



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

Daniel Lopes Antunes

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, realizado sob a orientação científica do Professor 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

Arguentes

Professor Doutor, Luís Miguel Pedroso de Moura Correia

Professor Adjunto, Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco

“Há uma coisa que gostei de ouvir do Fellini: tinha uma grande admiração pelas pessoas que falham e persistem. Persistem com a mesma vontade, ou mais forte, com a ideia de alcançarem a finalidade última. Considero-me um pouco dentro dessa classe.”

Manoel d'Oliveira

Agradecimentos

Primeiramente gostaria de expressar a minha gratidão ao Professor Armando Ramalho por me ter acompanhado neste projeto, cuja orientação e apoio foram fundamentais para o desenvolvimento deste projeto. O seu conhecimento foi essencial para superar os desafios encontrados ao longo da elaboração do projeto.

Também gostaria de agradecer à Escola Superior de Tecnologia de Castelo Branco, que nos disponibilizou o laboratório e os recursos necessários para a realização deste trabalho. A estrutura e o suporte oferecidos pela instituição foram indispensáveis para o sucesso deste projeto.

Queria também agradecer aos professores que passaram no meu caminho e que transmitiram ensinamentos essenciais para a conclusão desta fase.

Agradecer a todos os meus colegas que encontrei ao longo destes anos por toda a amizade, apoio, entreaajuda e tardes/noites de estudo para conseguirmos concluir este objetivo de concluir o curso.

Aos meus pais e familiares pelo esforço para que tivesse todas as condições necessárias para concretizar esta etapa.

E ao David Dias meu colega de projeto, pela troca de ideias e conhecimento nestes últimos meses na concretização do projeto final de curso.

Resumo

O objetivo deste trabalho é determinar a influência da cor nas propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA obtido por impressão 3D, com foco no coeficiente de Poisson e no módulo de Young, utilizando o procedimento definido na norma ASTM E 1876 – 01 e ASTM C 1259. Estas normas contém todos os procedimentos necessários para a determinação das propriedades elásticas dinâmicas dos materiais, este procedimento têm a ajuda de fórmulas matemáticas de forma que nos dê uma boa garantia na confiabilidade na obtenção de resultados.

Neste trabalho de projeto foi utilizada a técnica de excitação por impulso para medir essas propriedades, uma metodologia eficiente e não destrutiva para avaliar o comportamento elástico dos materiais, este método é muito eficaz na obtenção das propriedades anisotrópicas, utilizando as fórmulas necessárias para tal.

O fabrico dos provetes foi realizado com Tough PLA de cor branca, utilizando a tecnologia de impressão 3D, mais concretamente uma impressora Ultimaker S5. As amostras foram submetidas aos ensaios e assim permitindo a medição precisa do coeficiente de Poisson e do módulo de Young.

Os resultados obtidos indicarão se a cor influencia nessas propriedades.

Estes testes seguem as todas as diretrizes estabelecidas na norma ASTM E 1876 – 01 e ASTM C 1259, e assim poderemos ter a máxima confiabilidade nos resultados obtidos, e para podermos perceber melhor o impacto da cor nas propriedades mecânicas do Tough PLA.

Palavras chave

Tough PLA; Propriedades anisotrópicas; Impressão 3D; Coeficiente de Poisson; Módulo de Young

Abstract

The aim of this work is to determine the influence of colour on the dynamic elastic properties of Tough PLA obtained by 3D printing, with a focus on Poisson's ratio and Young's modulus, using the procedure defined in ASTM E 1876 - 01 and ASTM C 1259. These standards contain all the necessary procedures for determining the dynamic elastic properties of materials, this procedure is aided by mathematical formulae so as to give us a good guarantee of reliability in obtaining the results.

In this project, the impulse excitation technique was used to measure these properties, an efficient and non-destructive method for evaluating the elastic behaviour of materials. This method is very effective in obtaining anisotropic properties, using the necessary formulas.

The specimens were made from white Tough PLA using 3D printing technology, specifically an Ultimaker S5 printer. The samples were subjected to tests, thus enabling the Poisson's ratio and Young's modulus to be measured precisely.

The results obtained will indicate whether colour influences these properties.

These tests follow all the guidelines set out in ASTM E 1876 - 01 and ASTM C 1259, so that we can have maximum reliability in the results obtained, and so that we can better understand the impact of colour on the mechanical properties of Tough PLA.

Keywords

Tough PLA; Anisotropic properties; 3D printing; Poisson's ratio; Young's modulus

Índice Geral

Agradecimentos.....	VII
Resumo.....	IX
Abstract.....	XI
Índice de figuras.....	XV
Índice de símbolos.....	XVII
Lista de tabelas.....	XIX
1. Introdução.....	1
1.1. Enquadramento com o projeto	2
1.2. Estrutura do relatório	3
2. Caracterização das propriedades elásticas de materiais isotrópicos pelo método de excitação por impulso.....	4
2.1. Técnica de excitação por impulso.....	4
2.2. Caracterização das propriedades elásticas	6
2.2.1. Provetes excitados à flexão.....	6
2.2.2. Provetes excitados á torção.....	7
3. Material utilizado	9
3.1. Fusion360	9
3.2. Software Ultimaker Cura	10
3.3. Impressora 3D Ultimaker S5.....	12
3.4. Provetes.....	14
3.5. Transdutor de contacto de disco piezoelétrico fino.....	15
3.6. PicoScope	16
3.7. Balança, Paquímetro e Micrómetro	17
3.8. Excitador.....	18
4. Configuração da técnica de excitação por impulso.....	19
4.1. Dados obtidos	21
4.2. Análise dos resultados	26
4.3. Comparação de resultados	26
5. Conclusão	28
Bibliografia.....	29
Anexo 1: Proвете 1, ângulo de impressão a 90°.....	30
Anexo 2: Proвете 2, ângulo de impressão a 45°	32

