



# **Caracterização das propriedades mecânicas do Nylon 12CF utilizado no processo MEX**

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

Pedro Emanuel Mateus Figueira Garcia

Leiria, setembro de 2023



# **Caracterização das propriedades mecânicas do Nylon 12CF utilizado no processo MEX**

Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta

Pedro Emanuel Mateus Figueira Garcia

Projeto realizado sob a orientação do Professor Doutor Rui Miguel Barreiros Rúben,  
coorientação do Professor Doutor Armando Lopes Ramalho e do Professor Doutor Joel  
Oliveira Correia Vasco.

Leiria, setembro de 2023

# **Originalidade e Direitos de Autor**

O presente projeto é original, elaborado unicamente para este fim, tendo sido devidamente citados todos os autores cujos estudos e publicações contribuíram para a elaborar.

Reproduções parciais deste documento serão autorizadas na condição de que seja mencionado o Autor e feita referência ao ciclo de estudos no âmbito do qual o mesmo foi realizado, a saber, Curso de Mestrado em Engenharia para Fabricação Digital Direta, no ano letivo 2022/2023, da Escola Superior de Tecnologia e Gestão do Instituto Politécnico de Leiria, Portugal, e, bem assim, à data das provas públicas que visaram a avaliação destes trabalhos.

*“Não há melhor fragata que um livro  
para nos levar a terras distantes!  
Cada ser humano é um livro que Deus  
escreve a nossa história.”*

*Mãe, Laurinda Figueira*

# Agradecimentos

Ao Professor Doutor Rui Rúben, meu orientador científico, Professor Doutor Armando Ramalho e Professor Doutor Joel Vasco, meus coorientadores científicos, pela partilha de conhecimentos valiosos, pela disponibilidade e dedicação colocada na realização deste projeto.

Ao Instituto Politécnico de Leiria, em particular, à Escola Superior de Tecnologia e Gestão pela disponibilidade de utilização dos espaços laboratoriais/equipamentos e na aquisição de materiais necessários a concretização do trabalho proposto.

À Engenheira Fernanda Carvalho e ao Engenheiro Jorge Domingues, técnicos de laboratório do Departamento de Engenharia Mecânica do Politécnico de Leiria, pela ajuda preciosa e motivação ao longo dos anos que trabalhámos em conjunto.

Ao Professor Doutor Amílcar Lopes Ramalho, Professor Catedrático na Universidade de Coimbra, pela ajuda prestada com os ensaios mecânicos de tração.

À empresa CODI - Leiria, nomeadamente, ao Engenheiro Moisés Domingues por ter disponibilizado os serviços da empresa ao conhecimento e ao Engenheiro Carlos Matos pela ajuda preciosa e disponibilidade prestada na produção dos provetes feitos através de fabrico aditivo.

À empresa Micronsense – Leiria, por disponibilizar o seu equipamento de Micro-CT para a análise da porosidade dos provetes fabricados, e um especial agradecimento ao Técnico Pedro Fonseca, responsável pelo equipamento.

A todos os Professores do Departamento de Engenharia Mecânica do Instituto Politécnico de Leiria que invariavelmente sempre contribuíram, direta ou indiretamente, para a realização deste projeto e ainda na evolução como ser Humano e Engenheiro ao longo do meu percurso académico.

Um enorme agradecimento aos meus Pais e Irmão, e Amigos em geral, pela compreensão e por garantirem a minha constante motivação no projeto, assim como, do apoio aos meus objetivos, nas mais variadas formas ao longo da minha existência.

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Resumo

Pretende-se com este trabalho determinar as propriedades mecânicas de um material polimérico que contém 35% de fibras curtas de carbono, em peso. O material compósito Nylon 12 CF, comercializado pela Stratasys, é utilizado na tecnologia MEX (*Material Extrusion*), uma categoria dos processos de Fabrico Aditivo (FA). Este material de base polimérica, pela sua própria constituição já se apresenta como um material anisotrópico. O próprio processo de construção/deposição do filamento é ele também gerador de uma anisotropia nas peças produzidas. Pretende-se, através da técnica de excitação por impulso e ensaios mecânicos de tração e flexão em 3 pontos, a determinação das suas propriedades mecânicas.

Para que se possam dimensionar corretamente peças produzidas por MEX, é necessário conhecer as propriedades ortotrópicas (nas 3 direções do referencial cartesiano) de forma a usar esses dados em métodos de simulação computacional.

Foi ainda utilizada a Microtomografia Computorizada (Micro-CT) para obter diversas imagens 2D (raios-X) da peça e a utilização do método Otsu para a quantificação da porosidade.

Os resultados obtidos pelas técnicas para caracterização de propriedades mecânicas, obtiveram significativa semelhança entre elas e com a literatura disponível. Os valores de porosidade obtidos encontram-se bastante distintos dos encontrados na literatura, podendo-se apontar como causa, a afetação da resolução do processo de Micro-CT pela digitalização de três provetes em simultâneo, o que obrigou a um afastamento do emissor de raios-X.

O entendimento do comportamento mecânico de uma peça construída por MEX e por este tipo de material, permite que indústrias como a dos transportes, de máquinas e equipamentos industriais, indústria automóvel e quiçá, a indústria aeronáutica e aeroespacial à sua utilização em serviço.

**Palavras-chave:** Material compósito, *Material Extrusion*, Fabrico aditivo, Técnica de Excitação por Impulso, Micro-CT, Método Otsu.

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Abstract

*The aim of this work is to determine the mechanical properties of a polymeric material that contains 35% short carbon fibers by weight. The Nylon 12 CF composite material, commercialized by Stratasys, is used in the MEX (Material Extrusion) technology, a category of Additive Manufacturing (AF) processes. This polymer-based material, due to its very constitution, already presents itself as an anisotropic material. The filament construction/deposition process itself also generates anisotropy in the parts produced. The aim is, through the impulse conduction technique and mechanical tensile and flexion tests at 3 points, to determine mechanical properties.*

*In order to correctly size parts produced by MEX, it is necessary to know the orthotropic properties (in the 3 directions of the Cartesian reference) in order to use this data in computer simulation methods.*

*Microcomputer tomography (Micro-CT) was also used to obtain several 2D images (X-rays) of the part and the Otsu method was used to quantify porosity.*

*The results obtained by the techniques for characterizing mechanical properties were significantly similar between them and with the available literature. The porosity values obtained are quite different from those found in the literature, and the cause can be pointed out as the effect on the resolution of the Micro-CT process due to the scanning of three specimens simultaneously, which forced the X-ray emitter to be moved away.*

*Understanding the mechanical behaviour of a part built by MEX and this type of material allows industries such as transport, industrial machinery and equipment, the automotive industry and perhaps the aeronautical and aerospace industry to use it in service.*

**Keywords:** *Composite material, Material Extrusion, Additive manufacturing, Impulse Excitation Technique, Micro-CT, Otsu method.*

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Índice

<b>Originalidade e Direitos de Autor .....</b>	<b>iii</b>
<b>Agradecimentos .....</b>	<b>v</b>
<b>Resumo .....</b>	<b>vii</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>ix</b>
<b>Lista de Figuras .....</b>	<b>xiii</b>
<b>Lista de Tabelas .....</b>	<b>xvii</b>
<b>Lista de Símbolos .....</b>	<b>xix</b>
<b>Lista de Siglas .....</b>	<b>xxi</b>
<b>1. Introdução .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Estrutura do Trabalho .....</b>	<b>3</b>
<b>2. Fundamentação Teórica / Estado da Arte.....</b>	<b>5</b>
<b>2.1. Fabrico Aditivo .....</b>	<b>5</b>
2.1.1. Enquadramento Histórico .....	5
2.1.2. Filosofia do Fabrico Aditivo .....	5
2.1.3. Vantagens e Desvantagens do Fabrico Aditivo .....	6
2.1.4. Setores da Indústria .....	8
2.1.5. Classificação dos Processos de Fabrico Aditivo .....	9
2.1.6. Processo de Extrusão de Material – MEX.....	9
Funcionamento .....	9
Etapas do Processo MEX .....	11
Parâmetros do Processo MEX que Influenciam as Propriedades Mecânicas	11
Tipos de Cinemática de Máquina .....	12
Processos MEX para Materiais com Fibra de Carbono.....	13
Fibras de Carbono Contínuas .....	13
Fibras de Carbono Curtas .....	14
<b>3. Metodologia.....</b>	<b>15</b>
<b>3.1. Nylon 12CF – Stratasys.....</b>	<b>15</b>
<b>3.2. Técnicas Utilizadas para a Caracterização Mecânica.....</b>	<b>16</b>
3.2.1. Ensaio de Tração .....	16
3.2.2. Extensometria Elétrica.....	18
3.2.3. Ensaio de Flexão em Três Pontos.....	22
3.2.4. Técnica de excitação por Impulso .....	23
3.2.5. Análise de Microtomografia Computorizada ( <i>Micro-CT</i> ).....	28

3.2.6.	Método Otsu .....	30
<b>3.3.</b>	<b>Provetes .....</b>	<b>34</b>
3.3.1.	Parâmetros de máquina na construção dos provetes .....	37
<b>4.</b>	<b>Ensaio experimentalis.....</b>	<b>39</b>
4.1.	Ensaio de Tração .....	39
4.2.	Ensaio de Flexão em Três Pontos.....	43
4.3.	Técnica de Excitação por Impulso .....	45
4.4.	Análise de Micro-CT .....	52
<b>5.</b>	<b>Discussão .....</b>	<b>55</b>
<b>6.</b>	<b>Conclusões.....</b>	<b>59</b>
6.1.	Trabalhos Futuros: .....	60
	<b>Referências .....</b>	<b>61</b>
	<b>Anexos .....</b>	<b>69</b>
	<b>Anexo I – Ficha Técnica da Stratasys do Nylon 12CF .....</b>	<b>69</b>
	<b>Anexo II – Dimensões Provetes da Técnica de Excitação por Impulso.....</b>	<b>71</b>
	<b>Anexo III – Desenho Técnico dos Suportes da Técnica de Excitação por Impulso ....</b>	<b>72</b>
	<b>Anexo IV – Frequência de vibração e espectro de frequências dos provetes testados pela técnica de excitação por impulso .....</b>	<b>74</b>
	<b>Anexo V – Imagens da Microtomografia Computorizada dos Provetes.....</b>	<b>82</b>

# Lista de Figuras

Figura 2.1 - Esquema de deposição das camadas no processo MEX [25].	10
Figura 2.2 - Tipos de Cinemáticas de máquinas MEX [33].	13
Figura 2.3-Peça impressa em <i>Onyx</i> <sup>TM</sup> e reforçada com camadas de <i>kevlar</i> no contorno [36].	14
Figura 3.1 – Imagem obtida por SEM da presença de fibras curtas de carbono na matriz termoplástica do material <i>Nylon 12CF</i> [37].	15
Figura 3.2 – Vários tipos de curvas de tensão-deformação em ensaio de tração [39].	16
Figura 3.3 - Extensómetros de resistência elétrica, a) de fio e b) de lâmina [48].	19
Figura 3.4 - Ponte de Wheatstone utilizada com extensómetro elétrico na posição A [48].	19
Figura 3.5 - Extensómetro do tipo roseta 60° [51].	21
Figura 3.6 - Extensómetro do tipo T [52].	21
Figura 3.7 - Condições de fronteira impostas ao corpo de prova para a excitação do modo de vibração fundamental (a) flexional, (b) torcional e (c) longitudinal [54].	24
Figura 3.8 – Representação genérica de uma estrutura, detalhando como devem ser obtidos os provetes nas três principais direções para materiais não isotrópicos [53].	25
Figura 3.9 - Tipos de Configuração de emissão de raios X na microtomografia computadorizada [59].	29
Figura 3.10 – Imagem em escala de cinza de 6 níveis e o seu histograma à esquerda [64].	32
Figura 3.11 - Geometria dos provetes, A) tração e B) flexão.	34
Figura 3.12 - Dimensão em milímetros da placa para maquinação dos 5 provetes de tração.	34
Figura 3.13 - Representação da transição de sentido da deposição do filamento no processo de MEX.	35
Figura 3.14 – Provetes para técnica de excitação por impulso (base de construção no plano x-y).	36
Figura 3.15 - Stratasys F900, equipamento utilizado na construção dos provetes [37].	37
Figura 3.16 - Demonstração, pelo <i>software</i> GrabCAD Print, da colocação automática do material de suporte.	38
Figura 4.1 - Dados técnicos dos extensómetros utilizados.	40
Figura 4.2 - Pinça extensométrica e extensómetro colado no provete a ensaiar.	40
Figura 4.3 - <i>Apparatus</i> utilizado no ensaio de tração.	41
Figura 4.4 - Gráfico tensão-deformação no ensaio de tração ao <i>Nylon 12CF</i> .	42
Figura 4.5 - Gráfico da deformação longitudinal e transversal do provete de tração 1.	42
Figura 4.6 - Gráfico tensão-deformação do ensaio de flexão em três pontos do <i>Nylon 12CF</i> .	44

Figura 4.7 - Localização das 20 zonas a medir como micrómetro para cada provete. a) 6 medições na largura do provete, b) 6 medições no comprimento e c) 8 medições da espessura do corpo de prova [66].	45
Figura 4.8 - Provete A e B marcados com as linhas nodais para o modo de vibração flexional e torcional.	46
Figura 4.9 – Esquerda: provete em posição para ensaio em modo de vibração torcional. Direita: provete em posição para ensaio em modo de vibração flexional.	47
Figura 4.10 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete A.	48
Figura 4.11 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete A.	48
Figura 4.12 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete A.	49
Figura 4.13 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete A.	49
Figura 4.14 - Provetes posicionados e separados por espuma de baixa densidade dentro do equipamento de Micro-CT.	52
Figura 4.15 – Resultado da reconstrução 3D do provete A no visualizador <i>myVGL</i> .	53
Figura 4.16 - À esquerda: histograma da aplicação do método Otsu à análise dos provetes A,B e C. À direita: histograma da aplicação do método Otsu à análise dos provetes D,E e F.	54
Figura A.1 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete A.	74
Figura A.2 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete A.	74
Figura A.3 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete A.	75
Figura A.4 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete A.	75
Figura A.5 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete B.	76
Figura A.6 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete B.	76
Figura A.7 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete B.	77
Figura A.8 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete B.	77
Figura A.9 – Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete D.	78
Figura A.10 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete D.	78
Figura A.11 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete D.	79
Figura A.12 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete D.	79
Figura A.13 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete F.	80
Figura A.14 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete F.	80
Figura A.15 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete F.	81
Figura A.16 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete F.	81
Figura A.17 - Resultado da reconstrução 3D do provete A no visualizador <i>myVGL</i> .	82
Figura A.18 - Resultado da reconstrução 3D do provete B no visualizador <i>myVGL</i> .	82

Figura A.19 - Resultado da reconstrução 3D do provete C no visualizador <i>myVGL</i> .....	83
Figura A.20 - Resultado da reconstrução 3D do provete D no visualizador <i>myVGL</i> .....	83
Figura A.21 - Resultado da reconstrução 3D do provete E no visualizador <i>myVGL</i> .....	84
Figura A.22 - Resultado da reconstrução 3D do provete F no visualizador <i>myVGL</i> .....	84

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Lista de Tabelas

Tabela 2.1 - Principais setores da indústria e as suas aplicações do fabrico aditivo.....	8
Tabela 2.2 – Classificação dos processos de fabrico aditivo segundo a norma ISO/ASTM 52900:2021 [22]. .	9
Tabela 3.1 – Módulo de elasticidade caracterizado pela técnica de excitação por impulso de acordo com a orientação presente no corpo de prova e o modo de vibração aplicado.....	25
Tabela 3.2 – Resultados da exemplificação do método Otsu [64].....	33
Tabela 3.3 - Parâmetros de máquina na construção dos provetes.....	37
Tabela 4.1 - Valor médio da largura e espessura de cada provete de tração.....	39
Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de tração do Nylon 12CF .....	43
Tabela 4.3 - Valor médio da largura e espessura de cada provete de flexão. ....	43
Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de flexão em três pontos do Nylon 12CF .....	44
Tabela 4.5 – Medidas geométricas do Provete A, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão. ....	45
Tabela 4.6 - Valores de massa de cada um dos provetes usados na técnica de excitação por impulso. ....	46
Tabela 4.7 - Propriedades mecânicas obtidas pela Técnica de Excitação por Impulso no provete A.....	50
Tabela 4.8 - Propriedades mecânicas obtidas pela Técnica de Excitação por Impulso no provete B. ....	50
Tabela 4.9 - Propriedades mecânicas obtidas pela Técnica de Excitação por Impulso no provete D.....	50
Tabela 4.10 - Propriedades mecânicas obtidas pela Técnica de Excitação por Impulso no provete F. ....	51
Tabela 4.11 – Valor percentual da porosidade de cada provete analisado.....	54
Tabela 5.1 - Comparação de Valores obtidos pelas técnicas de caracterização.....	56
Tabela 5.2 - Tabela resumo das propriedades mecânicas obtidas pelas técnicas utilizadas no provete D.....	57
Tabela A.1 - Medidas geométricas do Provete A, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão. ....	71
Tabela A.2 - Medidas geométricas do Provete B, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão. ....	71
Tabela A.3 - Medidas geométricas do Provete D, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão. ....	71
Tabela A.4 - Medidas geométricas do Provete E, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão. ....	71

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# Lista de Símbolos

$A$	Fator de correção empírico que depende da razão da largura pela espessura do provete na técnica de excitação por impulso
$A$	Área da secção transversal do condutor
$A_0$	Seção transversal do provete
$b$	Largura do provete
$B$	Termo dependente da geometria do provete para técnica de excitação por impulso
$C_1$	<i>Image background</i>
$C_2$	<i>Image foreground</i>
$E$	Módulo de Young ou módulo de elasticidade
$F$	Força
$f_f$	Frequência de ressonância do primeiro modo de flexão
$f_l$	frequência de ressonância longitudinal do primeiro modo
$f_t$	Frequência de ressonância do primeiro modo de torção
$G$	Módulo de elasticidade transversal
$h$	Espessura do provete
$i$	Nível de cinza da imagem
$K$	Fator de correção que depende do coeficiente de Poisson, dimensões e a velocidade do som no corpo de prova na técnica de excitação por impulso
$K$	Fator do Extensómetro
$K_i$	Fator de correção do extensómetro para campo de tensões bidimensional
$l$	Comprimento do condutor elétrico, distância entre apoios
$L$	Comprimento
$L$	Número total dos níveis de intensidade de cinza
$l_0$	Distância inicial entre amaras
$m$	Massa do provete
$n$	Número do modo de ressonância
$n_i$	Quantidade de pixels da imagem que possuem a intensidade de cinza $i$
$N$	Número total de pixels na imagem a analisar
$R$	Resistência de um condutor elétrico
$S$	Flecha
$t$	Espessura
$T$	<i>Threshold</i>
$T_1$	Fator de correção no modo de vibração flexional
$V$	Volume
$\Delta l$	Alongamento do corpo de prova

$\Delta R$	Variação da resistência elétrica
$\varepsilon$	Deformação
$\varepsilon_f$	Deformação à flexão
$\varepsilon_{longitudinal}$	Deformação longitudinal
$\varepsilon_{transversal}$	Deformação Transversal
$\lambda$	Comprimento de onda
$\mu_1$	Média da Classe $C_1$
$\mu_2$	Média da Classe $C_2$
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\rho$	Resistividade elétrica, massa específica
$\sigma$	Tensão
$\sigma_1^2$	Variância da classe $C_1$
$\sigma_2^2$	Variância da classe $C_2$
$\sigma_{adm}$	Tensão admissível
$\sigma_B^2$	Variância interclasse
$\sigma_c$	Tensão de cedência
$\sigma_f$	Tensão de flexão
$\sigma_r$	Tensão de rotura
$\sigma_R$	Tensão de resistência à tração
$\sigma_w^2$	Variância intraclasse
$\omega_1$	Probabilidade da classe $C_1$
$\omega_2$	Probabilidade da classe $C_2$

# Lista de Siglas

AM	<i>Additive Manufacturing</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BJT	<i>Binder Jetting</i>
CAD	<i>Computer-Aided Design</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacturing</i>
CF	<i>Carbon Fiber</i>
CFF	<i>Continuous Fiber Fabrication</i>
CNC	<i>Computerized Numerical Control</i>
CU	<i>Célula Unitária</i>
DED	<i>Directed Energy Deposition</i>
END	<i>Ensaio Não Destrutivo</i>
FA	<i>Fabrico Aditivo</i>
FDM	<i>Fused Deposition Modeling</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MEX	<i>Material Extrusion</i>
Micro-CT	<i>Microcomputed Tomography</i>
MJT	<i>Material Jetting</i>
PA	<i>Poliamida</i>
PBF	<i>Powder Bed Fusion</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscope</i>
SHL	<i>Sheet Lamination</i>
SLA	<i>Stereolithography</i>
SLS	<i>Selective Laser Sintering</i>
STL	<i>Standard Triangle Language</i>
VPP	<i>Vat Photopolymerization</i>

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

# 1. Introdução

O *Additive Manufacturing* (AM) tem tido uma evolução significativa, tanto no uso doméstico como industrial. Poder-se-á definir como um processo que permite, com base num modelo 3D digital (obtido por CAD ou engenharia inversa), a construção de objetos físicos de geometria complexa através da deposição de material/materiais em camadas. Atualmente, o Fabrico Aditivo (FA) é capaz de construir peças de engenharia (com solicitações aplicadas), implantes médicos e até órgãos artificiais [1]. Contudo, no seu aparecimento, era apenas um processo de fabricação dedicado à construção de protótipos, sendo a primeira tecnologia a estereolitografia (SLA), desenvolvida desde 1980 [2]. Esta tecnologia consiste na fotopolimerização de uma resina líquida que solidifica por ação de um feixe laser ultravioleta. Devido à evolução de novas tecnologias, surgiu um novo leque de possibilidades de formas de processamento e de materiais. Presentemente, existem 7 categorias de processo de fabrico e a utilização de materiais de diversas classes de materiais, como por exemplo, os polímeros, metais, compósitos, cerâmicos e até células vivas (*bioprinting*) [3].

O fabrico aditivo, a nível industrial, tem sido fortemente impulsionada pelo setor da aeronáutica e aeroespacial, setores pioneiros no que diz respeito à adoção e aplicação deste tipo de fabrico. As tecnologias de fabrico aditivo oferecem-lhes capacidades únicas na forma de concretizar os seus componentes. De uma forma resumida, a capacidade de construir peças ocas ou parcialmente ocas e ainda a materialização física de uma geometria obtida por otimização topológica são os grandes pontos de atração para estes setores industriais.

Uma desvantagem que se pode associar a peças construídas por fabrico aditivo, é a sua anisotropia, que poderá ser encontrada à escala micrométrica (e. g., fibras de carbono curtas dispersas no filamento termoplástico) e ainda à escala macrométrica (no que concerne à forma de construção). Esta desvantagem perde significado quando existe um estudo e entendimento das propriedades do material da peça, para as diferentes orientações no referencial cartesiano.

Neste trabalho, será feito um estudo das propriedades mecânicas de um polímero carregado com fibras curtas de fibra de carbono, material proprietário da Stratasys com a designação de Nylon 12CF. Este material é disposto na forma de filamento e é utilizado apenas nos modelos de máquina Fortus 900 e 450mc da Stratasys, equipamentos do processo MEX (*Material Extrusion*). Serão utilizadas diversas técnicas para caracterizar as propriedades mecânicas do material. Será utilizada a técnica de excitação por impulso, aplicada a materiais anisotrópicos, para a determinação do módulo de Young, o módulo de elasticidade transversal e coeficiente de Poisson, nas três orientações do referencial cartesiano. Por fim, serão utilizados os ensaios quase-estáticos de tração e flexão em 3 pontos, para a determinação do módulo de Young, módulo de elasticidade à flexão, tensões de engenharia e ainda o coeficiente de Poisson num plano de direção. Será feita uma comparação/análise dos vários valores obtidos de propriedades mecânicas pelas diversas técnicas empregues.

Proceder-se-á à análise de microtomografia computadorizada (Micro-CT) para determinar, para cada uma das direções de deposição e de construção dos provetes, a sua porosidade.

O objetivo deste trabalho é a obtenção das propriedades mecânicas do material em estudo, obter-se dados de 1 direção que a ficha técnica do material não dá a conhecer e ainda fazer comparação de valores obtidos por diferentes técnicas, entre ambas e com os dados fornecidos pelo fabricante. Para que se possa dimensionar corretamente peças produzidas por MEX, é necessário conhecer as propriedades ortotrópicas (nas 3 direções do referencial cartesiano) de forma a usar esses dados em métodos de simulação computacional.

A utilização de algum processo de fabrico aditivo, por si só, já apresenta diversas vantagens (a abordar no capítulo seguinte), e, aliado a uma construção com base em materiais compósitos, as peças obtidas podem ter aplicações para elevado desempenho. A combinação a uma matriz termoplástica de fibras curtas de carbono, aumenta a resistência mecânica global da peça (o incremento maior é sentido quando a carga é paralela à orientação principal das fibras).

O entendimento do comportamento mecânico de uma peça construída por MEX e por este tipo de material, permite que indústrias como a dos transportes, de máquinas e equipamentos industriais, indústria automóvel e quiçá, a indústria aeronáutica e aeroespacial à sua utilização em serviço. As possíveis limitações poderão ser a temperatura de serviço (devido à matriz polimérica) e a existência de porosidade, que inviabilizará a sua utilização em peças onde a estanquicidade seja requisito e onde se podem iniciar/propagar fissuras.

## **1.1.Estrutura do Trabalho**

Após este capítulo introdutório, será analisado no Capítulo 2 o estado da arte/fundamentação teórica sobre o fabrico aditivo. Desde a sua globalidade, a filosofia de funcionamento deste tipo de materialização de componentes, até ao processo MEX na utilização de materiais compósitos em matriz termoplástica.

No Capítulo 3, serão apresentadas todas as técnicas de caracterização das propriedades mecânicas utilizadas nesta obra, assim como, de técnicas complementares para a obtenção de dados necessários às técnicas.

No Capítulo 4 será o espaço dedicado à apresentação dos resultados obtidos nas técnicas de caracterização mecânica dos provetes em Nylon 12CF.

Haverá espaço ao comentário dos resultados no Capítulo 5, onde serão comparados os valores das propriedades mecânicas obtidas em cada técnica.

Por fim, no Capítulo 6, será o espaço para apresentação de conclusões sobre o trabalho realizado, em particular à capacidade, fiabilidade e dificuldade de cada uma das técnicas empregues para a determinação das propriedades mecânicas.

*Esta página foi deixada intencionalmente em branco*

## 2. Fundamentação Teórica / Estado da Arte

### 2.1. Fabrico Aditivo

#### 2.1.1. Enquadramento Histórico

A prototipagem rápida, hoje conhecida também como fabrico aditivo ou impressão 3D, foi desenvolvida desde 1980 pelo Dr. Kodama, tendo sido o primeiro a abordar a construção com base na filosofia de camada por camada. Cerca de quatro anos depois, uma equipa de engenheiros franceses começou o desenvolvimento da tecnologia ainda hoje utilizada denominada de Estereolitografia (SLA), embora tenham abandonado a ideia por falta de perspectivas económicas. A sua patente foi pedida por Charls Hull que acabou por formar a 3D Systems Corporation, lançado a sua primeira máquina um ano depois [2].

Após este início lento, começaram a surgir outras abordagens e métodos de impressão, possibilitando também o uso de novos tipos de materiais, sendo proposta a patente da Sinterização Seletiva a Laser (SLS) no ano de 1988 por Carl Deckard e em 1992 Scott Crump, fundador da Stratasys, patenteou a tecnologia de Modelação por Fusão e Deposição (FDM), sendo a mais divulgada e conhecida atualmente [2].

Em 2012, acentuou-se a entrada da tecnologia de impressão 3D no mercado do consumidor doméstico, devendo-se ao facto da patente da tecnologia FDM ter expirado, aumentou-se assim a divulgação e cobertura por parte dos média do fabrico aditivo, sendo por isso vista comumente como uma forma, errada, de tecnologias recente. A indústria de fabricantes de equipamentos deste tipo de tecnologias vive atualmente uma transformação, resultado do aumento da concorrência e de novos intervenientes, obrigando os operadores históricos, Stratasys, 3D Systems e a EOS, que representam 70% da quota do mercado total, a reorganizarem-se [1].

#### 2.1.2. Filosofia do Fabrico Aditivo

O fabrico aditivo é um processo que permite, com base num modelo 3D digital, obtido por CAD ou engenharia inversa, construir objetos físicos através da deposição/formação de material/materiais em camadas. Esta tecnologia permite a criação de protótipos, peças simples ou até produtos finais altamente sofisticados, como peças de engenharia, implantes médicos e até órgãos artificiais, peças dessas que por outros meios de fabricação

convencional não seriam possíveis de obter [1]. Nestes processos, podem ser utilizados uma variedade de materiais com grandes diferenças nas propriedades mecânicas, características, acabamento superficial, resistência, aparência visual, exatidão e precisão, vida útil, propriedades térmicas e muito mais e dessa forma condicionar os resultados [1].

Por ser um processo com a capacidade de aplicar a quantidade de material certa no local certo à solicitação (geometria resultante da otimização topológica), e pelo facto de gerar muito baixo desperdício, os processos de fabrico aditivo são vistos como tecnologias com elevado grau de sustentabilidade.

### **2.1.3. Vantagens e Desvantagens do Fabrico Aditivo**

Independentemente dos diversos processos de fabrico aditivo, poder-se-á estipular um conjunto de vantagens partilhadas pela grande maioria de tecnologias [1]:

- Conjuntos auto-montados: É possível através de um desenho 3D (obtido por CAD ou engenharia inversa) de um conjunto, numa única operação de fabricação, construir peças constituídas por diversas partes, montagens inteiras. Evitando assim, a futura necessidade, por mão de obra ou máquina, de montagem do componente, reduzindo os custos de montagem associados ao projeto, fabrico e montagem propriamente dita.
- Baixo custo de variedade e quantidade: Qualquer objeto é virtualmente passível de ser obtido por fabrico aditivo. Os custos associados ao projeto são constantes, independentemente se a quantidade for 1 peça ou 100 peças.
- Redução do *time-to-market* e tempo de entrega: Poder-se-á obter, num período relativamente curto, quando comparado a processos convencionais, o resultado do projeto. Desta forma, é mais rápido e fácil a perceção física do modelo, permitindo assim uma validação do componente, ou se necessário, proceder a alterações de uma forma mais consciente.
- Peças de geometria complexa: Devido à construção em sucessivas camadas, a geometria complexa 3D, é repartida em diversas camadas 2D de geometria simples. Esta filosofia de processo permite criar peças com saída negativa e peças ocas ou parcialmente ocas. Essa parcialidade é definida pelo projetista, onde pode escolher diversas percentagens de enchimento interno, assim como, da geometria. Essa escolha de padrão e percentagem é um ponto atualmente bastante estudado, permite criar peças de maior leveza e obter resistência mecânica díspar em locais diferentes da peça.

