



Instituto Politécnico
de Castelo Branco
Escola Superior
de Tecnologia

Avaliação da influência da cor nas propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA obtido por impressão 3D

David Alexandre Marcelino Dias

Orientador

Prof. Armando Lopes Ramalho

Trabalho de Projeto apresentado à Escola Superior de Tecnologia do Instituto Politécnico de Castelo Branco para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Licenciado em Engenharia e Gestão Industrial, realizada sob a orientação científica do Prof. Armando Lopes Ramalho, do Instituto Politécnico de Castelo Branco.

Outubro de 2024

Composição do júri

Presidente do júri

Professor Doutor, Armando Lopes Ramalho

Professor Coordenador, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Vogais

Professor Doutor, Paulo Jorge Sequeira Gonçalves

Professor Coordenador, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Arguente

Professor Doutor, Luís Miguel Pedroso de Moura Correia

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero de expressar a minha gratidão ao Professor Doutor Armando Lopes Ramalho por ter colaborado comigo neste projeto, bem como todo o seu apoio e disponibilidade durante todo o processo na realização deste projeto. Foi bastante presente em todas as etapas do trabalho. Agradecer também toda a sua dedicação ao longo destes anos em que fui aluno desta instituição.

Ao IPCB e a todos os seus docentes e colaboradores, pelo seu profissionalismo, que diariamente assegura as condições necessárias para uma aprendizagem contínua e de sucesso, com os olhos postos no futuro e nos futuros profissionais das mais diversas áreas.

Agradecer ao meu colega de curso, Daniel Antunes pela entreaajuda, companheirismo e troca de conhecimentos que partilhamos e que em conjunto realizamos este projeto.

A todos os colegas e amigos que encontrei ao longo dos anos, que sem eles seria muito mais difícil concluir este projeto.

Por fim e não menos importante, aos meus pais e familiares que tornaram a minha rotina muito mais fácil durante o tempo que me dediquei a este projeto e à licenciatura.

Resumo

O objetivo do meu projeto é determinar as propriedades elásticas dinâmicas, como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, do Tough PLA vermelho obtido por impressão 3D, a partir da técnica de excitação por impulso, seguindo o procedimento estabelecido na norma ASTM E 1876 e ASTM C 1259 que é um método amplamente reconhecido para a determinação das propriedades elásticas dinâmicas de materiais. Pretende-se aplicar e justificar esse procedimento para obter propriedades anisotrópicas do material, considerando as possíveis variações nas propriedades mecânicas em diferentes direções.

As propriedades elásticas dinâmicas, como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, serão determinadas por meio de testes experimentais utilizando corpos de prova impressos em 3D. Esses testes seguirão as diretrizes estabelecidas na norma ASTM E 1876 e ASTM C 1259, garantindo assim a confiabilidade dos resultados obtidos.

Palavras-chave

Excitação por impulso; Impressão 3D; Tough PLA; Módulo de Young; Coeficiente de Poisson.

Abstract

The aim of my project is to determine the dynamic elastic properties, such as Young's modulus and Poisson's ratio, of red Tough PLA. This was obtained by 3D printing, using the impulse excitation technique, following the procedure established in the ASTM E 1876 and ASTM C 1259 standards, a widely recognized method for determining the dynamic elastic properties of materials. The aim was to apply and justify this procedure to obtain anisotropic material properties, considering the possible variations in mechanical properties in different directions.

The dynamic elastic properties, such as Young's modulus and Poisson's ratio, will be determined through experimental tests using 3D printed specimens. These tests will follow the guidelines established in the ASTM E 1876 and ASTM C 1259 standards, thus guaranteeing the reliability of the results obtained.

Keywords

Impulse excitation; 3D printing; Tough PLA; Young's modulus; Poisson's ratio.

Índice Geral

Agradecimentos.....	V
Resumo.....	VII
Abstract.....	IX
Índice de figuras	XIII
Índice de tabelas.....	XV
Índice de símbolos.....	XVII
1. Introdução.....	1
1.1 Enquadramento do projeto	1
1.2 Estrutura do relatório.....	2
2. Caracterização das propriedades elásticas de materiais isotrópicos pelo método de excitação por impulso	3
2.1 Caracterização das propriedades elásticas de materiais isotrópicos pelo método de excitação por impulso.....	4
3. Ensaios.....	6
3.1 Autodesk Fusion 360	7
3.2 Software Cura	8
3.3 Impressora 3D Ultimaker S5.....	10
3.4 Preparação dos Provetes.....	11
3.5 Transdutor de contato de disco piezoelétrico fino.....	13
3.6 PicoScope.....	14
3.7 Excitador utilizado nos ensaios	15
3.8 Paquímetros, micrómetro, e balança digital	15
4. Configuração experimental	16
4.1 Dados recolhidos e analisados	17
4.2 Análise de resultados	21
4.3 Comparação de resultados.....	21
5. Conclusão.....	23
Bibliografia	24
Anexo 1: Provette 2, 0°	25
Anexo 2: Provette 3, 45°	27
Anexo 3: Provette 4, 0° Vertical	29
Anexo 4: Fotografias	32

Índice de figuras

Figura 1 - Metodologia dos ensaios de excitação por impulso pela Norma [1]	3
Figura 2 - Desenho do provete no Fusion360.....	7
Figura 3 - Menu de configuração do Cura.....	9
Figura 4 - Simulação da impressão do provete 1 a 90°	9
Figura 5 - Simulação da impressão do provete 2 a 0°	10
Figura 6 - Simulação da impressão do provete 3 a 45°	10
Figura 7 - Impressora 3D Ultimaker S5 (imagem da esquerda). Impressora a imprimir o provete (imagem da direita)	11
Figura 8 - Fotos finais dos provetes.....	12
Figura 9 - Ângulos de impressão.....	12
Figura 10 - Sensor piezoelétrico	13
Figura 11 - PicoScope.....	14
Figura 12 - Desenho do excitador na norma [1] e excitador utilizado	15
Figura 13 - Paquímetros, micrómetro, e balança digital.....	16
Figura 14 - Provete suspenso e pronto para o ensaio de flexão.....	17
Figura 15 - Dados do PicoScope no ensaio de flexão, provete 90°	18
Figura 16 - Dados do PicoScope no ensaio de torção, provete 90°	18
Figura 17 - Frequência recolhida no ensaio de flexão, provete 90°, X=249.89 Hz...19	
Figura 18 - Frequência recolhida no ensaio de torção, provete 90°, X=549.75 Hz...19	
Figura 19 - Folha Excel usada para os cálculos.....	20

Índice de tabelas

Tabela 1: Características dos provetes	13
Tabela 2: Caracterização dos provetes com os resultados dos ensaios de flexão e torção.....	20
Tabela 3: Propriedades elásticas dinâmicas.....	21
Tabela 4: Propriedades elásticas dinâmicas determinadas pelo colega.....	22
Tabela 5: Propriedades elásticas dinâmicas determinadas no artigo [4].....	22

Índice de símbolos

E = módulo de Young, Pa.

G = módulo de torção, Pa.

ν = coeficiente de Poisson.

m = massa da barra, gr.

w/b = largura da barra, mm.

L = comprimento da barra, mm.

t = espessura da barra, mm.

f_f = frequência ressonante fundamental da barra em flexão, Hz.

f_t = frequência ressonante fundamental da barra em tração, Hz.

T = fator de correção para o modo de flexão fundamental levando em conta a espessura finita da barra, coeficiente de Poisson, e assim por diante.

1. Introdução

O trabalho desenvolvido no presente projeto final pretende aplicar os conhecimentos teóricos obtidos ao longo da Licenciatura em Engenharia e Gestão Industrial, mais especificamente na área de Caracterização Mecânica de Materiais e Resistência dos Materiais. O resultado final deste projeto será determinar as propriedades elásticas dinâmicas (módulo de Young e coeficiente de Poisson) do Tough PLA vermelho obtido por impressão 3D, utilizando o procedimento definido na norma ASTM E 1876 [1] e compará-los com os valores obtidos de um outro trabalho onde foi alterada a cor da impressão do Tough PLA para branco.

Procedimentos:

- Desenho dos provetes em Autodesk Fusion 360;
- Impressão 3D dos provetes na Ultimaker S5;
- Lixamento dos provetes;
- Estudo da norma ASTM E 1876;
- Obtenção das propriedades elásticas dinâmicas.

1.1 Enquadramento do projeto

Com a realização deste trabalho pretende-se determinar as propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA vermelho, nomeadamente o coeficiente de Poisson e módulo de Young, a partir da técnica de excitação por impulso e seguindo a norma ASTM E 1876[1] e ASTM C 1259[2] que são específicas para a determinação das propriedades elásticas dinâmicas de materiais poliméricos, como o Tough PLA.

Para determinar as suas propriedades foi utilizado o método de excitação por impulso que está bastante estabelecido pela norma ASTM E 1876 e amplamente utilizado para a determinação das propriedades elásticas dinâmicas de uma grande diversidade de materiais (metais, cerâmicas e plásticos). O método consiste em promover uma vibração por impacto no provete e obter as frequências naturais do modo de vibração excitado. Conhecendo o modo de vibração, a frequência natural, as dimensões e a massa das amostras, é possível calcular o módulo elástico dos materiais.

Na prática este projeto visa determinar de que modo a cor vermelha na impressão 3D do Tough PLA influencia as características do material. Cada um desses 4 provetes diferem no ângulo de impressão 0°, 45°, 90° e um foi impresso na vertical a 0° com as dimensões apresentadas mais á frente neste trabalho. A impressão dos provetes foi efetuada na impressora 3D da Ultimaker 5S, que está no laboratório de conceção e projeto de produtos da ESTCB.

O material em estudo neste projeto designa-se por Tough PLA, também conhecido como PLA resistente, é um tipo de material de impressão 3D que combina as características do PLA (ácido polilático) com alta resistência ao impacto e durabilidade. O Tough PLA é um polímero biodegradável e derivado de recursos naturais, como o amido extraído de fontes como milho, beterraba e trigo, o que o torna uma opção eco amigável e bastante popular para a impressão 3D [5].

1.2 Estrutura do relatório

Com o intuito de alcançar todos os objetivos mencionados anteriormente neste trabalho, o presente relatório encontra-se dividido em 4 capítulos.

O capítulo 1 faz uma breve introdução da metodologia dos ensaios e dos objetivos a cumprir.

No capítulo 2 é analisada a norma ASTM 1876[1] e a norma ASTM C 1259[2], e as metodologias e fórmulas que nela são apresentadas e vão ser utilizadas na resolução deste projeto.

No capítulo 3 irá ser apresentado todo o material utilizado e os softwares usados na realização dos ensaios, bem como a caracterização de cada um dos provetes estudados e especificações utilizadas nos diferentes softwares.

O capítulo 4 serão apresentados todos os passos dos ensaios realizados e a apresentação dos resultados desses mesmos ensaios. Será ainda feita uma comparação com os resultados do colega e com outro artigo [4] demonstrando a influência da cor nas propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA obtido por impressão 3D.

Por fim, no capítulo 5 são apresentadas as conclusões a que se chegaram na realização deste projeto.

2. Caracterização das propriedades elásticas de materiais isotrópicos pelo método de excitação por impulso

O método de excitação por impulso está bastante estabelecido pela norma e amplamente utilizado para determinar as propriedades elásticas dinâmicas de uma grande diversidade de materiais (metais, cerâmicas e plásticos). Este método é apoiado pelas normas ASTM, ASTM E1876 [1] e ASTM C1259 [2]. Neste método, um impulso ou uma força súbita e curta é aplicado ao sistema em análise. A resposta vibratória que resulta numa frequência é então medida e analisada para obter informações sobre as características dinâmicas do sistema.

Conhecendo o modo de vibração, a frequência, as dimensões e a massa dos provetes, é possível calcular o módulo de elasticidade dos materiais (módulo de Young), coeficiente de Poisson e o módulo de Torção. Para um provete retangular, existem basicamente quatro modos de vibração de interesse, representado na figura 1:

- Flexão fora do plano;
- Flexão no plano;
- Torção;
- Longitudinal.

Os principais modos de vibração usados para caracterizar as propriedades elásticas dinâmicas de provetes pequenos e finos são a flexão fora do plano e a torção.