Anexo 3: Provete 4, ângulo de impressão a 0° vertical	34
Fotografias.....	37

Índice de figuras

Figura 1 - Amostras retangulares testadas para flexão dentro e fora do plano	5
Figura 2 - Amostra retangular testada para vibração torcional.....	5
Figura 3 - Amostra retangular testada para vibração longitudinal	5
Figura 4 - Martelo típico para amostras pequenas	6
Figura 5 - Aparelho típico do ensaio.....	6
Figura 6 - Desenho do provete no Fusion360.....	9
Figura 7 - Janela de configuração do Ultimaker Cura	11
Figura 8 - Simulação de impressão no Cura do provete de 90°	11
Figura 9 - Simulação de impressão no Cura do provete de 45°	11
Figura 10 - Simulação de impressão no Cura do provete de 0°	12
Figura 11 - Impressora 3D Ultimaker S5 (esquerda) e impressora a imprimir um provete (direita).....	13
Figura 12 - Provetes prontos para o ensaio.....	14
Figura 13 - Ângulos de impressão.....	15
Figura 14 - Sensor piezoelétrico	16
Figura 15 - PicoScope	17
Figura 16 - Paquímetro.....	18
Figura 17 - Micrómetro	18
Figura 18 - Excitador utilizado no ensaio.....	19
Figura 19 - Posicionamento do sensor piezoelétrico e do ponto de impacto. 19	
Figura 20 - Provette pronto para ensaio de flexão (esquerda) e provete pronto para ensaio de torção (direita)	20
Figura 21 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio de flexão, provete 0° na horizontal.....	21
Figura 22 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio de torção, provete 0° na horizontal.....	22
Figura 23 - Frequência recolhida no ensaio de flexão, provete 0° horizontal, X=149.93 Hz.....	22
Figura 24 - Frequência recolhida no ensaio de torção, provete 0° , X=399.82 Hz	23
Figura 25 - Excel utilizado para os cálculos.....	24

Índice de símbolos

E = módulo de Young, Pa

G = módulo de torção, Pa

ν = coeficiente de Poisson

l = comprimento da barra, mm

w, b = largura da barra, mm

t = espessura da barra, mm

m = massa, gr

f_f = frequência ressonante fundamental da barra em flexão, Hz

f_t = frequência ressonante fundamental da barra em torção, Hz

T = fator de correção para o modo de flexão fundamental tendo em conta a espessura finita da barra, coeficiente de Poisson

Lista de tabelas

Tabela 1 - Caraterísticas dos provetes	15
Tabela 2 - Caracterização dos provetes e resultados dos ensaios de flexão e torção	23
Tabela 3 - Propriedades elásticas dinâmicas.....	24
Tabela 4 - Propriedades elásticas dinâmicas.....	25
Tabela 5 - Propriedades elásticas dinâmicas de cor vermelha obtido pelo colega	26
Tabela 6 - Propriedades elásticas dinâmicas de cor preta determinadas no artigo [4].....	27

1. Introdução

A impressão 3D está cada vez mais presente como uma tecnologia versátil no fabrico de objetos em várias áreas, desde a engenharia á medicina. Um dos materiais mais utilizado na impressão 3D é o Tough PLA, um material bastante escolhido por ter as propriedades mecânicas favoráveis.

O projeto que foi desenvolvido ao longo do último semestre, pretende aprofundar os conhecimentos obtidos nas cadeiras de caracterização mecânica de materiais, resistência de materiais e fabrico assistido por computador.

Com este projeto pretende-se avaliar a influência da cor nas propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA obtido por impressão 3D, com foco em parâmetros críticos como o coeficiente de Poisson e o módulo de Young, utilizando o procedimento definido na norma ASTM E 1876 [1]. Este procedimento será aplicado e fundamentado na obtenção das propriedades anisotrópicas.

Para um melhor entendimento, o coeficiente de Poisson é uma propriedade mecânica que descreve a deformação longitudinal e a deformação transversal quando um material é submetido a uma tensão. Ou seja, quando um material é esticado ou comprimido numa direção, ele tende a contrair ou expandir nas direções perpendiculares á força aplicada.

O módulo de Young mede a rigidez de um material, ou seja, avalia a relação entre a tensão e a deformação na zona elástica do material. Quanto maior for o módulo de Young, mais rígido é o material, o que significa que ele precisa de mais força para sofrer uma mesma quantidade de deformação. É fundamental para a análise de estruturas, pois permite prever como um material responderá a forças em termos de alongamento ou compressão. No último subcapítulo os resultados deste projeto vão ser comparados com os resultados de outro trabalho onde foi alterada a cor da impressão do Tough PLA para vermelho e com um artigo de Tough PLA de cor preto.

As tarefas realizadas durante o projeto foram as seguintes:

- Desenho dos provetes e do elemento estrutural;
- Impressão 3D dos provetes;
- Estudo da norma ASTM E 1876;
- Obtenção das propriedades elásticas dinâmicas.

1.1. Enquadramento com o projeto

Como já foi referido anteriormente, pretende-se avaliar a influência da cor nas propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA obtido por impressão 3D, com o objetivo de calcular o coeficiente de Poisson e o módulo de Young, seguindo a norma ASTM E 1876[1] e ASTM C 1259[2].

O material utilizado foi o Tough PLA ou ácido polilático, é um termoplástico biodegradável de origem natural e de fontes renováveis, como o amido de milho ou cana-de-açúcar, o que o torna um material biodegradável e mais sustentável em comparação com plásticos derivados do petróleo. Algumas das características do Tough PLA são:

- É um material biodegradável, o que o torna uma opção ecologicamente mais amigável do que outros plásticos;
- É fácil de imprimir, tendo baixa tendência a deformar e uma temperatura de extrusão relativamente baixa (entre 180°C e 220°C);
- O Tough PLA é menos resistente ao impacto e ao calor em comparação com outros polímeros, e por isso é mais adequado para peças que não exigem alta resistência mecânica ou térmica.

Os provetes foram impressos na impressora 3D Ultimaker S5 no laboratório de conceção e projeto da ESTCB (C1). Imprimiram-se 4 provetes e a cor aplicada foi branca, a espessura utilizada nas camadas de impressão foi de 0,15mm. O ângulo de impressão foi 0°, 45° e 90° todos estes na horizontal e um a 0° na vertical e assim poderemos verificar se a cor influencia nas propriedades elásticas dinâmicas com os diferentes ângulos de impressão. Num capítulo mais á frente será apresentado todas as características dos provetes.