Claro que em todos os processos de fabrico, as vantagens seguirão acompanhadas de desvantagens ou inconvenientes [1]:

- Limitação de tamanho: o tamanho possível depende, essencialmente, da área/volume da cama/câmara de construção, respetivamente, do equipamento.
- Qualidade superficial: A qualidade superficial depende do tipo de processo de fabrico aditivo e da altura de camada. Em peças cuja exigência da qualidade superficial é requerida, usam-se processos convencionais para a obter. Porém, em alguns casos, como no fabrico de implantes, a rugosidade superficial pode ser vantajosa na aderência de tecidos vivos, denominada de osteointegração [4].
- Rigor dimensional: O rigor dimensional das peças fabricadas apresenta algumas variações dependendo da orientação em relação à qual foi a sua direção de construção. É notória esta particularidade quando existem superfícies cilíndricas, pelo efeito de escada.
- Preço da tecnologia: Dependendo da tecnologia em causa, os preços podem variar de algumas poucas centenas de euros a equipamentos de milhões de euros. Tipicamente, tecnologias mais caras permitem peças com melhores propriedades mecânicas, devido aos materiais que processam e maior volume de construção, são máquinas projetadas para fins industriais. Associados ao equipamento estão inevitavelmente associados outros custos, tais como, manutenção, operação e de formação do operador. A situação de operador, nestes casos, adquire certa importância ao processo. Tipicamente, no processo subtrativo CNC, existe alguém que projeta a peça a maquina (CAD), seguido de um outro que planeia as estratégias de maquinação (CAM) e um operador em chão de fábrica que executa a peça no centro de maquinação. Nos processos de fabrico aditivo, tem-se notado que os operadores destes equipamentos, normalmente, são capazes e entendedores de todo o processo. São capazes da criação da geometria pretendida em CAD, a sua disposição e escolha de outros parâmetros no *software* do equipamento e até executores do pós-processamento, quando aplicável. Logo, a formação de pessoal qualificado na área de fabrico aditivo é representativa de alguma multidisciplinaridade.

#### 2.1.4. Setores da Indústria

Com o desenvolvimento das tecnologias de fabrico aditivo e o advento de materiais cada vez mais capazes para aplicações industriais/engenharia, garantiu uma reconhecida vantagem por diversos setores industriais sobre o fabrico aditivo. Os setores industriais da aeronáutica, aeroespacial e automóvel representam o maior segmento de utilizadores do mercado do fabrico aditivo, porém, espera-se que o setor da saúde possa crescer muito rapidamente num futuro próximo [1].

Na Tabela 2.1 apresenta-se as maiores áreas onde o fabrico aditivo tem utilização, assim como, de algumas aplicações principais.

Tabela 2.1 - Principais setores da indústria e as suas aplicações do fabrico aditivo.

Áreas	Aplicações
Indústria Aeronáutica e Aeroespacial	Conceção de modelos e Protótipos [1] Produção de Peças e Componentes de Motores [5] Equipamentos de Cabine [6] Veículos aéreos não tripulados [7]
Indústria Automóvel	Conceção de modelos e Protótipos [8] Produtos Personalizados [9] Ferramentas de Apoio à produção [10] [11] Produção de Peças Finais [12] [13] [14]
Máquinas e Equipamentos Industriais	Conceção de modelos e Protótipos [1] Manipulação robótica [1]
Produtos de Consumo	Conceção de modelos e Protótipos[1] Mercado Doméstico[1] Joias e Relógios [15] Moda, calçado e vestuário [16] [17] Indústria Alimentar [18]
Indústria Médica	Próteses e implantes por medida [19] Planeamento cirúrgico [20]
Arquitetura	Conceção de modelos, Protótipos e maquetes [1]

### 2.1.5. Classificação dos Processos de Fabrico Aditivo

Existem diferentes categorias dos processos de fabrico aditivo, distinguidas pela sua filosofia de funcionamento. Com o avanço de diferentes técnicas, foi necessário, a determinada altura, a criação de uma norma que os organizasse para que houvesse harmonia no setor industrial e académico. Na Tabela 2.2, apresentam-se as 7 famílias de fabrico aditivo inicialmente criadas, descritas na norma ISO/ASTM:52900:2015, definida em conjunto pelo comité F42 da *American Society for Testing and Materials* (ASTM) e pelo comité técnico ISO/TC 26 da *International Standards Organization* (ISO). Esta classificação foi revista na mais recente norma ISO/ASTM 52900:2021 [21].

Tabela 2.2 – Classificação dos processos de fabrico aditivo segundo a norma ISO/ASTM 52900:2021 [22].

Categories de Processos de Fabrico	Descrição
1. Processos de Fotopolimerização em Câmara (VPP)	Resina fotossensível em cuba curada seletivamente por feixe de luz
2. Processos de Impressão de Material (MJT)	Material em forma de micro-gotas ( <i>droplets</i> ) impresso seletivamente sobre a plataforma de construção
3. Processos de Impressão de Aglomerante (BJT)	Agente de ligação em forma líquida que é depositado para unir os pós
4. Processos de Extrusão de Material (MEX)	Materiais que são seletivamente depositados através de <i>nozzle(s)</i> ou orifício(s)
5. Processos de Fusão em Camada de Pó (PBF)	Energia térmica que funde seletivamente pó por regiões da câmara de construção
6. Processos de Laminação em Folhas (SHL)	Folhas de material são unidas progressivamente
7. Processos de Deposição Direcionada de Energia (DED)	Fusão dos materiais através de energia térmica à medida que são depositados

### 2.1.6. Processo de Extrusão de Material – MEX

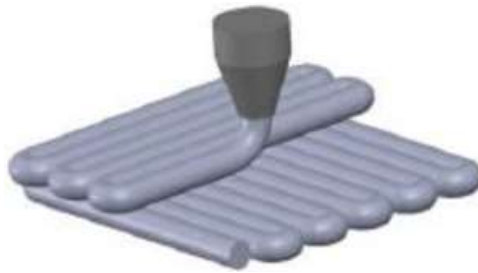
#### Funcionamento

O processo de MEX (*Material Extrusion*) conjuga o método de extrusão de materiais de base termoplástica com a deposição do fundido em camadas. O material de base pode ser encontrado em forma de filamento, alimentado por uma bobine ou de grânulos, através da sua colocação numa tremonha. Os materiais atualmente utilizados passam por uma enorme variedade de termoplásticos, termoplásticos reforçados com fibras e ainda com partículas metálicas ou cerâmicas. Neste caso particular, existem equipamentos comerciais em que as

peças são automaticamente escaladas para que durante o pós-processamento de sinterização, a cerca de 85% da temperatura de fusão do metal, o material aglutinante das partículas metálicas, seja consumido, restando a peça metálica consolidada.

Porém, podem-se referir outros materiais utilizados por este processo, nem sempre todos são materiais de engenharia, com por exemplo a impressão de materiais alimentares [23]. Um caso interessante e que se encontra em estudo é o fabrico de casas através de pórticos ou braços robôs onde está acoplada a cabeça extrusora dimensionada para a deposição de cimento, tecnologia essa baseada no processo de MEX [24].

Independentemente do material utilizado, a estratégia de deposição/construção é similar. O material passa pela cabeça extrusora, onde é parcialmente fundido, e de seguida através do bico extrusor, que irá garantir a dimensão do filamento extrudido à plataforma de construção. Durante o processo de deposição do material, a cabeça extrusora percorre uma trajetória para definir o contorno da camada (perímetro) e depois passará à impressão do enchimento do seu núcleo (*infill*). Assim que essa camada 2D do modelo esteja concluída, a cabeça de extrusão subirá a distância requerida, permitindo assim um novo ciclo de construção de uma nova camada. As sucessivas camadas formaram assim o produto com a geometria pretendida. Na Figura 2.1, é apresentado, de forma genérica, a construção (deposição) em camadas para o processo de MEX.



**Figura 2.1 - Esquema de deposição das camadas no processo MEX [25].**

No caso de equipamentos que utilizem o material de base em forma de filamento, a máquina contém rolos tratores responsáveis pela tração do filamento desde a bobina à cabeça extrusora e em simultâneo a força de compressão que irá proporcionar ao material parcialmente fundido a sua deposição, pela passagem pelo bico extrusor. Em equipamentos de MEX que utilizam parte da filosofia das máquinas de injeção em moldes, tipicamente há um fuso responsável pela dosagem e plastificação/fusão do material, o acionamento desse parafuso acontece por ação de um motor de passo responsável pela regulação do material extrudido à plataforma de construção.

Nesta tecnologia de fabrico aditivo, como em algumas outras, é por vezes necessário, dependendo da geometria da peça e/ou orientação desta na plataforma de construção, da utilização de estruturas de suportes. Existem duas estratégias de máquina para lidar com a situação, na primeira, utilizada maioritariamente em máquinas industriais, existe um bico extrusor reservado ao material de suporte, material esse diferente do qual está a ser construída a peça, que pode ser removido posteriormente através da sua colocação em líquido que o irá dissolver. No segundo caso, mais usado em equipamentos domésticos e/ou de baixo custo, há apenas um bico extrusor, logo, o material de suporte será igual ao da peça em fabrico. A diferença passa pela forma como é depositado o filamento de suporte, é depositado de uma forma mais distanciada e em menor quantidade, não tendo assim resistência mecânica além da suficiente para suportar as camadas que formarão a peça. No fim da etapa de fabrico, no pós-processamento, estes são retirados facilmente, são partidos/arrancados da peça.

### **Etapas do Processo MEX**

Podem-se referir a existência de 4 fases no processo de fabrico pela tecnologia MEX [26]:

- Criação de um modelo 3D do produto: Através de *Software* CAD modelar o produto a produzir-se, ou, através de engenharia inversa. Conversão num ficheiro compatível com o equipamento, sendo o mais comum o formato STL;
- Pré-processamento no *software* do equipamento MEX: Escolha da orientação das peças, definição de altura de camada, existência de suportes, geometria e percentagem do núcleo da peça, entre outras. Etapas que influenciarão na produção, qualidade e desempenho mecânico das peças, às quais se segue o processo de *slicing*, ou seja, a separação do volume 3D da peça em camadas 2D;
- Construção da peça: Construção da peça, em camadas, através da deposição do material parcialmente fundido através da extrusão por um bico, de diâmetro controlado e escolhido em função do material;
- Pós-processamento: Etapa do processo para minimizar efeitos estéticos provenientes do próprio processo, por ações químicas ou mecânicas, e a remoção, quando aplicável, do material de suporte [27] [28].

### **Parâmetros do Processo MEX que Influenciam as Propriedades Mecânicas**

A resistência mecânica de peças impressas por MEX varia com diversos parâmetros de processo, tais como:

- **Direção de deposição:** Os componentes fabricados por esta técnica aditiva geram peças de propriedades anisotrópicas. Quando a orientação do filamento extrudido, nas várias camadas, é paralelo ao esforço, a peça terá maior resistência mecânica, e menor, quando o esforço for aplicado perpendicularmente [25].
- **Densidade do preenchimento do núcleo:** A variação da percentagem de preenchimento originará diferenças de tempo de construção, massa do produto e por consequência o custo. Como exemplo, para o padrão retangular, uma peça com 50% de preenchimento comparada a uma de 25%, a primeira apresenta maior resistência em cerca de 25%. Já se for comparada uma percentagem de 50% a uma de 75%, o incremento de resistência é cerca de 10%. Logo, não há uma proporcionalidade direta [29].
- **Geometria de preenchimento do núcleo:** Existem diferentes tipos de geometria que se podem seleccionar, variando de linhas simples a formas geométricas complexas. Essa escolha irá influenciar a resistência, o peso e o tempo de construção [29][30].
- **Altura da Camada Depositada:** Tem uma forte relação com o acabamento superficial da peça obtida no processo, mas também existe uma relação de espessura de camada com a resistência do componente. Quanto mais baixa for a altura de camada, melhor será a compactação entre elas, que se traduzirá numa melhor resistência mecânica, assim como, de uma densidade superior. No extremo oposto, existe uma inversão das consequências anteriormente descritas [31].
- **Temperatura de Processamento:** Deve ser sempre tido em conta as recomendações do fabricante do material, no que diz respeito ao seu armazenamento e conservação, à utilização (taxas, velocidades, temperaturas, etc.) e ao seu fim de vida. A temperatura acima do recomendado leva a uma queda das propriedades mecânicas do material e degradação do aspeto visual. Em temperaturas inferiores às recomendadas, não haverá uma fusão (agregação) correta entre camadas [32].

### **Tipos de Cinemática de Máquina**

Atualmente existem máquinas de MEX de cinemáticas de funcionamento distintas, Figura 2.2, que podem ser classificadas em quatro tipos [33]:

- Impressora Cartesiana;
- Impressora Polares;
- Impressora Delta;

- Impressoras de Braço Robô.

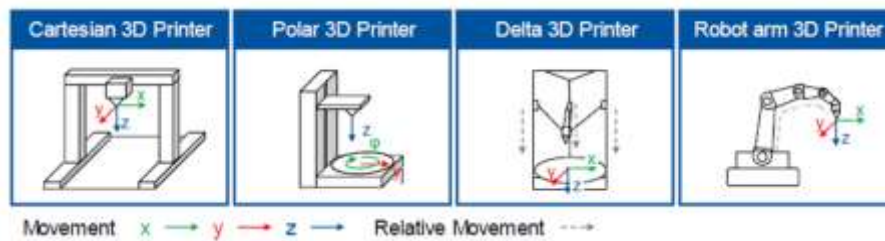


Figura 2.2 - Tipos de Cinemáticas de máquinas MEX [33].

### Processos MEX para Materiais com Fibra de Carbono

A capacidade da tecnologia de MEX, inicialmente, estava limitada aos materiais de base termoplástica. Como resultado, determinadas peças para certas aplicações não poderiam ser produzidas por esta técnica por falta de propriedades mecânicas adequadas. Detalhando o caso da utilização de materiais compósitos no processo de MEX, é possível, numa matriz polimérica, ter fibras curtas ou longas de fibra de carbono, de vidro e aramídica, assim como, de outros tipos de reforços orgânicos.

### Fibras de Carbono Contínuas

O primeiro fabricante que comercializou um equipamento de impressão de fibra de carbono contínua (fibras longas) por base na tecnologia de MEX foi a *Markforged*, em 2014 [34]. Nomeou esta nova variante de processo como CFF (*Continuous Fiber Fabrication*) [2]. Como exemplo, o equipamento *Markforged Mark Two* tem uma cabeça de impressão com dois extrusores, um para o filamento de fibra e para a matriz da peça (PA-6) [2]. O filamento de reforço usado pela *Markforged Mark Two* contém mil fibras individuais de fibra de carbono, embutidos numa matriz de poliamida (PA), em que a fração volúmica de fibra é de 35% [35].

Estas camadas de reforço são colocadas segundo orientações e outros aspetos definidos pelo utilizador. Na Figura 2.3, apresenta-se a camada com reforço de fibra aramídica no contorno de uma peça, uma manete de um motociclo.



Figura 2.3-Peça impressa em *Onyx*<sup>TM</sup> e reforçada com camadas de *kevlar* no contorno [36].

O *ex-libris* de peças fabricadas pela tecnologia MEX com fibras de carbono, consegue-se, através da utilização deste equipamento combinado com o material de matriz contendo ele também fibras, mas curtas, de carbono, material proprietário da Markforged denominado de *Onyx*.

#### **Fibras de Carbono Curtas**

A utilização de fibras de carbono curtas em matrizes termoplásticas é amplamente usado no processo de MEX, visto que, com a alteração do bico extrusor para um material rígido, um equipamento simples passa a ser capaz de processá-lo. Existe uma enorme variedade de tipos de polímeros que se podem utilizar, assim como, de várias frações volúmicas de fibra de carbono e diâmetro de fibras. O fabricante que apresenta maior dedicação a este tipo de material é a Stratasys, tendo o seu equipamento Fortus 900, de volume de construção de 914mm por 610mm de área e com uma altura de 914mm, uma capacidade dedicada à produção industrial. Usa o material denominado de Nylon 12CF, que contém 35% em peso de fibras de carbono curtas com um comprimento de 150  $\mu\text{m}$  e um diâmetro de 8  $\mu\text{m}$  [37][38].

## 3. Metodologia

### 3.1. Nylon 12CF – Stratasys

O material em estudo, o Nylon 12CF, propriedade da Stratasys, é um termoplástico carregado que contém 35% em peso de fibras de carbono curtas, com um comprimento de 150  $\mu\text{m}$  e diâmetro de 8  $\mu\text{m}$  [37][38]. Este material é fornecido em filamento, disposto para ser utilizado nos equipamentos da Stratasys nos seus modelos Fortus 450mc e F900, ambos equipamentos de fabrico aditivo da categoria de extrusão de material (MEX).

Na Figura 3.1, apresenta-se uma imagem obtida por SEM (*Scanning Electron Microscope*) da secção transversal do filamento, onde é possível constatar as fibras presentes na matriz termoplástica alinhadas, na sua maioria, com a direção de extrusão [37].

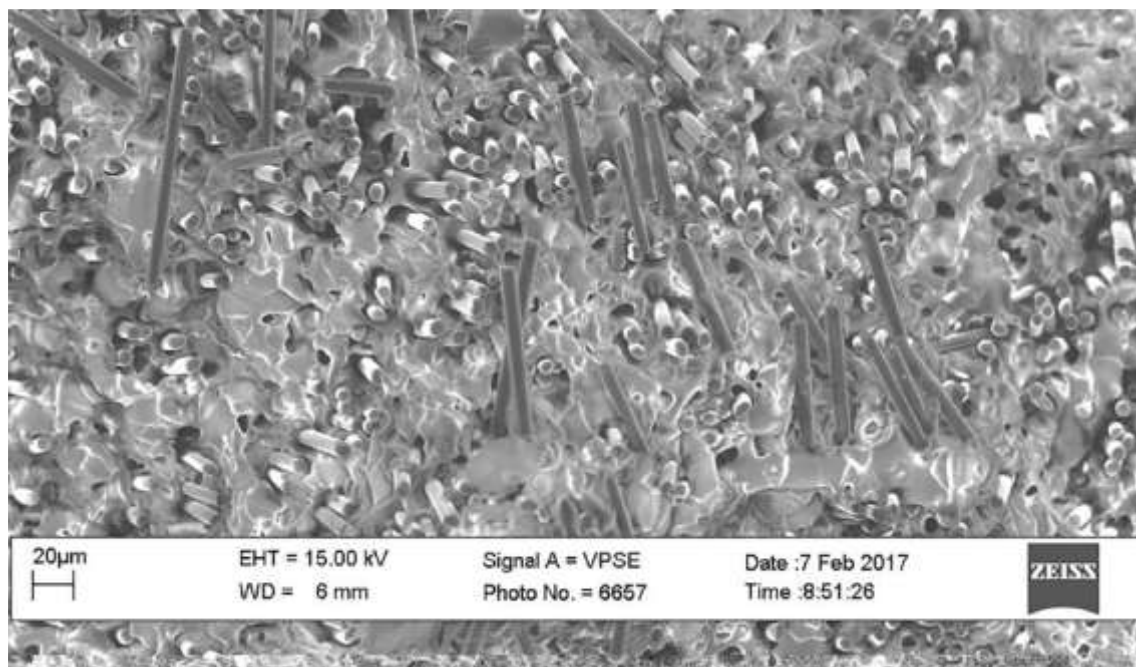


Figura 3.1 – Imagem obtida por SEM da presença de fibras curtas de carbono na matriz termoplástica do material *Nylon 12CF* [37].

No Anexo I, expõe-se a ficha técnica deste material onde constam diversas propriedades mecânicas obtidas pela Stratasys.

## 3.2. Técnicas Utilizadas para a Caracterização Mecânica

### 3.2.1. Ensaio de Tração

No ensaio de tração, a máquina de ensaios irá submeter o provete a um deslocamento através de uma das suas extremidades, que irá originar esforços axiais, até que este atinga a rutura. Esta fixação da amostra à máquina é feita recorrendo a amarras adequadas ao ensaio e ao provete. O deslocamento é feito a velocidade constante, numa taxa de mm/min. Os valores de força que serão obtidos através de uma célula de carga, resultam da resistência do material, das forças internas, que resistem à ação exterior do alongamento aplicado, tentando-o contrariar.

Os resultados obtidos no *software* da máquina serão dados através de valores de força vs alongamento, que serão transformados em valores de engenharia, tensão vs deformação, através das Equações 1 e 2:

$$\sigma \equiv \frac{F [N]}{A_0 [mm^2]} = [MPa] \quad (1)$$

$$\varepsilon \equiv \frac{\Delta l [mm]}{l_0 [mm]} = [Adimensional] \quad (2)$$

Sendo  $A_0$  a seção transversal do provete,  $l_0$  a distância inicial entre amarras ou o *gage length* (em função do selecionado) e  $\Delta l$  o alongamento do corpo de prova.

A curva do gráfico tensão-deformação é uma descrição do comportamento de deformação de um material devido à ação da carga de tração uniaxial, que pode ter diversas formas, dependendo do tipo de material ensaiado. Na figura 3.2, apresenta-se algumas curvas típicas.

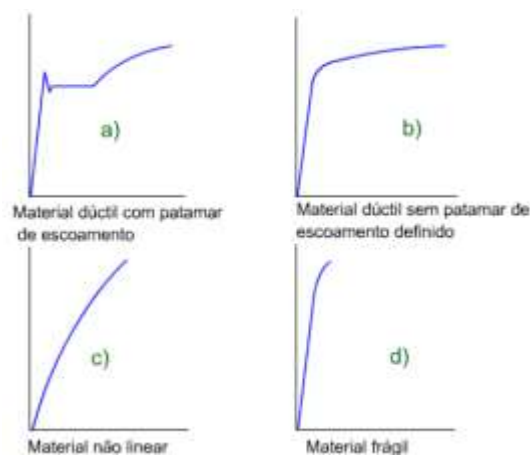


Figura 3.2 – Vários tipos de curvas de tensão-deformação em ensaio de tração [39].

A definição de material dúctil e de material frágil é feita através da análise da curva tensão-deformação. Maior a área abaixo da curva obtida, maior será o indicador que o material apresenta comportamento dúctil. Um material de comportamento frágil apresenta essencialmente a parte da curva com comportamento linear (parte inicial) e é praticamente inexistente o domínio plástico nestes materiais.

Na Figura 3.2a) vê-se um material dúctil típico, como um aço de baixo/médio carbono, onde há claramente um patamar de cedência, dividindo assim a região elástica da região plástica do material. Na Figura 3.2b), curva de tensão-deformação que se encontra no ensaio de materiais como o alumínio e ligas de aço, encontra-se a inexistência de um patamar de escoamento bem definido. Assim, a análise da tensão de cedência é feita através da traçagem de uma reta paralela à porção elástica da curva a partir de um ponto onde a deformação específica seja, no casos dos metais, de 0,2%. Nas Figuras 3.2c) e d), aparecem materiais de comportamento frágil. No caso da Figura 3.2c) aparece um comportamento não linear, característica dos ferros fundidos. Já na Figura 3.2 d), o comportamento é elástico e linear até próximo da rutura, característica de materiais cerâmicos e ligas fundidas de elevada dureza [39] [40].

No caso de materiais diferentes do aço, onde não exista uma clara evidencia da tensão de cedência, dever-se-á aplicar regressão linear em 0,5% da deformação para materiais compósitos e de 1% para materiais poliméricos (sem cargas) [41].

No regime plástico a deformação deixa de ser proporcional à tensão (a equação de Hooke deixa de ser válida, Equação 3) e o material deixa de ter capacidade de retomar à sua forma original quando a tensão for libertada.

$$\sigma = E \times \varepsilon \quad (3)$$

Isto acontece porque matrizes inteiras de átomos, devido à influência da tensão aplicada, são forçados a mover-se, irreversivelmente, para novos locais da estrutura cristalina. Durante a deformação elástica, por outro lado, os átomos são deslocados apenas ligeiramente por reversíveis estiramentos das ligações interatómicas. Deslocamento em grande escala de átomos sem rutura completa do material, ou seja, deformação plástica, só é possível na presença de materiais com ligação metálica, de modo que apenas metais e ligas podem exibir a verdadeira deformação plástica [42].

O módulo de Young ( $E$ ), através da lei de Hooke (Equação 3), pode ser definido como a inclinação da parte linear da curva do ensaio de tração. O módulo de elasticidade representa a rigidez do material no regime elástico. Contudo, podem ser ainda retirados os seguintes dados num ensaio de tração: tensão de cedência ( $\sigma_c$ ), ponto de transição entre domínio elástico e domínio plástico; tensão de resistência à tração ( $\sigma_R$ ), maior valor de tensão atingida no ensaio; tensão de rotura ou tensão última ( $\sigma_r$ ), tensão registada na rotura do provete.

Usualmente, em engenharia, projetam-se as estruturas para que as cargas que se lhe aplicam façam com que o material esteja sempre dentro do seu regime elástico. Para além de se conhecer a tensão de cedência do material, é projetada a estrutura tendo em consideração um fator de segurança (valores típicos entre 1,5 e 12), usando assim uma tensão admissível ( $\sigma_{adm}$ ) no projeto. Porém, em certas aplicações, como por exemplo a estampagem, constroem-se peças através da deformação plástica do material.

### 3.2.2. Extensometria Elétrica

Há ainda a necessidade de referir outra propriedade elástica importante de cada material, o coeficiente de Poisson. Pode ser definido pela razão entre a deformação transversal e longitudinal do material quando sujeito à tração/compressão (Equação 4), que pode ser medida através de diferentes formas.

$$\nu = - \frac{\varepsilon_{transversal}}{\varepsilon_{longitudinal}} \quad (4)$$

Em materiais isotrópicos os valores do coeficiente de Poisson variam entre valores de -1 a  $\frac{1}{2}$  [43]. Para materiais anisotrópicos os valores de coeficiente de Poisson podem ter limites superiores [44]. A madeira, material considerado ortotrópico, é um dos materiais onde é facilmente obtido valores de coeficiente de Poisson superiores a 0,5 [45].

Poderão ser usadas pinças extensométricas, por exemplo, que têm a vantagem de ser reutilizáveis e fáceis de aplicar, contudo, são suscetíveis de escorregamento e podem ser danificados devido à alta energia libertada aquando da rotura de alguns materiais. Para evitar este último problema, devem ser retirados antes da rotura, mas o que irá impossibilitar assim a medição da deformação à rotura [46]. É possível utilizar uma técnica de medição sem contacto, por exemplo a medição com base em tecnologia vídeo/ registo fotográfico, para a determinação das deformações sofridas pelo material durante o ensaio [47].

Normalmente, são preferíveis para a determinação experimental do coeficiente de Poisson os extensómetros colados, já que oferecem alta precisão de medição, baixo tamanho e peso, excelente resposta a fenómenos dinâmicos, excelente linearidade e podem ser aplicados submersos em líquidos ou em atmosferas de gás (após tratamento apropriado) [48].

Os extensómetros funcionam com base no facto elementar de que fios metálicos mudam a sua resistência eléctrica quando sofrem uma deformação [49]. Na Figura 3.3 apresentam-se dois tipos de extensómetros de resistência eléctrica: a) extensómetro de fio e b) extensómetro de lâmina.

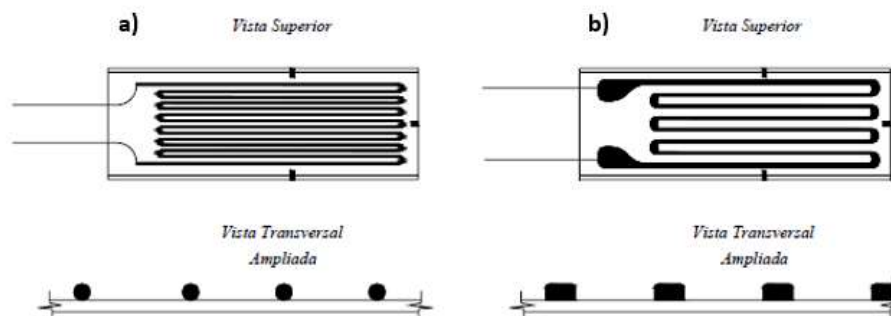


Figura 3.3 - Extensómetros de resistência eléctrica, a) de fio e b) de lâmina [48].

Um método simples de medir a variação de resistência é por intermédio de uma ponte *Wheatstone*, Figura 3.4, no qual os quatro braços da ponte contêm resistências, uma das quais é sempre o extensómetro ativo [49].

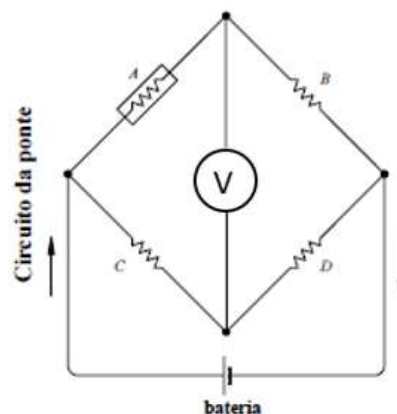


Figura 3.4 - Ponte de Wheatstone utilizada com extensómetro eléctrico na posição A [48].

A montagem dos extensómetros na ponte pode ser feita fundamentalmente por três processos: a montagem em  $\frac{1}{4}$  de ponte, em que se utiliza apenas um extensómetro ativo, a montagem em  $\frac{1}{2}$  ponte, com dois extensómetros ativos, e a montagem em ponte completa/inteira, com quatro extensómetros ativos. Uma fonte de tensão fornece a força

eletromotriz e um multímetro detecta a diferença de potencial entre dois pontos extremos [49].

A deformação na peça provocará a deformação do extensómetro e a consequente variação de resistência é detectada e medida na ponte de Wheatstone. Uma relação proporcional entre a deformação e a variação de resistência permite que a deformação seja medida [49].

A Equação 5 rege o princípio de funcionamento do extensómetro:

$$R = \rho \cdot \frac{l}{A} \quad (5)$$

Sendo  $R$  a resistência de um condutor, de resistividade elétrica  $\rho$ , e  $l$  e  $A$  são o comprimento e a área da secção transversal do condutor. Pela análise da Equação 5, quando o fio do extensómetro variar o seu comprimento devido a deformação imposta, irá também existir uma variação da área de secção transversal, logo, a resistência elétrica varia. Contudo, a experiência mostrou que a variação da resistência elétrica não era exclusivamente função da variação da geometria do condutor, tendo também importância o facto de que a resistividade elétrica variar proporcionalmente com a deformação [49].

Tendo em conta estes dois fatores que influenciam a resistência elétrica medida, foi criado um fator do extensómetro,  $K$ , que se calcula experimentalmente, e depende do material resistivo usado no extensómetro [48] [49] [50]. Assim sendo, o valor da deformação do extensómetro será dado pela Equação 6:

$$\varepsilon = \frac{\left(\frac{\Delta R}{R}\right)}{K} \quad (6)$$

Os fios do extensómetro podem ser feitos de diversos metais, sendo o mais popular uma liga de cobre e níquel com composição mais ou menos equilibrada. Outras ligas podem ser a de níquel, cromo e ferro com outros elementos em menor quantidade. Nos extensómetros do tipo semiconductor, o condutor normalmente é de silício [49].

A resistência dos extensómetros varia normalmente entre 120 e 600 ohms, embora haja em certos tipos especiais valores de resistência elétrica distintos. Já a intensidade de corrente elétrica tem valores compreendidos entre 20 e 40 mA. O comprimento linear do enrolamento pode variar em função do tipo de extensómetro, contudo, assumem-se os valores entre 0,5 e 100 mm os mais comuns. O valor da deformação obtida por um extensómetro é sempre a média aritmética das deformações nos pontos situados na área do enrolamento. Com este

ponto em consideração, quanto menor for a área coberta, mais o valor da extensão obtida se aproxima da situação teórica da extensão num dado ponto do material em teste [49].

O extensómetros eléctricos só medem extensões na direcção longitudinal do enrolamento. Nos casos em que se conhece as direcções das extensões da peça basta colar o extensómetro de acordo com tal sentido. No caso de desconhecimento das direcções de deformação de uma estrutura solicitada, como exemplo, passa a ser necessário recorrer a três extensómetros, de forma que os prolongamentos dos enrolamentos convirjam no ponto em que se pretende medir a deformação. Este género de extensómetro é do tipo roseta, Figura 3.5, podendo assumir, geralmente, a configuração de 45° ou 60° [49].

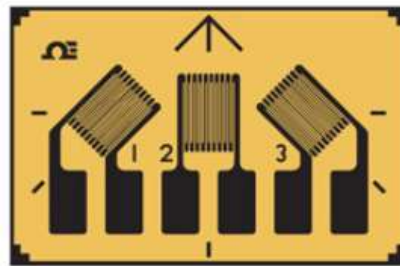


Figura 3.5 - Extensómetro do tipo roseta 60° [51].

Podem ainda existir os extensómetros em T, Figura 3.6, que permitem medir as extensões longitudinais e transversais.