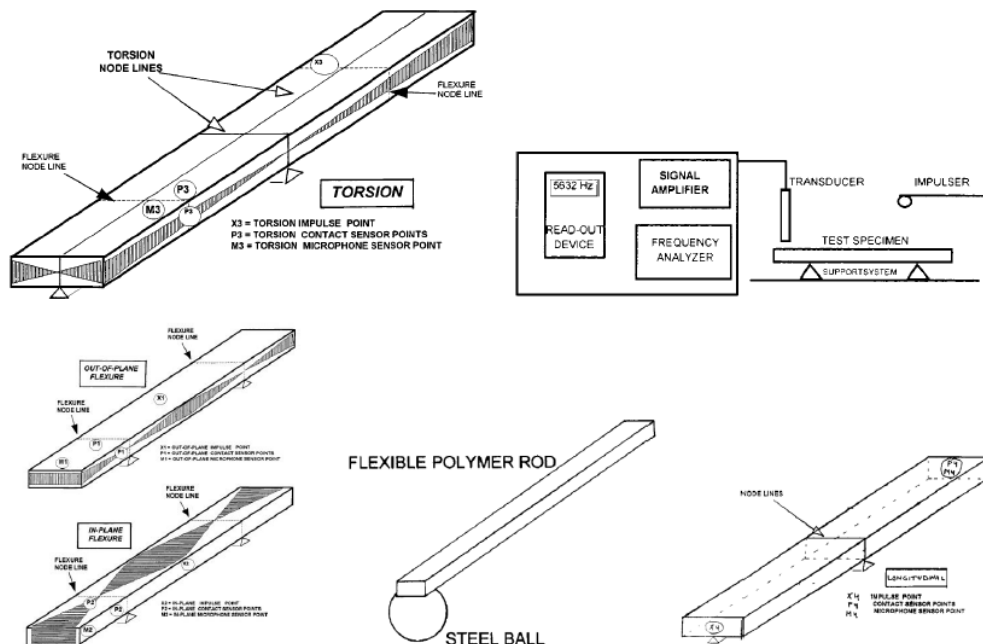


Figura 1- Metodologia dos ensaios de excitação por impulso pela Norma [1]

2.1 Caracterização das propriedades elásticas de materiais isotrópicos pelo método de excitação por impulso

- Segundo a norma [1], o módulo de Young (módulo de flexão) é calculado pela seguinte equação:

$$E = 0.9465 \left(\frac{m f_f^2}{w} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T$$

Sendo m , L , w e t , respetivamente, massa, comprimento, largura e espessura do provete, f_f é a primeira frequência de flexão e T é o fator de correção que depende do coeficiente de Poisson e das dimensões do provete.

O indicador T é calculado pela seguinte expressão:

$$T = 1 + 6.585(1 + 0.0752\nu + 0.8109\nu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2 - 0.868 \left(\frac{t}{L} \right)^4 - \left[\frac{8.340(1 + 0.2023\nu + 2.173\nu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^4}{1 + 6.338(1 + 0.1408\nu + 1.536\nu^2) \left(\frac{t}{L} \right)^2} \right]$$

Onde ν é o coeficiente de Poisson. A norma estabelece que quando $L/t \geq 20$, T pode ser simplificado:

$$T = [1.000 + 6.585 (t / L)^2]$$

O módulo de Torção, G , para um provete retangular fino, é calculado pela seguinte equação:

$$G = \frac{4 L m f_t^2}{b t} [B / (1 + A)]$$

Sendo m , L , w e t , respetivamente, massa, comprimento, largura e espessura do provete, f_t é a primeira frequência de torção, e B e A são fatores que dependem das dimensões do provete.

O fator B é calculado pela seguinte equação:

$$B = \left[\frac{b/t + t/b}{4 (t/b) - 2.52 (t/b)^2 + 0.21 (t/b)^6} \right]$$

O fator de correção A é calculado pela seguinte equação:

$$A = \frac{[0.5062 - 0.8776 (b/t) + 0.3504 (b/t)^2 - 0.0078 (b/t)^3]}{[12.03 (b/t) + 9.892 (b/t)^2]}$$

- A norma ASTM E 1876 [1] refere que o coeficiente de Poisson, ν , para materiais isotrópicos, é calculado pela seguinte equação:

$$\nu = \frac{E}{2G} - 1$$

Onde E e G são o módulo de Young e módulo de Torção, respetivamente.

Este caso aplica-se para materiais isotrópicos onde as suas propriedades mecânicas são as mesmas em todas direções.

Regularmente, a precisão nos dados do módulo obtidos nos testes realizados é da ordem de 1%, mas isso é frequentemente afetado por vários fatores. Para obter dados de alta qualidade, existem vários fatores que devem ser levados em consideração, incluindo:

- Controle preciso das dimensões, geometria e forma da peça de teste. A espessura do provete, que entra nas equações como o terceiro poder, é provavelmente o fator mais importante que afeta a precisão e confiabilidade dos resultados.
- A maquinagem das faces das peças de teste deve ser realizada com cuidado para garantir a sua planicidade e paralelismo, melhores que 0,3%.
- A rugosidade da superfície do provete deve ser ínfima, pois isso pode afetar a precisão nas dimensões medidas do provete em teste e o cálculo do módulo. Uma superfície lisa é desejável, e um acabamento padrão de engenharia deve ser considerado como a especificação mínima.

Neste trabalho de projeto, é apresentado um método para obter as propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA obtido por impressão 3D tendo em conta a sua cor, nomeadamente o módulo de Young dinâmico, o módulo de elasticidade transversal e o coeficiente de Poisson pelo método de excitação por impulso.

3. Ensaios

Neste capítulo vai ser exposto todo o material e os softwares utilizados na realização deste projeto. Vão ainda ser revelados todos os pormenores referentes à fabricação dos provetes. O primeiro passo foi desenvolver os desenhos dos provetes no software Autodesk Fusion360, que estão em anexo neste relatório em formato digital. Imediatamente a seguir, os desenhos foram transferidos para o software CURA da Ultimaker, onde foram especificadas as condições de impressão, mostradas mais à frente, tendo em conta os parâmetros da impressora e o material utilizado.

Com os provetes impressos, iniciou-se a fase de lixamento e acabamento dos provetes para, posteriormente, a realização dos ensaios de excitação por impulso nos provetes.

3.1 Autodesk Fusion 360

O Autodesk Fusion 360 é uma ferramenta de desenho que combina o projeto mecânico e equipamentos industriais, simulação e colaboração, num conjunto de ferramentas integrado que abrange o ciclo de vida total de um projeto – do conceito ao fabrico [6]. As suas principais características são:

- Criar modelos de CAD 3D para projetos mecânicos e equipamentos industriais, com uma única ferramenta de desenvolvimento de produto integrada, baseada na nuvem e fácil de usar.
- Aceder a todos os projetos a qualquer hora, em qualquer lugar em qualquer dispositivo móvel.

No Fusion 360, é bastante intuitivo e fácil de usar, portanto foi simples realizar o desenho do provete necessário. Escolhi a função sólido e defini a dimensão de cada lateral. (figura 2)

Comprimento (L): 167.00 mm

Largura (w/b): 37.00 mm

Espessura (t): 4.00 mm

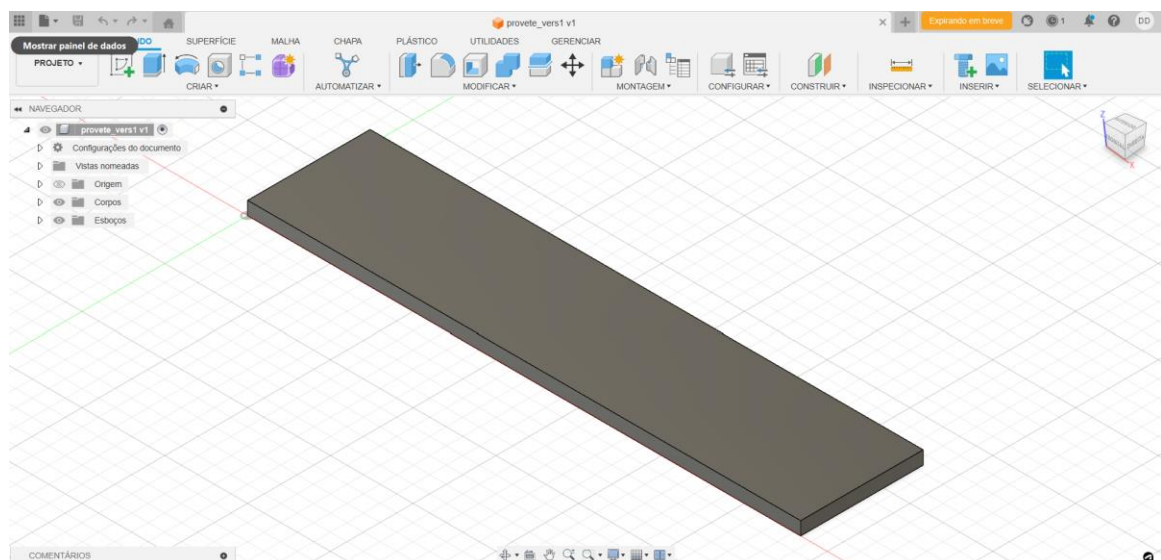


Figura 2 - Desenho do provete no Fusion360

3.2 Software Cura

O software Cura é uma solução de impressão 3D bastante popular. Este software converte modelos 3D em instruções compreensíveis pela impressora 3D, gerando várias camadas fatiadas que são impressas uma a uma.

O Cura é um software de código aberto desenvolvido pela Ultimaker, mas é igualmente compatível com diversas outras impressoras 3D no mercado. Oferece uma interface fácil de usar e funcionalidades avançadas que permitem personalizar as definições de impressão conforme as preferências do utilizador. Algumas das principais características do software Cura são:

- Importação de modelos 3D: O Cura permite importar arquivos 3D nos formatos mais comuns, como STL, OBJ, AMF e 3MF.
- Configurações de impressão: Ele oferece uma ampla gama de opções de configuração, como velocidade de impressão, temperatura do bico (dependendo do material que está a ser utilizado), espessura de camada, densidade de preenchimento, entre outros como está explícito na figura 3. Essas configurações devem ser ajustadas de acordo com as especificações do modelo a ser impresso e do material de impressão.
- Visualização de camadas: O Cura permite visualizar as camadas fatiadas do modelo antes de iniciar a impressão, o que facilita a identificação de possíveis problemas antes de iniciar a impressão.
- Geração de suportes: Sempre que necessário, o Cura pode criar automaticamente estruturas de suporte para modelos que tenham partes suspensas ou sobreposições mais complexas.
- Simulação de impressão: O software também inclui uma função de simulação que permite ao utilizador ver antecipadamente como a impressão será realizada, o que pode auxiliar a identificar áreas defeituosas ou possíveis colisões com os suportes.
- Gestão de perfis: O Cura permite gerir e guardar perfis personalizados com configurações específicas de impressão, para que possam ser novamente usados em projetos futuros.

As especificações definidas neste software para obter a impressão desejada foram:

O provete foi impresso no plano XY, usando o perfil de qualidade fina, um bico de impressão AA de 0,4 mm, preenchimento de 100%, espessura de camada de 0.15 mm, temperatura do bico de 215 °C, temperatura da placa de construção de 60 °C, velocidade de impressão de 45.0 mm/s . O único parâmetro que foi alterado na

impressão dos provetes foi o ângulo de impressão (figura 4,5 e 6) e, no último caso, o provete foi impresso na vertical.

Todos os dados utilizados e apresentados neste relatório estão em anexo no formato digital do mesmo.