Depois de todo este processo foi realizado o método de excitação por impulso. Este método é não destrutivo e serve para medir as propriedades elásticas dinâmicas de materiais. Trata-se em aplicar um pequeno impacto controlado ao material e medir as vibrações resultantes. De seguida essas vibrações são analisadas de modo a obter as suas frequências naturais, com esses dados obtidos, as vibrações, as frequências, o peso e as dimensões dos provetes irá ser possível obter resultados acerca do módulo elástico dos materiais.

1.2. Estrutura do relatório

O presente relatório está dividido em 5 capítulos com o objetivo de alcançar os objetivos descritos acima e para que seja de fácil entendimento.

O capítulo 1 faz uma apresentação do que se vai realizar ao longo dos ensaios e os objetivos a cumprir.

O capítulo 2 é analisada a norma ASTM E 1876[1] e a norma ASTM C 1259[2], e todas as fórmulas que vão ser usadas para obter os resultados.

No capítulo 3 apresenta se todo o material utilizado ao longo da realização do projeto bem como os softwares e também as medidas e características dos provetes em estudo.

O capítulo 4 tem os passos dos ensaios realizados, uma análise aos provetes, a apresentação dos resultados obtidos e também vai ser comparado com os resultados de outro trabalho de projeto e com um artigo.

O capítulo 5 são apresentadas todas as conclusões retiradas na realização deste projeto.

Por fim são apresentados anexos e algumas fotografias que foram tiradas ao longo do projeto.

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

2.1. Técnica de excitação por impulso

A técnica de excitação por impulso é um método não destrutivo utilizado para medir as propriedades elásticas dinâmicas, como o coeficiente de Poisson e o módulo de Young.

Este método de ensaio não destrutivo avalia as características dos materiais sem que altere a sua capacidade de uso final. É um método que oferece uma resposta rápida e os custos dos equipamentos necessários para os ensaios são relativamente acessíveis.

No contexto deste projeto, que avalia as propriedades elásticas do Tough PLA obtido por impressão 3D, a técnica abrange aplicar um pequeno impacto controlado ao provete e medir as vibrações resultantes sem danificá-lo, e o transdutor que captura a resposta acústica, transforma em sinal elétrico que é processado pelo software permitindo a determinação das propriedades elásticas do material.

Essas vibrações são analisadas pelas suas frequências naturais, que são diretamente relacionadas às propriedades mecânicas do material. Com base nesses dados é possível calcular o módulo de Young (rigidez) e o coeficiente de Poisson (relação entre deformações longitudinal e transversal), permitindo avaliar fatores como a cor do material Tough PLA afeta as suas características mecânicas.

A partir daí, é calculado o módulo elasticidade dos materiais considerando a vibração, a geometria, a massa, as dimensões do corpo e as frequências. Existem quatro modos de vibração de interesse, são os seguintes:

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

Para os nossos provetes pequenos e finos são utilizados a flexão fora do plano e a torção, para calcular as propriedades elásticas.

De referir que as normas ASTM E 1876[1] e ASTM C 1259[2] explicam pormenorizadamente como deve ser realizado esta técnica, abordando todos os parâmetros. As seguintes figuras representam a metodologia dos ensaios pela norma:

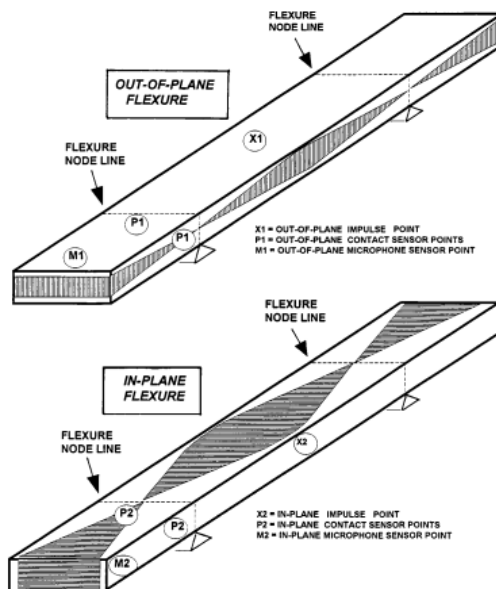


Figura 1 - Amostras retangulares testadas para flexão dentro e fora do plano

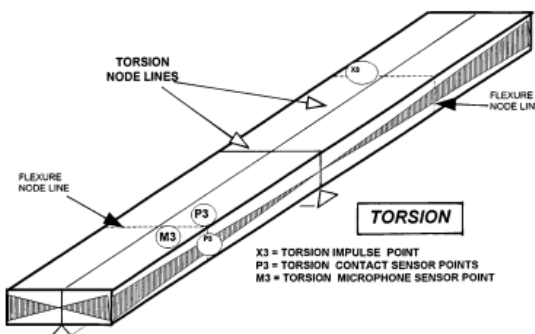


Figura 2 - Amostra retangular testada para vibração torcional

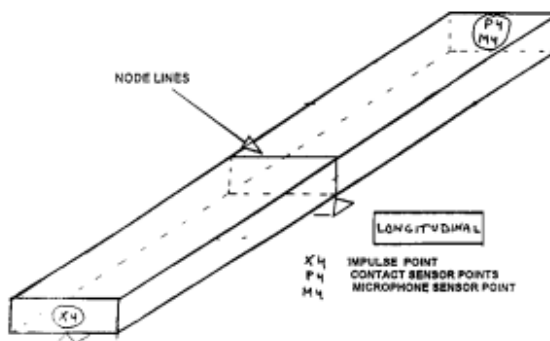


Figura 3 - Amostra retangular testada para vibração longitudinal

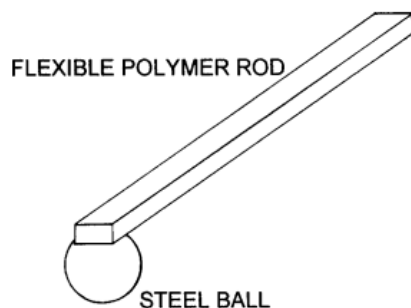


Figura 4 - Martelo típico para amostras pequenas

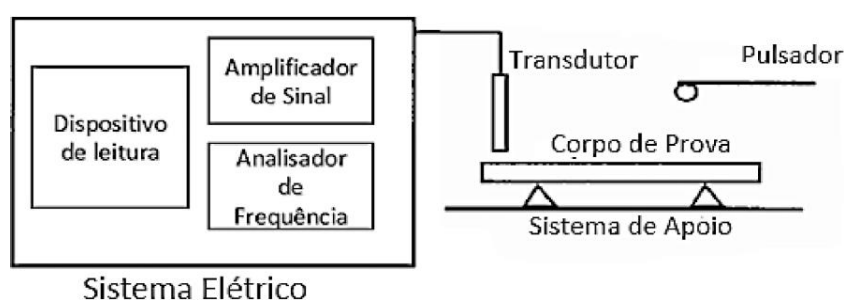


Figura 5 - Aparelho típico do ensaio

2.2. Caracterização das propriedades elásticas

2.2.1. Provetes excitados à flexão

Segundo a norma [1], o módulo de Young é definido pela seguinte equação:

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

Os símbolos representam-se da seguinte maneira:

- E = Módulo de elasticidade
- Ff = Frequência de ressonância do primeiro modo de flexão
- m = Massa da barra
- w = Largura da barra
- L = Comprimento da barra
- t = Espessura da barra

- T = Fator de correção para o modo de flexão fundamental que depende da espessura finita da barra e do coeficiente de Poisson

A seguinte equação representa o fator de correção T :

$$T = 1 + 6.585 (1 + 0.0752 \mu + 0.8109 \mu^2) (t/L)^2 - 0.868 (t/L)^4 - \left[\frac{8.340 (1 + 0.2023 \mu + 2.173 \mu^2) (t/L)^4}{1.000 + 6.338 (1 + 0.1408 \mu + 1.536 \mu^2) (t/L)^2} \right]$$

Onde μ é o coeficiente de Poisson.

O fator de correção T pode ser simplificado se $\frac{L}{t} \geq 20$, caso isso aconteça pode ser utilizada a equação:

$$T = \left[1,000 + 6,585 \left(\frac{t}{L} \right)^2 \right].$$

2.2.2. Provetes excitados á torção

O módulo de torção G , é definido pela seguinte equação:

$$G = \frac{4Lmf_t^2}{bt} \left[\frac{B}{(1 + A)} \right]$$

Onde:

- G = Módulo de elasticidade transversal
- Ft = Frequência de ressonância do primeiro modo de torção
- L = Comprimento da barra
- m = Massa da barra
- b = Largura da barra
- t = Espessura da barra

O B é um termo que depende da geometria do provete e é definido pela equação:

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

O A é um fator de correção empírico que depende da razão da largura pela espessura do provete.

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

A seguinte fórmula aplica-se para materiais isotrópicos, ou seja, as suas propriedades mecânicas são as mesmas em todas as direções. A norma ASTM E 1876[1] diz nos que o coeficiente de Poisson para materiais isotrópicos é calculado da seguinte fórmula:

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

Onde:

- G = Módulo de torção
- E = Módulo de Young

Para conseguirmos ter uma maior precisão nos dados de módulo do teste dinâmico que é na ordem de 1%, precisamos de ter em atenção vários fatores como:

- Um controlo preciso das dimensões, geometria e forma da peça. A espessura da viga, que entra nas equações como o terceiro poder é um dos fatores mais importantes que afeta a precisão e a confiabilidade dos resultados.
- A maquinagem das faces do teste das peças devem ser realizadas com cuidado para garantir paralelismo melhor que 0,3.
- A rugosidade da superfície da peça deve ter uma qualidade bastante alta, pois pode afetar a precisão nas dimensões medidas da peça e os cálculos do módulo. Uma superfície lisa é desejável e um acabamento padrão de engenharia deve ser considerada como a especificação mínima.

3. Material utilizado

Neste capítulo vou mencionar todo o material e softwares que foi usado ao longo do projeto. Vou também explicar todo o processo desde que foi impresso até estar pronto para a realização dos ensaios.

3.1. Fusion360

A primeira tarefa a ser executada foi desenhar os provetes no software Fusion360. O Fusion360 é um software de modelagem 3D desenvolvido pela Autodesk, bastante utilizado para engenharia e fabrico assistido no computador. Combina algumas ferramentas numa única plataforma, o que facilita o desenvolvimento de produtos desde a conceção inicial até à fase de protótipo e fabrico.

Esta etapa foi acessível de fazer, o desenho do provete no Fusion 360 foi criado com as seguintes dimensões (figura 6):

- $L = 167,00 \text{ mm}$
- $w, b = 37,00 \text{ mm}$
- $t = 4,00 \text{ mm}$

Os provetes vão ser impressos todos com as mesmas dimensões, por isso basta desenhar uma vez. Depois de desenhar os provetes, foram exportados para o software Cura da Ultimaker no formato .STL.