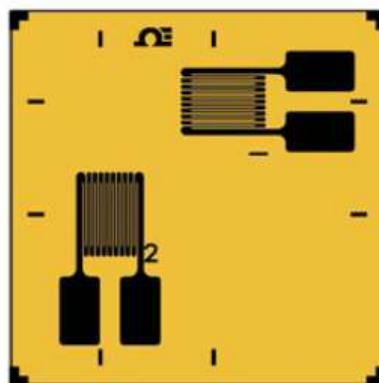


Figura 3.6 - Extensómetro do tipo T [52].

No caso de ser feito este tipo de montagem através de extensómetros isolados, basta colar o extensómetro principal na direcção longitudinal e o outro extensómetro perpendicular a este que irá medir as deformações transversais [49].

Há salientar, de forma resumida, a necessidade da consideração sobre a sensibilidade transversal do extensómetro e a compensação de temperatura e humidade. No enrolamento

do extensómetro, uma parte pequena do enrolamento (na transição para uma nova linha do extensómetro), está orientado perpendicularmente ao eixo do extensómetro, logo, irá reagir às deformações transversais do material quando na verdade só se está a querer realizar a medição da deformação na direção longitudinal. No caso de a deformação a ser medida seja num campo uniaxial de tensões, a sensibilidade transversal pode ser desprezada. Se for num campo de tensões bidimensional as leituras serão afetadas pela deformação transversal do extensómetro e deverá ser usado um fator de correção,  $K_i$ . As variações da temperatura ambiente durante o ensaio afetam as leituras das medições de um extensómetro devido fundamentalmente a dois fatores: variação da temperatura causa variação da resistência elétrica de um condutor e aos diferentes coeficientes de expansão térmica entre o extensómetro e a peça. Uma forma de corrigir este problema é recorrendo ao método do extensómetro passivo [49].

### 3.2.3. Ensaio de Flexão em Três Pontos

No ensaio de flexão em três pontos, irá ser imposto ao provete uma deformação com direção paralela à secção transversal, essa distância é denominada de flecha. O corpo de prova é apoiado nas suas extremidades, por uma distância definida pela norma, o punção irá ser o responsável pela aplicação do deslocamento que irá fletir o provete. Os raios dos apoios e do punção são determinados pela norma do ensaio. Novamente, será obtido os valores do ensaio em força vs alongamento (flecha), que serão convertidos em dados de tensão vs deformação através das Equações 7 e 8:

$$\sigma_f \equiv \frac{3 \times F \times l}{2 \times b \times h^2} = [MPa] \quad (7)$$

$$\varepsilon_f \equiv \frac{6 \times S \times h}{l^2} = [Adimensional] \quad (8)$$

Sendo  $b$  a largura [mm] e  $h$  a espessura do provete [mm].  $l$  a distância entre apoios [mm] e  $S$  a flecha [mm].

Neste tipo de ensaio, o corpo de prova experimentará dois tipos de esforços originados pela flexão. Abaixo da linha média, lado convexo do provete deformado, irá existir tensões de tração, e do lado concavo existirá tensões de compressão. Este binómio de tensões irá originar tensão de corte no material.

Também no ensaio de flexão em três pontos se deve utilizar a regressão linear em determinado valor da deformação, em função do material em estudo (valores referenciados no capítulo 3.2.1), para se calcular a tensão de cedência do material.

Para calcular o módulo de elasticidade à flexão, determina-se o declive da reta no gráfico tensão-deformação, para valores de deformação entre 0,0005 a 0,0025 [adimensional]. O mesmo método se aplica ao cálculo do módulo de Young no ensaio de tração.

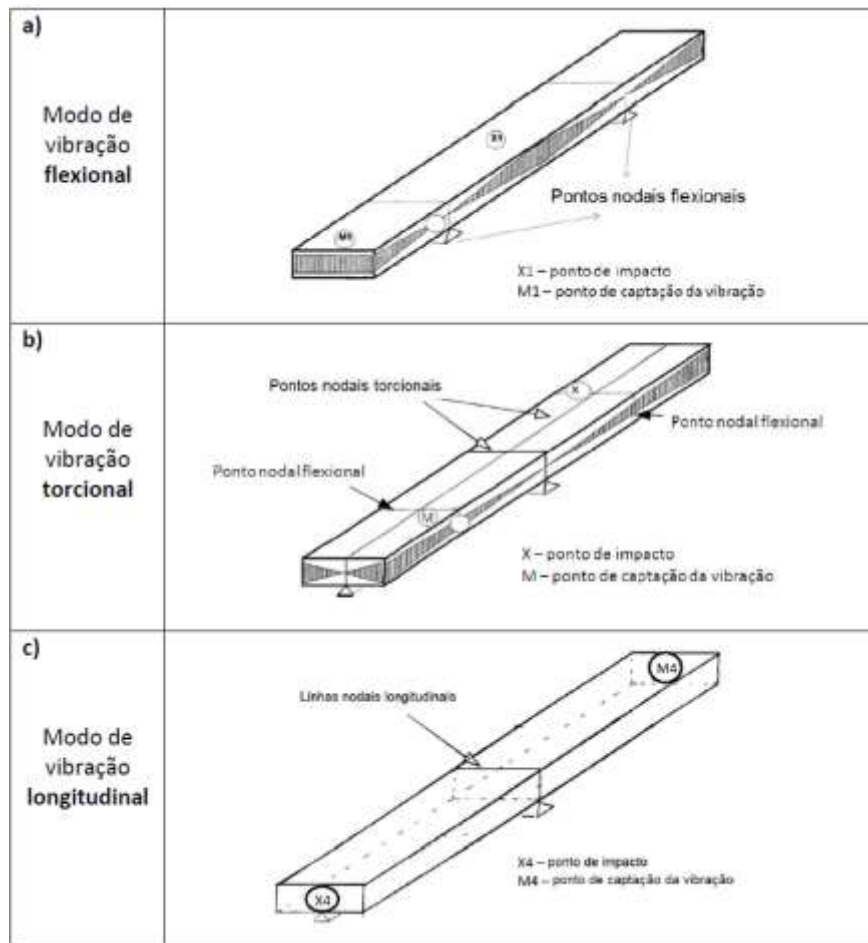
#### **3.2.4. Técnica de excitação por Impulso**

Para uma outra determinação experimental do módulo de elasticidade e do coeficiente de Poisson, recorreu-se à técnica de excitação por impulso, uma técnica de ensaio não destrutiva possível de aplicar a materiais anisotrópicos.

A medição dos módulos de elasticidade através do gráfico tensão – deformação (tração) pode revelar-se imprecisos, pelo que a medição de forma dinâmica do módulo, através da excitação das vibrações naturais ou a medição da velocidade das ondas sonoras no material, pode resultar em valores com maior precisão [41].

Segundo a norma ASTM E 1876-01, a técnica permite a determinação do módulo de elasticidade do material com base na frequência natural de um corpo de prova com uma geometria em formato de barra, cilindro, disco ou anel. As frequências naturais são excitadas através de um pequeno impulso mecânico (batida), posteriormente, serão adquiridos os dados da resposta acústica ou do movimento através de um sensor. Os sinais sofrerão um processamento matemático do sinal com fim à obtenção do espectro de frequências de ressonância. As determinações dos módulos elásticos dinâmicos (e conseqüente cálculo do coeficiente de Poisson) serão calculados recorrendo às equações fornecidas pela norma ASTM, que considera as frequências obtidas (registadas pelo *software*), a massa do provete, o tipo de geometria do provete e suas dimensões [53].

Na Figura 3.7 são apresentadas as condições de fronteira ideais a adotar nos principais modos de vibração para provetes com geometria retangular, onde se indica a posição dos suportes, a posição de impacto no provete e a posição da leitura da resposta de ressonância [54].



**Figura 3.7 - Condições de fronteira impostas ao corpo de prova para a excitação do modo de vibração fundamental (a) flexional, (b) torcional e (c) longitudinal [54].**

Como é entendido pela figura acima, o provete estará apoiado nos pontos nodais consoante o modo de vibração em ensaio. Na medição da frequência de ressonância flexional, o provete deverá estar apoiado sobre apoios que distanciam  $0,224L$  de cada extremidade (longitudinalmente). No caso das frequências torcionais, o corpo de prova deverá estar apoiado nas linhas nodais a  $0,5L$ , tanto longitudinalmente como transversalmente. Isto será, a linha que divide em igual parte o comprimento do provete e outra que o dividirá pela sua largura. Por fim, nas frequências longitudinais, o provete deverá estar apoiado de igual forma ao modo antes descrito onde a alteração de ensaio se deve apenas à posição de impacto e leitura da frequência de ressonância [55] [56].

Os materiais compósitos, de filamentos contínuos e orientados, são facilmente reconhecidos como materiais ortotrópicos, com propriedades mecânicas diferentes segundo direções distintas. Na aplicação desta técnica a este tipo de materiais é necessário preparar provetes que reflitam diversas orientações do compósito, conforme Figura 3.8.

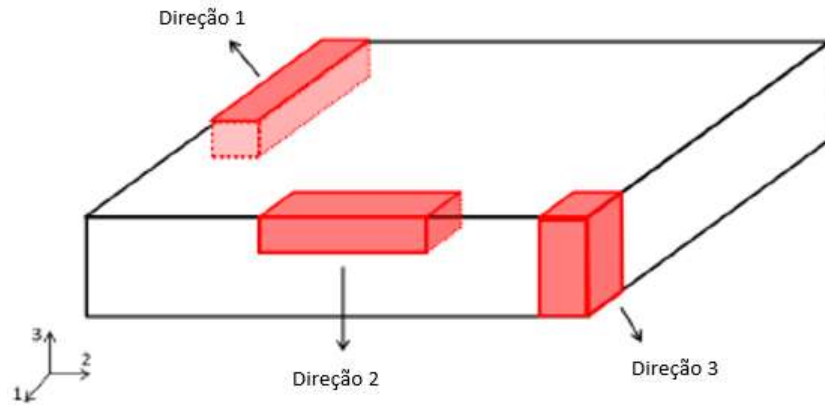


Figura 3.8 – Representação genérica de uma estrutura, detalhando como devem ser obtidos os provetes nas três principais direções para materiais não isotrópicos [53].

Assuma-se, para mais fácil entendimento, para o material em estudo, os vários filamentos depositados que formarão uma camada sejam sempre depositados segundo a direção 1 do referencial da imagem, em todas as camadas.

Na Tabela 3.1, é especificado os módulos de elasticidade que podem ser caracterizados pela técnica de excitação por impulso para este tipo de materiais, em que em índice é apresentado a direção ou plano que representam.

Tabela 3.1 – Módulo de elasticidade caracterizado pela técnica de excitação por impulso de acordo com a orientação presente no corpo de prova e o modo de vibração aplicado.

		Modo de Vibração		
		Longitudinal	Flexional	Torsional
Orientação do corpo de prova	1	$E_1^{long}$	$E_1^{flex}$	$G_{eff}(G_{12}, G_{13})$
	2	$E_2^{long}$	$E_2^{flex}$	$G_{eff}(G_{12}, G_{23})$
	3	$E_3^{long}$	$E_3^{flex}$	$G_{eff}(G_{13}, G_{23})$

No modo de **vibração flexional**, a determinação do módulo de elasticidade dinâmico (na direção longitudinal do provete) é definido pela Equação 9:

$$E = 0,9465 \times \left( \frac{m \times f_f^2}{b} \right) \times \left( \frac{L^3}{t^3} \right) \times T_1 \quad (9)$$

Onde  $f_f$  é a frequência de ressonância do primeiro modo de flexão em Hz,  $m$  como a massa do provete em gramas,  $b$  a sua largura [mm],  $L$  o seu comprimento [mm],  $t$  a sua espessura [mm] e  $T_1$  um fator de correção.

Como a razão de  $\frac{L}{t}$  será maior a 20, pelos provetes que foram fabricados para este ensaio, o fator de correção  $T_1$  será calculado pela Equação 10:

$$T_1 = [1,000 + 6,585 \times \left(\frac{t}{L}\right)^2] \quad (10)$$

Desta forma não será necessário conhecer o coeficiente de Poisson previamente, que no caso da razão  $\frac{L}{t}$  ser inferior a 20, seria imperativo para o seu cálculo.

No modo de **vibração torcional**, poder-se-á calcular o módulo de elasticidade transversal através da Equação 11:

$$G = \frac{4 \times L \times m \times f_t^2}{b \times t} \times \left[ \frac{B}{(1 + A)} \right] \quad (11)$$

Em que  $B$  é um termo que depende da geometria e é definido pela Equação 12:

$$B = \left[ \frac{\frac{b}{t} + \frac{t}{b}}{4 \times \left(\frac{t}{b} - 2,52 \times \left(\frac{t}{b}\right)^2\right) + 0,21 \times \left(\frac{t}{b}\right)^6} \right] \quad (12)$$

$A$  é um fator de correção empírico que depende da razão da largura pela espessura do provete e que pode ser omitido no caso de se admitirem erros superiores a 2%. Será então calculado pela Equação 13:

$$A = \frac{\left[ 0,5062 - 0,8776 \times \left(\frac{b}{t}\right) + 0,3504 \times \left(\frac{b}{t}\right)^2 - 0,0078 \times \left(\frac{b}{t}\right)^3 \right]}{\left[ 12,03 \times \left(\frac{b}{t}\right) + 9,892 \times \left(\frac{b}{t}\right)^2 \right]} \quad (13)$$

No modo de **vibração longitudinal**, o módulo de elasticidade obtido será referente à orientação do comprimento do corpo de prova. Portanto, a orientação no corpo de prova determinará qual módulo está a ser determinado ( $E_1$ ,  $E_2$  ou  $E_3$ ), conforme já apresentado na Tabela 3.1.

O módulo de elasticidade dinâmico poderá ser calculado pela Equação 14:

$$E = \rho \times C^2 \times \frac{1}{K(v)} \quad (14)$$

Sendo  $\rho$  a massa específica do material,  $K$  um fator de correção que depende do coeficiente de Poisson e dimensões do corpo de prova e  $C$  a velocidade do som no corpo de prova, este último é determinado pela Equação 15:

$$C = \lambda \times f_l \quad (15)$$

Em que  $f_l$  corresponde ao primeiro modo de vibração da frequência de ressonância e  $\lambda$  como o comprimento de onda, que é calculado através da Equação 16:

$$\lambda = \frac{2 \times L_x}{n} \quad (16)$$

Onde  $L_x$  representa o comprimento do provete e  $n$  o número do modo de ressonância.

Por fim, para a determinação do fator de correção  $K$ , tem-se, através das Equações 17 e 18:

$$k(v) = 1 - \frac{\pi^2 \times v^2 \times D^2}{8 \times L_x^2} \quad (17)$$

$$D^2 = \frac{2}{3} \times (L_y^2 + L_z^2) \quad (18)$$

Sendo  $L_y$  e  $L_z$  a largura e a espessura do corpo de prova, respetivamente.

A caracterização do coeficiente de Poisson, através da técnica de excitação por impulso, ocorre de uma forma indireta. A sua obtenção resulta na correlação dos módulos de Young e os módulos de elasticidade transversal ou através da equação de reciprocidade de coeficientes de Poisson. As Equações 19, 20 e 21 advêm da Teoria da Elasticidade e são diretamente relacionadas com a matriz de rigidez envolvendo a simetria presente no corpo de prova [53]:

- Material isotrópico

$$v = \frac{E}{2 \times G} - 1 \quad (19)$$

- Material transversalmente isotrópico

$$\nu_{23} = \frac{E_2}{2 \times G_{23}} - 1 \quad (20)$$

- Material ortotrópico

$$\frac{\nu_{12}}{E_1} = \frac{\nu_{21}}{E_2} \quad , \quad \frac{\nu_{13}}{E_1} = \frac{\nu_{31}}{E_3} \quad , \quad \frac{\nu_{23}}{E_2} = \frac{\nu_{32}}{E_3} \quad (21)$$

### 3.2.5. Análise de Microtomografia Computorizada (*Micro-CT*)

A microtomografia computadorizada de raios X ( $\mu$ -CT) é uma técnica de ensaio não destrutiva (END) que permite a avaliação das características estruturais e texturais tanto à superfície como no interior do objeto, sem a necessidade de preparação físico-mecânica ou de tratamento químico da amostra. Esta metodologia, a par do seu aspeto mais apelativo da visualização 3D dos objetos, também permite através da microscopia, a caracterização qualitativa e quantitativa de aspetos fundamentais da estrutura do objeto, tais como aspetos morfológicos e topológicos da matriz (material) e do espectro poroso (vazio), a distribuição espacial e o calibre dos poros (textura) [57].

O feixe de raios X corresponde ao conjunto de fótons que foram gerados através do bombardeamento dos eletrões, com elevada energia cinética, contra um alvo de material metálico de alto número atómico (e.g. Titânio). Como resultado, a radiação eletromagnética é caracterizada por ser de alta frequência, pequeno comprimento de onda e alto poder de penetração. A técnica de Micro-CT funciona com base na atenuação da intensidade do feixe de raios X que foi produzida, pela absorção parcial da radiação pelo objeto. Quando os raios X passam pela amostra, eles são atenuados em intensidades distintas, com base nas diferenças entre os coeficientes de atenuação linear das fases contidas (diferentes materiais). A densidade e o número atómico efetivo dos materiais são os principais fatores que determinam o grau de absorção dos raios X, contudo, no caso destes coeficientes serem semelhantes, irá existir dificuldade na diferenciação dos materiais presentes. [58].

O ensaio inicia-se pela emissão do feixe de raios X, que pode ter uma configuração *Planar Fan*, *Cone* ou *Parallel* (Figura 3.9), que irá atingir a peça em análise e será em seguida captado o feixe de raios X, atenuados, pelo detetor. São tiradas diversas radiografias (2D) à peça fazendo-a rodar em torno de um eixo vertical (eixo Z). A qualidade dos resultados a

obter no fim do ensaio dependem fortemente do número e da qualidade das radiografias capturadas. [57].

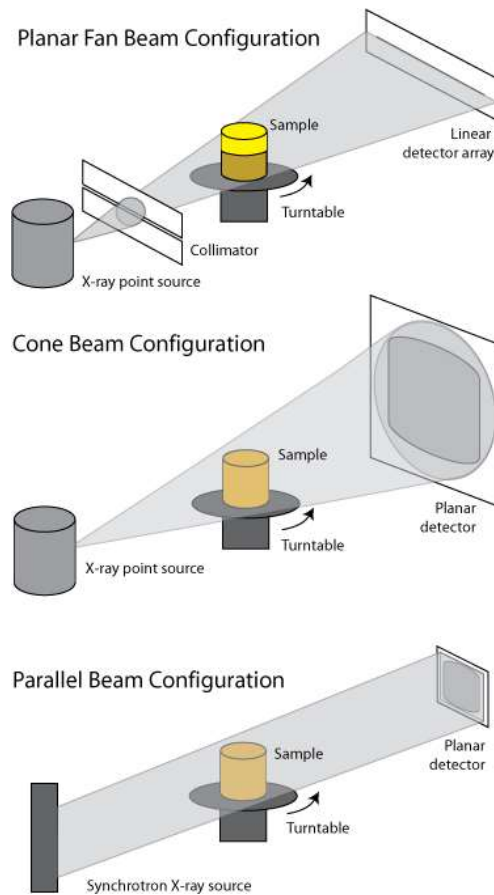


Figura 3.9 - Tipos de Configuração de emissão de raios X na microtomografia computadorizada [59].

A amostra deverá permanecer fixa ao porta-amostras rotativo, rodar em torno de um eixo vertical sem se deformar/deslocar durante o ensaio e estar sempre totalmente irradiada pelo feixe de raios X. Estas medidas instrumentais condicionam a qualidade/resolução das imagens obtidas: nas amostras de maior dimensão (centimétricas) a fonte deve ficar mais distante da amostra e por isso o fator de ampliação é mais reduzido (resolução das imagens é mais baixa); já no que diz respeito a amostras muito pequenas (cerca de 1 mm) a fonte pode ficar praticamente colada ao objeto, o que irá permitir obter imagens de grande qualidade [57].

A reconstrução tridimensional do objeto através das diversas radiografias (2D), a filtragem das imagens e tratamento de resultados é feito recorrendo a *software* dedicado [57].

Aplicar a técnica de Micro-CT a peças feitas por fabrico aditivo é de extrema importância, já que são propensas a ter defeitos como vazios ou porosidades, o que irá afetar

negativamente a sua resistência mecânica [60]. Para além da determinação da porosidade da peça, a análise permite ainda visualizar a direção, quantidade e posição espacial das fibras de carbono no material de base.

Atualmente, não existem normas específicas para ensaios não destrutivos, como a Micro-CT, a peças produzidas por fabrico aditivo de materiais poliméricos. A única norma ativa, mas para materiais metálicos, é a ISO/ASTM TR 52906:2022. Outras normas deste tipo de ensaios estão em fase de desenvolvimento, apenas para materiais metálicos, tais como: ASTM WK69731, ASTM WK75584, ASTM WK76038, ASTM WK78465 e ASTM/ISO DTR 52905 [61] [62].

A falta de normas que regulem o ensaio irá gerar análises a peças diferentes, no que diz respeito a tamanho e geometria, o que provocará resultados com diferentes resoluções e qualidade de digitalização. Assim, a comparação direta entre diferentes análises de tomografia de peças produzidas por fabrico aditivo são praticamente impossíveis. Além disso, diferentes metodologias de análise da imagem poderão produzir resultados diferentes [60].

### 3.2.6. Método Otsu

O método Otsu [63], proposto por Nobuyuki Otsu, tem como objetivo, a partir de uma imagem em tons de cinza, determinar o valor ideal de *threshold* que separe os elementos do fundo e da frente da imagem em duas regiões, atribuindo a cor branca ou preta para cada uma delas.

$L$  representa o número total dos níveis de intensidade de cinza (256 numa imagem de 8-bit). O resultado da segmentação divide a imagem em duas classes, o fundo  $C_1$  (*background*) e a frente  $C_2$  (*foreground*), tal que,  $C_1 = (0, 1, 2, \dots, T)$  e  $C_2 = (T + 1, T + 2, \dots, L - 1)$ .  $N$  representa o número total de pixels na imagem a analisar. A probabilidade de ocorrência do nível de cinza  $i$  é dado pela Equação 22:

$$p_i = \frac{n_i}{N} \quad (22)$$

em que  $n_i$  é a quantidade de pixels da imagem que possuem a intensidade de cinza  $i$ , para  $i=0, \dots, L - 1$ .

$T$  será o nível de cinza que particiona o histograma da imagem nas duas classes  $C_1$  e  $C_2$ , Assim, as probabilidades das classes  $C_1$  e  $C_2$  são dadas pelas Equações 23 e 24:

$$\omega_1 = P_{C_1}(T) = \sum_{i=0}^T p_i \quad (23)$$

$$\omega_2 = P_{C_2}(T) = \sum_{i=T+1}^{L-1} p_i \quad (24)$$

e como são probabilidades complementares, isto é,  $P_{C_1} + P_{C_2} = 1$ .

As médias das duas classes podem agora ser calculadas com base nas Equações 25 e 26:

$$\mu_1 = \sum_{i=0}^T \frac{i P_i}{P_{C_1}} \quad (25)$$

$$\mu_2 = \sum_{i=T+1}^{L-1} \frac{i P_i}{P_{C_2}} \quad (26)$$

A variância das classes é dado pelas Equações 27 e 28:

$$\sigma_1^2 = \sum_{i=0}^T \frac{(i - \mu_1)^2 P_i}{P_{C_1}} \quad (27)$$

$$\sigma_2^2 = \sum_{i=T+1}^{L-1} \frac{(i - \mu_2)^2 P_i}{P_{C_2}} \quad (28)$$

A variância entre classes  $\sigma_w$  é dada pela Equação 29:

$$\sigma_w^2 = \sum_{k=1}^2 P_{C_k} \sigma_i^2 \quad (29)$$

Por fim, a soma ponderada das variâncias entre classes  $\sigma_B$  a serem maximizadas pode ser obtida pela Equação 30:

$$\sigma_B^2 = P_{\omega_1} P_{\omega_2} (\mu_{\omega_1} - \mu_{\omega_2})^2 \quad (30)$$

Assim sendo, o método Otsu visa encontrar o limiar  $T$  que minimiza a variância interclasse  $\sigma_B$ , que é equivalente a maximizar a variância intraclasse  $\sigma_w$ . Isso se traduz matematicamente na Equação 31:

$$T = \arg \max \sigma_B^2(T) = \arg \min \sigma_w^2(T) \quad (31)$$

De forma a exemplificar o método, suponha-se a Figura 3.10, onde consta uma imagem de  $N=36$  pixels com  $L=6$  níveis de intensidade de cinza. À esquerda da figura, o histograma  $p$  da imagem, onde consta a quantificação dos pixels para cada uma das 6 intensidades  $i$  apresentadas neste exemplo.

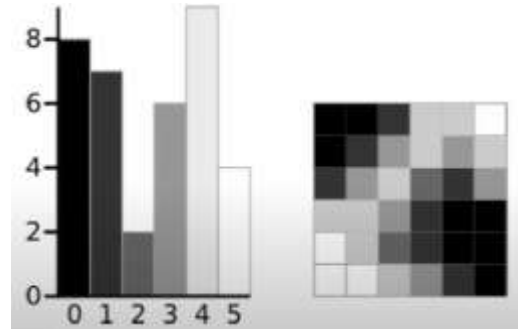


Figura 3.10 – Imagem em escala de cinza de 6 níveis e o seu histograma à esquerda [64].

O histograma da imagem foi calculado pela Equação 22.

Assumindo como limite (*threshold*)  $T=3$ , teremos a divisão da imagem em duas regiões. Os valores de intensidade 0, 1 e 2 serão valores de *Background* (preto) e os valores de intensidade de 3, 4 e 5 os valores de *Foreground* (branco).

Para a determinação na região esquerda  $C_1$  (background), usa-se as Equações 23, 25 e 27, respetivamente.

$$\omega_1 = \frac{8 + 7 + 2}{36} = 0,4722$$

$$\mu_1 = \frac{(0 \cdot 8) + (1 \cdot 7) + (2 \cdot 2)}{17} = 0,6471$$

$$\sigma_1^2 = \frac{((0 - 0.6471)^2 \cdot 8) + ((1 - 0.6471)^2 \cdot 7) + ((2 - 0.6471)^2 \cdot 2)}{17} = 0,4637$$

Aplicando os cálculos à região direita do limite definido,  $C_2$ , através das Equações 24, 26 e 28, tem-se que:

$$\omega_2 = 0,5278$$

$$\mu_2 = 3,8947$$

$$\sigma_2^2 = 0,5152$$

A variância entre classes, pela equação 29, será de:

$$\sigma_w^2 = \omega_1 \sigma_1^2 + \omega_2 \sigma_2^2$$

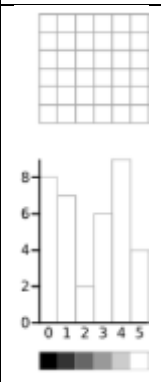
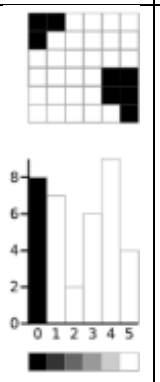
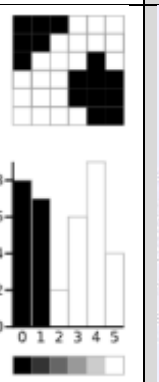

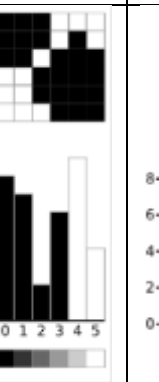
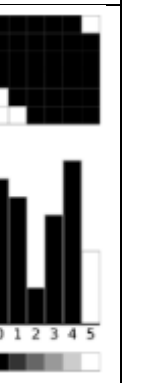
$$\Leftrightarrow \sigma_w^2 = 0,4722 \cdot 0,4637 + 0,5278 \cdot 0,5152$$

$$\sigma_w^2 = 0,4909$$

Este é um processo iterativo, onde se experimentam vários valores de  $T$  para se obter o valor mais baixo de variância entre classes.

Para os restantes valores possíveis de  $T$  (de 0 a  $L - 1$ ), apresenta-se os valores na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Resultados da exemplificação do método Otsu [64].

Threshold	T=0	T=1	T=2	T=3	T=4	T=5
						
$\omega_1$	0	0,22	0,4167	0,4722	0,6389	0,8889
$\mu_1$	0	0	0,4667	0,6471	1,2609	2,0313
$\sigma_1^2$	0	0	0,2489	0,4637	1,4102	2,5303
$\omega_2$	1	0,7778	0,5833	0,5278	0,3611	0,1111
$\mu_2$	2,3611	3,0357	3,7143	3,8947	4,3077	5,000
$\sigma_2^2$	3,1196	1,9639	0,7755	0,5152	0,2130	0
$\sigma_w^2$	3,1196	1,5268	0,5561	<b>0,4909</b>	0,9779	2,2491

Fica evidente que a utilização de calculo computacional é preferível para esta determinação. Existem outros métodos para o mesmo objetivo do método Otsu, tal como o método Ridler (*Global thresholding methods*), o método Kittler e o método Niblack (*Locally adaptive thresholding methods*), por exemplo. Segundo o publicado no artigo [65], o método de Otsu apresenta melhores resultados na avaliação da porosidade de objetos através das imagens resultantes da técnica de Micro-CT do que o método de Ridler e Kitler.

### 3.3.Provetes

Para os ensaios mecânicos de tração e flexão utilizaram-se as normas ASTM D638-14 e ASTM D790-10, respetivamente. Foram produzidos 5 provetes para a realização de cada tipo de ensaio com as dimensões requeridas nas normas citadas, conforme Figura 3.11.

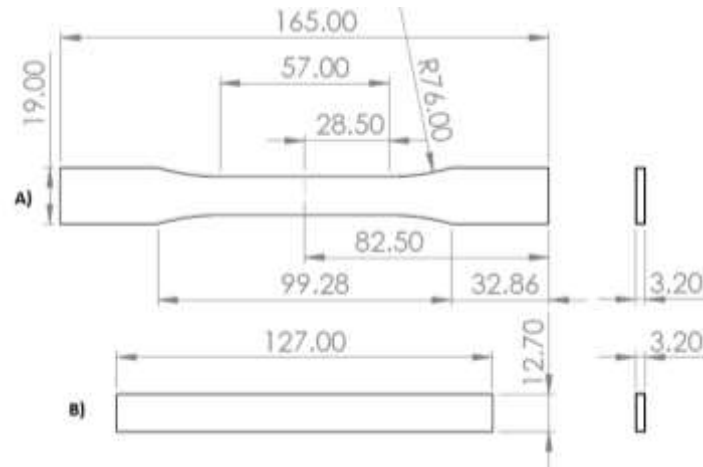


Figura 3.11 - Geometria dos provetes, A) tração e B) flexão.

Os provetes para os ensaios de tração e flexão foram obtidos através da maquinação de uma placa do material em estudo, conforme Figura 3.12, onde a azul está representada a deposição a  $+45^\circ$  e a vermelho, a camada seguinte, a  $-45^\circ$ . Esta disposição repete-se ao longo da construção da peça.

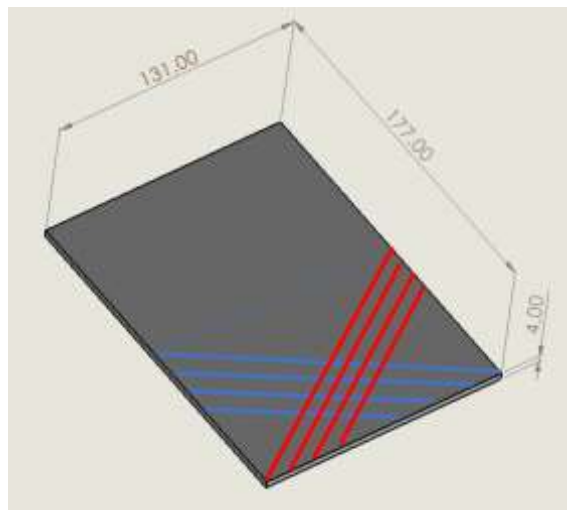


Figura 3.12 - Dimensão em milímetros da placa para maquinação dos 5 provetes de tração.