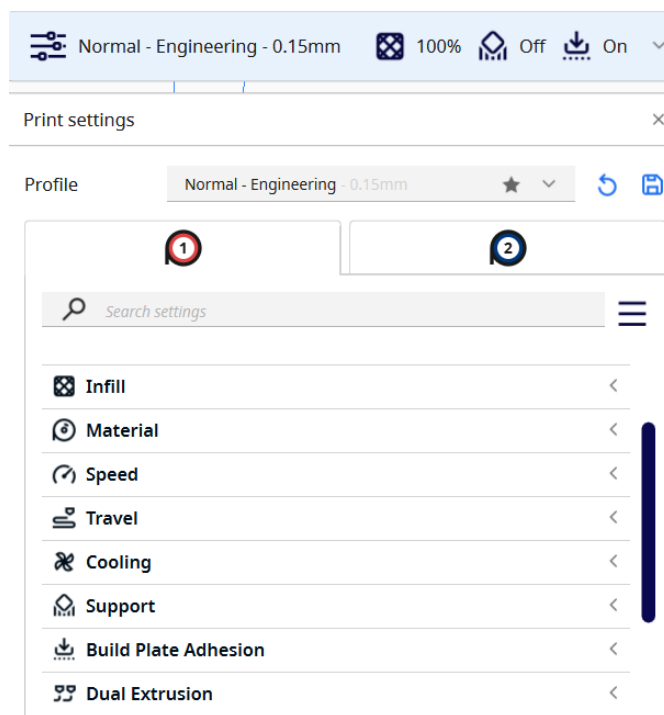


Figura 3 - Menu de configuração do Cura



Figura 4 - Simulação da impressão do provete 1 a 90°

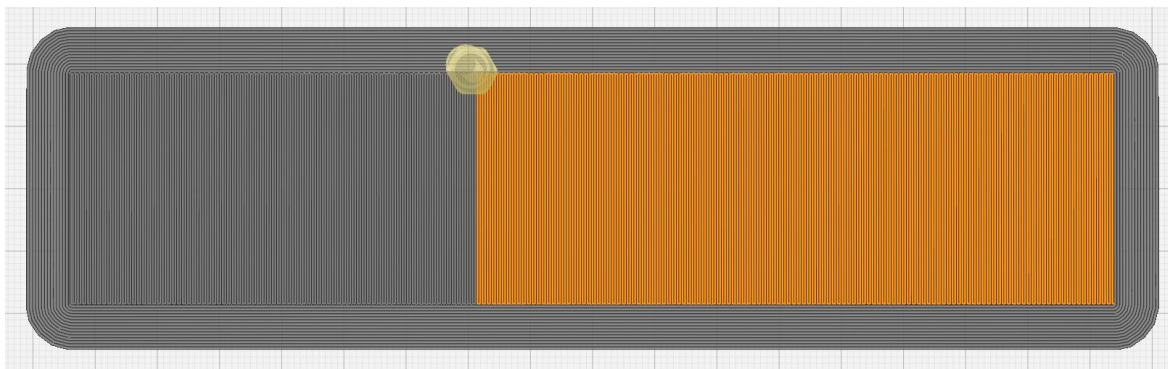


Figura 5 - Simulação da impressão do provete 2 a 0°

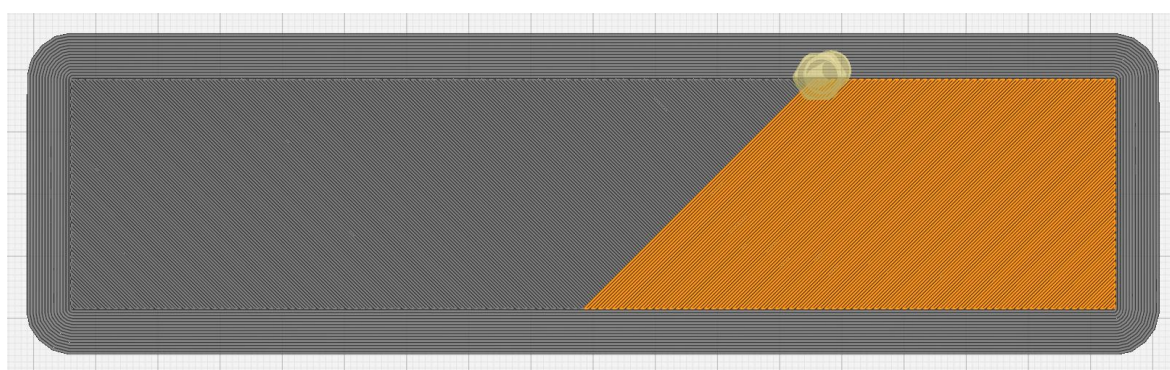


Figura 6 - Simulação da impressão do provete 3 a 45°

3.3 Impressora 3D Ultimaker S5

A impressão de Tough PLA numa impressora 3D Ultimaker S5, figura 7, é um processo relativamente simples e eficiente. A Ultimaker S5 é uma impressora 3D de alto desempenho conhecida pela sua precisão e qualidade de impressão.

Para imprimir os provetes na Ultimaker S5 teve de se seguir algumas etapas básicas:

1. Desenho do provete: Fez-se o provete no Autodesk Fusion 360 em 3D e foi guardado num formato STL que é compatível com a Ultimaker S5.
2. Configuração do Cura: Configurou-se o software Cura para definir os parâmetros de impressão, como a altura da camada, velocidade de impressão, e direção da impressão (90°, 0° ou 45°), etc.
3. Preparação para a impressão: transferiu-se o ficheiro do Cura para a impressora Ultimaker S5 através de uma pen USB, selecionou-se o ficheiro no ecrã da impressora, limpou-se a base de vidro onde o provete ia ser impresso e aplicou-

se uma cola de batom para assegurar a aderência do Tough PLA à base e iniciou-se então a impressão do provete.

4. Monitoramento: Durante a impressão, o processo foi monitorado regularmente para assegurar que tudo estava a decorrer como o previsto, pois pode surgir alguma poeira/lixo que deixe a impressão defeituosa.
5. Pós-processamento: Após a impressão ser concluída, removeu-se o provete da base com cuidado e recorreu-se a várias lixas para eliminar os excessos, nivelar as superfícies do provete e colocar nas dimensões desejadas.

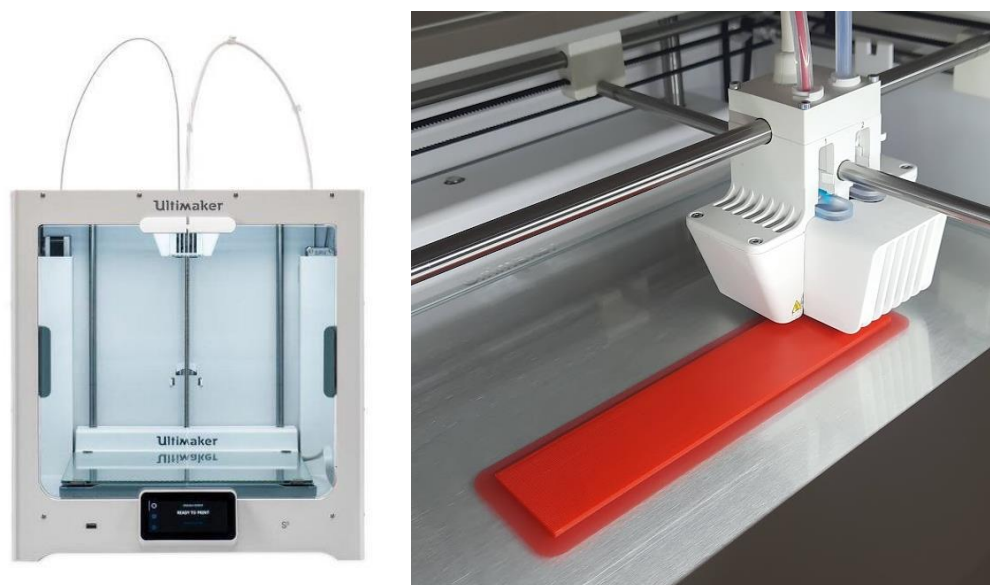


Figura 7 - Impressora 3D Ultimaker S5 (imagem da esquerda). Impressora a imprimir o provete (imagem da direita)

No caso dos provetes de 0° , 45° e 90° , cada impressão demorou cerca de 2 horas e 50 minutos. Já a impressão do provete na vertical teve uma duração de 4 horas e 7 minutos. Em todos os casos, é impressa uma primeira camada (definida como base) e só depois se dá início à impressão consoante os parâmetros definidos no Cura.

3.4 Preparação dos Provetes

Neste subcapítulo serão apresentadas as fotos finais dos provetes (figura 8), o ângulo de cada impressão e uma tabela 1 com as dimensões finais dos provetes assim como a sua massa.

Todas as extremidades dos provetes, depois de impressos, foram lixadas com papel de lixa no início com lixa P80, passando para P240 e o acabamento feito com lixa P500, para assegurar o acabamento superficial desejado, sem rugosidades e remover o efeito da variação na direção de impressão.

De seguida todos os provetes foram furados com uma broca de 1,5mm para posterior suspensão dos provetes durante a realização dos ensaios de excitação por impulso. Os provetes impressos são diferentes no seu ângulo de impressão: 0°, 45° e 90°, como se pode ver na figura 9.



Figura 8 - Fotos finais dos provetes

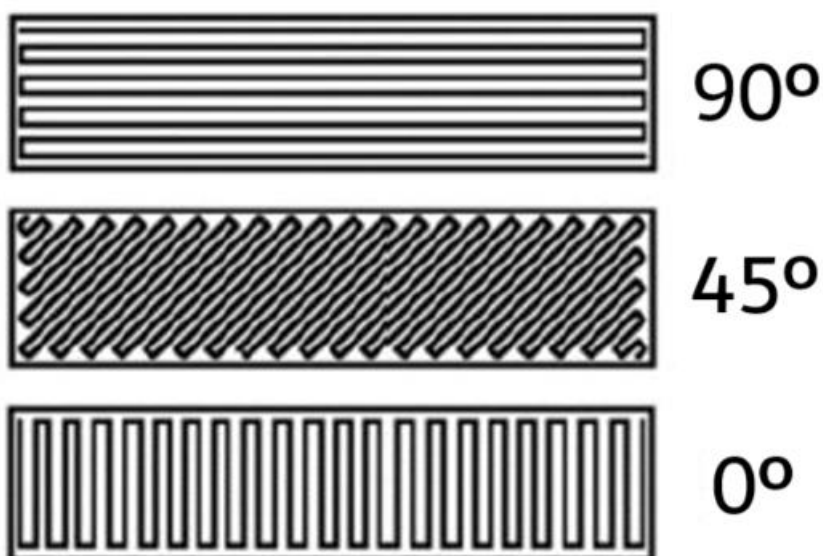


Figura 9 - Ângulos de impressão

Foram impressos 4 provetes, em que 3 deles têm uma espessura de camada de impressão de 0.15 mm e o último provete foi impresso na vertical com 0.15 mm de espessura de camada. As características de cada provete são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1: Características dos provetes

Provetes	Ângulo de impressão	L	w,b	t	m
		mm	mm	mm	gr
Provete 1	90°	166,58	36,98	3,86	27,31
Provete 2	0°	166,22	36,57	3,64	25,44
Provete 3	45°	166,4	36,35	3,8633	27,12
Provete 4	0° Vertical	166,73	37,1	3,6833	27,49

3.5 Transdutor de contato de disco piezoelétrico fino

Um transdutor de contato de disco piezoelétrico fino (figura 10) é um tipo de sensor de aceleração que converte energia mecânica em sinais elétricos, ou vice-versa, utilizando o efeito piezoelétrico e na configuração bimorfa. É composto por um material piezoelétrico em forma de disco, normalmente feito de cerâmica ou cristais, que gera uma tensão elétrica quando submetido a deformação mecânica (como vibrações, impactos ou pressão).

Sendo estes transdutores, sensores bastante finos, leves e devido à sua capacidade de produzir um sinal elétrico que é diretamente proporcional à aceleração aplicada, torna-os excelentes para aplicações em que é necessário medir vibrações em superfícies sem ocupar muito espaço ou adicionar peso significativo.



Figura 10 - Sensor piezoelétrico

3.6 PicoScope

Um osciloscópio de sinal PicoScope, mostrado na figura 11, é um dispositivo eletrônico utilizado para amplificar, filtrar e ajustar sinais elétricos antes de serem digitalizados e processados por um sistema de aquisição e tratamento de dados, que neste caso o software utilizado foi o Origin2017. Este software disponibiliza uma vasta gama de funcionalidades e ferramentas que permitem importar, manipular, analisar e visualizar dados de forma eficaz. Os sinais elétricos de entrada são amplificados para aumentar a sensibilidade e a faixa dinâmica do sistema. O software também pode aplicar filtros para eliminar ruídos indesejados ou interferências eletromagnéticas que possam comprometer a precisão das medições. O software do PicoScope permite, de forma geral, a visualização e análise dos dados capturados, facilitando a determinação de propriedades elásticas dinâmicas, como o módulo de Young e o coeficiente de Poisson, através de cálculos e análises específicas [7].