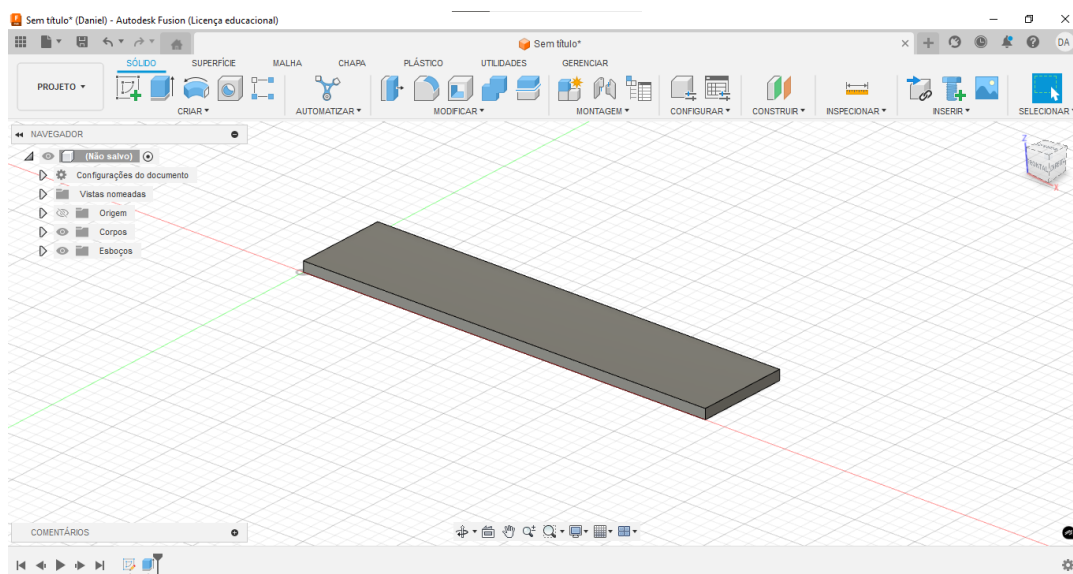


Figura 6 - Desenho do provete no Fusion360

3.2. Software Ultimaker Cura

O Ultimaker Cura é um software de fatiamento desenvolvido pela Ultimaker, utilizado para preparar modelos 3D para impressoras 3D. É reconhecido por ser um dos softwares mais utilizados para impressoras 3D.

O fatiamento é um processo que converte um modelo 3D em camadas 2D que são impressas continuamente e assim a peça é construída camada por camada.

Existem várias características positivas do Ultimaker Cura que vão ser mencionadas de seguida:

- Interface intuitiva:

A visualização em tempo real permite que vejamos o modelo e as camadas a serem impressas, logo se houver algum ajuste a fazer poderá ainda ser feito.

- Compatibilidade com diversas impressoras 3D:

Embora tenha sido projetado para as impressoras da Ultimaker, o Cura é compatível com outras marcas e modelos de impressoras 3D.

- Configurações avançadas de impressão:

O Cura oferece mais de 400 parâmetros configuráveis (figura 7), tais como a altura da camada, a velocidade de impressão, o preenchimento, suportes, temperatura do bico de extrusão, etc.

- Simulação e visualização de camadas:

O Cura permite que vejamos cada camada da impressão detalhada, facilitando a identificação de problemas ou possíveis colisões antes de iniciar a impressão, e assim o objeto poderá ser impresso corretamente.

- Ecossistema Ultimaker:

Tem a facilidade de se integrar com o Ultimaker Cloud, permitindo a impressão remota, monitoramento à distância e a gestão dos materiais.

- Suporte personalizado:

O Cura possibilita criarmos e ajustar suportes de maneira personalizada, e define onde eles devem ser adicionados. Assim é uma forma de economizar material e otimizar a remoção dos suportes após a impressão.

Podemos afirmar que o Ultimaker Cura é uma ferramenta de fatiamento bastante útil para impressoras 3D com uma interface simples, com muita flexibilidade e controlo sobre o processo de impressão.

Neste caso os provetes foram impressos no plano XY, com uma espessura de camada de 0,15mm, um preenchimento de 100% para a peça ficar com o mínimo de porosidades e o mais rígida possível, temperatura da placa de construção de 60°C, um bico de impressão AA de 0,4 mm, a velocidade de impressão de 45 mm/s um perfil de qualidade fina. Todos os restantes parâmetros ficaram como estavam.

O único parâmetro que foi alterado nos vários provetes imprimidos foi o ângulo de impressão (figuras 8, 9 e 10).