Esta decisão, deve-se ao facto de que na construção pelo processo de MEX existe, para além do perímetro da peça, uma zona de “zig zag” na transição do sentido de deposição do filamento, conforme representado na Figura 3.13.



**Figura 3.13 - Representação da transição de sentido da deposição do filamento no processo de MEX.**

Para que a análise contemple apenas os filamentos alinhados segundo as direções pretendidas é necessário obter a geometria interior ao quadrado vermelho representado na figura antes disposta. Desta forma, o ensaio será de melhor qualidade, já que se está efetivamente a determinar o módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson em que os filamentos estão todos e completamente alinhados segundo a mesma direção do referencial ( $\pm 45^\circ$ ).

Para a determinação experimental dos coeficientes de Poisson e dos módulos de elasticidade segundo a técnica de excitação por impulso, pela norma ASTM E 1876-01, as dimensões selecionadas para o provete teriam de respeitar imperativamente a razão de  $\frac{L}{t}$  ser  $\geq 20$ , conforme explicado no capítulo 3.2.4.

Novamente, não se pretende ter os filamentos que fazem o contorno/perímetro da peça e nem as zonas de transição de sentido de deposição do filamento na análise. Assim sendo, os provetes foram produzidos com as dimensões iniciais de 7 x 38 x 138 [mm], e posteriormente, através de maquinação, foram retirados.

Na Figura 3.14, apresentam-se os provetes construídos, sendo que cada linha vermelha representa um filamento, onde sucessivos formarão uma camada. O plano x-y representa a base de construção da máquina.

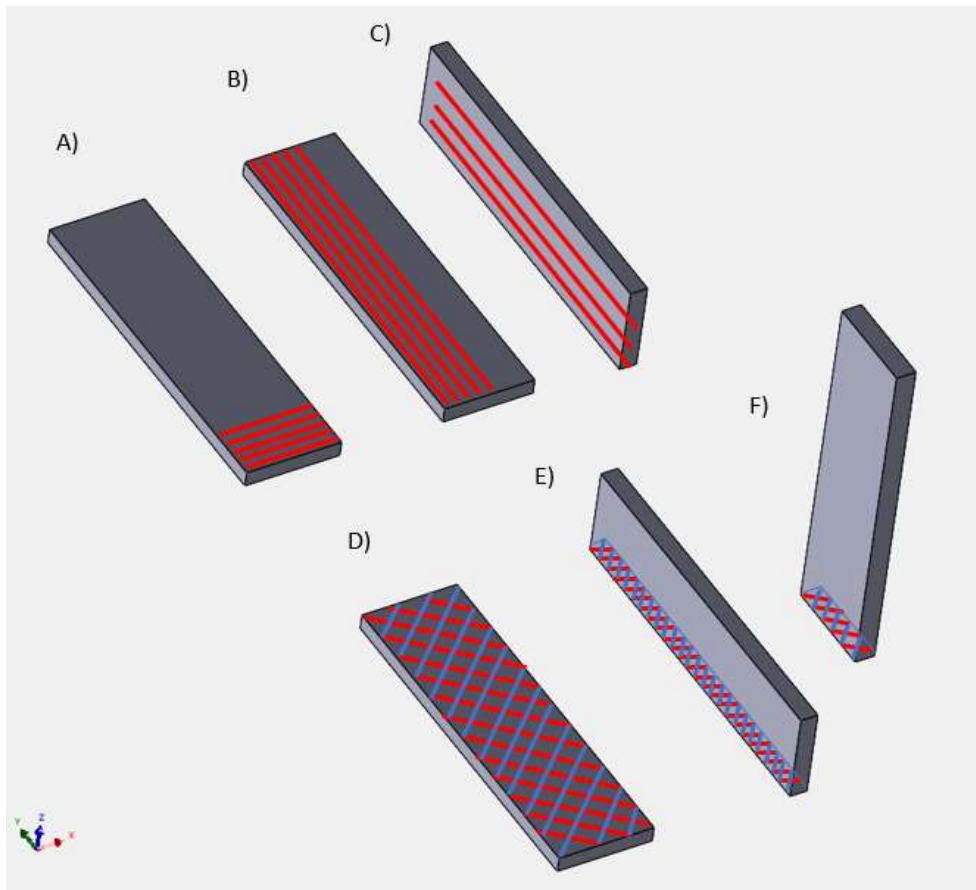


Figura 3.14 – Provetes para técnica de excitação por impulso (base de construção no plano x-y).

No provete A) todas as camadas têm a deposição dos filamentos a  $0^\circ$ , perpendicularmente em relação ao comprimento do provete. No provete B) as camadas têm os filamentos orientados a  $90^\circ$ , paralelos ao comprimento do provete. O provete C) de igual direção de deposição dos filamentos como no provete B) mas construído *On-Edge*. Para os provetes D), E) e F) as camadas serão a  $\pm 45^\circ$ , sendo a linha azul a indicação do filamento a  $+45^\circ$  e a vermelho a  $-45^\circ$ .

De salientar que todos os provetes neste estudo foram fabricados com uma densidade de 100% (valor teórico, dado que se prevê a existência de porosidade).

Na determinação da porosidade de peças produzidas por este material e máquina, foi utilizada a técnica de microtomografia computadorizada onde se utilizou os mesmos corpos de prova aos utilizados para a técnica de excitação por impulso.

### 3.3.1. Parâmetros de máquina na construção dos provetes

A produção de todos os provetes foi feita recorrendo ao equipamento Fortus 900 da Stratasys, Figura 3.15, que conta com uma área de construção de 610 mm por 914 mm e de altura 914 mm.



Figura 3.15 - Stratasys F900, equipamento utilizado na construção dos provetes [37].

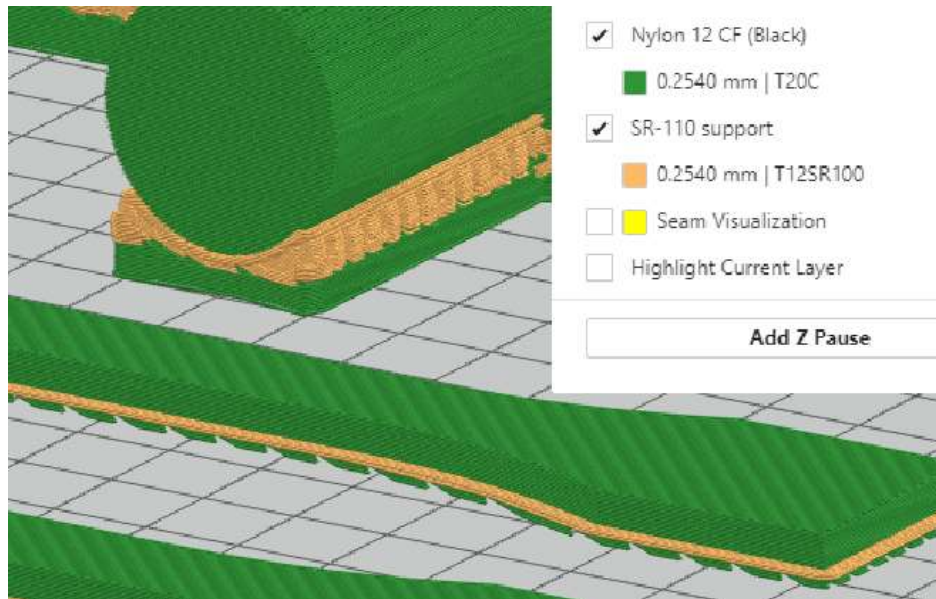
Na Tabela 3.3 são apresentados os parâmetros de máquina na construção de todo o tipo de provetes antes referidos.

Tabela 3.3 - Parâmetros de máquina na construção dos provetes.

Bico do material para <i>Nylon 12CF</i> :	T20C (referência <i>Stratasys</i> )
Bico do material de suporte (SR 130):	T12 SR100 (referência <i>Stratasys</i> )
Altura de camada:	0,254 mm (única opção neste material)
Temperatura do bico para o Nylon 12CF:	336°C
Temperatura do bico para o SR130:	240°C
Temperatura da câmara de construção:	125°C
Diâmetro do Bico para Nylon 12CF:	(Não disponível)

A produção das peças através desta máquina e material requer a utilização de uma folha fina de nylon transparente (material da Stratasys), onde é fixada à plataforma de construção por meio de vácuo (mesa da máquina é perfurada) e será sobre ela que serão construídas as peças.

A máquina apresenta uma outra particularidade na utilização deste material. Na peça, mesmo não necessitando de suportes, estes serão gerados automaticamente, tal como evidenciado na Figura 3.16.



**Figura 3.16 - Demonstração, pelo *software* GrabCAD Print, da colocação automática do material de suporte.**

São colocadas algumas camadas do mesmo material que constituirá a peça sobre a folha polimérica, posteriormente, serão depositadas camadas de material de suporte e só depois será colocado material que formará a geometria da peça pretendida (a construção da peça só começa neste instante). Tal particularidade não é passível de ser alterada.

Na etapa de pós-processamento, o material de suporte é removido por dissolução numa solução aquosa com o agente químico P400SC da Stratasys. As peças são submersas nesse banho num tanque aquecido a 50°C durante 4 horas.

## 4. Ensaio experimentais

### 4.1. Ensaio de Tração

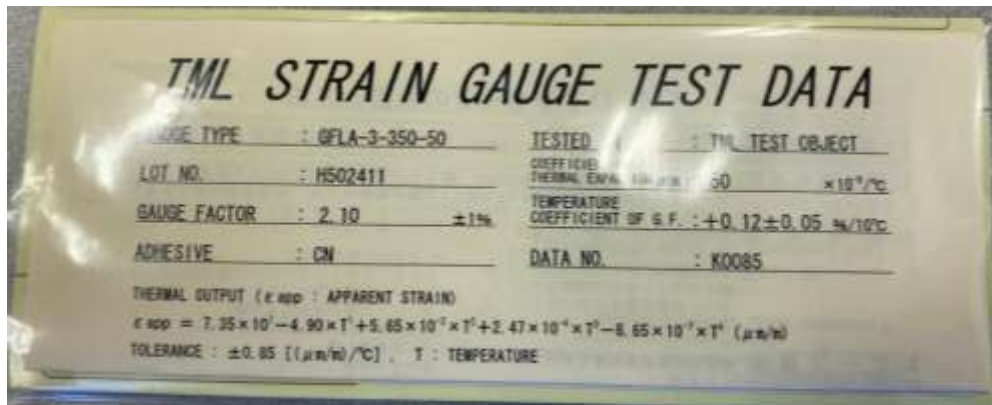
Após a maquinação da placa do material, com fim à obtenção da geometria dos provetes, estes foram polidos de forma a garantir uma superfície com bom acabamento (para colagem dos extensómetros) e uma espessura mais uniforme. Recorrendo ao micrómetro, mediram-se os provetes nas principais dimensões para o posterior tratamento de dados após ensaio de tração. Foram feitas diversas medições com fim à obtenção da média aritmética de cada dimensão, tal como ilustrado na Tabela 4.1.

Tabela 4.1 - Valor médio da largura e espessura de cada provete de tração.

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
$b_1$ [mm]	12,98	13,01	12,97	12,99	12,96
$h_1$ [mm]	3,21	3,23	3,12	3,22	2,99
$b_2$ [mm]	12,98	13,01	12,98	12,99	12,98
$h_2$ [mm]	3,23	3,24	3,08	3,21	3,01
$b_3$ [mm]	12,98	13,01	12,96	12,98	12,98
$h_3$ [mm]	3,24	3,24	3,12	3,23	3,02
Largura média ( $b_{méd}$ ) [mm]	12,98	13,01	12,97	12,99	12,97
Espessura média ( $h_{méd}$ ) [mm]	3,23	3,24	3,11	3,22	3,01

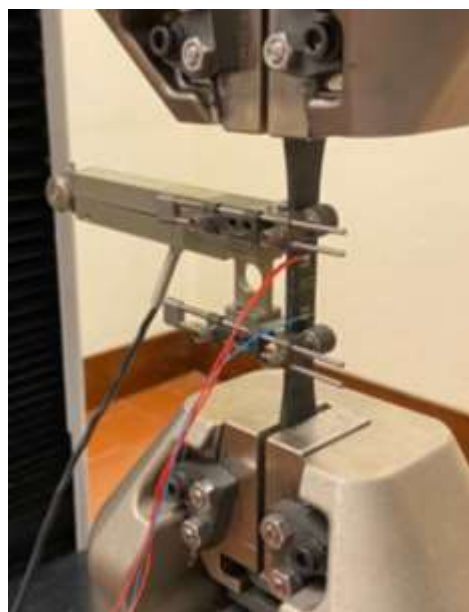
Antes de se iniciar a colagem do extensómetro, foi marcado no provete as suas linhas de simetria recorrendo a um riscador. Foi limpa a superfície do provete que iria receber o extensómetro através de éter de petróleo. Com o auxílio de uma lupa foi colocado o extensómetro na posição certa, em função das marcações que o extensómetro fornece e das linhas previamente marcadas no provete. Foi utilizado adesivo de cianoacrilato (introduzido no mercado no início dos anos 70 com a designação de “supercola” [47]) para a fixação do extensómetro à superfície do provete.

Na Figura 4.1, apresenta-se a embalagem dos extensômetros utilizados onde consta os dados técnicos do sensor.



**Figura 4.1 - Dados técnicos dos extensômetros utilizados.**

Como abordado no capítulo 3.2.2., é necessário recorrer à ponte de Wheatstone para se fazer a leitura da variação da resistência no extensômetro, e de forma consequente, a determinação da deformação no provete. Para a medição do alongamento longitudinal, foi utilizado uma pinça extensométrica com o registo de sinal feito através do próprio controlador da máquina de ensaios. A distância inicial,  $l_0$ , foi de 50 mm (*gauge length*). O extensômetro colado, teve unicamente como objetivo a medição do alongamento transversal. Na Figura 4.2, mostra-se a pinça extensométrica posicionada no provete, o provete com o extensômetro colado previamente e os diversos fios que serão conectados a equipamentos de medição.



**Figura 4.2 - Pinça extensométrica e extensômetro colado no provete a ensaiar.**

A pinça extensométrica estava ligada diretamente ao controlador da máquina de ensaios de tração, o que permitiu obter no fim do ensaio um ficheiro Excel onde constava a coluna do tempo de duração do ensaio, da força medida pela célula de carga, o alongamento do provete entre amarras (medido pela posição do sem-fim da máquina) e ainda o valor de alongamento registado pela pinça extensométrica na região do *gage length* do provete (valor de maior precisão).

Já a medição e registo dos valores do extensómetro colado foi feito de uma forma distinta. O extensómetro estava ligado à ponte extensométrica Hottinger Baldwin Messtechnik (Alemanha), que é responsável por fazer todo o circuito elétrico da ponte de Wheatstone, onde se tem de configurar o tipo de ponte ( $\frac{1}{4}$ ,  $\frac{1}{2}$  ou completa) e a tensão utilizada. Deste dispositivo, através de uma das suas saídas analógicas, será conectado um cabo que irá ligar a um PicoScope (osciloscópio) que é o responsável pela leitura dos valores da variação da extensão e pelo seu registo. Ao mesmo tempo, existe um outro canal do PicoScope que estará conectado com a célula de carga da máquina de ensaios de tração registando os valores de força. Desta forma, para cada um dos dois ficheiros Excel, existirá uma “constante”, uma forma de poder sobrepor todos estes dados. A Figura 4.3 ilustra todo o *apparatus* utilizado no ensaio de tração.



**Figura 4.3 - Apparatus utilizado no ensaio de tração.**

Os provetes foram testados na máquina de ensaios universal Shimadzu AGS-100kNX (Japão) com célula de carga de 100 kN e equipada com amarras do tipo cunha. No ensaio de

tração, de acordo com a norma da ASTM D638-14, foi aplicado aos provetes do tipo I uma velocidade de ensaio de 1 mm/min com a distância inicial entre amarras de 115 mm. Na Figura 4.4 apresenta-se o gráfico Tensão-Deformação do ensaio de tração.

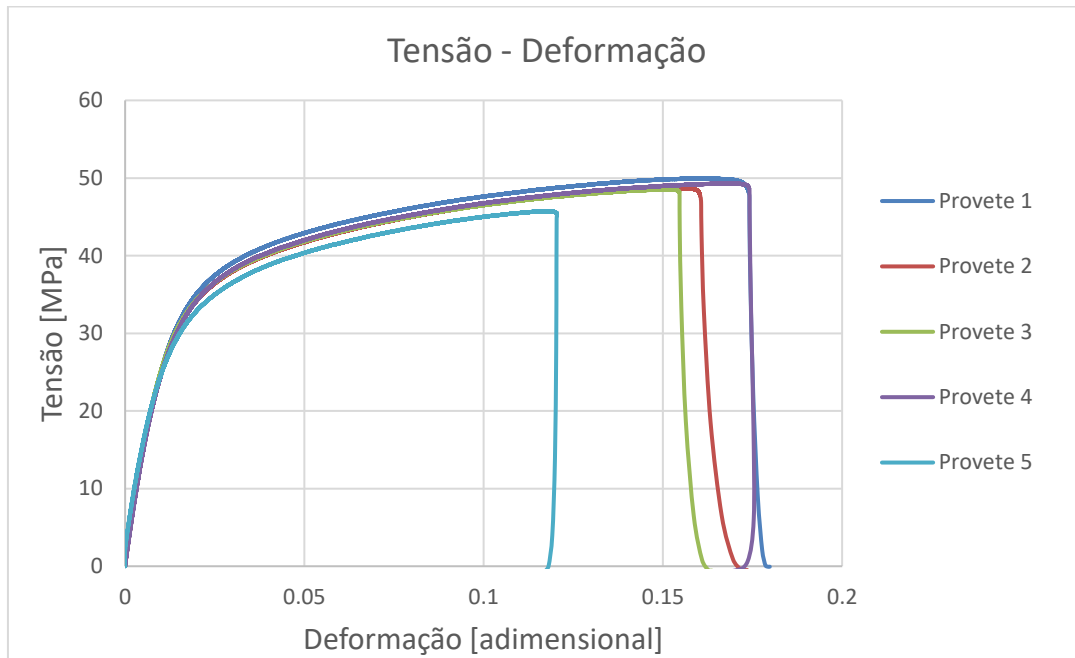


Figura 4.4 - Gráfico tensão-deformação no ensaio de tração ao Nylon 12CF.

Na Figura 4.5, apresenta-se o gráfico com a deformação longitudinal e transversal do provete 1, a título de exemplo. Através do declive de cada uma das linhas do gráfico e pela aplicação da Equação 4, para determinação do coeficiente de Poisson, obteve-se o valor de 0,60.

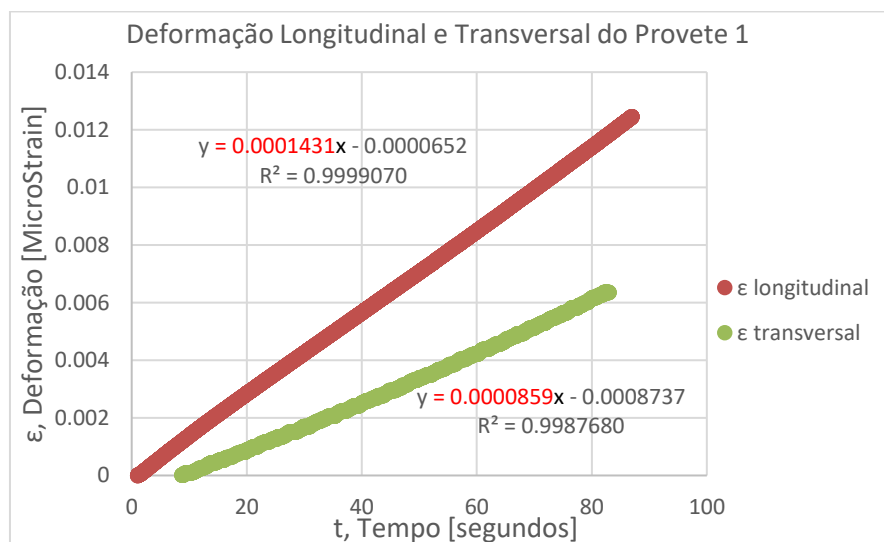


Figura 4.5 - Gráfico da deformação longitudinal e transversal do provete de tração 1.

Por fim, na Tabela 4.2, evidenciam-se os valores importantes retirados de cada uma das linhas do gráfico Tensão-Deformação e o coeficiente de Poisson correspondente a cada um dos corpos de prova ensaiados.

**Tabela 4.2 – Resultados do ensaio de tração do Nylon 12CF**

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Média
Módulo de Young, E [MPa]	3068.6	3119.0	3102.2	3119.2	2945.6	3070.92
Tensão de Cedência, $\sigma_c$ [MPa]	31.8	30.6	30.9	30.4	29.9	30.71
Tensão de Resistência à Tração, $\sigma_R$ [MPa]	49.9	48.7	48.5	49.3	45.7	48.43
Coefficiente de Poisson, $\nu_{12}$ [adimensional]	0,60	0,58	0,54	0,57	0,54	0,57

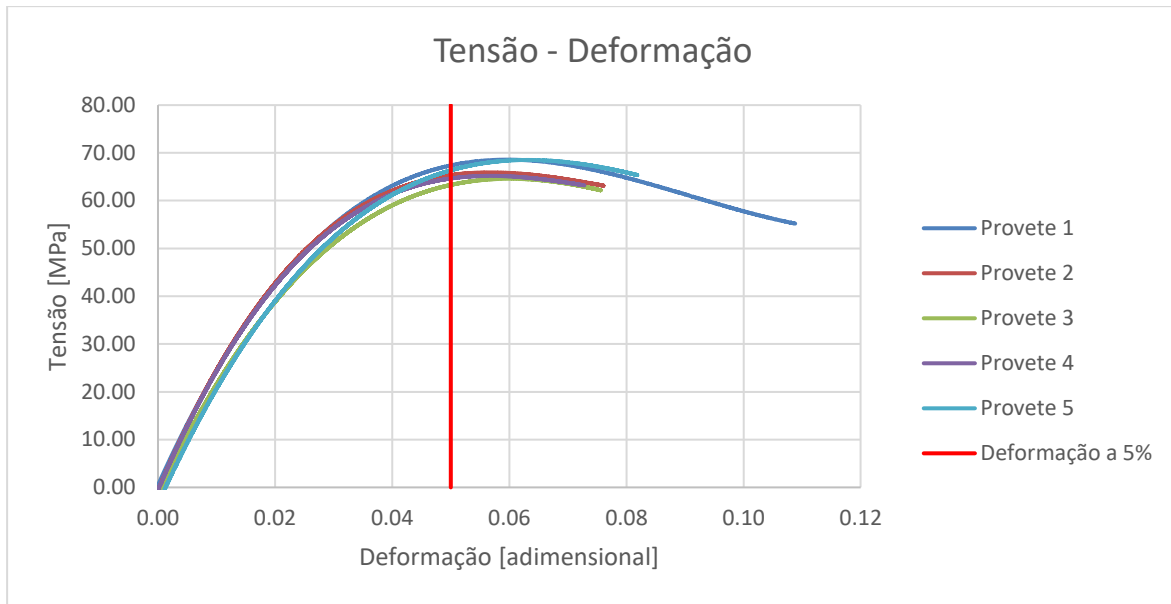
## 4.2. Ensaio de Flexão em Três Pontos

Tal como na obtenção dos provetes de tração, também os provetes de flexão foram obtidos pela maquinação de uma placa retangular do material em estudo. Realizaram-se medições à largura e espessura de cada provete para a obtenção do seu valor médio para os cálculos posteriores ao ensaio. Na Tabela 4.3, ilustra-se os valores registados com o micrómetro.

**Tabela 4.3 - Valor médio da largura e espessura de cada provete de flexão.**

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5
$b_1$ [mm]	12,82	12,76	12,81	12,77	12,80
$h_1$ [mm]	3,48	3,51	3,48	3,46	3,51
$b_2$ [mm]	12,75	12,78	12,76	12,79	12,78
$h_2$ [mm]	3,41	3,44	3,50	3,49	3,48
$b_3$ [mm]	12,79	12,80	12,78	12,80	12,75
$h_3$ [mm]	3,48	3,48	3,44	3,48	3,47
Largura média ( $b_{méd}$ ) [mm]	12,79	12,78	12,78	12,79	12,78
Espessura média ( $h_{méd}$ ) [mm]	3,46	3,48	3,43	3,48	3,49

No ensaio mecânico de flexão em três pontos, utilizou-se uma máquina de ensaios ZwickRoell Z100 (Alemanha) equipada com uma célula de carga de 100 kN. Segundo a norma ASTM D790-10, aplicou-se uma velocidade de ensaio de 2 mm/min, distância entre apoios de 56 mm e raios de apoios e punção de 5 mm. Na Figura 4.6 apresenta-se o resultado do ensaio para os provetes testados numa curva Tensão-Deformação.



**Figura 4.6 - Gráfico tensão-deformação do ensaio de flexão em três pontos do Nylon 12CF.**

Na Tabela 4.4 apresenta-se os valores de determinados pontos de interesse da curva tensão-deformação dos provetes testados, assim como, a sua média aritmética.

**Tabela 4.4 – Resultados do ensaio de flexão em três pontos do Nylon 12CF**

	Provete 1	Provete 2	Provete 3	Provete 4	Provete 5	Média
Módulo de Elasticidade à Flexão, $E_f$ [MPa]	4525.1	4373.2	3299.2	4373	4012.3	4116.56
Tensão de Cedência, $\sigma_c$ [MPa]	26.1	27.2	28.5	26.6	21.2	25.92
Tensão de Resistência à Flexão, $\sigma_{fM}$ [MPa]	67.37	65.35	63.29	64.64	66.35	65.40

Segundo a norma ASTM D 790, o ensaio de flexão em materiais plásticos reforçados deverá ser feito até que o provete atinga a rotura, caso esta ocorra antes do valor de 5% da deformação (limite do ensaio). No material em estudo, as tensões de resistência à flexão apresentadas na tabela correspondem à tensão para a deformação de 5%.

### 4.3. Técnica de Excitação por Impulso

Ficou claro, pela Equação 9, que a precisão do módulo elástico dinâmico estimado é altamente dependente da regularidade do corpo de prova e da incerteza relacionada com a medição das suas dimensões. Como as variáveis de espessura ( $t$ ) e comprimento ( $L$ ) na equação do módulo têm um expoente de 3, logo, um erro de 1% nestas dimensões originará um erro de 3% no módulo estimado. Assim, para reduzir as variações, os provetes foram polidos de forma a regularizar as suas dimensões.

Foi utilizado um micrómetro (com precisão de +/- 0.01mm) para realizar as diversas medições ao longo do provete, conforme a Figura 4.7.

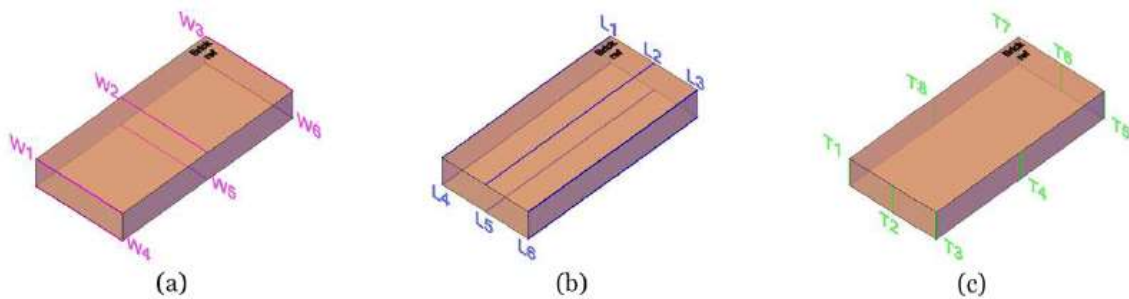


Figura 4.7 - Localização das 20 zonas a medir como micrómetro para cada provete. a) 6 medições na largura do provete, b) 6 medições no comprimento e c) 8 medições da espessura do corpo de prova [66].

Há a constatar, contudo, que não foi possível realizar certas medições, já que o corpo de prova tem dimensões pequenas o suficiente para que a área circular do micrómetro (do fuso e batente) abranja toda a espessura do provete, por exemplo. Assim, no caso do Provete A (ver capítulo 3.3 - Figura 3.14), as dimensões obtidas apresentam-se na Tabela 4.5.

Tabela 4.5 – Medidas geométricas do Provete A, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão.

Provete A [unidades em milímetros]							
$b_1$	33,77	$L_1$	133,47	$t_1$	6,08	$t_5$	6,15
$b_2$	33,75	$L_2$	133,65	$t_2$	6,11	$t_6$	6,12
$b_3$	33,73	$L_3$	133,57	$t_3$	6,11	$t_7$	6,08
				$t_4$	6,30	$t_8$	6,32
$b_{méd}=33,75$		$L_{méd}=133,56$		$t_{méd} = 6,16$			

Todos os outros provetes testados passaram de igual forma por esta medição e cálculo de valores médios, podem ser encontrados esses valores, de igual apresentação à tabela 4.5, no Anexo II.

Antes mesmo de se iniciar os testes de vibração, para além das dimensões geométricas é também necessário conhecer a massa de cada provete. São dados necessários para a o cálculo das propriedades elásticas do material. A massa foi determinada recorrendo a uma balança eletrónica com uma precisão de 0,1 mg, obtendo assim uma precisão superior a 0,1% da massa total do provete, tal como recomendado na norma [56]. As massas medidas de cada provete testado pela técnica de excitação por impulso apresentam-se na Tabela 4.6.

**Tabela 4.6 - Valores de massa de cada um dos provetes usados na técnica de excitação por impulso.**

	Massa [g]
Provete A	31.4590
Provete B	12,7721
Provete D	18,3958
Provete F	23,7136

O passo seguinte foi a marcação das linhas nodais, tanto para o modo de vibração flexional e torcional (ver capítulo 3.2.4. - Figura 3.7), conforme Figura 4.8.



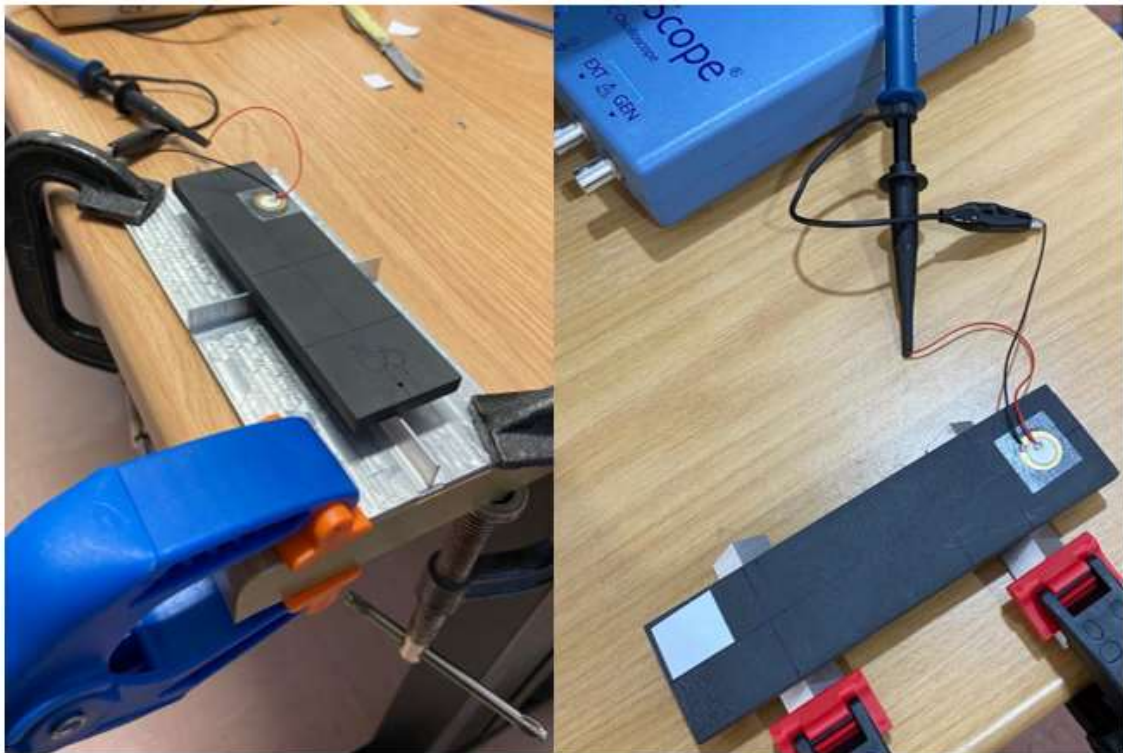
**Figura 4.8 - Provete A e B marcados com as linhas nodais para o modo de vibração flexional e torcional.**

Estas linhas mostram onde/como deverão ser apoiados os provetes para isolar os modos fundamentais que se pretendem ensaiar e ajudam na localização da posição do sensor e zona a impactar no provete.