Foi pedido ao software PicoScope para retirar 10000 amostras com um intervalo temporal de 50 ms, e a variação de sinal de $-2/2$ Volts. No entanto, em alguns casos, o software retirou 100000 amostras para obter resultados mais refinados. Estes valores são retirados do software, transferidos para Microsoft Excel e só depois depositados no Origin2017.

Relativamente ao software Origin2017, foram introduzidos os dados, dos ensaios de flexão e torção de cada provete testado, e retirados os gráficos das frequências naturais numa escala de 0 Hz por 5000 Hz como se pode ver no capítulo 4.

Para seguir o bom funcionamento do software e obter resultados assertivos, é importante seguir as instruções do fabricante do PicoScope e da norma ASTM E 1876-01 [1] para garantir uma medição precisa e confiável das propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA impresso em 3D.



Figura 11 - PicoScope

3.7 Excitador utilizado nos ensaios

Seguindo as indicações da norma ASTM E1876 [1] foi utilizado como excitador (martelo) uma braçadeira de serrilha com uma bola metálica colada na ponta, visível na figura 12, ou seja, uma haste flexível e massa com mais de $1/3$ da massa total a estar numa extremidade da haste.

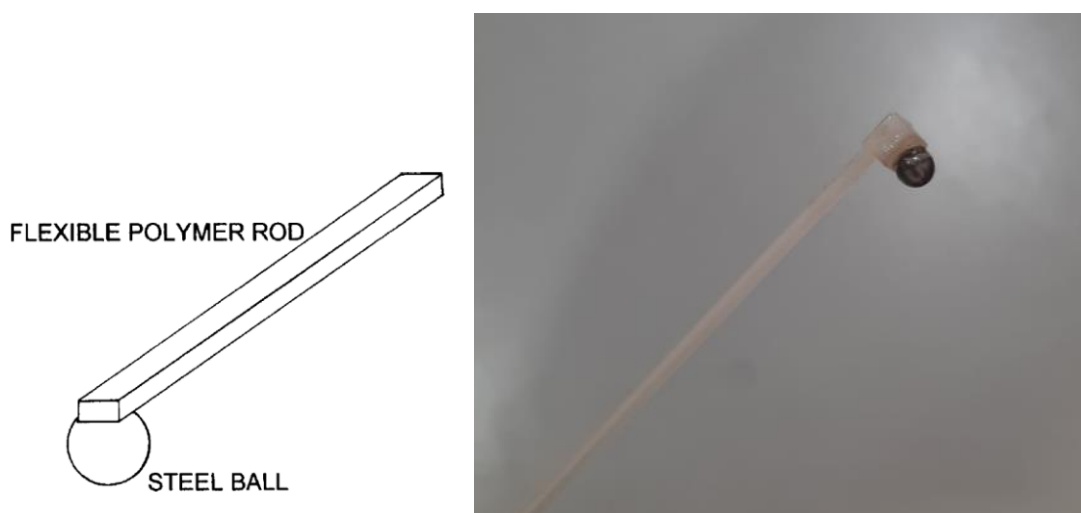


Figura 12 - Desenho do excitador na norma [1] e excitador utilizado

3.8 Paquímetros, micrómetro, e balança digital

Nas medições dos provetes, foram utilizados 4 instrumentos de medição. O paquímetro grande, paquímetro normal e micrómetro, todos eles disponíveis no laboratório de concepção e projetos da ESTCB. Também foi utilizada a balança digital que se encontra no laboratório de Engenharia Civil na ESTCB. (figura 13)



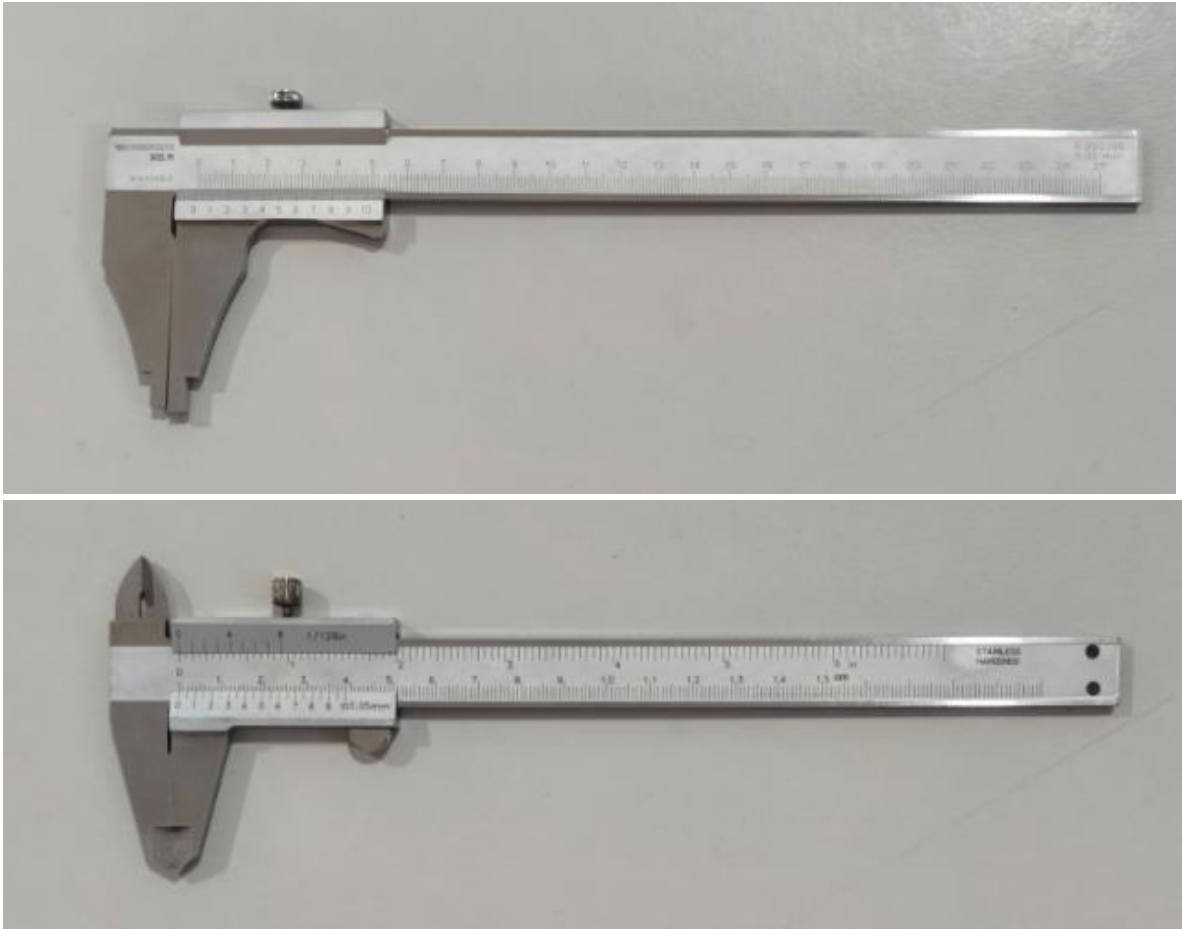


Figura 13 - Paquímetro, micrómetro, e balança digital

4. Configuração experimental

Depois de lixados e furados, os provetes foram limpos e, com o auxílio de uma fita adesiva dupla face, o transdutor de contato de disco piezoelétrico fino foi colado no provete numa posição específica, como é referido na norma [1], para obter uma leitura correta e funciona por efeito bimorfo. (figura 14)

De seguida, os provetes foram suspensos por um fio fino para permitir a sua vibração livre durante o ensaio de excitação por impulso.

O sinal elétrico foi coletado no PicoScope 3204A. Foi depois tratado e processado pelo algoritmo de transformada de Fourier no software Origin2017 para obter os valores das frequências naturais de vibração.

Com o provete suspenso e o PicoScope ligado ao disco piezoelétrico fino, foi executada a força com o excitador apresentado anteriormente para esse efeito e foram recolhidos os dados. Foram realizados 4 ensaios para cada provete, dois ensaios de flexão e dois de torção como referido no capítulo 3 deste relatório. Ambos os ensaios são baseados no método [3] [4] e foram realizados 2 ensaios de cada para obter resultados mais refinados e precisos.



Figura 14 - Provete suspenso e pronto para o ensaio de flexão

4.1 Dados recolhidos e analisados

Para demonstrar o tratamento dos dados recolhidos, vamos analisar ao pormenor um provete impresso a 90° , os restantes resultados obtidos estão em anexo no formato digital deste relatório.

O sinal foi recolhido através do PicoScope e enviado para o computador em formato de texto. Os valores dos picos em X e Y são frequência e magnitude respetivamente (figura 15 e 16). Estes valores de picos foram tratados em Excel e depois introduzidos no Origin2017 onde foram analisados pormenorizadamente. De seguida, foram

retirados os valores das frequências de vibração do ensaio de flexão e torção. (figura 17 e 18).

A escala utilizada no software Origin2017 foi, como está representado nos gráficos em baixo, de 0 Hz por 5000 Hz. O valor de $X=249.89$ Hz (figura 17) é o nosso f_f (frequência de flexão). Por sua vez, o valor de $X=549.75$ Hz (figura 18) é o nossa f_t (frequência de torção). Todos os dados apresentados e referenciados estão em anexo em formato digital neste relatório.