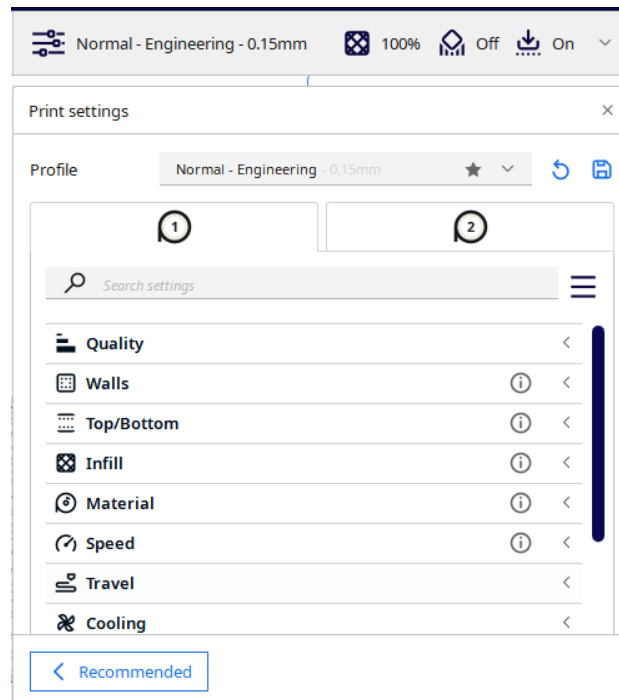


Figura 7 - Janela de configuração do Ultimaker Cura



Figura 8 - Simulação de impressão no Cura do provete de 90°

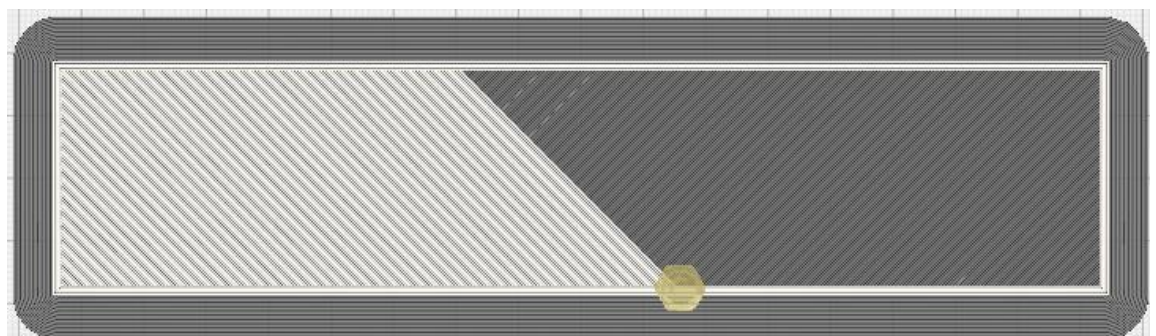


Figura 9 - Simulação de impressão no Cura do provete de 45°

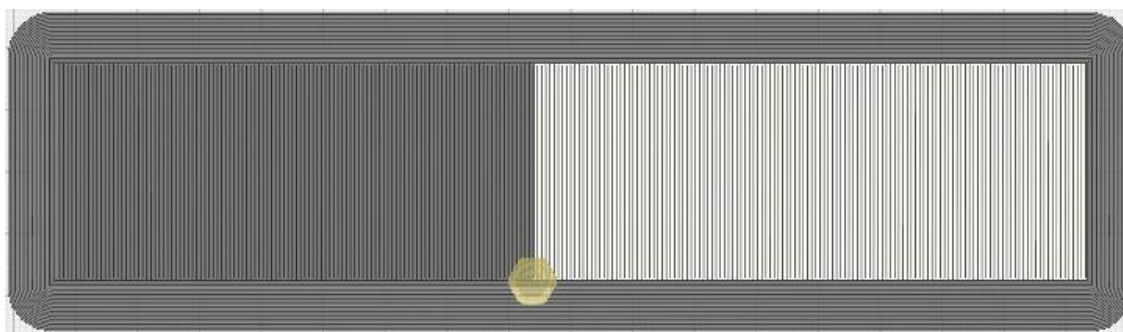


Figura 10 - Simulação de impressão no Cura do provete de 0°

3.3. Impressora 3D Ultimaker S5

A Ultimaker S5 (figura 11) é uma impressora 3D de alta qualidade concebida para uso profissional e industrial, é conhecida pela sua precisão, confiabilidade e facilidade de uso. A Ultimaker S5 utiliza uma tecnologia em que o filamento de material termoplástico, neste nosso caso o PLA, é derretido e depositado camada a camada para formar o objeto, ou seja, muito simples e versátil. Oferece uma excelente precisão, com uma espessura mínima de camada de 0,02mm, o que resulta em peças com detalhes fino e as superfícies lisas e suaves. Tem o nivelamento automático da mesa, garantindo que o início da impressão comece corretamente e que as camadas sejam depositadas com precisão, de modo que exista o mínimo de erros. Existe um sensor que deteta quando o material acaba, fazendo com que a impressão faça pausa, permitindo a substituição do filamento sem perder o progresso da impressão.

De seguida vou mostrar as várias etapas que tiveram de ser seguidas desde a preparação do modelo até á finalização da impressão dos provetes:

- **Modelo 3D:**

O primeiro passo foi criar o modelo 3D do provete no software Fusion 360. Depois de criar o modelo foi exportado para o formato .STL, um formato compatível com a impressora.

- **Preparação do modelo no software de impressão:**

Foi utilizado o software Ultimaker Cura para configurar os vários parâmetros de impressão, como a escolha do material, altura da camada, o preenchimento, a velocidade da impressão e a direção da impressão.

- **Configuração da impressora:**

Aplicou-se cola batom para garantir aderência do PLA á base, certificar que o filamento correto está carregado na impressora, verificar se o bico de impressão está

limpo e pronto para imprimir, e embora a impressora tenha nivelamento automático, convém verificar se a mesa está bem nivelada para termos a primeira camada perfeita.

- Envio do arquivo e início da impressão:

O arquivo foi transferido para a impressora 3D utilizando uma pen USB. Depois de transferir o arquivo, iniciámos a impressão pela interface da impressora.

- Monitoramento da impressão:

É importante verificar as primeiras camadas serem depositadas para garantir que o PLA tenha uma boa adesão á mesa e que o filamento esteja a ser extrudado da maneira certa. Ao longo da impressão convém ir verificando se está tudo bem.

- Remoção do provete:

Depois de terminada a impressão esperamos que a base arrefeça-se antes de remover o provete, para não deformar ou danificar o provete.

- Pós-processamento:

Após a remoção do provete, é necessário lixar as superfícies que contém irregularidades ou rebarbas.

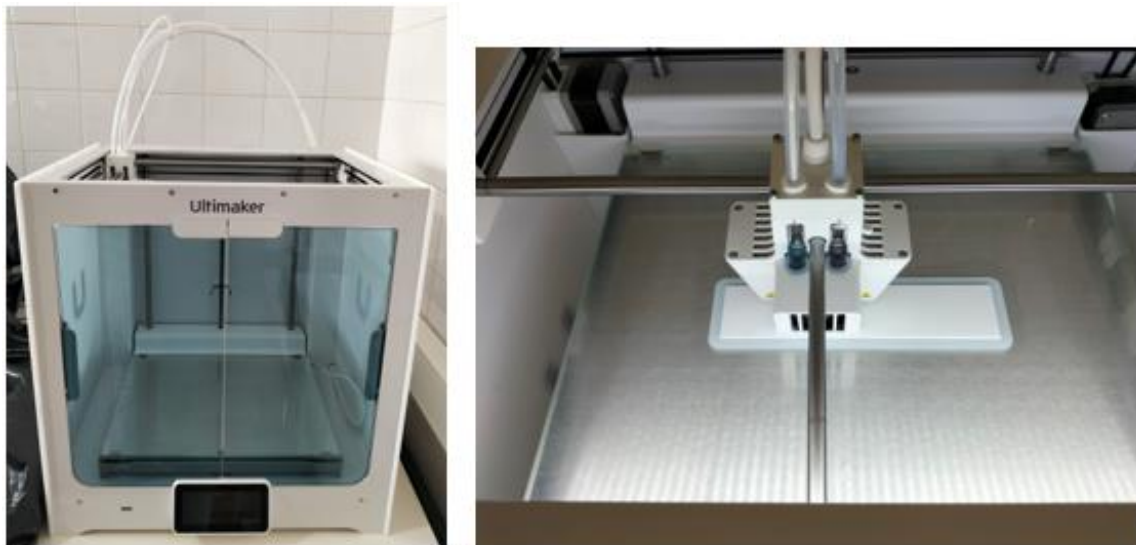


Figura 11 - Impressora 3D Ultimaker S5 (esquerda) e impressora a imprimir um provete (direita)

3.4. Provetes

Depois de concluído todo o processo referido nos capítulos anteriores foi necessário proceder á lixagem dos provetes para retirar todas as irregularidades e rebarbas para que todas as superfícies sobre a amostra ficassem planas e com um acabamento liso. Foram utilizadas lixas para remover essas irregularidades, a primeira lixa a ser utilizada foi a P80, uma lixa mais grossa para tirar as rebarbas maiores, de seguida usou-se P180 e P240, por fim utilizou-se P600 para termos um acabamento liso de forma que não se visualize a direção da impressão. De seguida os provetes foram todos furados com uma broca de 1,5mm numa das pontas do provete na parte central para depois serem suspensos na realização dos ensaios.