Os suportes onde os provetes seriam assentes foram maquinados em alumínio. No caso do suporte para o ensaio do modo de vibração torcional, a aresta de contacto tem um raio de 1 mm. Já o suporte para o ensaio em modo de vibração flexional, tem “aresta viva”. O desenho técnico de ambos os tipos de suportes poderá ser encontrado no Anexo III.

O impacto será feito recorrendo a um “martelo” em que a sua cabeça é uma esfera de aço de 5 mm de diâmetro. O sensor utilizado é do tipo piezoelétrico de efeito bimorfe, que será ligado ao PicoScope responsável pelo registo (em função do tempo) do sinal elétrico (volts) gerado pelo sensor quando excitado.

Na Figura 4.9, é possível observar as duas formas de teste realizados a cada um dos provetes.



**Figura 4.9 – Esquerda: provete em posição para ensaio em modo de vibração torcional. Direita: provete em posição para ensaio em modo de vibração flexional.**

Analisando o provete A, no ensaio do modo de vibração flexional obteve-se o gráfico apresentado na Figura 4.10. Tem-se em abcissa o valor do tempo em milissegundos e em ordenada o valor de tensão (Volts) registado pelo sensor piezoelétrico devido à vibração que se propagou no material desde a zona de impacto até este.

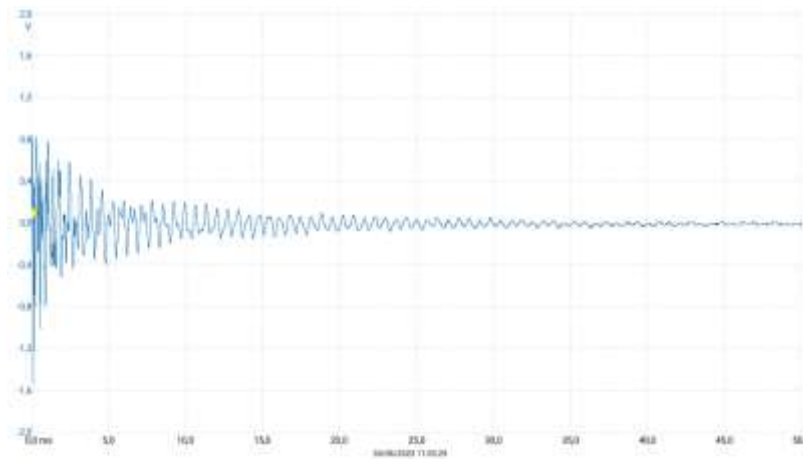


Figura 4.10 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete A.

Utilizando agora o *software* Origin2017, procedeu-se à transformada rápida de Fourier através dos valores do PicoScope em formato de texto (2 colunas). Através dessa transformação matemática, consegue-se passar do domínio do tempo para o domínio da frequência. Na Figura 4.11, apresenta-se o gráfico do espectro de frequências.

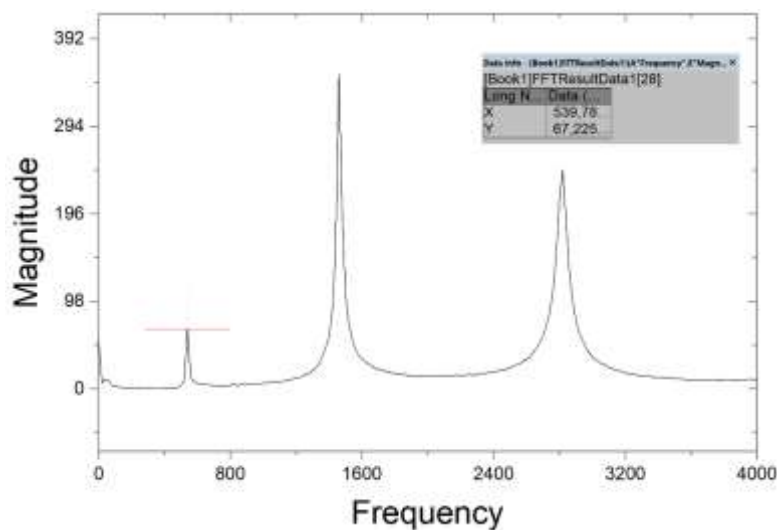


Figura 4.11 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete A.

O valor de  $f_f$  (frequência de ressonância principal à flexão) será retirado na primeira harmónica (primeiro pico do gráfico), esse valor é de 539,78 Hz. Pela teoria, poder-se-á prever quais serão as frequências da 2ª e 3ª harmónica. Para tal, dever-se-á multiplicar a frequência da 1ª harmónica pelo fator de 2,7 (para se obter a 2ª harmónica) e 5,4 (para se obter a 3ª harmónica). Esta previsão, ajuda a detetar a frequência principal de torção,  $f_t$ .

Colocando agora o provete na posição de ensaio para o modo de vibração torcional e depois do impacto no provete, obtém-se o gráfico apresentado na Figura 4.12.

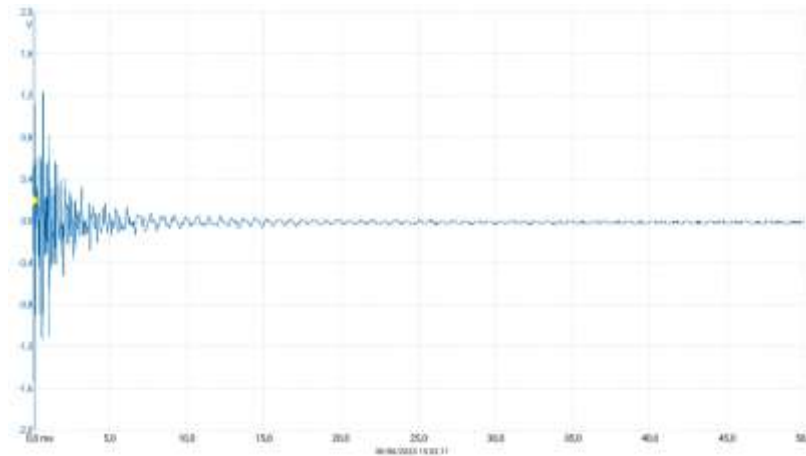


Figura 4.12 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete A.

Pela aplicação do mesmo tratamento de dados ao ficheiro originado no *software* PicoScope, através do *software* Origin2017, obteve-se o gráfico do espectro de frequências ilustrado na Figura 4.13.

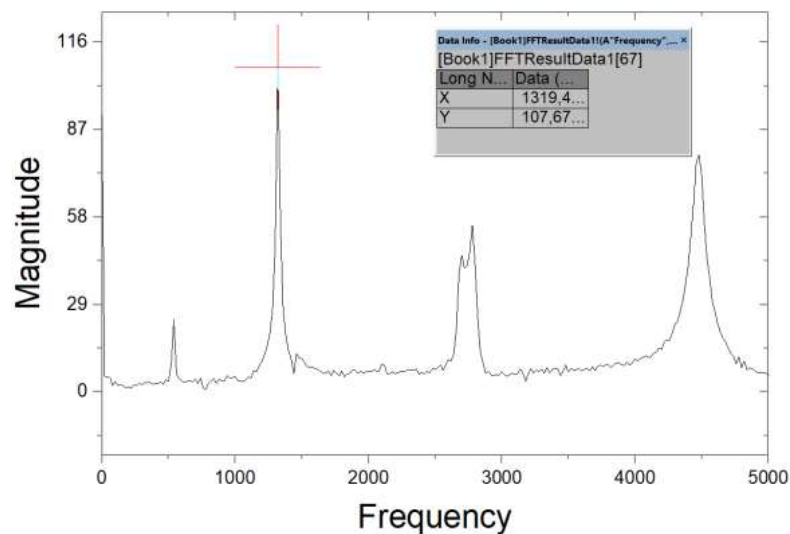
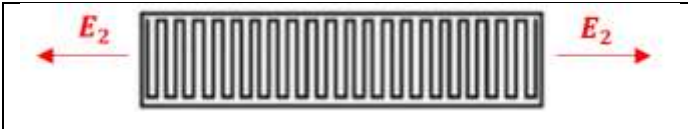


Figura 4.13 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete A.

Pela teoria, o pico do modo de vibração torcional encontrar-se-á muito próximo, e à esquerda, da 2ª harmónica (1489,8 Hz). Assim sendo, o maior valor perto desse ponto é a frequência de 1319,4 Hz, o que corresponde ao  $f_t$ .


Através destes 2 tipos de frequências e utilizando as equações descritas no subcapítulo 3.2.4., é possível obter as propriedades mecânicas apresentadas na Tabela 4.7.

**Tabela 4.7 - Propriedades mecânicas obtidas pela Técnica de Excitação por Impulso no provete A**

	
Módulo de elasticidade longitudinal, $E_2$ :	2,62 GPa
Módulo de elasticidade transversal, G:	1,04 GPa


Aplicando todo o método antes descrito, mas ao provete B, obtém-se as seguintes propriedades elásticas, apresentadas na Tabela 4.8.

**Tabela 4.8 - Propriedades mecânicas obtidas pela Técnica de Excitação por Impulso no provete B.**

	
Módulo de elasticidade longitudinal, $E_1$ :	13,13 GPa
Módulo de elasticidade transversal, G:	6,37 GPa

No caso do corpo de prova D (camadas +/- 45°), apresenta-se na Tabela 4.9 as propriedades mecânicas obtidas pela técnica de excitação por impulso.

**Tabela 4.9 - Propriedades mecânicas obtidas pela Técnica de Excitação por Impulso no provete D.**

	
Módulo de elasticidade longitudinal, $E_{45}$ :	3,99 GPa
Módulo de elasticidade transversal, $G_{12}$ :	2,60 GPa

No Anexo IV, apresenta-se para cada modo de ensaio (flexional e torcional) nos provetes A, B, D e F a frequência de vibração registada e o respetivo espectro de frequências obtidos pela transformada rápida de Fourier.

Pela literatura, através da Equação 32, é possível determinar o coeficiente de Poisson do provete D (construído por camadas +/-45°) através do conhecimento dos módulos de elasticidade dos provetes A ( $E_2$ ), B ( $E_1$ ), do módulo ao corte ( $G_{12}$ ) e do módulo de elasticidade longitudinal ( $E_{45}$ ) obtido no provete D [67].

$$v_{12} = \frac{E_1}{2} \left( \frac{1}{G_{12}} - \frac{4}{E_{45}} + \frac{1}{E_2} + \frac{1}{E_1} \right) \quad (35)$$


Esta equação, definida inicialmente para materiais compósitos reforçados com fibras e em que a sua construção no plano 1-2 fosse feita recorrendo a uma simetria (peça transversalmente isotrópica na direção 3), pode ser usada no processo de MEX. Outros Autores utilizaram igualmente esta equação para determinarem propriedades mecânicas de peças produzidas por MEX em material PLA e assumiram uma resposta elástica do material transversalmente isotrópica [68].

Assim sendo, pela equação anterior, obteve-se um coeficiente de Poisson,  $v_{12}$ , de 0,55 [adimensional].

Assumindo a isotropia transversal do provete D (+/-45°) na direção 3, estes construídos no plano x-y (1-2), é possível determinar o módulo de elasticidade e o módulo ao corte no plano 2-3 através do ensaio ao provete F.

Através de iguais ensaios de modo de vibração (flexional e torcional) e respetivo tratamento de dados como nos anteriores provetes, obteve-se as seguintes propriedades elásticas apresentadas na Tabela 4.10.

**Tabela 4.10 - Propriedades mecânicas obtidas pela Técnica de Excitação por Impulso no provete F.**

	
Módulo de elasticidade longitudinal, $E_3$ :	3,52 GPa
Módulo de elasticidade transversal, $G_{23}$ :	1,14 GPa

Através da Equação 20, apresentada no subcapítulo 3.2.4, o coeficiente de Poisson,  $v_{23}$ , obtido foi de 0,54 [adimensional].

#### 4.4. Análise de Micro-CT

Foi utilizado o equipamento Micro-CT Phoenix v|tomex|x m 240, localizado na empresa Micronsense – Leiria. Foram digitalizados 3 provetes em simultâneo, A, B e C, e em outro processo de aquisição de geometria, os provetes D, E e F. Foram posicionados e separados por uma espuma de baixa densidade de forma a prevenir que os provetes se movam durante o processo de aquisição de dados, conforme Figura 4.14. Devido à baixa densidade da espuma, esta é facilmente retirada dos dados obtidos.



Figura 4.14 - Provetes posicionados e separados por espuma de baixa densidade dentro do equipamento de Micro-CT.

O equipamento de Micro-CT estava equipado com um detetor de painel plano com resolução de 2024 x 2024 pixels, uma fonte de raios-X de 10 a 240 kV e uma corrente de 5 a 3000  $\mu$ A. A emissão dos raios X deste equipamento tem a configuração cónica. O tamanho do *voxel* (resolução espacial) das análises de microtomografia computadorizada foi de 47  $\mu$ m. Foram analisados 3 provetes em simultâneo em que o tempo total de aquisição foi de 16 minutos. Foram feitas 1194 projeções por cada análise, enquanto a voltagem e a corrente do tubo de raios-X foi de 100 kV e 400  $\mu$ A, respetivamente. Nenhum Filtro foi utilizado e o tempo de exposição foi ajustado para 131 ms.

Posteriormente, as projeções em escala de cinza foram processadas para reconstruir imagens completas 3D dos provetes (volume) através do *software Phoenix Dados X2 Reconstruction*. Na Figura 4.15, apresenta-se o resultado visual da reconstrução 3D do provete A usando o visualizador *myVGL*. É claramente perceptível os vazios existentes no provete (a cor preta) e

tanto o efeito de transição de sentido de deposição como o perímetro do provete (perceptível na vista apresentada no canto superior esquerdo da figura).

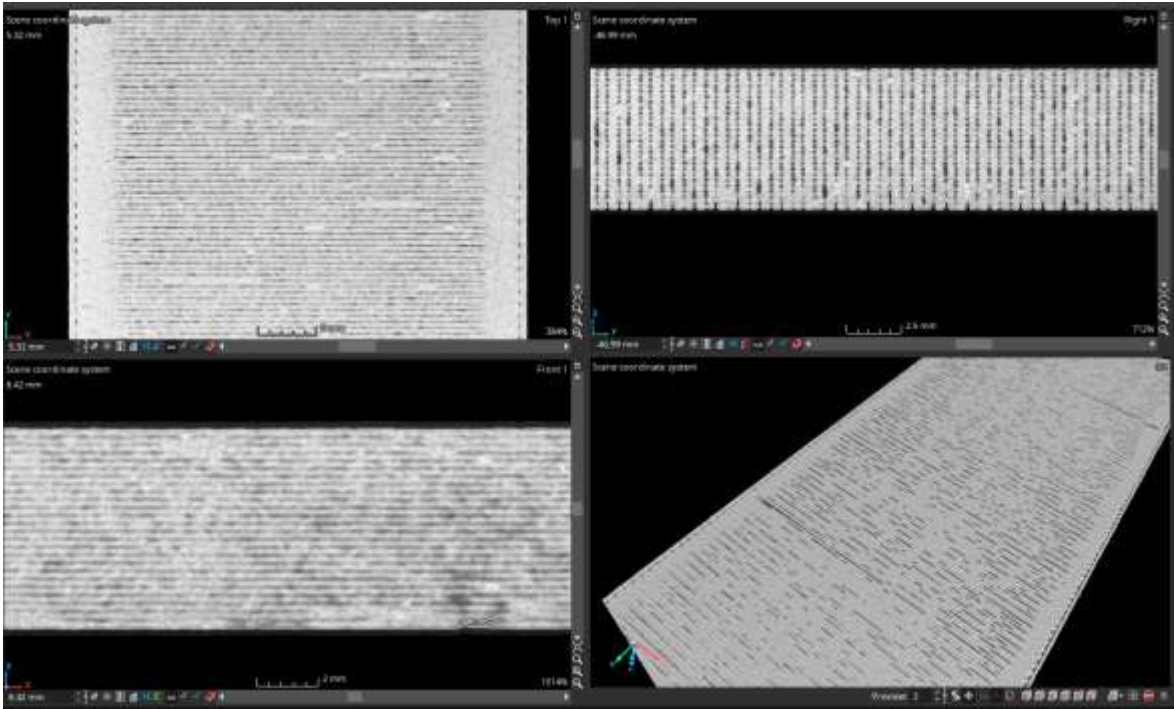


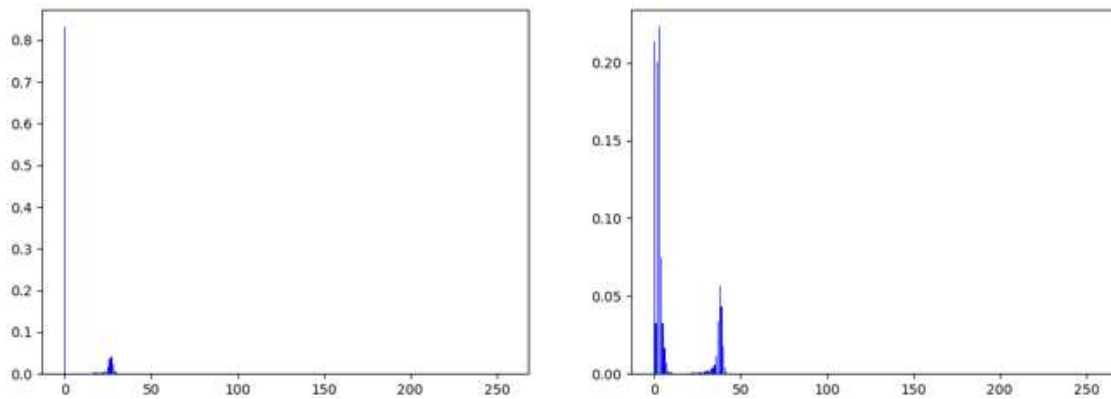
Figura 4.15 – Resultado da reconstrução 3D do provete A no visualizador *myVGL*.

No Anexo V, apresentam-se os restantes provetes analisados por esta técnica recorrendo ao *myVGL*.

A porosidade de cada corpo de prova poderia ter sido calculada através das ferramentas contidas em *software* dedicado à análise deste tipo de ficheiros, resultantes da técnica de Micro-CT. A empresa que prestou o serviço, utiliza o *software VGSTUDIO MAX 3.5* para a análise dos dados. Contudo, a prestação de serviço não englobava essa análise, mas sim a criação do modelo 3D dos corpos de prova.

Assim sendo, para o cálculo da porosidade recorreu-se ao método Otsu, apresentado no subcapítulo 3.2.6. Foi necessário utilizar as 1194 imagens 2D (raios X) geradas no processo de microtomografia computadorizada. O *threshold* calculado foi de 12 e 19 (análise A, B e C e a análise D, E e F, respetivamente), responsável pela definição e criação de duas regiões que irão representar o vazio (cor preta) e o material da peça (cor branca).

Na Figura 4.16, é possível de constatar os histogramas obtidos na aplicação do método Otsu.



**Figura 4.16 - À esquerda: histograma da aplicação do método Otsu à análise dos provetes A,B e C. À direita: histograma da aplicação do método Otsu à análise dos provetes D,E e F.**

Posteriormente, será quantificado o número de pixels a branco (material) e os pixels de cor preta (representação do poro/vazio). Desta forma, é possível obter a porosidade para cada provete, valores apresentados na Tabela 4.11.

**Tabela 4.11 – Valor percentual da porosidade de cada provete analisado.**

Provete:	Porosidade [%]:	Volume Analisado [ $mm^3$ ]:
A	0,8999	12036,473
B	2,9785	13504,214
C	2,9112	14347,174
D	0,2552	12028,484
E	0,3506	12028,484
F	0,8442	11586,261

Todo o processo do método Otsu para calcular a porosidade foi feito através de programação em *Python*.

## 5. Discussão

O ensaio de tração, para ser concretizado, necessita de equipamento próprio e com um custo de máquina e acessórios na ordem das dezenas a centenas de milhares de euros. É um processo de caracterização fortemente conhecido/utilizado na obtenção de propriedades mecânicas de materiais, contudo, um processo de ensaio destrutivo. Os provetes testados à tração apresentaram rotura frágil e não apresentaram estricção antes da rotura.

Já no ensaio de flexão em três pontos, os provetes não apresentaram rotura até aos 5% da deformação, de salientar que, a direção do carregamento era perpendicular com a direção de deposição das camadas. Os valores obtidos no ensaio de flexão em três pontos, especialmente o valor do módulo elástico à flexão, não podem ser considerados 100% fidedignos. A célula de carga, em baixos valores de força e respetivo alongamento (flecha), apresentou uma linha muito instável, tanto os valores se apresentavam em crescimento como de imediato em decrescimento. A célula de carga de 100 kN poderá ter uma precisão baixa e/ou apresentar ruído.

A técnica de excitação por impulso, comparada às técnicas antes descritas, é uma forma de caracterizar as propriedades mecânicas de um material, mas recorrendo a equipamentos de valor bem menor, apenas na ordem das centenas a milhares de euros. É um processo bastante menos reconhecido, contudo, apresenta valores fidedignos e de alta repetibilidade. A sua aplicação a materiais anisotrópicos tem sido, essencialmente, a materiais compósitos com fibras contínuas e em matriz termoendurecível. A aplicação desta técnica para a caracterização de peças produzidas por fabrico aditivo apresenta elevado interesse académico e industrial. Poder-se-á, no caso do processo MEX, estimar as propriedades elásticas (E, G e Coeficiente de Poisson) nas três direções do referencial cartesiano do material. O processo é não destrutivo e precisa de amostras (provetes) de baixas dimensões. O processo de obtenção de dados é de baixa simplicidade, a transformação de dados (recorrendo à transformada de Fourier) poderá ser feito recorrendo a *software* aberto ou não. Já a interpretação dos resultados, especialmente para materiais anisotrópicos ou ortotrópicos, necessita de algum cuidado e experiência.

Entre os ensaios produzidos ao longo desta obra, é possível apresentar algumas propriedades comparáveis, na Tabela 5.1.

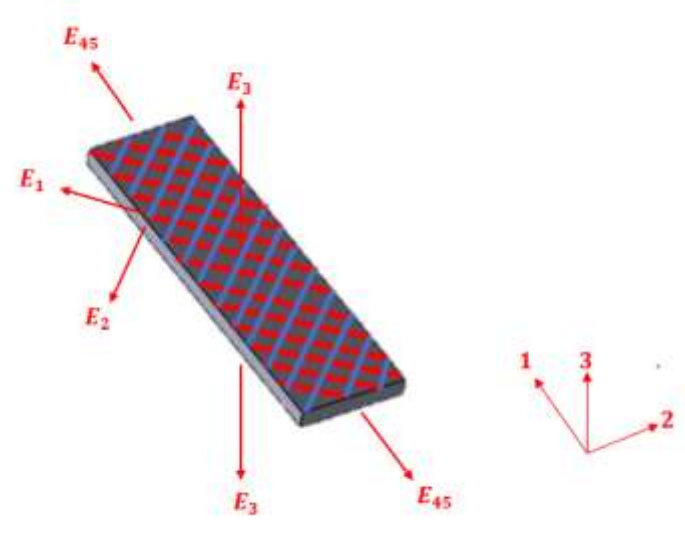
**Tabela 5.1 - Comparação de Valores obtidos pelas técnicas de caracterização**

	Ensaio de Tração	Técnica de Excitação por Impulso
Módulo de Young, $E_{45}$ [MPa]	3070,92	3987,27
Coefficiente de Poisson, $\nu_{12}$ [adimensional]	0,57	0,55

Para que houvesse um maior número de valores a comparar, seria necessário testar provetes de tração que contemplassem outras direções de construção em função do eixo longitudinal do provete. Ter-se-ia de testar provetes de tração construídos de igual forma ao provete E e F da técnica de excitação por impulso. A diferença entre os valores de Poisson é bastante reduzido. Em relação aos módulos de Young obtidos, existe uma diferença de 22,98%, que pode ser justificada pelas velocidades de ensaio de cada técnica. No ensaio de tração a velocidade é de 1mm/min, enquanto na técnica de excitação por impulso as velocidades de vibração são de uma ordem de grandeza bastante superiores. Daí, neste último módulo elástico, ser também reconhecido na literatura como módulo elástico dinâmico.

Apresenta-se, na Tabela 5.2, de forma resumida os valores obtidos pelas diferentes técnicas no provete D.

**Tabela 5.2 - Tabela resumo das propriedades mecânicas obtidas pelas técnicas utilizadas no provete D.**



	Ensaio de Tração	Técnica de Excitação por Impulso	Ensaio de Flexão em Três Pontos
Módulo de Elasticidade, $E_{45}$ [MPa]	3070,92	3987,27	-
Módulo de elasticidade paralelo à direção de deposição dos filamentos, $E_1$ [MPa]	-	13130,90	-
Módulo de elasticidade perpendicular à direção de deposição dos filamentos, $E_2$ [MPa]	-	2620,98	-
Módulo de elasticidade na direção 3, $E_3$ [MPa]	-	3518,84	-
Módulo de Elasticidade à Flexão, $E_f$ [MPa]	-	-	4116.56
Módulo de Elasticidade Transversal, $G_{12}$ [MPa]		2600,5	
Módulo de Elasticidade Transversal, $G_{23}$ [MPa]		1139,2	
Coefficiente de Poisson, $\nu_{12}$ [adimensional]	0,57	0,55	-
Coefficiente de Poisson, $\nu_{23}$ [adimensional]	-	0,54	-
Tensão de Cedência na tração, $\sigma_c$ [MPa]	30.71	-	-
Tensão de Cedência na flexão, $\sigma_c$ [MPa]	-	-	25.92
Tensão de Resistência à Tração, $\sigma_R$ [MPa]	48.43	-	-
Tensão de Resistência à Flexão, $\sigma_{fM}$ [MPa]	-	-	65.40

Fica evidente, que as tensões de engenharia só foram possíveis de obter pelos ensaios mecânicos de tração e flexão.

Na ficha técnica da Stratasys sobre o material em estudo (Anexo I) constata-se que não são apresentados valores de propriedades mecânicas testadas à tração e flexão para os provetes construídos no plano, x-y (proвете D). São sim apresentados valores para provetes construídos com densidade de “100%” e um padrão de +/- 45° na orientação XZ (proвете E) e ZX (proвете F). Assim sendo, o único valor comparável dos dados obtidos neste trabalho com a ficha técnica do material é o módulo de Young numa única direção de construção. Pela técnica de excitação por impulso, o módulo de Young,  $E_3$ , teve o valor de 3,52 GPa e o módulo de Young na ficha técnica do material para a orientação de construção ZX é de 3,00 GPa. Existe, portanto, uma diferença de 14,28% entre os valores.

Existem poucos dados na literatura sobre propriedades mecânicas do material em estudo obtidas por ensaios de tração, contudo, é possível encontrar alguma semelhança com os valores obtidos nesta obra [69].

Como já referido neste trabalho, existe o conhecimento da altura depositada, mas não o diâmetro do nozzle que o equipamento Fortus 900 utiliza, o que torna mais difícil a comparação com outros dados na literatura sobre a porosidade. Uma altura de camada de 0,254 mm não é comum de encontrar nos diversos artigos publicados. Pela literatura disponível, onde a altura de camada é de 0,2 mm (processo MEX) e o material utilizado é um polímero não carregado, os valores de porosidade encontram-se entre 3% a 7%. Este intervalo de valores foi obtido para provetes com densidade teórica de 100% e para as direções de deposição a 0°, 90° e +/- 45° [70][71]. Os dados obtidos neste trabalho pela análise de Micro-CT e posterior aplicação do método Otsu, originaram valores entre 0,25% a 2,97 %. Dos 6 provetes analisados, 4 deles apresentaram valores de porosidade inferiores a 1%. Assim sendo, não se podem considerar fidedignos os valores obtidos. Poder-se-á justificar pela baixa resolução utilizada na microtomografia computadorizada. O tamanho de voxel foi de 47  $\mu\text{m}$  de aresta, logo, valores de poro inferiores não seriam contabilizados. Este valor de resolução poderia ter sido superior caso não se tivesse executado a análise de Micro-CT a 3 provetes em simultâneo, o que obrigou a um afastamento do emissor dos raios-X e a consequente perda de resolução.

## 6. Conclusões

O fabrico aditivo é claramente um processo de construção que muitas vantagens oferece à indústria e à sociedade no geral. O conhecimento das propriedades mecânicas é fundamental para que se possa dimensionar com segurança peças produzidas por fabrico aditivo.

No ensaio de tração, os provetes apresentaram rotura frágil e não apresentaram estricção antes da rotura. No ensaio de flexão em três pontos, os provetes não apresentaram rotura até aos 5% de deformação (valor imposto como limite de ensaio na norma ASTM D790). As tensões de engenharia e módulo de elasticidade à flexão obtidos nos ensaios, não se podem considerar completamente fidedignos. A célula de carga apresentava oscilações em tensões baixas durante o ensaio.

Nos ensaios realizados com a técnica de excitação por impulso, os valores obtidos apresentaram-se com bastante repetibilidade. Na comparação dos valores obtidos por esta técnica com a de ensaios de tração, a diferença do valor de módulo de Young foi de 22,98%. Já na comparação do coeficiente de Poisson obtido no ensaio de tração com a técnica de excitação por impulso, houve uma diferença de 3,5%.

Comparativamente com os dados obtidos nos ensaios realizados e os fornecidos pela ficha técnica do material, apenas se pode comparar uma propriedade mecânica. O valor do módulo de Young,  $E_3$ , obtido na técnica de excitação por impulso tem o mesmo significado que o módulo de elasticidade no provete ZX da ficha técnica, onde a diferença de resultados é de 14,28%.

Os valores obtidos de propriedades mecânicas apresentam-se semelhantes com dados na literatura para o mesmo material. A comparação de um maior número de valores de propriedades mecânicas implicaria o ensaio a provetes com outras direções de construção (especialmente pelos ensaios de tração). Preferiu-se, de forma conservadora, testar primeiro a existência de semelhança, ou não, entre valores obtidos por ambas as técnicas. Ao mesmo tempo, a produção de uma placa no plano x-y, para posterior maquinação dos provetes de tração, foi escolhida para evitar construções em altura, propensas a problemas durante a construção.

Em relação aos dados obtidos sobre a porosidade dos provetes A, B, C, D, E e F, os valores foram bastante distintos dos encontrados na literatura. Quatro dos provetes apresentaram valores inferiores a 1% e o valor máximo obtido foi de 2,97%, já pela literatura os valores comumente encontrados apresentam-se entre 3% a 7%. A resolução na análise de Micro-CT foi de 47  $\mu\text{m}$  (tamanho da aresta do *voxel*), valor que poderia ser inferior (aumento de resolução) se não tivesse sido feito a análise a três provetes em simultâneo.