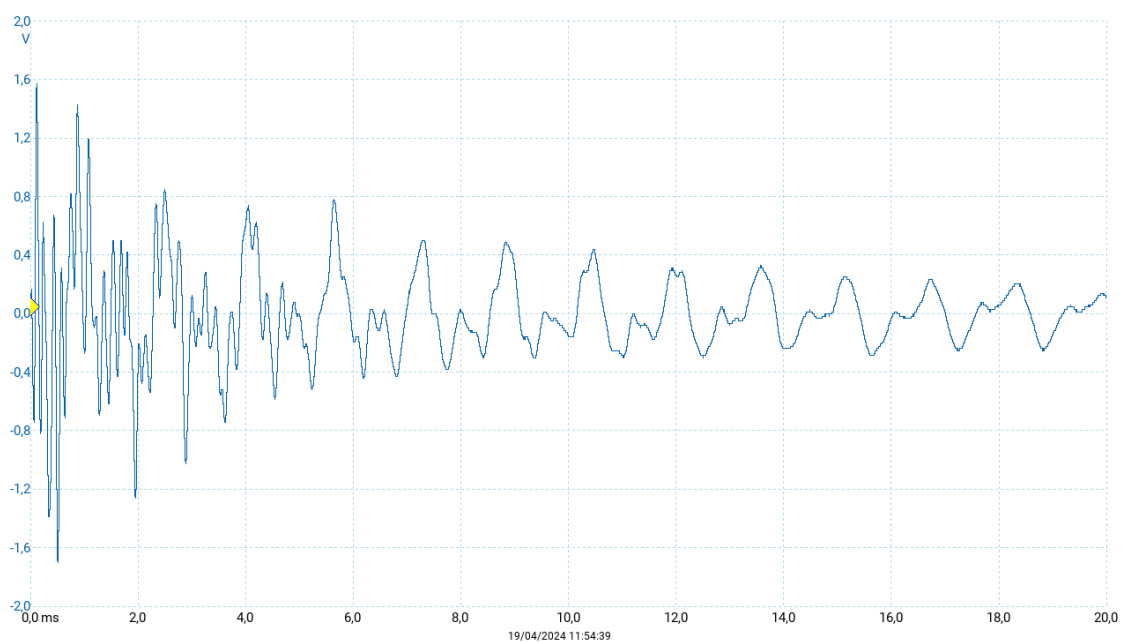


Figura 15 - Dados do PicoScope no ensaio de flexão, provete 90°

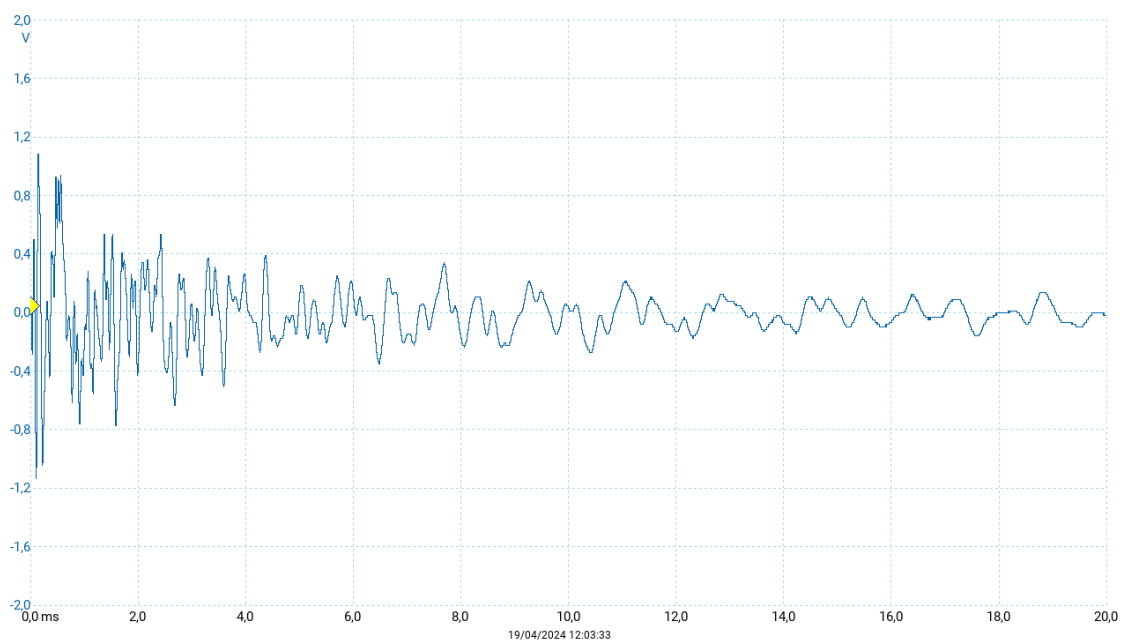


Figura 16 - Dados do PicoScope no ensaio de torção, provete 90°

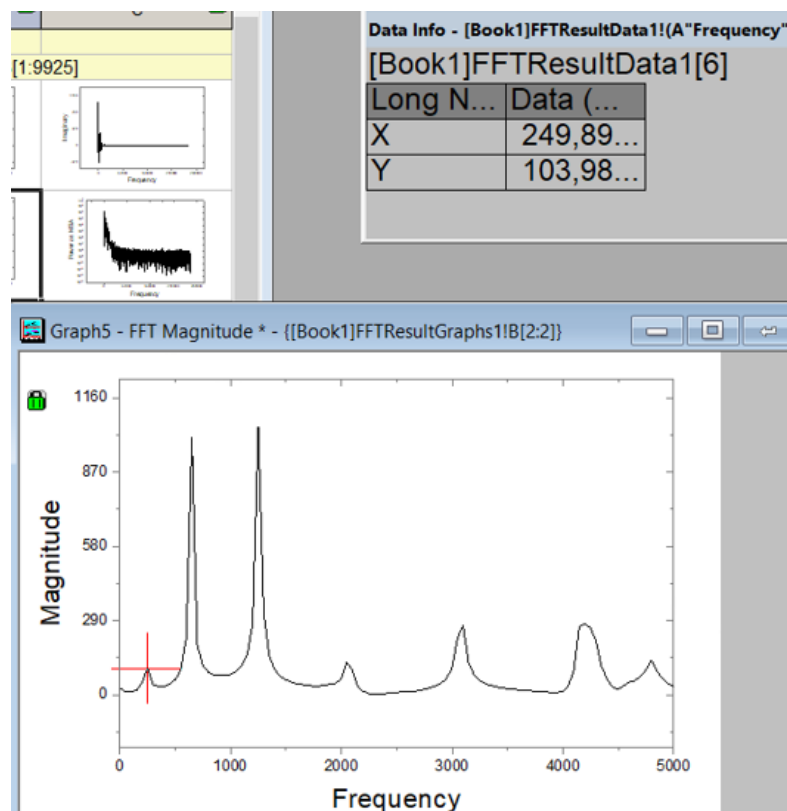


Figura 17 - Frequência recolhida no ensaio de flexão, provete 90°, X=249.89 Hz

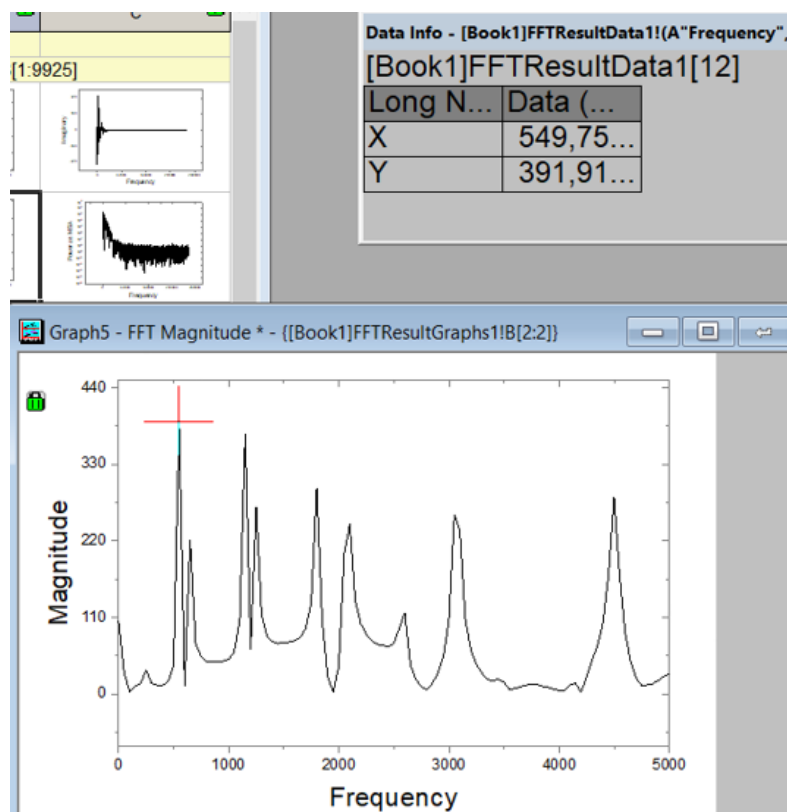


Figura 18 - Frequência recolhida no ensaio de torção, provete 90°, X=549.75 Hz

Tabela 3: Propriedades elásticas dinâmicas

Provetes	Ângulo de impressão	E	G	ν
		GPa	GPa	-
Provete 1	90°	3,508	0,953	0,84
Provete 2	0°	2,507	1,044	0,199
Provete 3	45°	2,256	1,109	0,016
Provete 4	0° Vertical	2,601	1,107	0,174

4.2 Análise de resultados

Antes da realização de qualquer cálculo, foi identificado um aspeto no processo de medição. Os provetes cuja impressão foi a 0°, isto quer dizer provetes 2 e 4, apresentaram mais desgaste na fase do lixamento o que lhes conferiu uma espessura menor. Consequentemente, o provete 2 reduziu a sua massa em relação aos restantes provetes.

Em relação aos cálculos efetuados, observa-se que no provete 1 (90°) o módulo de Young é superior aos outros provetes, o que demonstra que nesta configuração de impressão o Tough PLA vermelho é mais elástico e demonstra uma deformação menor para uma determinada tensão em relação aos outros provetes.

Observa-se também uma variação bastante distinta do coeficiente de Poisson no mesmo provete em relação aos restantes. O provete 1 tem um valor mais elevado para o coeficiente de Poisson o que lhe confere características de maior rigidez.

4.3 Comparação de resultados

Após a análise de resultados realizada anteriormente, será agora feita uma comparação com os resultados do colega e os resultados do artigo [4] que alterou a cor de impressão do Tough PLA para branco e para preto, respetivamente. A tabela 4 apresenta os valores das propriedades elásticas dinâmicas que por ele foram determinadas. A tabela 5 apresenta os resultados que foram determinados no artigo [4].

Tabela 4: Propriedades elásticas dinâmicas determinadas pelo colega

Provetes	Ângulo de impressão	E	G	ν
		GPa	GPa	-
Provete 1	90°	3,6642	0,9973	0,8371
Provete 2	0°	1,1678	0,4604	0,2682
Provete 3	45°	2,2813	0,9421	0,2108
Provete 4	0° Vertical	2,6936	1,1762	0,145

Tabela 5: Propriedades elásticas dinâmicas determinadas no artigo [4]

E_{11}	E_{22}	ν_{12}	ν_{23}	G_{12}	G_{23}	E_{33}
2,785	3,512	0,323	0,279	1,032	1,151	2,945

E_{11} -> módulo de Young na impressão a 0°

E_{22} -> módulo de Young na impressão a 90°

ν_{12} -> coeficiente de Poisson no plano

ν_{23} -> coeficiente de Poisson na vertical

G_{12} -> módulo de Torção no plano

G_{23} -> módulo de Torção na vertical

E_{33} -> módulo de Young na impressão a 45°

Ao comparar os resultados, exigem algumas alterações nas propriedades elásticas dinâmicas entre os provetes de cores diferentes que são de relevante discussão.

Na impressão a 0°, o provete branco demonstra um módulo de elasticidade bastante inferior ao resultado que foi obtido com o provete vermelho e ao provete preto.

O módulo de Young na impressão a 90° foi uma propriedade que se manteve relativamente igual nas 3 configurações de cores.

Em relação do coeficiente de Poisson, é de realçar que na impressão vertical o provete preto [4] obteve um valor maior em relação aos resultados obtidos no meu trabalho e do colega.

Na impressão a 45°, o provete branco apresenta um coeficiente de Poisson superior em comparação com o provete vermelho o que revela uma maior rigidez do provete branco nesta configuração de impressão.

5. Conclusão

Os objetivos para este trabalho foram concluídos com sucesso. Todos os resultados estão aqui apresentados e descritos para que mais tarde, estes resultados possam ser utilizados para outras dissertações ou estudos.

Em relação aos provetes impressos em Tough PLA vermelho em estudo, foi concluído que o tipo de impressão com maior módulo de elasticidade e maior coeficiente de Poisson é a impressão do provete a 90°, o que torna os elementos impressos nesta configuração mais elásticos e resistentes quando expostos a uma determinada tensão.

As conclusões da influência da cor nas propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA obtido por impressão 3D são as seguintes: na impressão a 90° é aquela onde são apresentados os melhores resultados nas 3 cores com maior elasticidade, e conseqüente, menor deformação o que torna esta configuração a mais fiável.

Na impressão a 0°, é bastante visível que o provete branco apresenta mais fragilidades no seu módulo de elasticidade em relação as outras 2 cores, o que esta configuração a mais frágil.

Após a apresentação das conclusões obtidas a partir dos resultados, estes podem ser analisados e utilizados como base para o desenvolvimento de projetos futuros no âmbito da impressão 3D com o material Tough PLA. A partir dessa análise, poderá ser possível identificar potenciais melhorias na construção de equipamentos utilizando este material.

Bibliografia

[1] ASTM E1876: Standard test method for dynamic Young's modulus, shear modulus and Poisson's ratio by impulse excitation of vibration;

[2] ASTM C1259 Test Method for Young's Modulus, Shear Modulus and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration;

[3] Ramalho, Armando. "Measuring the dynamic elastic properties of anisotropic materials to characterize the mechanical behaviour of products manufactured by additive processes". Speech proffered at the 13th International Conference on Key Engineering Materials (ICKEM 2023), Istanbul, Türkiye | March 24-26, 2023.