Foram imprimidos 4 provetes (figura 12), dos quais 3 foram impressos na horizontal e 1 na vertical. Todos eles com uma espessura de 0,15mm. Os ângulos de impressão são 0°, 45° e 90°, na figura 13 podemos observar os ângulos utilizados.

As medidas de comprimento, largura e a espessura dos provetes foram medidas cada uma em três locais diferentes para ter uma maior precisão nas medidas.



Figura 12 - Provetes prontos para o ensaio

De seguida apresento numa tabela 1 todas as medidas dos provetes:

Tabela 1 - Características dos provetes

Provetes	Ângulo de impressão	L <i>mm</i>	w,b <i>mm</i>	t <i>mm</i>	m <i>gr</i>
Provete 1	90°	167,1	37,083	3,821	27,49
Provete 2	45°	166,593	36,4	3,856	26,49
Provete 3	0°	166,7	36,7	3,853	24,88
Provete 4	0° vertical	166,82	37,633	3,603	27

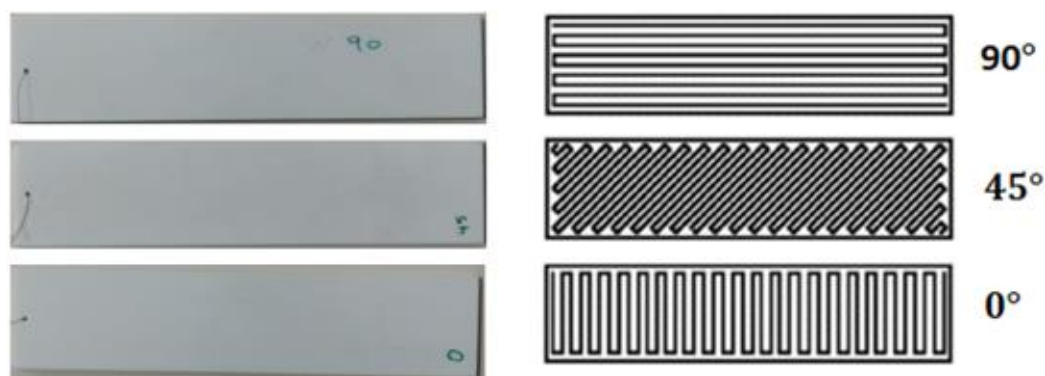


Figura 13 - Ângulos de impressão

3.5. Transdutor de contacto de disco piezoelétrico fino

Um transdutor de contacto de disco piezoelétrico fino como verificamos na figura 14, é um sensor que utiliza o efeito piezoelétrico para converter forças mecânicas, como pressão, vibrações, ou deformações, em sinais elétricos. Estes sensores são muito sensíveis a pequenas variações de força, tornando-os ideais para diversas aplicações de medição e monitoramento.

Ou seja, quando uma força mecânica é aplicada ao material piezoelétrico, ele produz uma corrente elétrica proporcional à intensidade dessa força, permitindo assim que o sensor detete e converta essa variação num sinal elétrico que pode ser medido.

De seguida vou apresentar a estrutura de um sensor piezoelétrico:

- O transdutor é composto por um disco de material piezoelétrico fino e circular, como por exemplo as cerâmicas piezoelétricas ou cristais que quando sofrem uma deformação mecânica produzem uma corrente elétrica. Esse disco tem elétrodos nos dois lados para captar a tensão quando o material é deformado.
- É muito fino e sensível, detalhado para ser sensível a pequenas vibrações.

É essencial que o transdutor esteja em contacto direto com o material onde as vibrações vão ser detetadas, o que o torna ideal para testes de materiais e controlo de qualidade. [6]



Figura 14 - Sensor piezoelétrico

3.6. PicoScope

O osciloscópio de sinal PicoScope ilustrado na figura 15 é um equipamento eletrónico que foi utilizado para visualizarmos os sinais elétricos e analisar as formas das ondas elétricas. Este dispositivo funciona diretamente no computador o que ajuda no armazenamento e na análise dos dados.

Este equipamento eletrónico serve para amplificar, filtrar e condicionar sinais elétricos antes que sejam digitalizados e processados por um sistema de aquisição e análise de dados.

Neste projeto utilizámos o software Origin2017, utilizado para análise de dados que nos oferece muitas ferramentas que permitem a importação, manipulação, análise e visualização eficiente dos dados. O Origin2017 utiliza filtros para eliminar ruídos indesejados ou interferências eletromagnéticas, garantindo uma maior precisão nas medições.

O osciloscópio de sinal PicoScope mostra-nos a análise dos sinais capturados, o que nos vai facilitar no cálculo das propriedades elásticas dinâmicas, neste caso o módulo de Young e o coeficiente de Poisson.

No ensaio, o PicoScope foi configurado para 10 000 amostras num intervalo de 50 ms, e a variação de sinal foi ajustada entre -2 e 2 Volts.

No caso do software Origin2017, os dados obtidos nos testes de flexão e torção foram inseridos no programa, permitindo a criação de gráficos de frequência. Para o ensaio de flexão foi introduzido a escala de 0 Hz a 2000 Hz, enquanto que no ensaio de torção foi introduzido uma escala de 0 Hz a 3000 Hz. Esta escala introduzida não é de todo o mais importante, pois o maior foco está nas primeiras frequências, porque são as que vão ser analisadas.