O entendimento do comportamento mecânico de uma peça construída por MEX e por este tipo de material, permite que indústrias como a dos transportes, de máquinas e equipamentos industriais, indústria automóvel e quiçá, a indústria aeronáutica e aeroespacial à sua utilização em serviço. As possíveis limitações poderão ser a temperatura de serviço (devido à matriz polimérica) e a existência de porosidade, que inviabilizará a sua utilização em peças onde a estanquicidade seja requisito e são zonas onde se podem iniciar/propagar fissuras.

### **6.1. Trabalhos Futuros:**

Como trabalhos futuros, de forma a complementar este trabalho, sugiro:

- A aplicação da homogeneização assintótica ao material em estudo. Realizar ensaios mecânicos de tração ao filamento Nylon 12CF, para se obter o seu módulo de Young e coeficiente de Poisson. Desta forma, e através de dados de porosidade da análise de Micro-CT, conhecer a porosidade e distribuição das fibras ao longo do filamento e aplicar o método matemático para obter as propriedades homogeneizadas do filamento (constituído por fibras de carbono curtas e uma matriz polimérica de poliamida). Numa análise macroscópica, realizar iguais operações, mas de forma a obter dados da estrutura impressa (material e vazios existentes entre determinadas zonas de contacto entre diversos filamentos na mesma camada e/ou adjacentes), de forma a comparar diretamente com os valores obtidos na técnica de excitação por impulso.
- Realizar ensaios de tração em outras direções, as não executadas neste trabalho.
- Aplicar a técnica de excitação por impulso a outras direções, as não realizadas neste trabalho, mas indicadas.

## Referências

- [1] C. Relvas, *O Mundo da Impressão 3D e o Fabrico Digital*, Quântica E. Porto: Publindústria - engebook, 2018.
- [2] P. Diogo, “Caracterização e Avaliação dos Parâmetros de Fabrico nas Propriedades Mecânicas de um Material Compósito Obtido por Impressão 3D,” Instituto Técnico de Lisboa, 2018.
- [3] A. Persaud, A. Maus, L. Strait, and D. Zhu, “3D Bioprinting with Live Cells,” in *Engineered Regeneration*, 2022, vol. 3, no. 3, pp. 292–309, doi: 10.1016/j.engreg.2022.07.002.
- [4] C. D. F. T. Sampaio, “Importância da rugosidade da superfície implantar,” Universidade Fernando Pessoa - Faculdade de Ciências da Saúde, 2015.
- [5] M. Tomlin and J. Meyer, “Topology Optimization of an Additive Layer Manufactured (ALM) Aerospace Part,” *7th Altair CAE Technol. Conf. 2011*, pp. 1–9, 2011.
- [6] S. Kobenko, D. Dejus, J. Jatnieks, D. Pazars, and T. Glaskova-Kuzmina, “Structural Integrity of the Aircraft Interior Spare Parts Produced by Additive Manufacturing,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 8, 2022, doi: 10.3390/polym14081538.
- [7] H. Klippstein, A. Diaz De Cerio Sanchez, H. Hassanin, Y. Zweiri, and L. Seneviratne, “Fused Deposition Modeling for Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Review,” *Adv. Eng. Mater.*, vol. 20, no. 2, pp. 1–17, 2018, doi: 10.1002/adem.201700552.
- [8] Formlabs, “How the Concept Cars of Tomorrow Are Made With 3D Printing,” 2022. <https://formlabs.com/blog/concept-car-3d-printing/> (accessed Sep. 28, 2022).
- [9] MINI, “Mini Yours Customised. Personalizado, Único e Especial,” 2018. [https://www.mini.pt/pt\\_PT/home/news/mini-yours-customised.html](https://www.mini.pt/pt_PT/home/news/mini-yours-customised.html) (accessed Sep. 28, 2022).
- [10] R. Leal *et al.*, “Additive manufacturing tooling for the automotive industry,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 92, no. 5–8, pp. 1671–1676, 2017, doi: 10.1007/s00170-017-0239-8.

- [11] Formlabs, “Reducing Cost in Manufacturing with 3D Printing,” 2017. <https://formlabs.com/blog/reducing-costs-and-lead-time-in-manufacturing-with-3d-printed-jigs-fixtures-and-toolings/> (accessed Sep. 28, 2022).
- [12] J. Huetter, “Partly 3-D-printed supercar Divergent 3D Blade,” *Repairer Driven News*, 2016. <https://www.repairerdrivennews.com/2016/11/21/partly-3-d-printed-supercar-divergent-blade-shown-off-at-l-a-auto-show/> (accessed Sep. 28, 2022).
- [13] Bugatti, “World Premiere: Brake Caliper From 3-D Printer,” 2018. <https://www.bugatti.com/media/news/2018/world-premiere-brake-caliper-from-3-d-printer/> (accessed Sep. 28, 2022).
- [14] A. Williams, “Ford Creates ‘Largest 3D-Printed Metal Part’ For a Vehicle in Five Days,” *3D Printing Industry*, 2019. <https://3dprintingindustry.com/news/ford-creates-largest-3d-printed-metal-part-for-a-vehicle-in-five-days-148284/> (accessed Sep. 28, 2022).
- [15] H. Das Akash, “Additive Manufacturing in the Jewelry Industry - Design and Production,” Tallinn University of Technology - School of Engineering, 2021.
- [16] M. R. ul Haq, A. Nazir, S.-C. Lin, and J.-Y. Jeng, “Design and performance evaluation of multifunctional midsole using functionally gradient wave springs produced using multijet fusion additive manufacturing process,” *Mater. Today Commun.*, vol. 31, no. 43, p. 20, 2022, doi: 10.1016/j.mtcomm.2022.103505.
- [17] B. Dunne, “These 3D-Printed Sneakers Are Nike’s Next Big Step Forward,” 2018. <https://solecollector.com/news/2018/04/nike-flyprint-3d-printed-zoom-vaporfly-elite-sneaker-review> (accessed Sep. 28, 2022).
- [18] J. I. Lipton, M. Cutler, F. Nigl, D. Cohen, and H. Lipson, “Additive manufacturing for the food industry - A review,” *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 43, no. 1, pp. 114–123, 2015, doi: 10.1016/j.tifs.2015.02.004.
- [19] M. Munsch, “Laser additive manufacturing of customized prosthetics and implants for biomedical applications,” in *Laser Additive Manufacturing: Materials, Design, Technologies, and Applications*, Elsevier Ltd, 2017, pp. 399–420.
- [20] A. Tejo-Otero, I. Buj-Corral, and F. Fenollosa-Artés, “3D Printing in Medicine for

- Preoperative Surgical Planning: A Review,” *Ann. Biomed. Eng.*, vol. 48, no. 2, pp. 536–555, 2020, doi: 10.1007/s10439-019-02411-0.
- [21] C. Liu and Z. Xia, “Additive manufacturing innovation for musculoskeletal tissue repair and regeneration : from bench to bedside,” vol. 3, no. 2, pp. 99–101, 2022, doi: 10.12336/biomatertransl.2022.02.002.
- [22] M. Srinivas and B. S. Babu, “A Critical Review on Recent Research Methodologies in Additive Manufacturing,” *Mater. Today Proc.*, vol. 4, no. 8, pp. 9049–9059, 2017, doi: 10.1016/j.matpr.2017.07.258.
- [23] H. Almeida, J. Vasco, and V. Ribeiro, “Current and Future Trends of 3D Food Printing,” 2021, doi: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3\\_30](https://doi.org/10.1007/978-3-030-75315-3_30).
- [24] G. H. Ahmed, “A review of ‘3D concrete printing’: Materials and process characterization, economic considerations and environmental sustainability,” *J. Build. Eng.*, vol. 66, no. November 2022, 2023, doi: 10.1016/j.job.2023.105863.
- [25] J. F. P. Lovo and C. A. Fortulan, “Estudo de propriedades mecânicas e anisotropia em peças fabricadas por manufatura aditiva tipo FDM,” *I Simpósio do Programa Pós-Graduação em Eng. Mecânica da EESC-USP*, no. 1, pp. 2–8, 2016.
- [26] S. H. Masood, “Intelligent rapid prototyping with fused deposition modelling,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 2, no. 1, pp. 24–33, 1996, doi: 10.1108/13552549610109054.
- [27] K. S. Boparai, R. Singh, and H. Singh, “Development of rapid tooling using fused deposition modeling: A review,” *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 2, pp. 281–299, 2016, doi: 10.1108/RPJ-04-2014-0048.
- [28] C. Armstrong, “Post processing for FDM printed parts,” 2021. <https://www.3dhubs.com/knowledge-base/post-processing-fdm-printed-parts/>.
- [29] Hubs, “What are the optimal shell and infill parameters for FDM 3D printing?,” 2022. <https://www.hubs.com/knowledge-base/selecting-optimal-shell-and-infill-parameters-fdm-3d-printing/> (accessed Sep. 29, 2022).
- [30] J. O’Connell, “3D Printing Infill: The Basics for Optimal Results,” *ALL3DP*, 2022. <https://all3dp.com/2/infill-3d-printing-what-it-means-and-how-to-use-it/> (accessed Sep. 29, 2022).

- [31] V. E. Kuznetsov, A. N. Solonin, O. D. Urzhumtsev, R. Schilling, and A. G. Tavitov, “Strength of PLA components fabricated with fused deposition technology using a desktop 3D printer as a function of geometrical parameters of the process,” *Polymers (Basel)*, vol. 10, no. 3, 2018, doi: 10.3390/polym10030313.
- [32] S. Herman, “The Influence of Extrusion Temperature on Layer Adhesion,” *CNC Kitchen*, 2020. <https://www.cnckitchen.com/blog/the-influence-of-extrusion-temperature-on-layer-adhesion> (accessed Sep. 29, 2022).
- [33] A. Kampker, J. Triebs, S. Kawollek, P. Ayvaz, and S. Hohenstein, “Review on machine designs of material extrusion based additive manufacturing (AM) systems - Status-Quo and potential analysis for future AM systems,” *Procedia CIRP*, vol. 81, pp. 815–819, 2019, doi: 10.1016/j.procir.2019.03.205.
- [34] H. Zhao, X. Liu, W. Zhao, G. Wang, and B. Liu, “An Overview of Research on FDM 3D Printing Process of Continuous Fiber Reinforced Composites,” *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1213, no. 5, pp. 0–10, 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1213/5/052037.
- [35] J. D. Santos, A. Fernández, L. Ripoll, and N. Blanco, “Experimental Characterization and Analysis of the In-Plane Elastic Properties and Interlaminar Fracture Toughness of a 3D-Printed Continuous Carbon Fiber-Reinforced Composite,” *Polymers (Basel)*, vol. 14, no. 3, 2022, doi: 10.3390/polym14030506.
- [36] D. Sher, “Markforged founder Greg Mark leaves company,” *3D Printing Media Network*, 2022. <https://www.3dprintingmedia.network/markforged-founder-greg-mark-leaves-company/> (accessed Sep. 30, 2022).
- [37] Stratasys, “FDM Nylon 12 Carbon Fiber,” *Material Guide*, 2021. [file:///C:/Users/pedro/Downloads/FDM Nylon 12CF - EN Material Guide.pdf](file:///C:/Users/pedro/Downloads/FDM%20Nylon%2012CF%20-%20EN%20Material%20Guide.pdf) (accessed Sep. 30, 2022).
- [38] M. Anton, “Materials News 2017 - Iberia workshop,” 2017. [Online]. Available: [file:///C:/Users/pedro/Downloads/1\\_Whats new with materials\\_Iberia April2017\\_pixel \(1\).pdf](file:///C:/Users/pedro/Downloads/1_Whats%20new%20with%20materials_Iberia%20April2017_pixel%20(1).pdf).
- [39] “A Curva Tensão Deformação,” *CIMM*, 2023. [https://www.cimm.com.br/portal/material\\_didatico/6537-a-curva-tensao-deformacao](https://www.cimm.com.br/portal/material_didatico/6537-a-curva-tensao-deformacao) (accessed May 15, 2023).

- [40] J. F. De Souza, “Estudo Para Diminuição Do Grau De Redução Por Passe Na Laminação a Frio De Um Fio De Aço Baixo Carbono,” UFRGS - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.
- [41] M. F. Ashby, *Materials Selection in Mechanical Design, Fourth Edition*, 4<sup>o</sup> Edition. Elsevier, 2011.
- [42] B. D. Ratner, A. S. Hoffman, F. J. Schoen, and J. E. Lemons, *Biomaterials Science, An Introduction to Materials in Medicine 2nd Edition Edited*. Elsevier Academic Press, 2004.
- [43] J. A. dos Santos, “Estudo de modelos e caracterização do comportamento mecânico da madeira,” Universidade do Minho, 2007.
- [44] T. C. T. Ting and T. Chen, “Poisson’s ratio for anisotropic elastic materials can have no bounds,” *Q. J. Mech. Appl. Math.*, vol. 58, no. 1, pp. 73–82, 2005, doi: 10.1093/qjmamj/hbh021.
- [45] N. T. Davies, C. M. Altaner, and L. A. Apiolaza, “Elastic constants of green *Pinus radiata* wood,” *New Zeal. J. For. Sci.*, vol. 46, no. 1, pp. 1–6, 2016, doi: 10.1186/s40490-016-0075-x.
- [46] M. F. S. F. de Moura, A. B. de Moraes, and A. G. de Magalhães, *Materiais Compósitos-Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, 2<sup>a</sup> Edição. Porto: Publindústria - engebook, 2011.
- [47] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhães, and M. F. S. F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2007.
- [48] R. P. Andolfato, J. S. Camacho, and G. A. de Brito, “Extensometria Básica,” *Ilha Solterria*, 2004. [Online]. Available: <https://www.feis.unesp.br/Home/departamentos/engenhariacivil/nepae/extensometria-basica.pdf>.
- [49] C. A. G. de M. Branco, *Mecânica dos Materiais*, 5<sup>a</sup>. Lisboa, Portugal: Fundação Calouste Gulbenkian, 2011.
- [50] M. A. Bussmann, “Condicionamento de sinal para sistema de aquisição de dados em superfícies metálicas finas,” Instituto Politécnico de Bragança - Escola Superior de

- Tecnologia e Gestão, 2020.
- [51] OMEGA™, “60° STRAIN DELTA ROSETTE Planar Compact Geometry,” 2015. [https://br.omega.com/pptst/SGD\\_3-ELEMENT60.html](https://br.omega.com/pptst/SGD_3-ELEMENT60.html) (accessed May 19, 2023).
- [52] OMEGA™, “PRECISION STRAIN GAGES 2-ELEMENT, 90° BIAXIAL ROSETTE,” 2015. [https://br.omega.com/pptst/SGD\\_2-ELEMENT90.html](https://br.omega.com/pptst/SGD_2-ELEMENT90.html) (accessed May 19, 2023).
- [53] L. B. Otani, A. H. A. Pereira, J. D. D. Melo, and S. C. Amico, “Elastic Moduli characterization of composites using the Impulse Excitation Technique,” 2014. doi: 10.13140/RG.2.2.34302.66886.
- [54] L. B. Otani, P. G. de A. Segundinho, E. A. M. Morales, and A. H. A. Pereira, “Caracterização dos módulos elásticos de madeiras e derivados utilizando a Técnica de Excitação por Impulso,” 2022. doi: 10.13140/RG.2.2.19622.60488.
- [55] R. J. C. Geraldo, “Avaliação das propriedades elásticas de materiais a elevada temperatura pela técnica de excitação por impulso,” Universidade de Coimbra - Faculdade de Ciências e Tecnologia, 2013.
- [56] ASTM Standard E1876-01, “Standard Test Method for Dynamic Young’s Modulus, Shear Modulus, and Poisson’s Ratio by Impulse Excite of Vibration,” pp. 1–16, 2001.
- [57] A. Maurício, M. Pereira, I. Flores-Colen, L. Silva, and A. Fontes, “Microtomografia computadorizada de raios X aplicada ao estudo de argamassas,” 2012. [Online]. Available: [https://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/Paper\\_111\\_2012.pdf](https://www.apfac.pt/congresso2012/comunicacoes/Paper_111_2012.pdf).
- [58] J. M. dos Reis Neto *et al.*, “A microtomografia computadorizada de raios x integrada à petrografia no estudo tridimensional de porosidade em rochas,” *Rev. Bras. Geociências*, vol. 41, no. 3, pp. 498–508, 2011, doi: 10.25249/0375-7536.2011413498508.
- [59] R. Ketcham, “X-ray Computed Tomography (CT),” *Geochemical Instrumentation and Analysis*, 2022. [https://serc.carleton.edu/research\\_education/geochemsheets/techniques/CT.html](https://serc.carleton.edu/research_education/geochemsheets/techniques/CT.html) (accessed Feb. 25, 2023).
- [60] A. du Plessis *et al.*, “Standard method for microCT-based additive manufacturing


- quality control 1: Porosity analysis,” *MethodsX*, vol. 5, no. September, pp. 1102–1110, 2018, doi: 10.1016/j.mex.2018.09.005.
- [61] ASTM, “Standards & Publications,” *American Society for Testing and Materials*, 2023. <https://www.astm.org/products-services/standards-and-publications.html> (accessed Feb. 25, 2023).
- [62] ISO, “Standards by ISO/TC 261 Additive manufacturing,” *International Organization for Standardization*, 2023. <https://committee.iso.org/sites/isoorg/contents/data/committee/62/90/629086/x/catalogue/p/1/u/1/w/1/d/1> (accessed Feb. 25, 2023).
- [63] N. Otsu, “A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms,” *IEEE Trans. Syst. Man. Cybern.*, vol. C, no. 1, pp. 62–66, 1979, doi: 10.1109/TSMC.1979.4310076.
- [64] A. Greensted, “Otsu Thresholding,” *The Lab Book Pages*, 2010. <http://www.labbookpages.co.uk/software/imgProc/otsuThreshold.html> (accessed Aug. 07, 2023).
- [65] F. Rezaei, H. Izadi, H. Memarian, and M. Baniassadi, “The effectiveness of different thresholding techniques in segmenting micro CT images of porous carbonates to estimate porosity,” *J. Pet. Sci. Eng.*, vol. 177, no. December 2018, pp. 518–527, 2019, doi: 10.1016/j.petrol.2018.12.063.
- [66] N. Makoond, L. Pelà, and C. Molins, “Dynamic elastic properties of brick masonry constituents,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 199, no. December, pp. 756–770, 2019, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.12.071.
- [67] J. M. Hennessey, J. M. Whitney, and M. B. Riley, “Experimental Methods for Determining Shear Modulus of Fiber Reinforced Composite Materials,” 1965. [Online]. Available: <https://apps.dtic.mil/sti/citations/AD0623316>.
- [68] Y. Song, Y. Li, W. Song, K. Yee, K. Y. Lee, and V. L. Tagarielli, “Measurements of the mechanical response of unidirectional 3D-printed PLA,” *Mater. Des.*, vol. 123, pp. 154–164, 2017, doi: 10.1016/j.matdes.2017.03.051.
- [69] M. Athale, T. Park, R. Hahnen, and F. Pourboghrat, “Experimental characterization

- and finite element simulation of FDM 3D printed polymer composite tooling for sheet metal stamping,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 121, no. 9–10, pp. 6973–6989, 2022, doi: 10.1007/s00170-022-09801-0.
- [70] X. Wang, L. Zhao, J. Y. H. Fuh, and H. P. Lee, “Effect of porosity on mechanical properties of 3D printed polymers: Experiments and micromechanical modeling based on X-ray computed tomography analysis,” *Polymers (Basel)*, vol. 11, no. 7, 2019, doi: 10.3390/polym11071154.
- [71] A. R. Zekavat, A. Jansson, J. Larsson, and L. Pejryd, “Investigating the effect of fabrication temperature on mechanical properties of fused deposition modeling parts using X-ray computed tomography,” *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 100, no. 1–4, pp. 287–296, 2019, doi: 10.1007/s00170-018-2664-8.

# Anexos

## Anexo I – Ficha Técnica da Stratasys do Nylon 12CF

Spec Sheet



# FDM Nylon 12CF

FDM Nylon 12CF™ is a carbon-filled thermoplastic with excellent structural characteristics. The material is comprised of a blend of Nylon 12 resin and chopped carbon fiber, at a loading of 35% by weight. This combination produces one of the strongest thermoplastics in the FDM® material portfolio. It has the highest flexural strength of any FDM thermoplastic, resulting in the highest stiffness-to-weight ratio.

Appropriate uses include strong but lightweight tooling applications and functional prototypes in the aerospace, automotive, industrial and recreational manufacturing industries. FDM Nylon 12CF is available on the Fortus 380mc Carbon Fiber Edition, Fortus 450mc™ and Stratasys F900™ 3D Printers and is compatible with SR-110™ support material.

Mechanical Properties	Test Method	XZ Axis	ZX Axis
Tensile Strength, Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	63 MPa (9,190 psi)	29 MPa (4,170 psi)
Tensile Strength, Ultimate (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	76 MPa (10,960 psi)	34 MPa (4,990 psi)
Tensile Modulus (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	7.6 GPa (1,100 ksi)	2.3 GPa (330 ksi)
Tensile Elongation at Break (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	1.9%	1.2%
Tensile Elongation at Yield (Type 1, 0.125", 0.2"/min)	ASTM D638	0.9%	1.1%
Flexural Strength (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	142 MPa (20,660 psi)	58 MPa (8,430 psi)
Flexural Modulus (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	10.3 GPa (1,500 ksi)	2.07 GPa (300 ksi)
Flexural Strain at Break (Method 1, 0.05"/min)	ASTM D790	3%	3%
IZOD Impact, notched (Method A, 23 °C)	ASTM D256	85 J/m (1.6 ft-lb/in)	21 J/m (0.4 ft-lb/in)
IZOD Impact, un-notched (Method A, 23 °C)	ASTM D256	307 J/m (5.8 ft-lb/in)	85 J/m (1.6 ft-lb/in)
Compression Strength, Ultimate (Method 1, 0.050 in./min)	ASTM D695-15	67 MPa (9,670 psi)	92 MPa (13,310 psi)
Compression Modulus (Method 1, 0.050 in./min)	ASTM D695-15	2.7 GPa (387 ksi)	2.2 MPa (314 ksi)

Thermal Properties	Test Method	Value
Heat Deflection (HDT) @ 264 psi	ASTM D648	143 °C (289 °F)
Glass Transition Temperature (Tg)	ASTM D7426-06	41 °C (105 °F)
Coefficient of Thermal Expansion (flow) at 104 °F (40 °C)	ASTM E831	25 µm/(m·°C) (14 µin/(in·°F))
Coefficient of Thermal Expansion (flow) at 212 °F (100 °C)	ASTM E831	27 µm/(m·°C) (15 µin/(in·°F))
Coefficient of Thermal Expansion (flow) at 104 °F (40 °C)	ASTM E831	150 µm/(m·°C) (83 µin/(in·°F))
Coefficient of Thermal Expansion (flow) at 212 °F (100 °C)	ASTM E831	300 µm/(m·°C) (167 µin/(in·°F))



# FDM Nylon 12CF

Electrical Properties	Test Method	Value
Volume Resistivity	ASTM D257	$1.4 \times 10^5 - 1.01 \times 10^6 \Omega \cdot \text{cm}$
Surface Resistivity	ASTM D257	$3.3 \times 10^4 - 8.9 \times 10^5 \Omega/\text{sq}$

Other	Test Method	Value
Specific Gravity	ASTM D792	1.15

System Availability	Layer Thickness Capability	Support Structure	Available Colors
Fortus 450mc	0.010"	Soluble	■ Black
Stratasys F900	0.010"	Soluble	■ Black
Fortus 360mc Carbon Fiber Edition	0.010"	Soluble	■ Black

The information presented are typical values intended for reference and comparison purposes only. They should not be used for design specifications or quality control purposes. End-use material performance can be impacted (+/-) by, but not limited to, part design, end-use conditions, test conditions, etc. Actual values will vary with build conditions. Tested parts were built on a Fortus 450mc @ 0.010" (0.254 mm) slice. Product specifications are subject to change without notice.

The performance characteristics of these materials may vary according to application, operating conditions or end use. Each user is responsible for determining the Stratasys material is safe, lawful and technically suitable for the intended application, as well as for identifying the proper disposal (or recycling) method consistent with applicable environmental laws and regulations. Stratasys makes no warranties of any kind, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability, fitness for a particular use or warranty against patent infringement.

### Stratasys Headquarters

7685 Commerce Way,  
Eden Prairie, MN 55344  
+1 800 801 6491 (US Toll Free)  
+1 952 937-3000 (Int'l)  
+1 952 937-0070 (Fax)

1 Holtzman St., Science Park,  
PO Box 2406  
Rohovot 76124, Israel  
+972 74 745 4000  
+972 74 745 5000 (Fax)

stratasys.com  
ISO 9001:2008 Certified

©2016 Stratasys Ltd. All rights reserved. Stratasys, Stratasys logo, FDM, Fortus, Fortus 360mc, Fortus 360mc Carbon Fiber Edition, Fortus 450mc, Stratasys F900 and FDM Nylon 12CF are trademarks or registered trademarks of Stratasys Ltd. and/or its subsidiaries or affiliates and may be registered in certain jurisdictions. All other trademarks belong to their respective owners. Product specifications subject to change without notice. Printed in the USA. MEX\_FDM\_Nylon12CF\_0116

## Anexo II – Dimensões Provete da Técnica de Excitação por Impulso

Tabela A.1 - Medidas geométricas do Provete A, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão.

Provete A [unidades em milímetros]							
$b_1$	33,77	$L_1$	133,47	$t_1$	6,08	$t_5$	6,15
$b_2$	33,75	$L_2$	133,65	$t_2$	6,11	$t_6$	6,12
$b_3$	33,73	$L_3$	133,57	$t_3$	6,11	$t_7$	6,08
				$t_4$	6,30	$t_8$	6,32
$b_{méd}=33,75$		$L_{méd}=133,56$		$t_{méd} = 6,16$			

Tabela A.2 - Medidas geométricas do Provete B, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão.

Provete B [unidades em milímetros]							
$b_1$	32,69	$L_1$	116,81	$t_1$	2,99	$t_5$	2,95
$b_2$	32,74	$L_2$	116,91	$t_2$	3,01	$t_6$	3,01
$b_3$	32,72	$L_3$	116,76	$t_3$	3,01	$t_7$	3,04
				$t_4$	3,03	$t_8$	3,02
$b_{méd}=32,72$		$L_{méd}=116,83$		$t_{méd} = 3,01$			

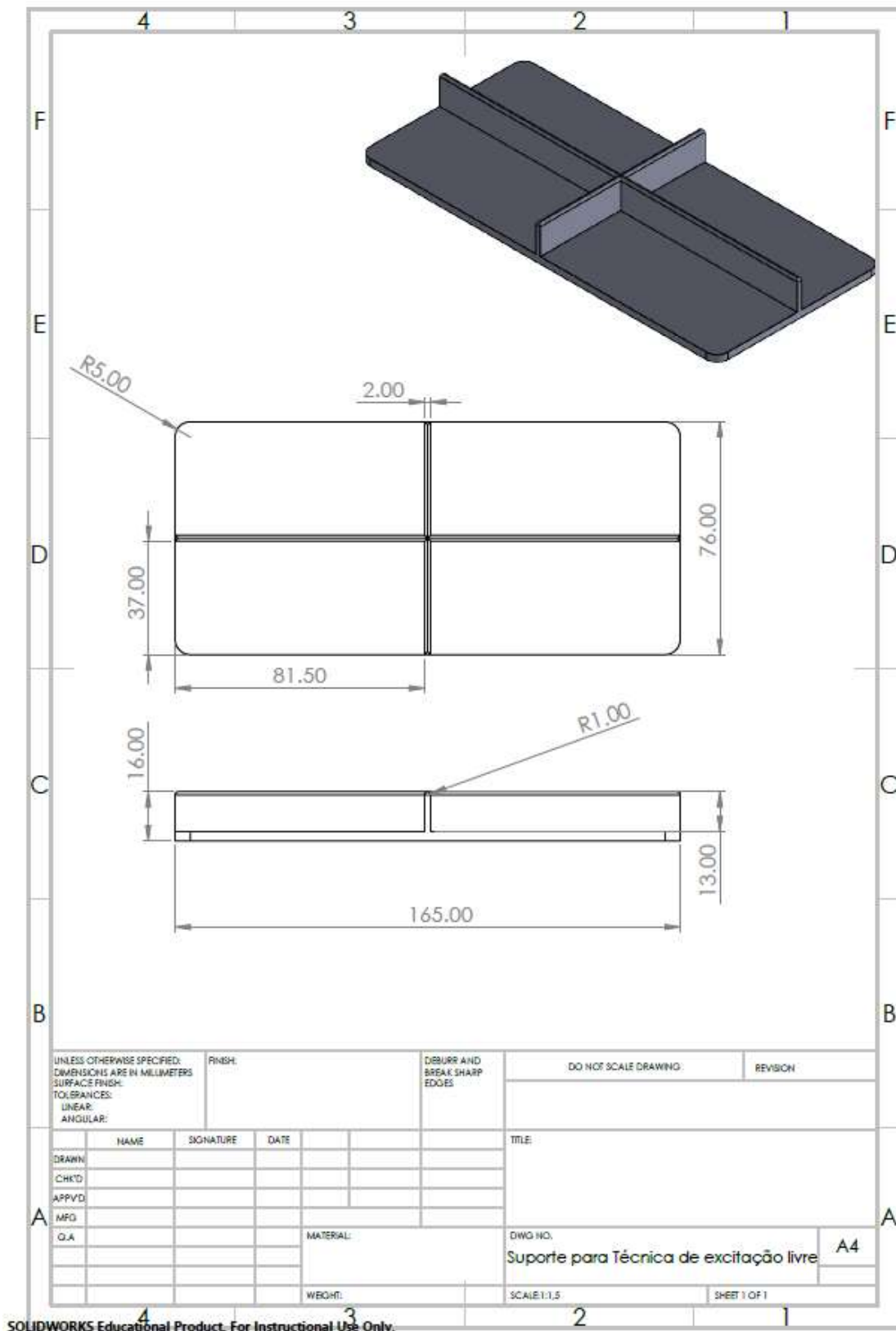
Tabela A.3 - Medidas geométricas do Provete D, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão.