<https://repositorio.ipcb.pt/handle/10400.11/8563>

[4] Ramalho, Armando; Gonçalves, Luís; Couto, Gonçalo. "The influence of layer height in the orthotropic elastic properties of PLA material obtained by additive processes". Third European Conference on the Structural Integrity of Additively Manufactures Materials (ESIAM23) | 2024

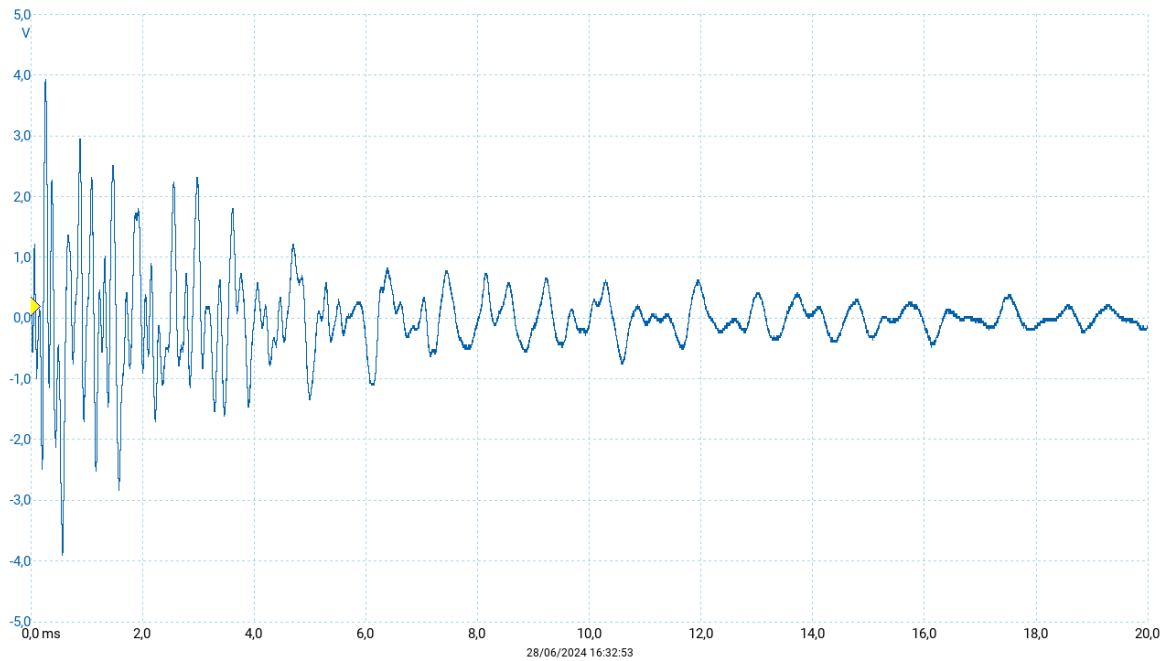
[5]<https://evolt.pt/produto/pla-tough-1kg-natural-winkle/>

[6]<https://www.datech.pt/produtos-autodesk/autodesk-fusion-360/>

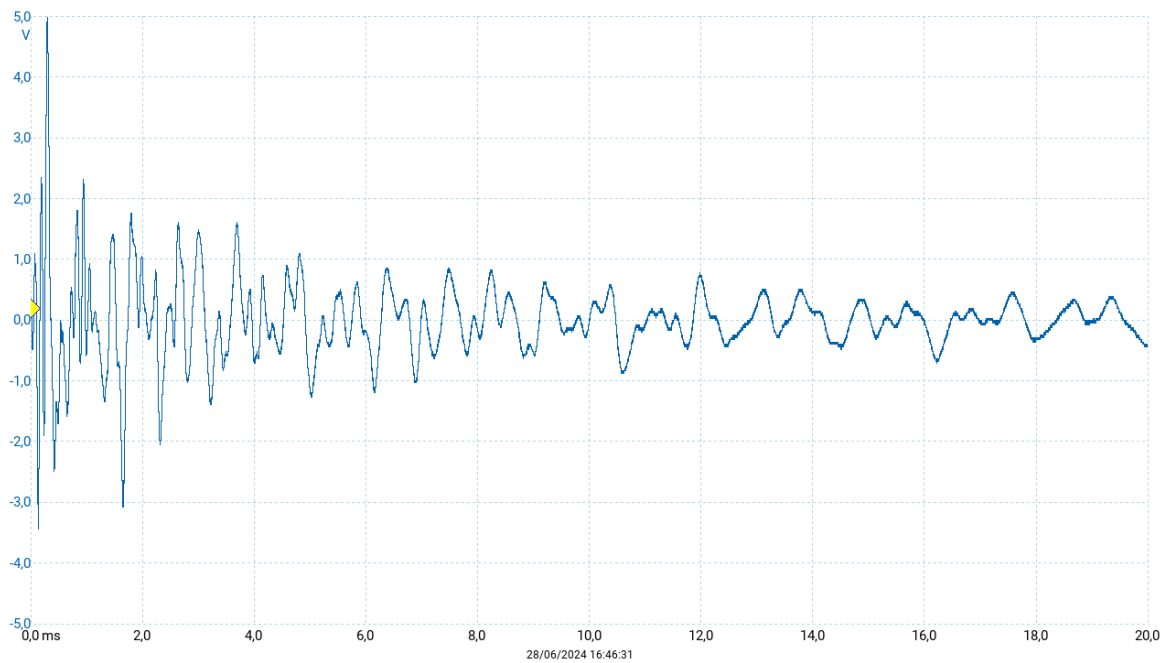
[7]<https://www.picotech.com/download/datasheets/PicoScope3200ABSeriesDataSheet.pdf>