Provete D [unidades em milímetros]							
$b_1$	35,10	$L_1$	133,14	$t_1$	3,49	$t_5$	3,50
$b_2$	35,10	$L_2$	133,21	$t_2$	3,50	$t_6$	3,50
$b_3$	35,20	$L_3$	133,26	$t_3$	3,47	$t_7$	3,49
				$t_4$	3,48	$t_8$	3,48
$b_{méd}=35,13$		$L_{méd}=133,20$		$t_{méd} = 3,49$			

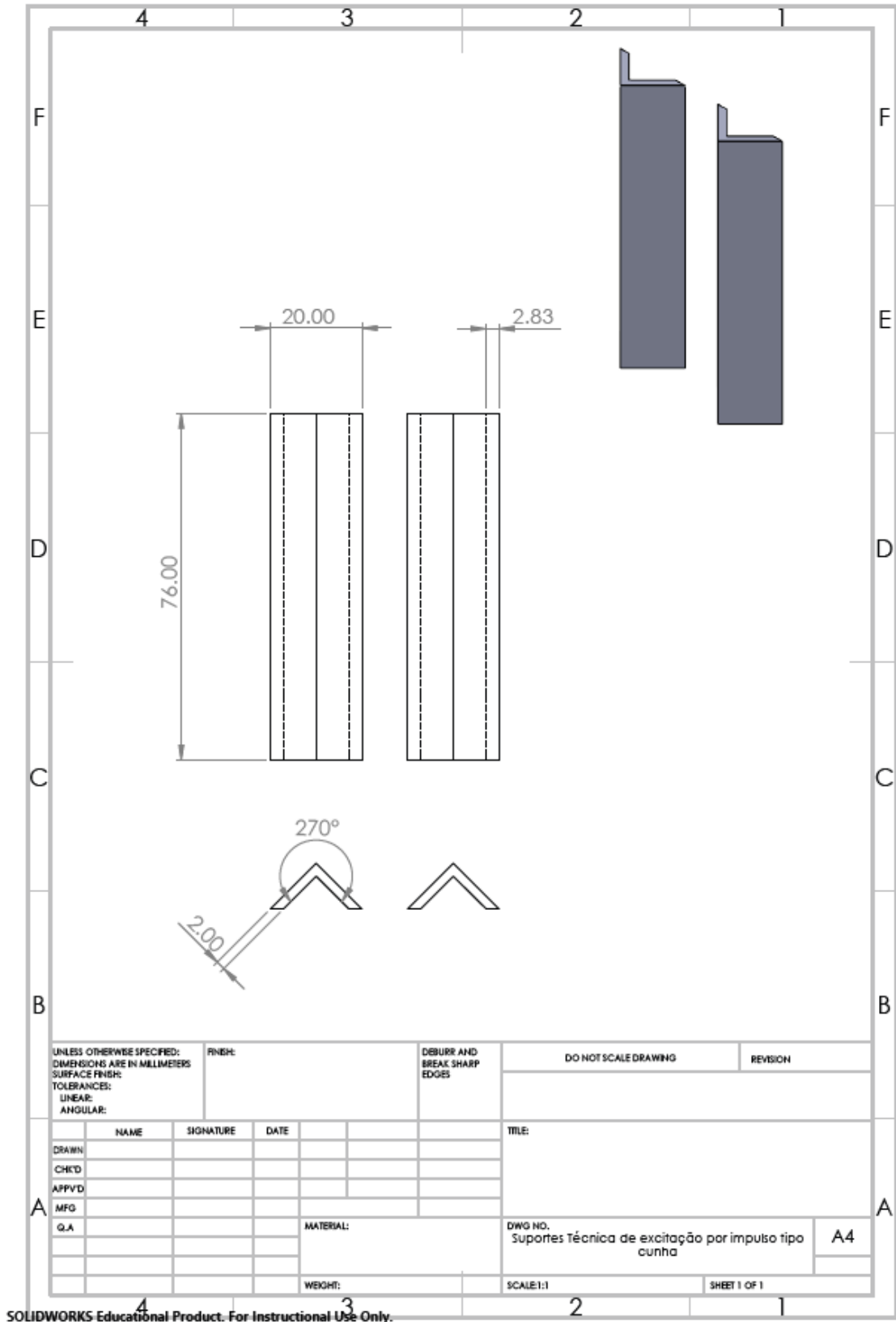
Tabela A.4 - Medidas geométricas do Provete E, para a técnica de excitação por impulso, e o valor médio para cada dimensão.

Provete F [unidades em milímetros]							
$b_1$	34,04	$L_1$	137,10	$t_1$	4,52	$t_5$	4,26
$b_2$	33,91	$L_2$	137,16	$t_2$	4,61	$t_6$	4,30
$b_3$	33,82	$L_3$	136,96	$t_3$	4,52	$t_7$	4,23
				$t_4$	4,39	$t_8$	4,37
$b_{méd}=33,92$		$L_{méd}=137,07$		$t_{méd} = 4,40$			

### Anexo III – Desenho Técnico dos Suportes da Técnica de Excitação por Impulso



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.



SOLIDWORKS Educational Product. For Instructional Use Only.

## Anexo IV – Frequência de vibração e espectro de frequências dos provetes testados pela técnica de excitação por impulso

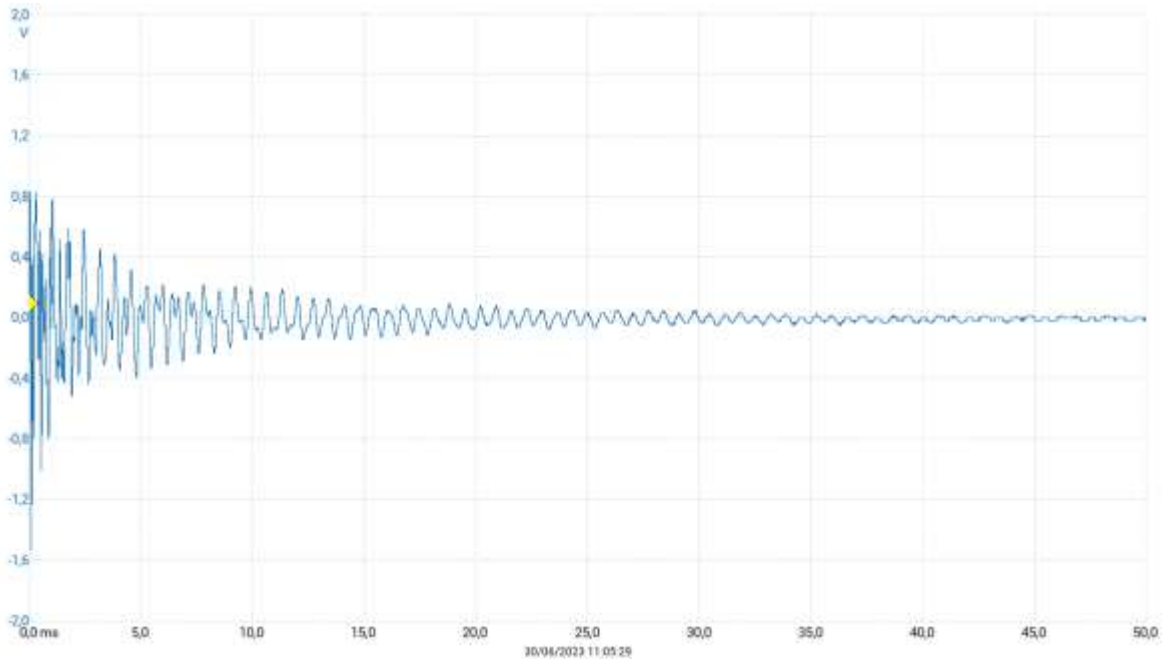


Figura A.1 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete A.

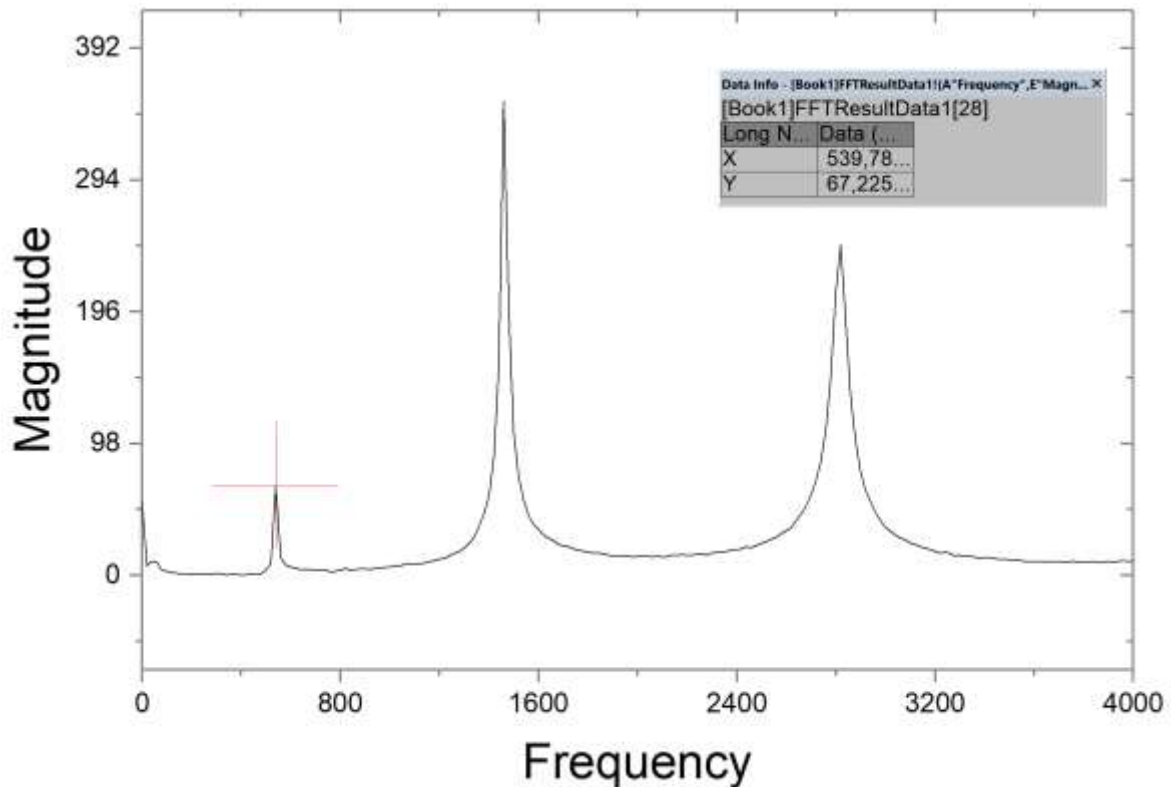


Figura A.2 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete A.

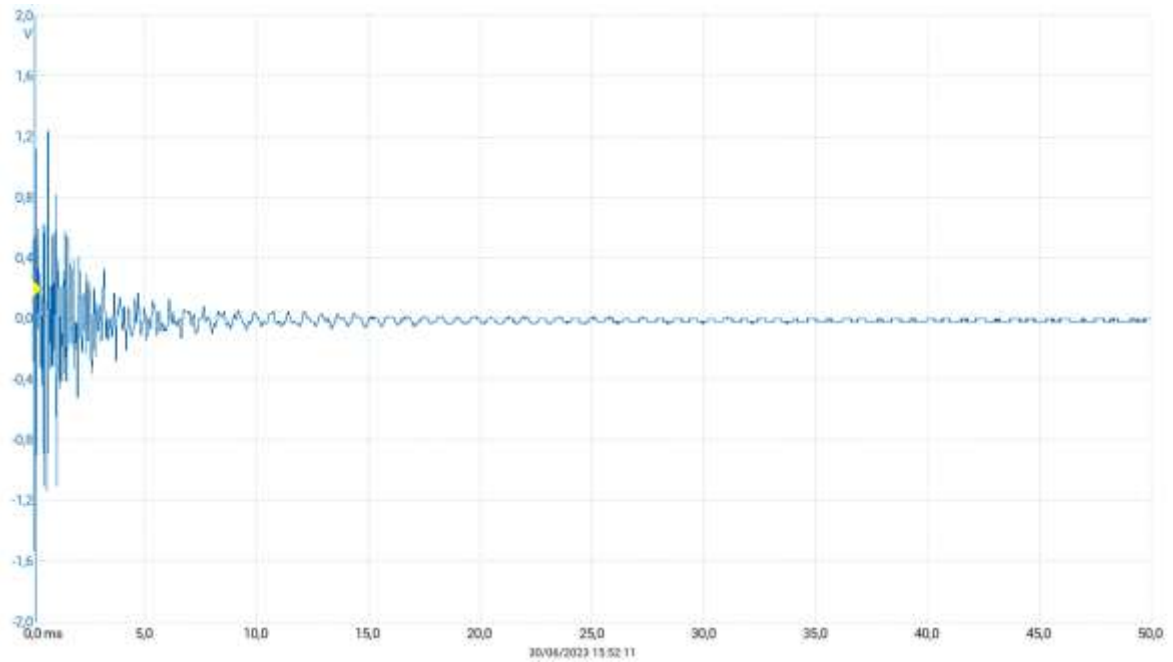


Figura A.3 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete A.

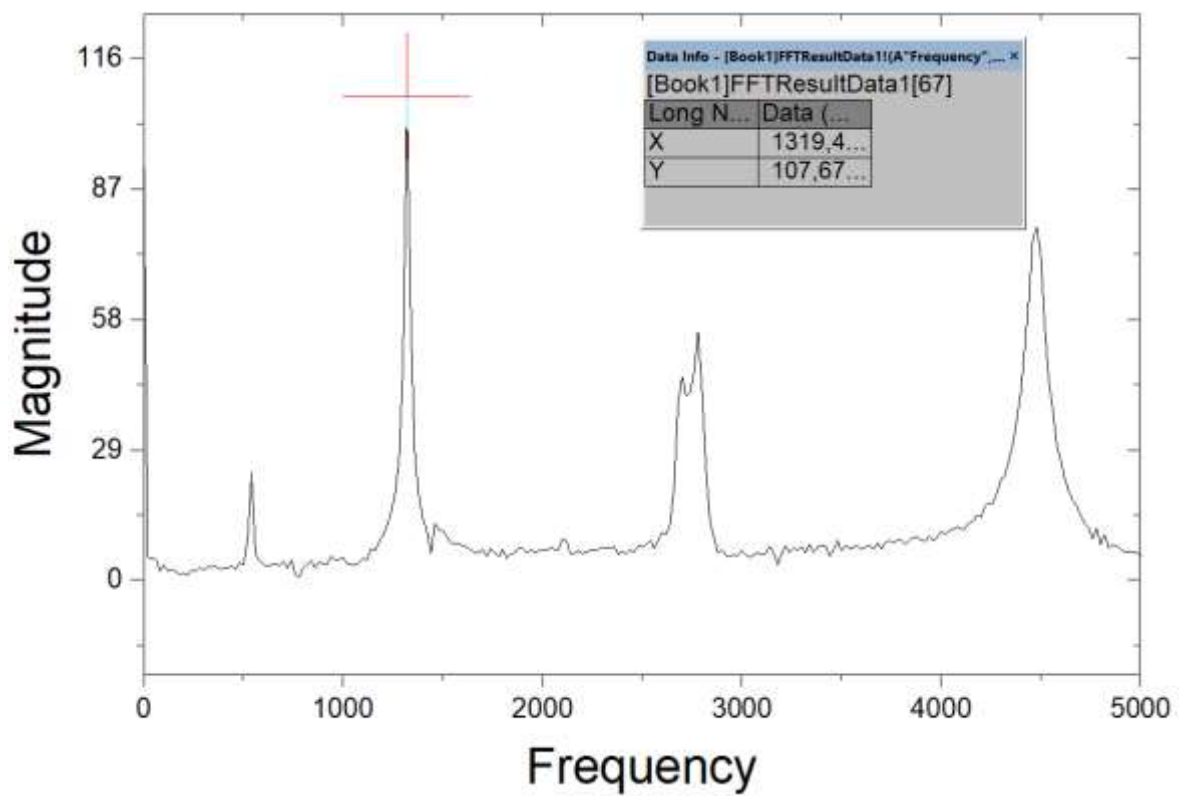


Figura A.4 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete A.

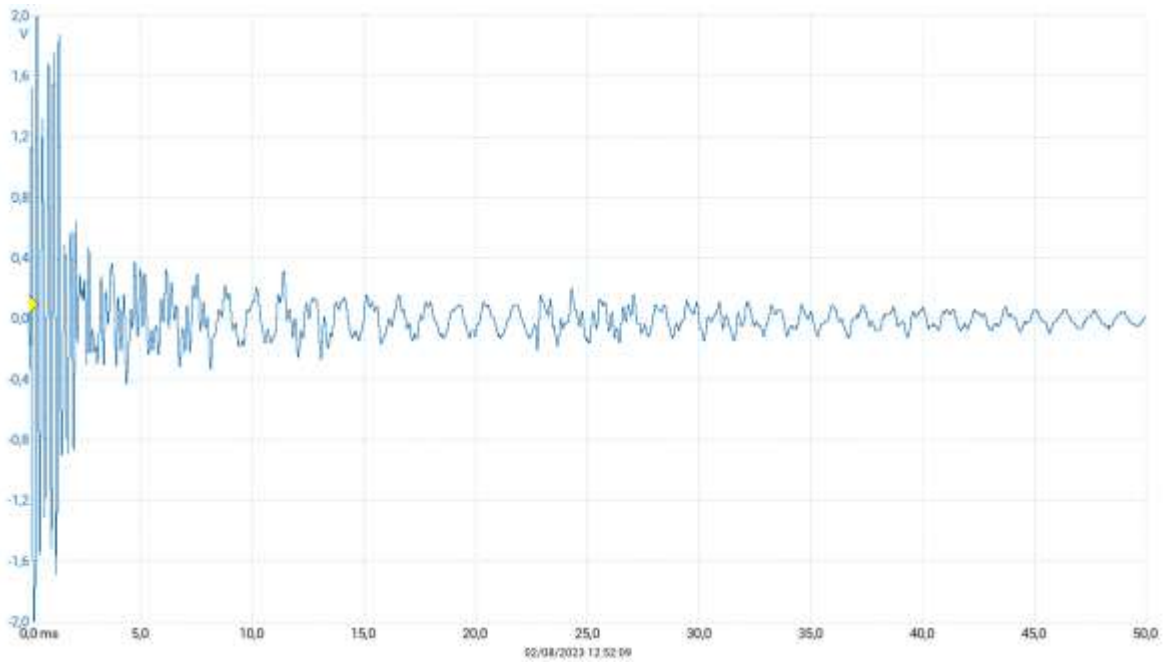


Figura A.5 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete B.

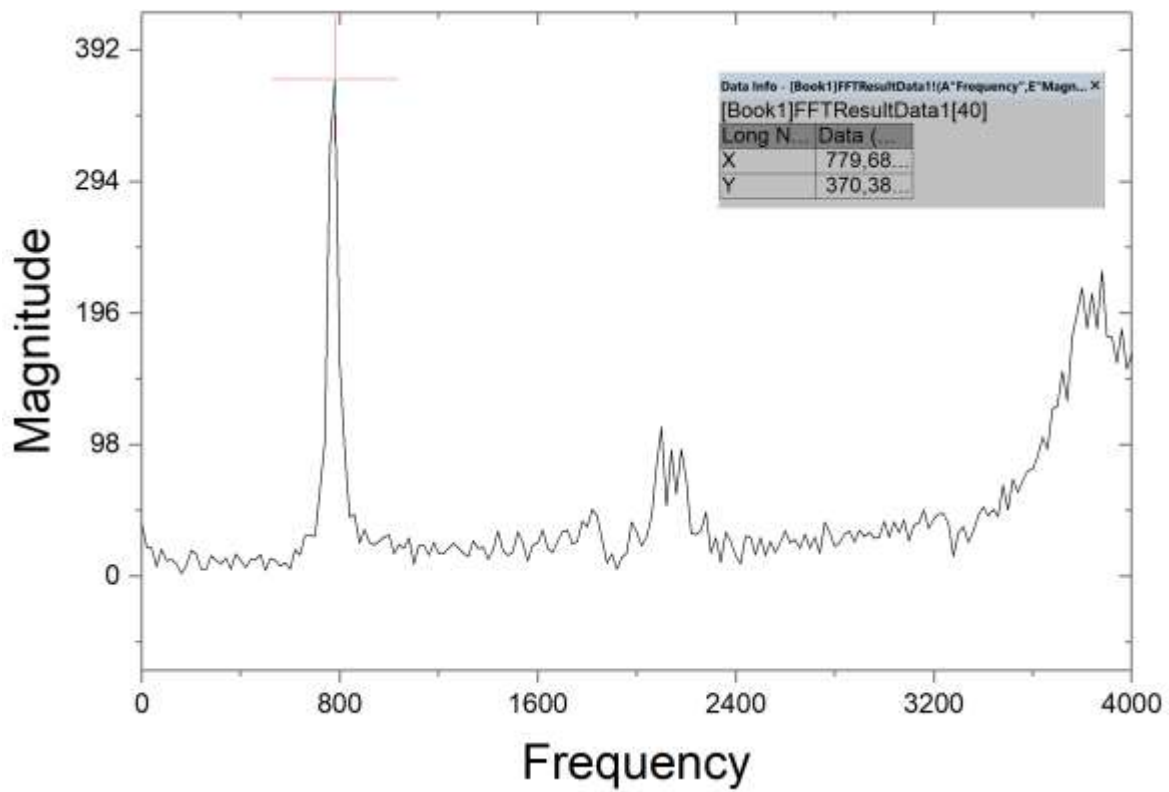


Figura A.6 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete B.

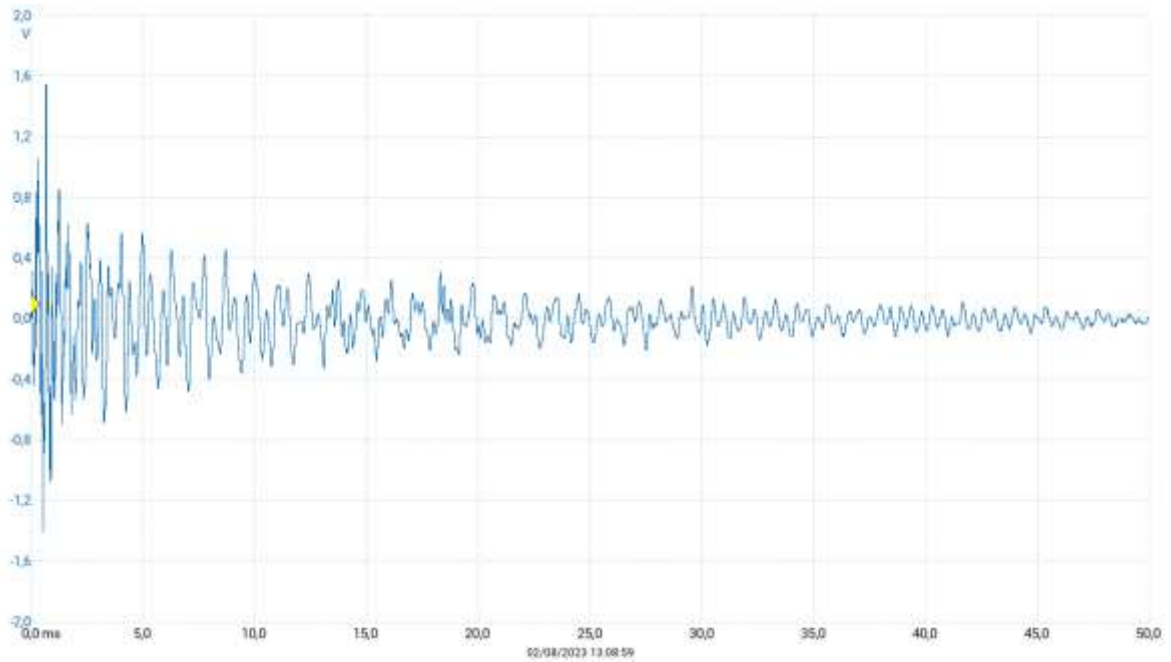


Figura A.7 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete B.

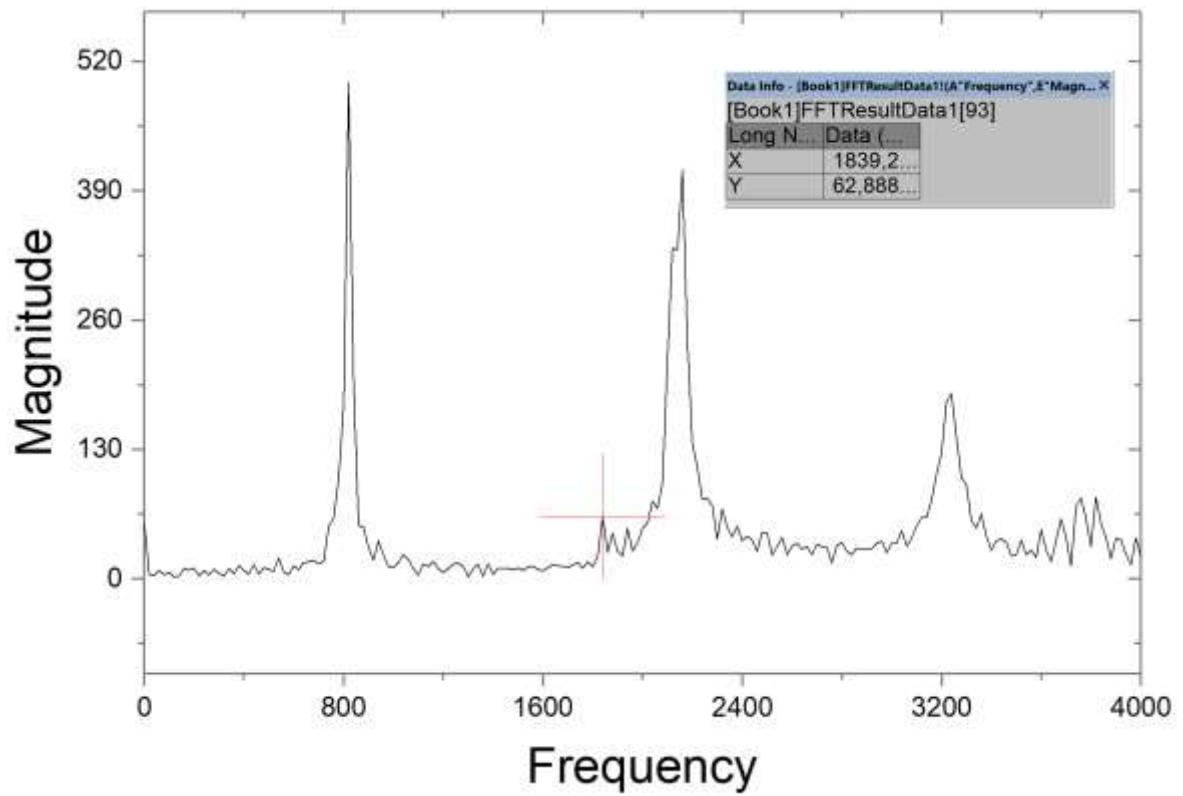


Figura A.8 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete B.

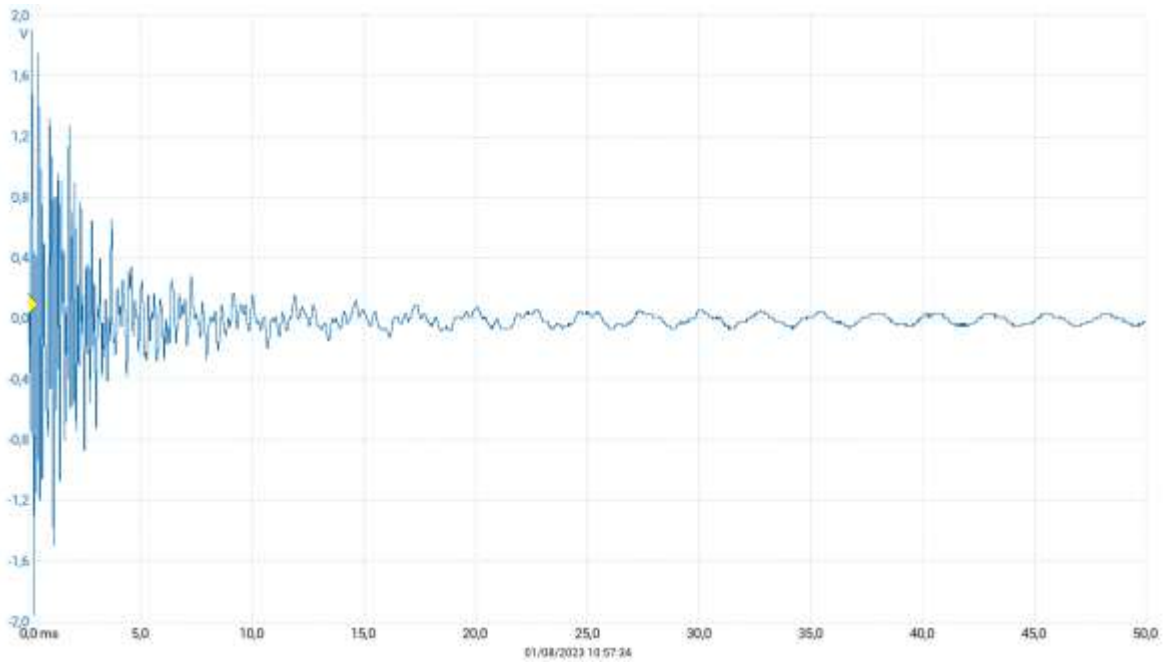


Figura A.9 – Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete D.

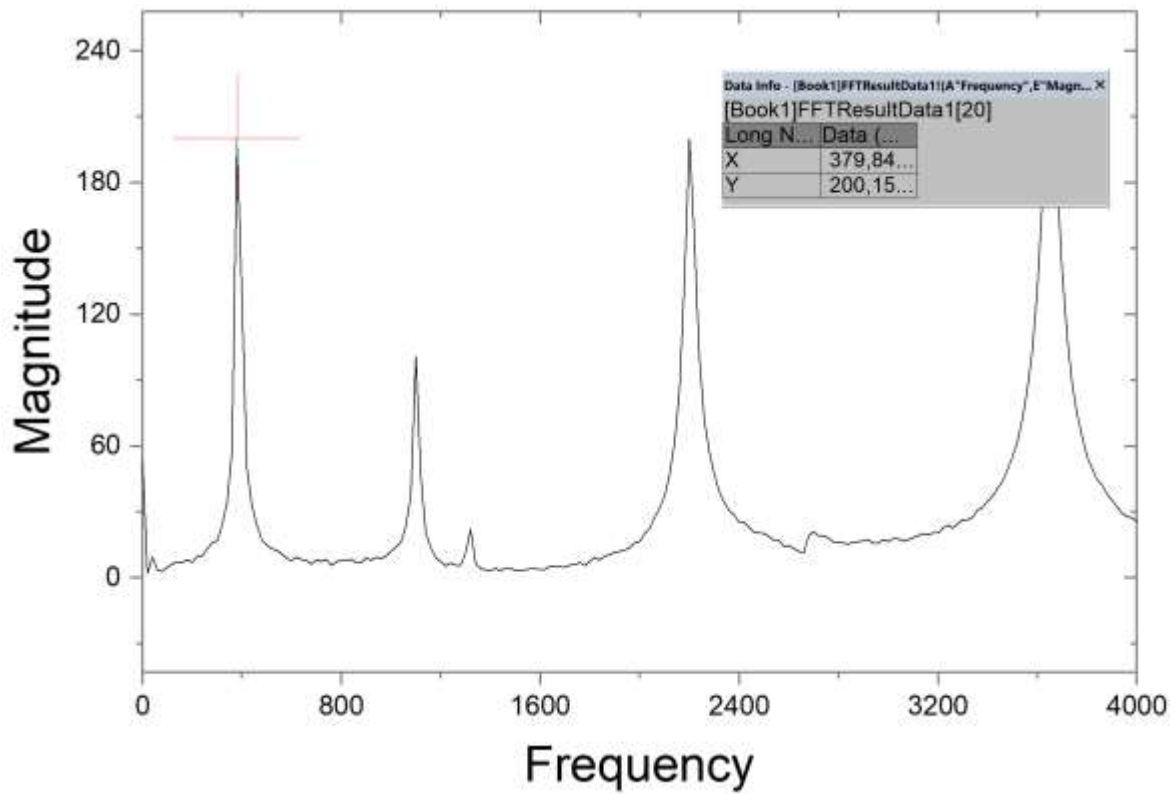


Figura A.10 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete D.