Anexo 1: Provette 2, 0°

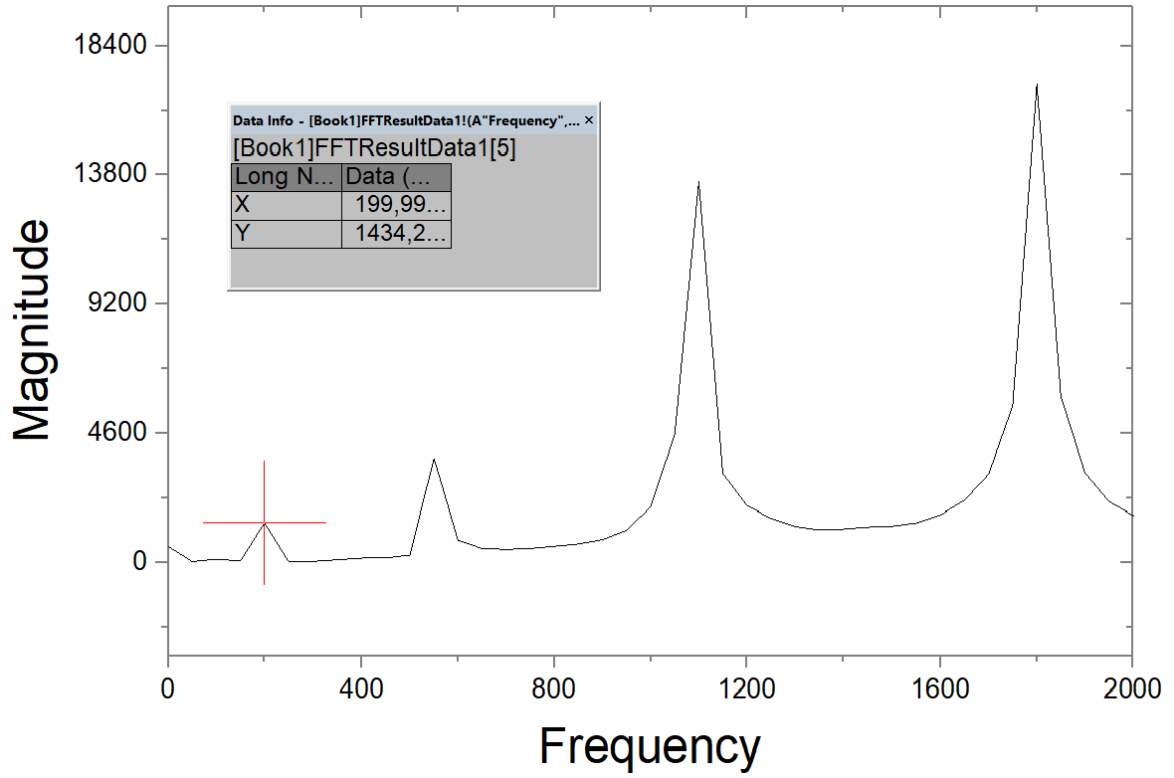
PicoScope, flexão



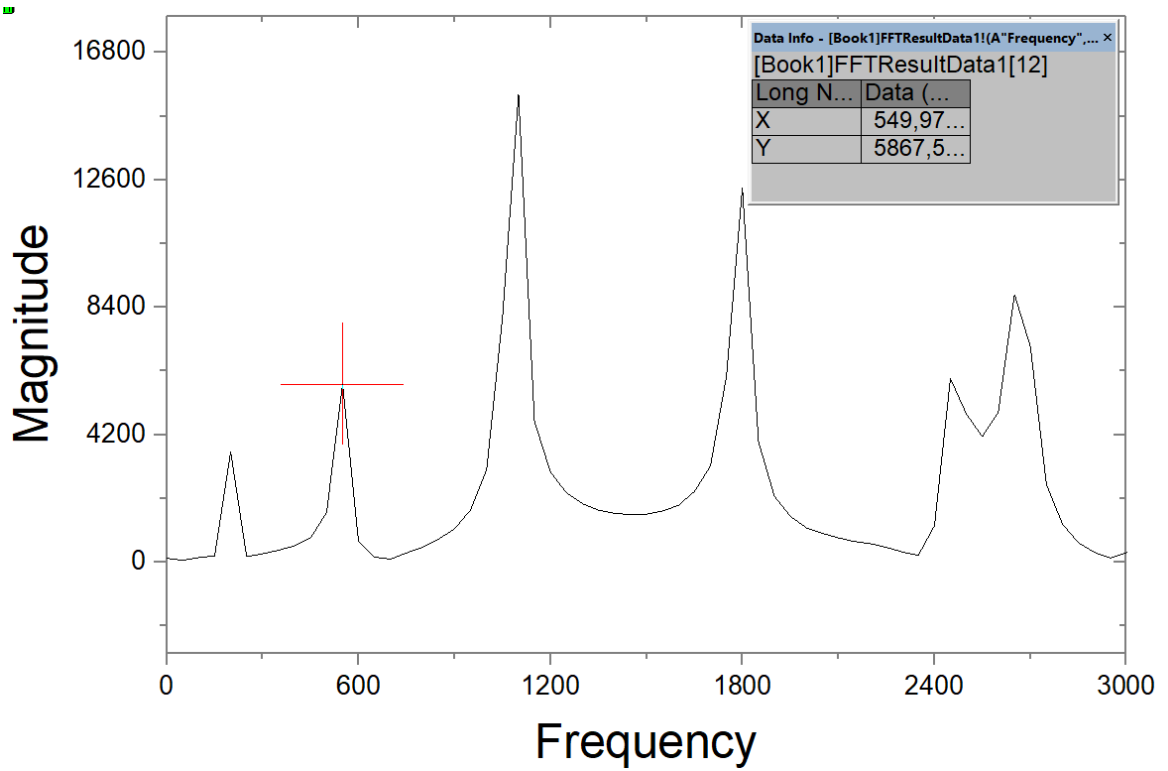
PicoScope, torção



Origin2017, flexão

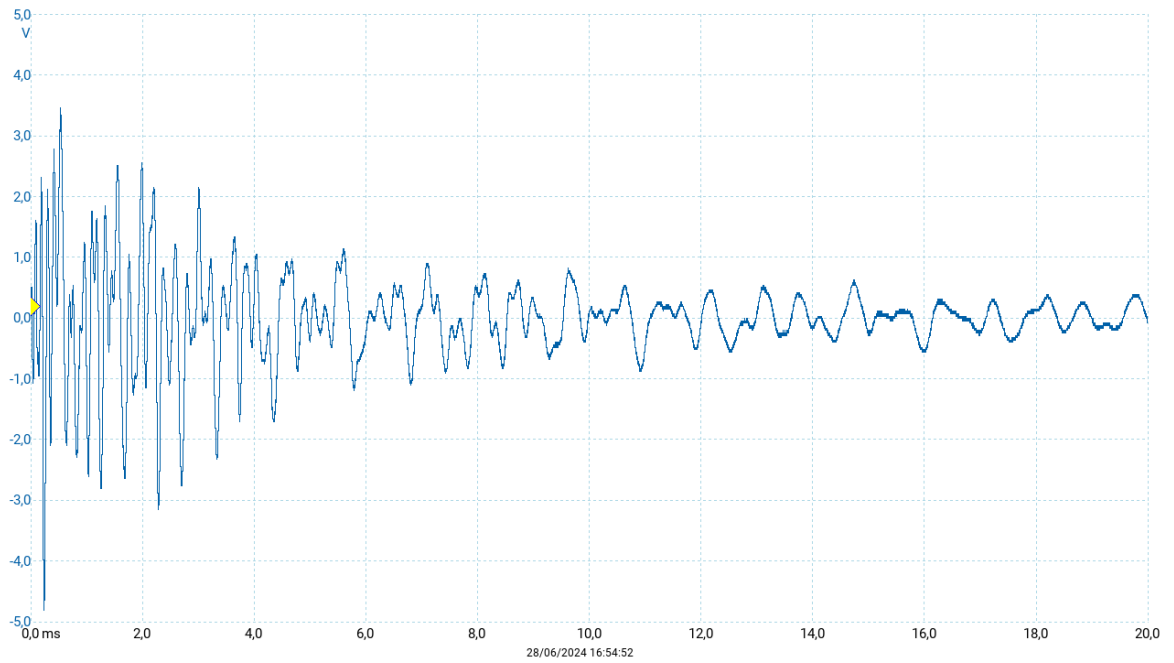


Origin2017, torção

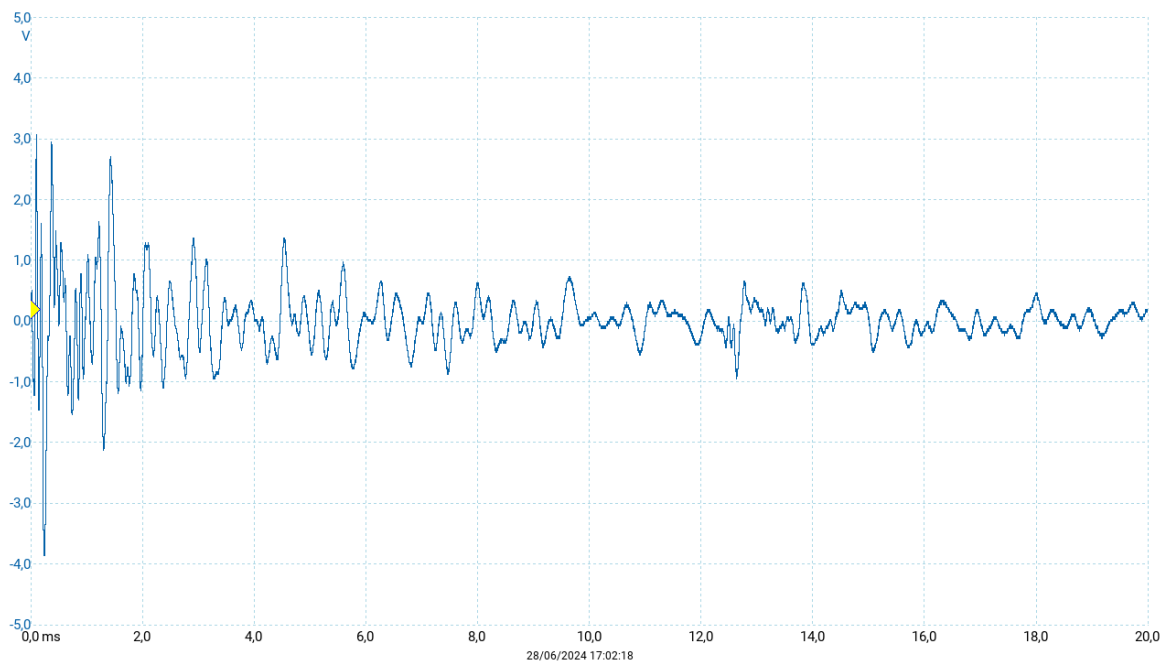


Anexo 2: Provete 3, 45°

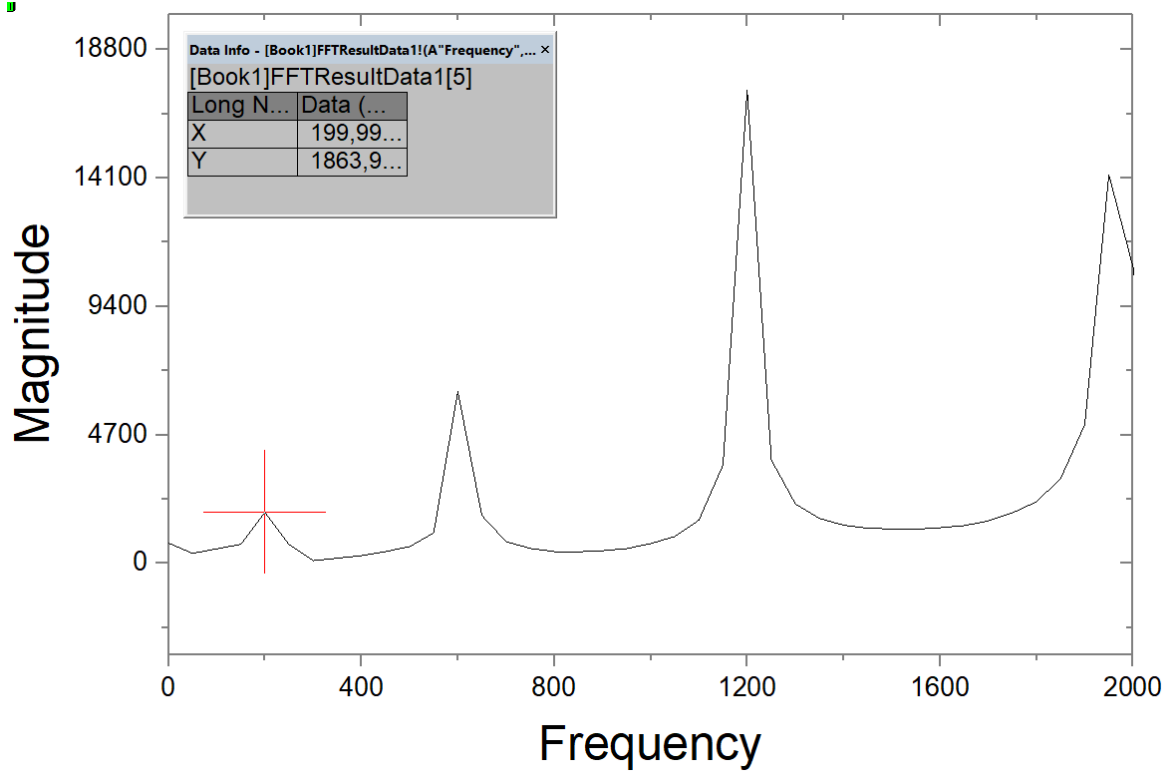
PicoScope, flexão



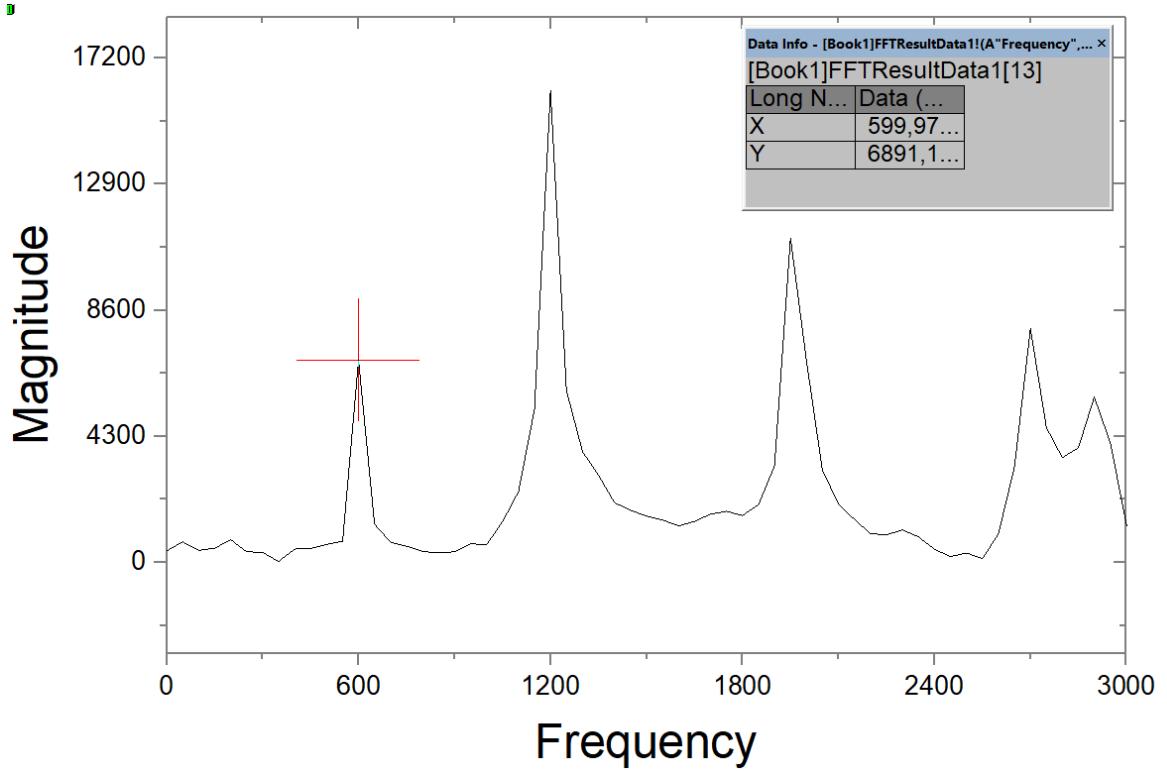
PicoScope, torção



Origin2017, flexão

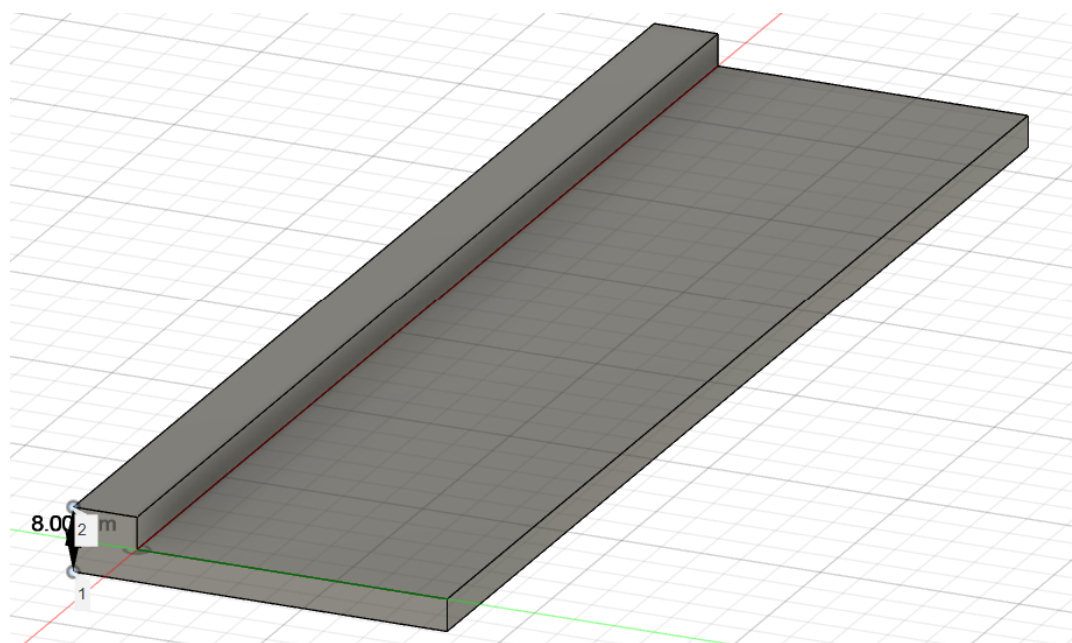


Origin2017, torção

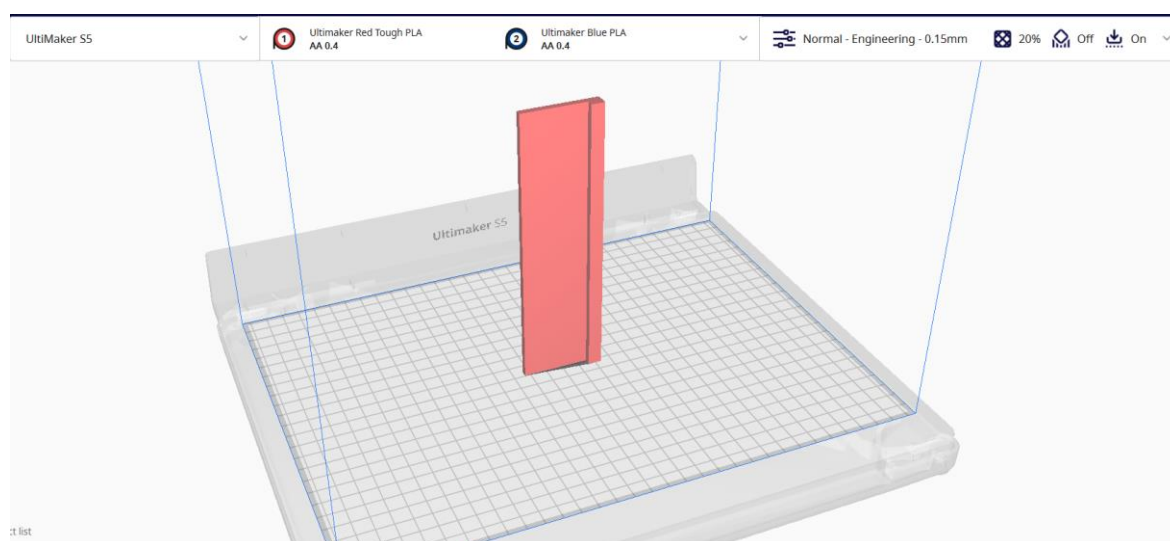


Anexo 3: Provete 4, 0° Vertical

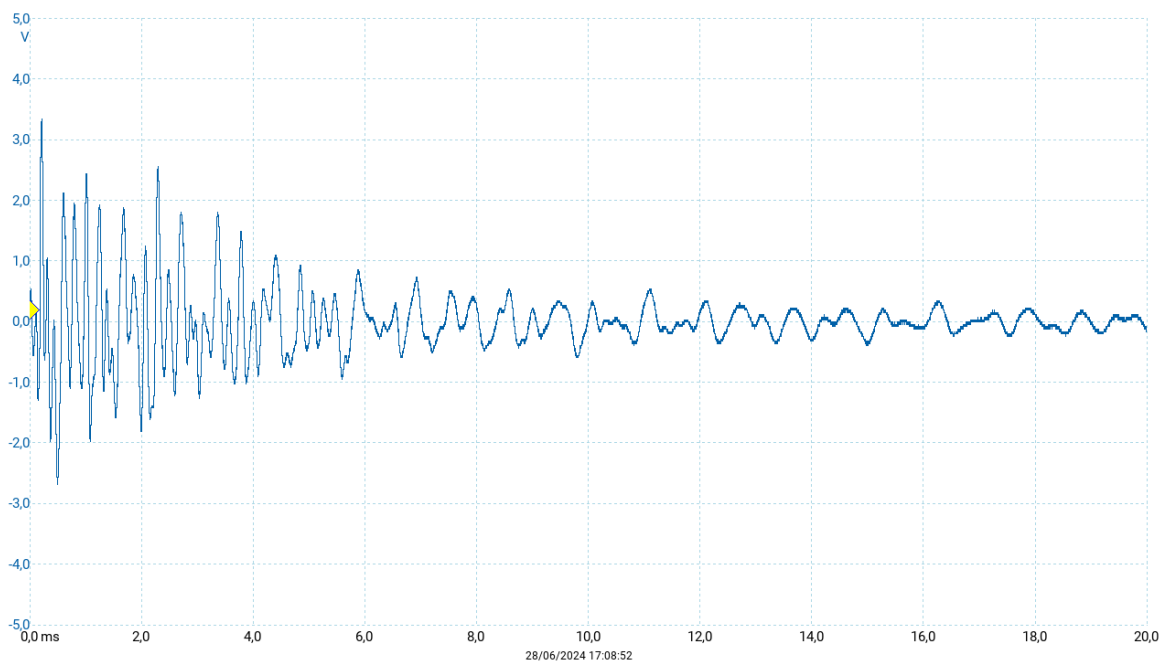
Autodesk Fusion360



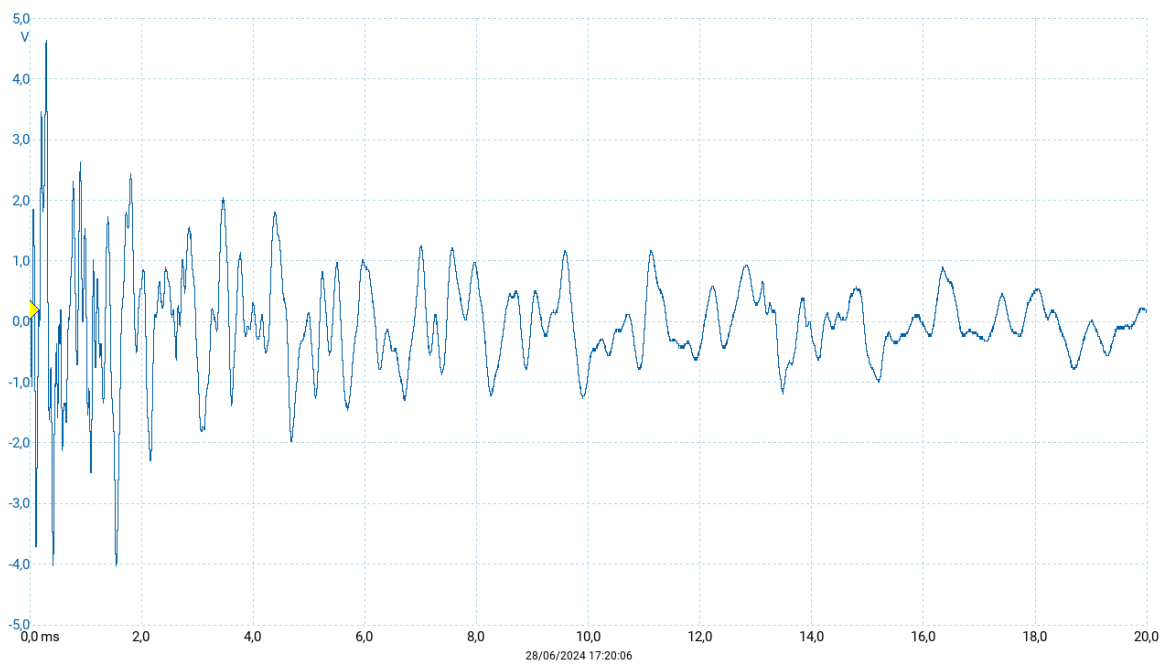
Ultimaker Cura



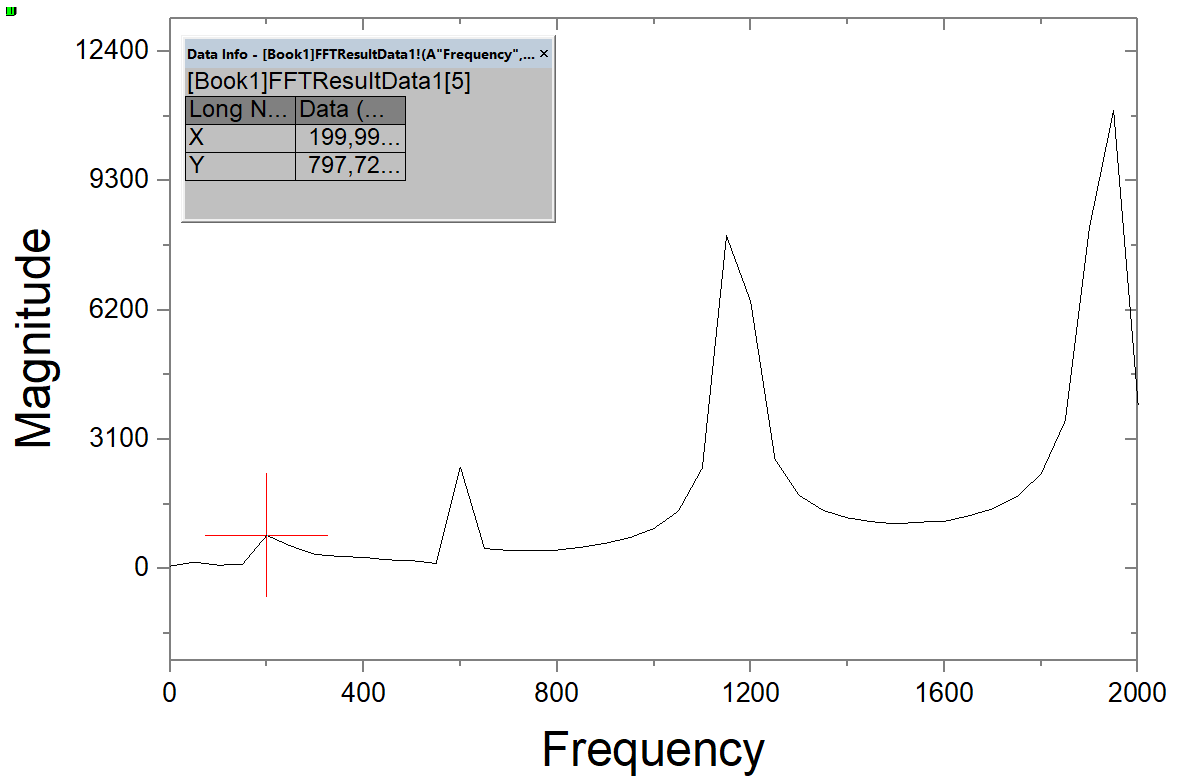
PicoScope, flexão



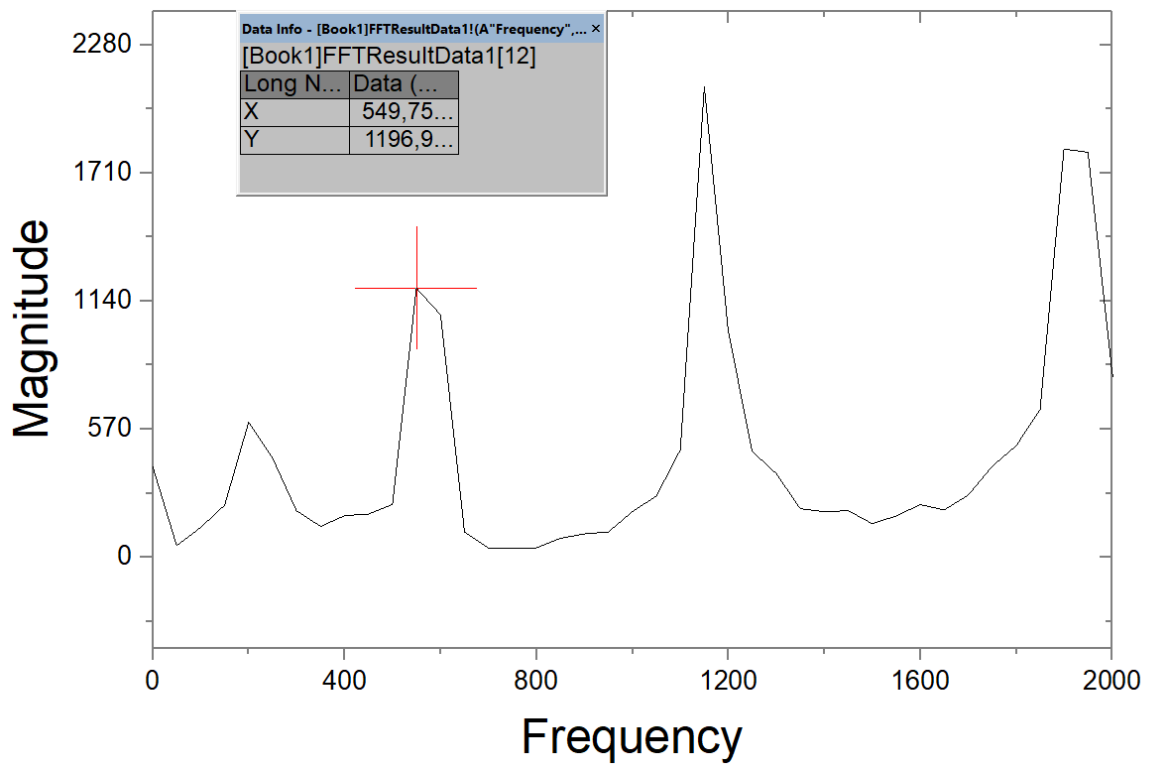
PicoScope, torção



Origin2017, flexão



Origin2017, torção



Anexo 4: Fotografias