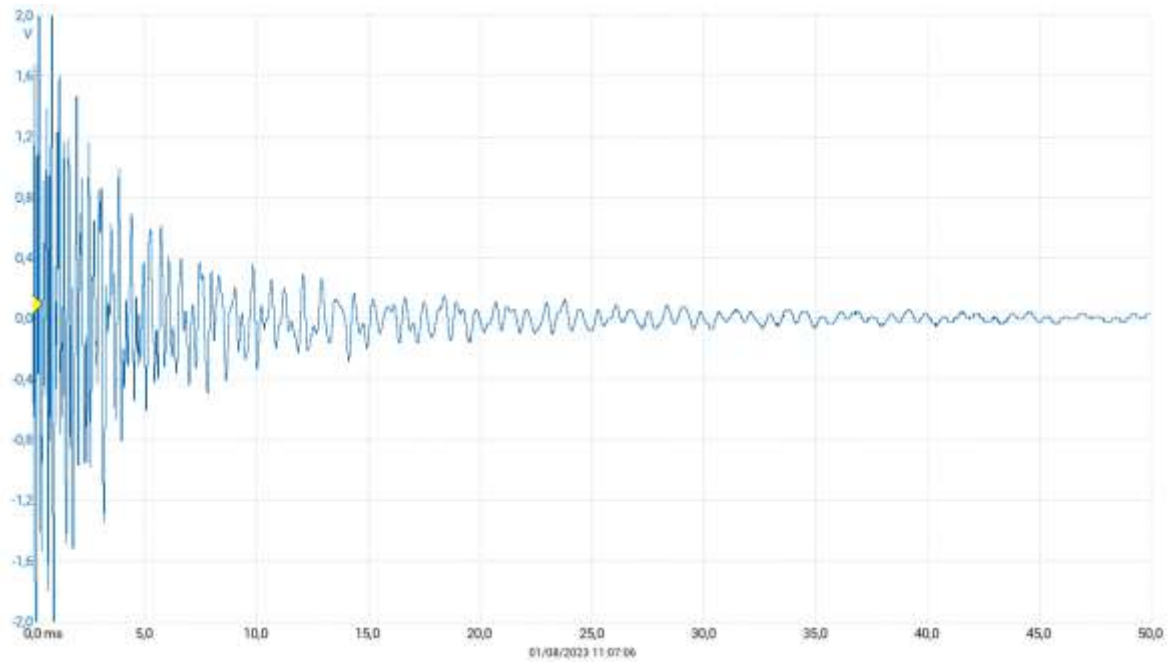


Figura A.11 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete D.

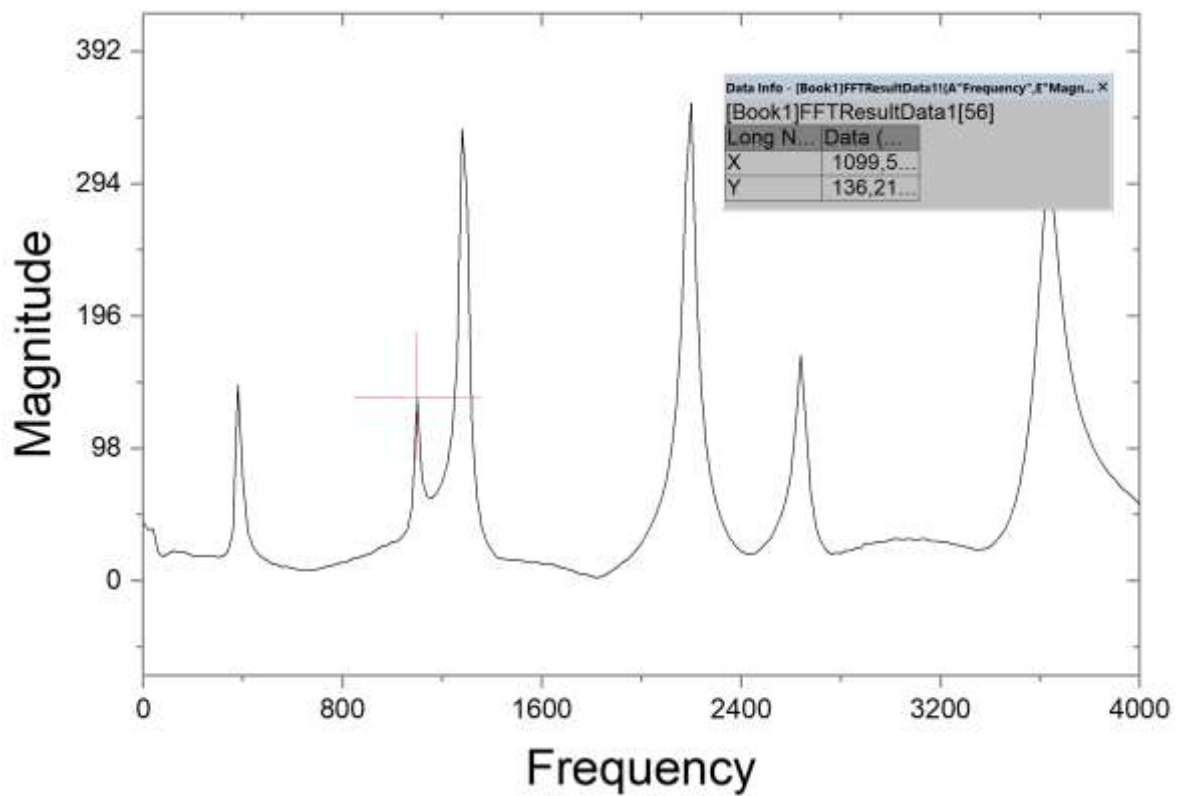


Figura A.12 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete D.

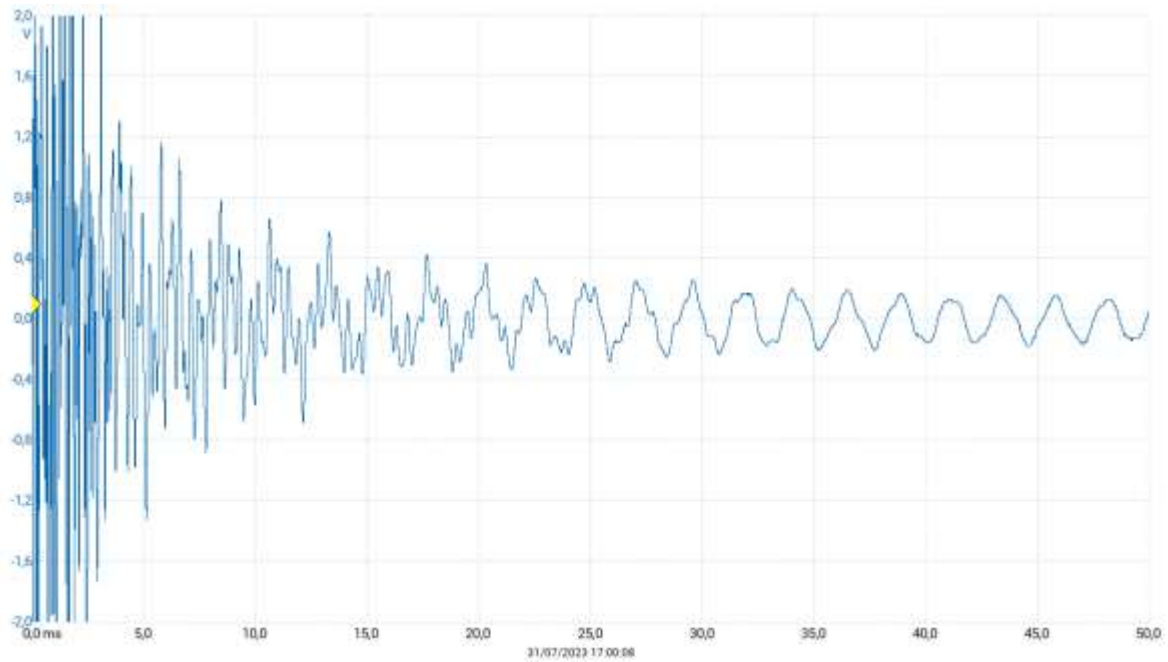


Figura A.13 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração flexional no provete F.

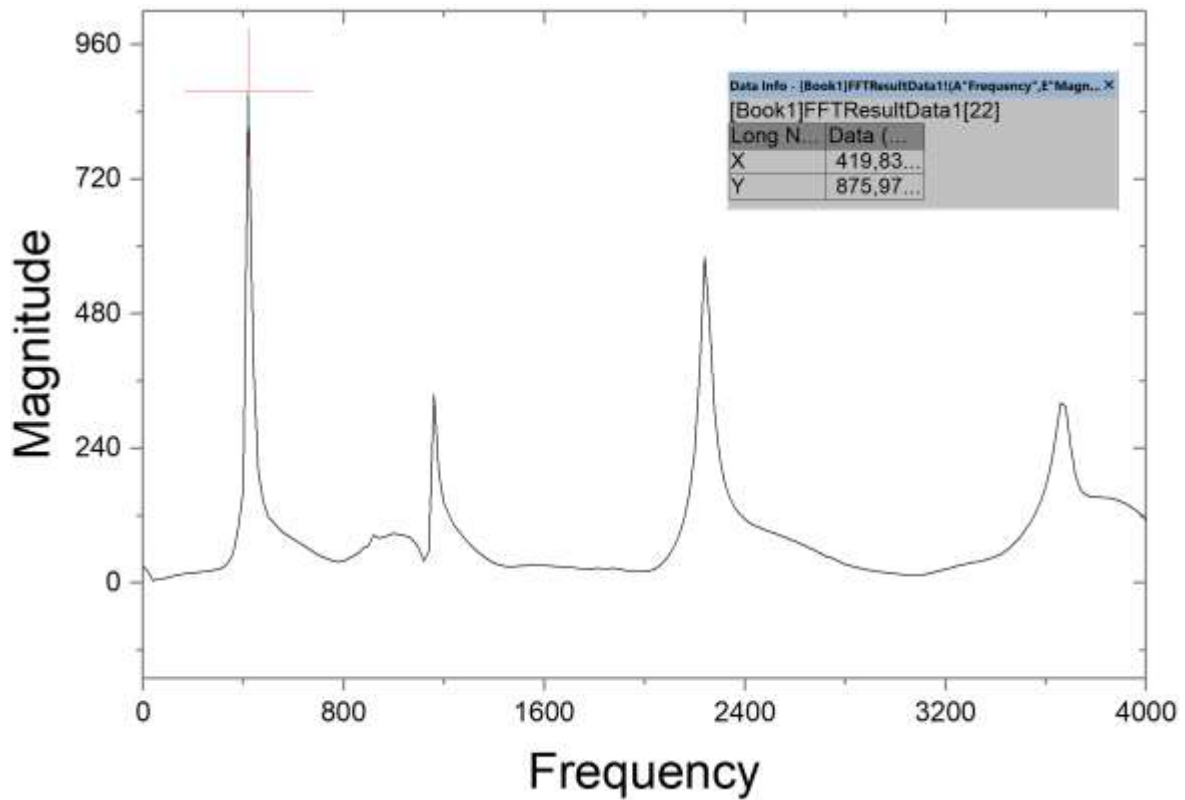


Figura A.14 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração flexional no provete F.

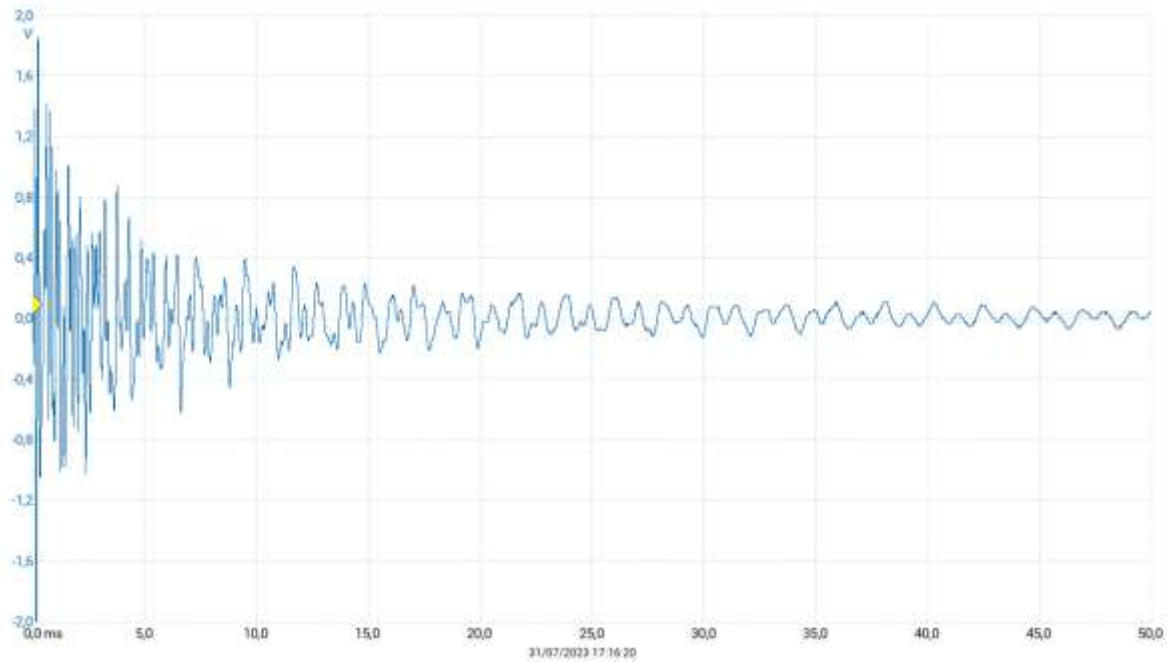


Figura A.15 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio do modo de vibração torcional no provete F.

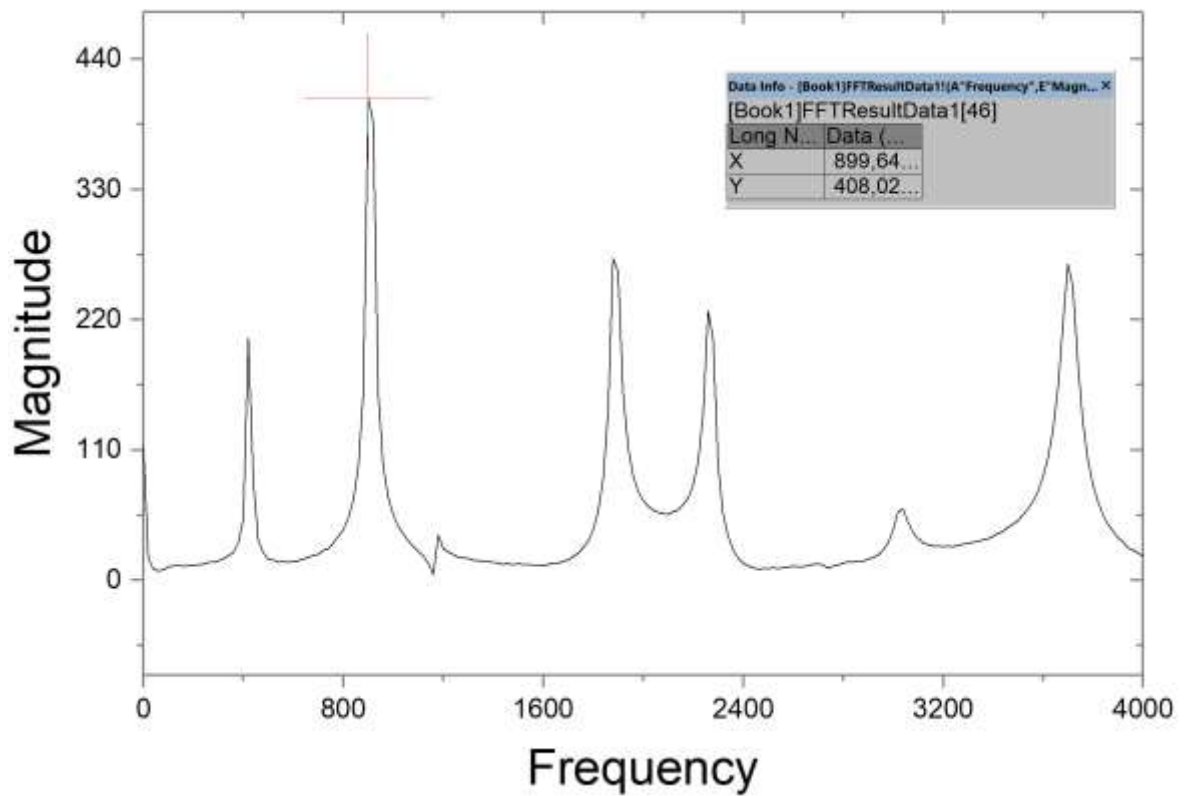


Figura A.16 - Espectro de frequências no ensaio do modo de vibração torcional no provete F.

## Anexo V – Imagens da Microtomografia Computorizada dos Provete

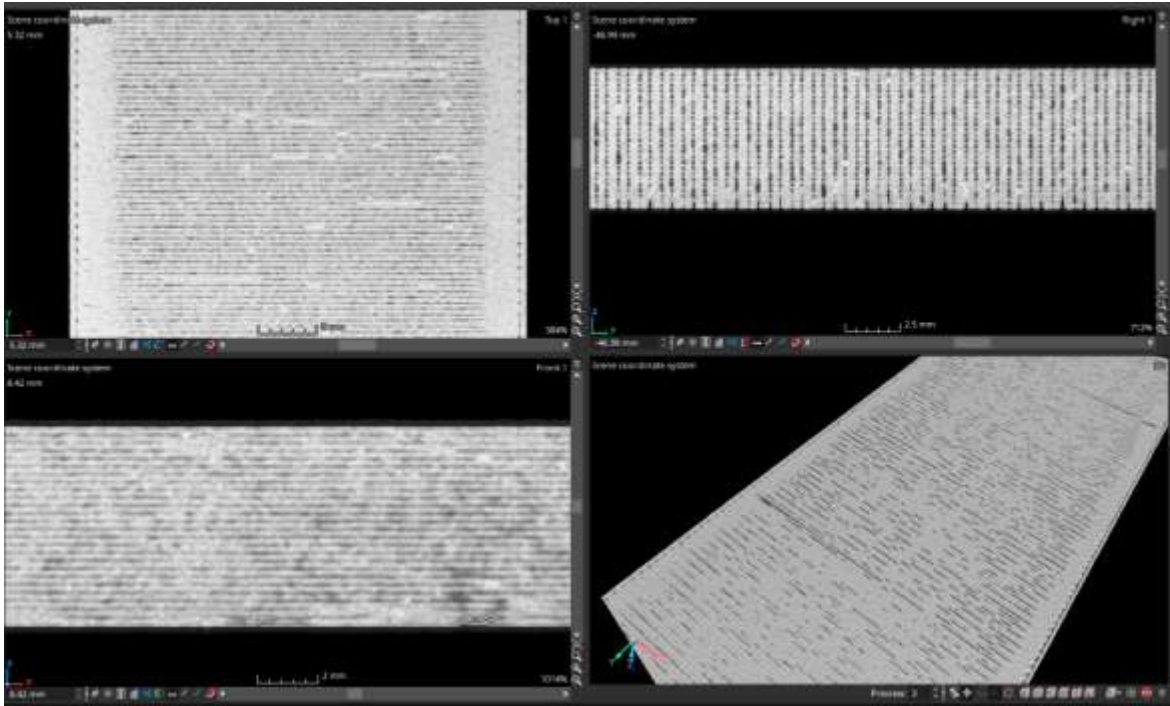


Figura A.17 - Resultado da reconstrução 3D do provete A no visualizador *myVGL*

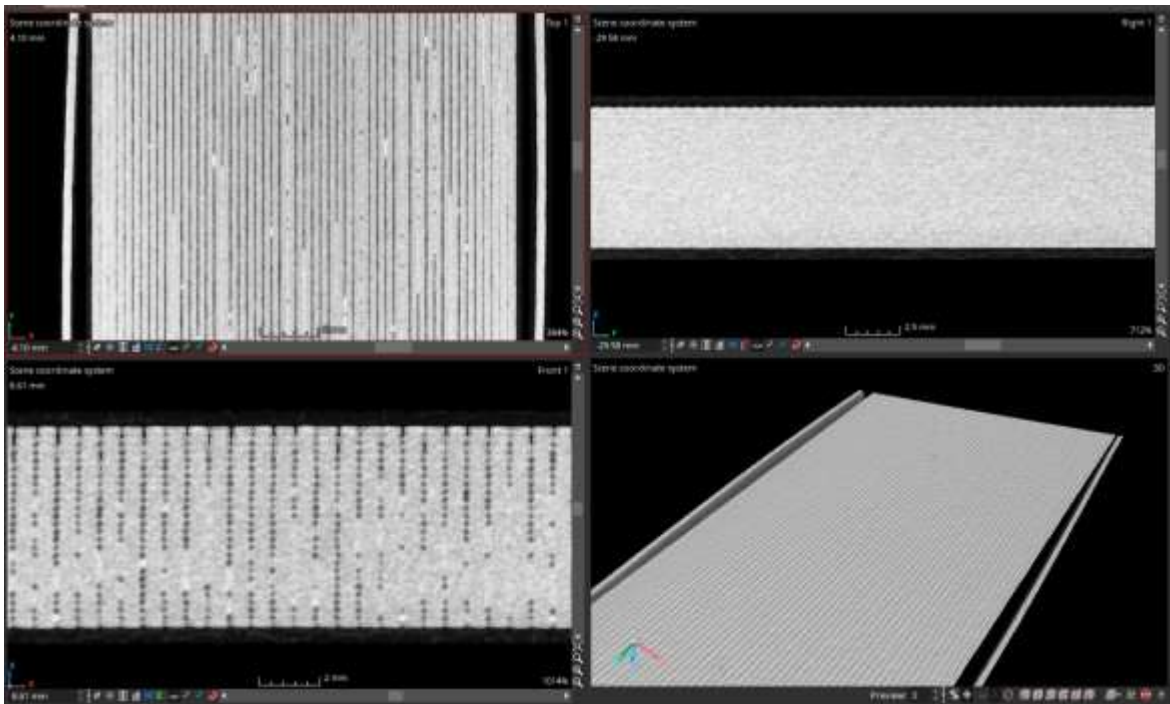


Figura A.18 - Resultado da reconstrução 3D do provete B no visualizador *myVGL*

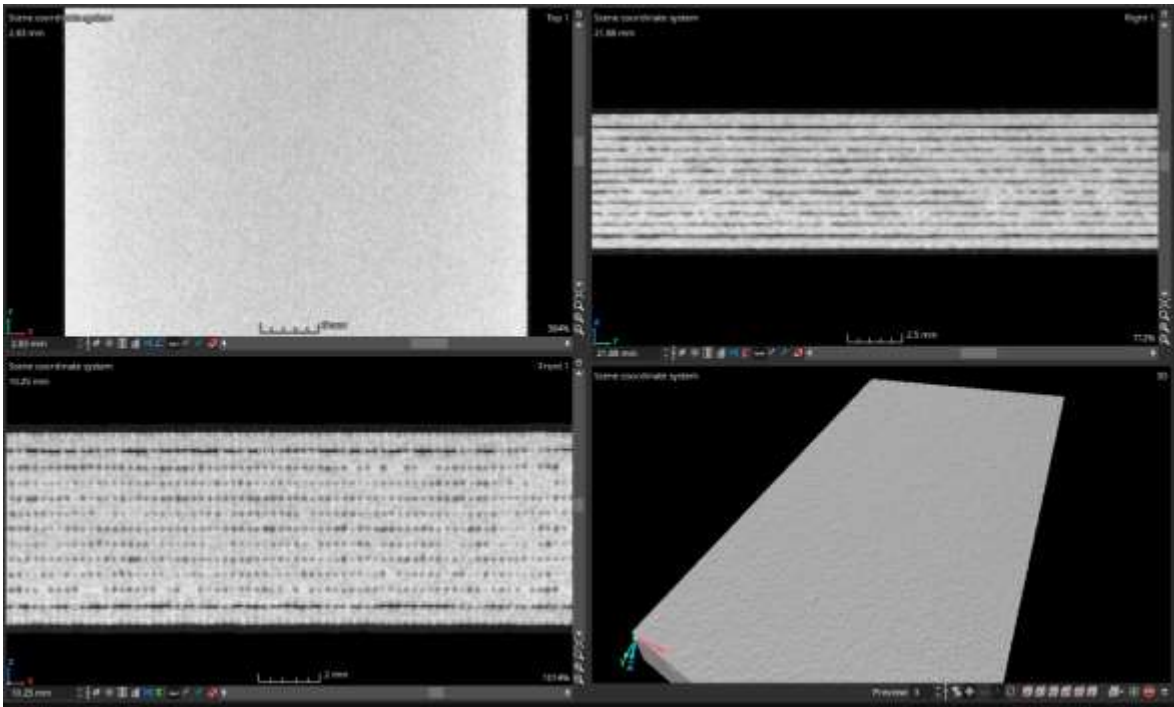


Figura A.19 - Resultado da reconstrução 3D do provete C no visualizador *myVGL*

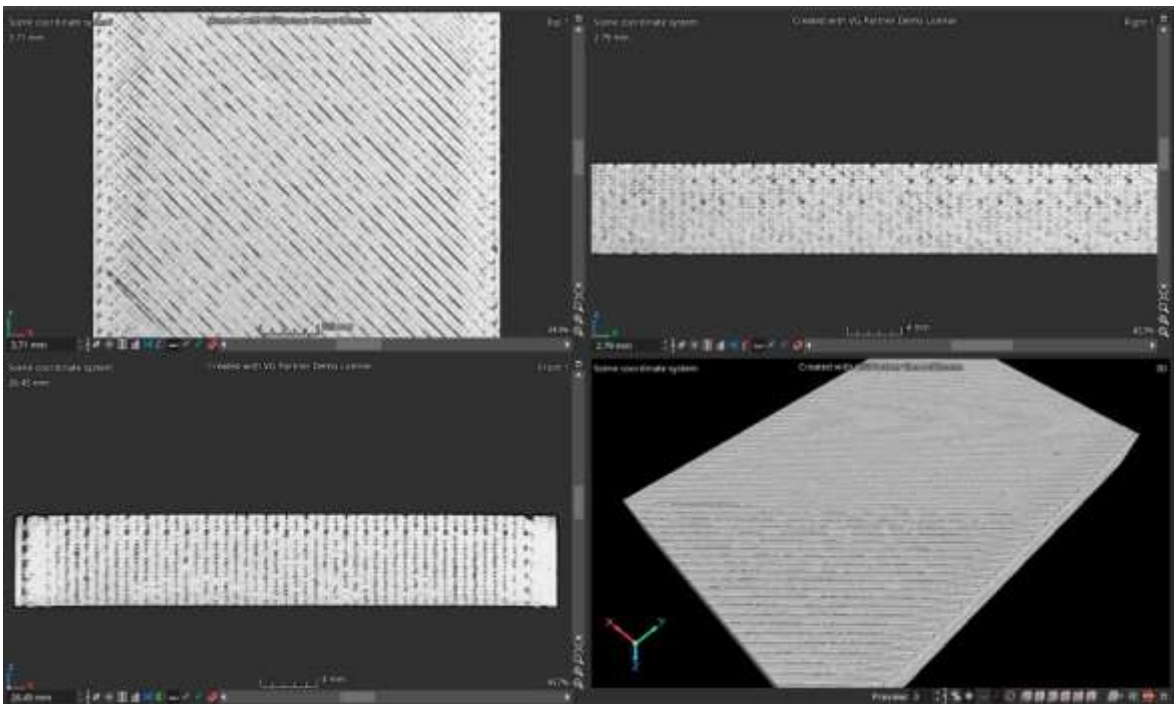


Figura A.20 - Resultado da reconstrução 3D do provete D no visualizador *myVGL*

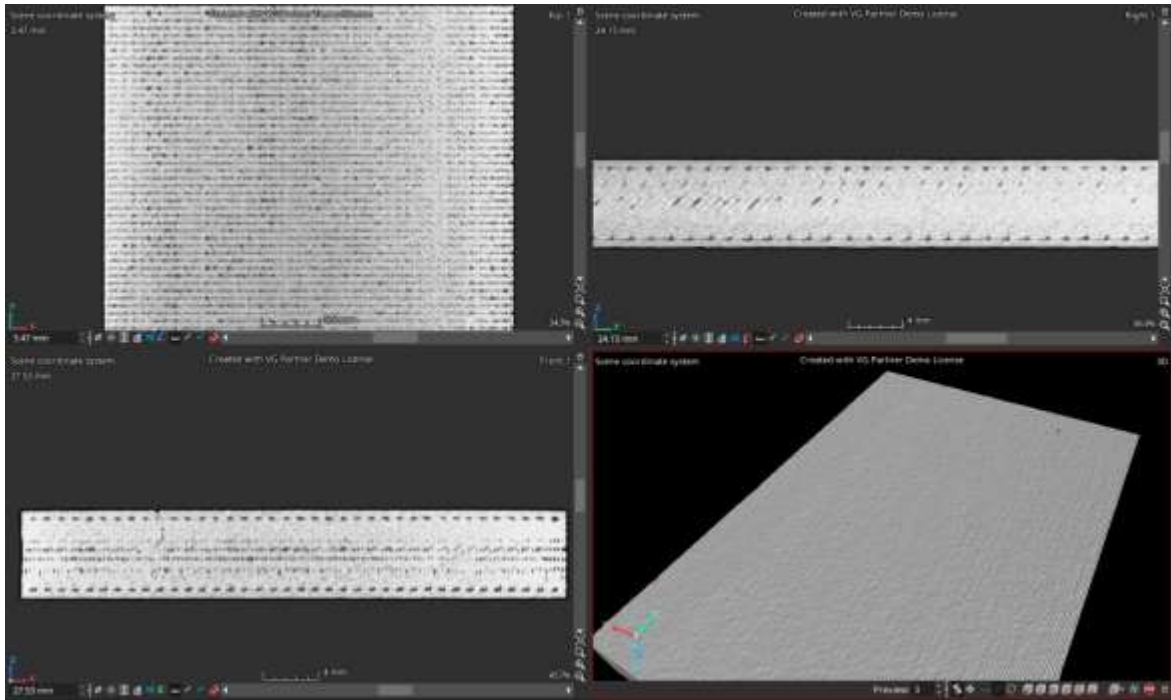


Figura A.21 - Resultado da reconstrução 3D do provete E no visualizador *myVGL*

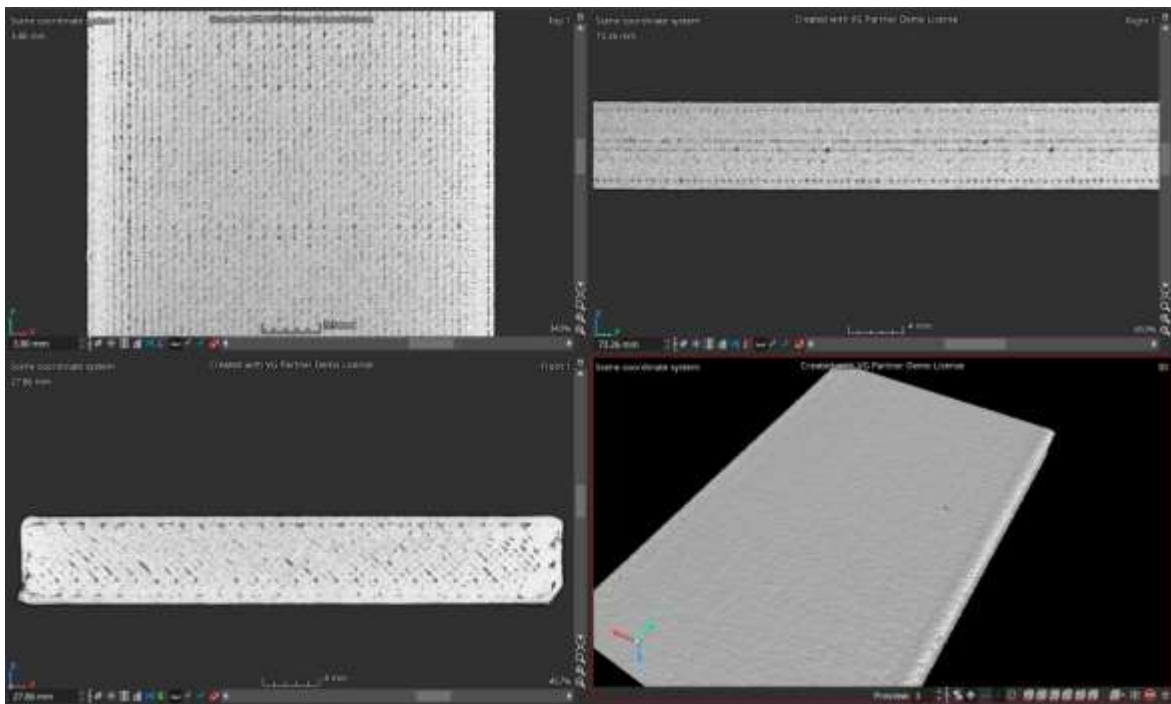


Figura A.22 - Resultado da reconstrução 3D do provete F no visualizador *myVGL*