Por fim é fundamental seguir as recomendações do fabricante do PicoScope, assim como as diretrizes da norma ASTM E 1876[1], para assegurar a precisão e confiabilidade na medição das propriedades elásticas dinâmicas do Tough PLA impresso em 3D.



Figura 15 - PicoScope

3.7. Balança, Paquímetro e Micrómetro

Para medir e pesar os provetes foram utilizados estes três instrumentos. O paquímetro (figura 16) foi utilizado para medir a largura e o comprimento dos provetes, cada uma dessas medidas foram retirados valores em 3 locais diferentes, uma em cada uma das pontas e outra no meio, com um desvio de 0,02mm e depois foi realizada a média para termos um só valor para cada unidade de medida.

O micrómetro (figura 17) é um instrumento de medida com bastante precisão e foi utilizado para medir as espessuras dos provetes. Foram retiradas 9 medidas em locais diferentes para cada provete e depois realizada a média dessas medidas.

A balança foi utilizada para a pesagem dos provetes e encontra-se no laboratório de Engenharia Civil da ESTCB.



Figura 16 - Paquímetro



Figura 17 - Micrómetro

3.8. Excitador

Neste ensaio foi utilizado um excitador, que tem a forma de um martelo. O excitador tem a maior massa concentrada no ponto de impacto, cerca de $\frac{1}{3}$ e tem de ter o peso necessário para provocar uma vibração mecânica, mas que não haja uma deslocação assim tão grande do provete. Normalmente o excitador é uma porca com 0,5 cm de diâmetro colada a uma braçadeira de serrilha de cerca de 10 cm, como podemos visualizar na figura 18.

Esta é a forma de um excitador utilizado neste tipo de ensaios e que está descrito na norma ASTM E 1876[1].



Figura 18 - Excitador utilizado no ensaio

4. Configuração da técnica de excitação por impulso

Nesta etapa do projeto foi realizado os ensaios da técnica de excitação por impulso nos provetes.

Em primeiro lugar colocámos fita cola dupla face para colar o sensor piezoelétrico e que funciona por efeito bimorfo.

Nos ensaios de flexão os sensores piezoelétricos foram colados no centro do provete em baixo como indica a figura 19 (imagem da esquerda), o provete foi colocado verticalmente e o ponto onde foi provocada a vibração mecânica foi ao centro em cima no ponto oposto ao sensor piezoelétrico.

No ensaio de torção o procedimento é o mesmo, mas o sensor piezoelétrico é colado no provete descentrado mais chegado para um dos lados e o ponto de impacto é provocado no lado oposto na outra extremidade lateral como representa a figura 19 (imagem da direita).

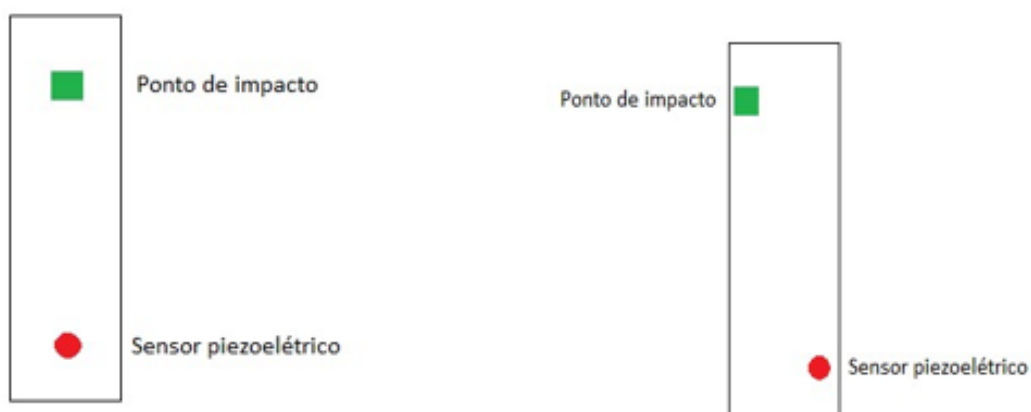


Figura 19 - Posicionamento do sensor piezoelétrico e do ponto de impacto

De seguida os provetes são presos por um fio fino e flexível e posicionado verticalmente de forma que a amostra fique a vibrar livremente sem restrições.

Depois de colar o sensor piezoelétrico, é ligado ao software PicoScope 3204A e a partir daqui iniciou-se com a técnica de excitação por impulso nos provetes e assim o sinal elétrico é recolhido pelo mesmo, na figura 20 vemos os vários provetes prontos para esta etapa.

De seguida o sinal obtido foi processado pelo algoritmo da transformada de Fourier no software Origin2017, que é basicamente um método que converte um sinal em componentes espectrais e assim fornece as informações das frequências naturais sobre esse sinal, este método calcula rapidamente essas transformações e reduz a complexidade de calcular a transformada de Fourier.

Para cada provete foi realizado dois ensaios de flexão e dois de torção, com base na norma ASTM E 1876[1] onde explica pormenorizadamente como deve ser feita este tipo de técnica.



Figura 20 - Provete pronto para ensaio de flexão (esquerda) e provete pronto para ensaio de torção (direita)

4.1. Dados obtidos

Neste subcapítulo vou analisar os dados que foram recolhidos de um dos provetes, analisando ao pormenor o provete 0º impresso na horizontal com espessura de 0,15mm. Os resultados dos restantes provetes estão em anexo.

Em primeiro lugar o sinal foi recolhido para o computador através do PicoScope, nas figuras 21 e 22 podemos observar os valores dos picos em X onde temos a frequência e em Y onde observamos a magnitude.

A seguir estes valores dos picos são tratados no Excel e transferidos para o Origin2017 e aí é que vão ser analisados ao pormenor. Foi retirado os valores das frequências de vibração do ensaio de flexão e do ensaio de torção, como verificamos nas figuras 23 e 24.

Os gráficos obtidos no software Origin2017 tem uma escala de 0 Hz por 5000 Hz. Na figura 23 observamos o valor de $X=149,93$ Hz, que é a nossa frequência de flexão (F_f), na figura 24 temos o valor de $X=399,82$ Hz, que é a nossa frequência de torção (F_t). Os dados dos restantes provetes estão todos anexados no final do relatório.

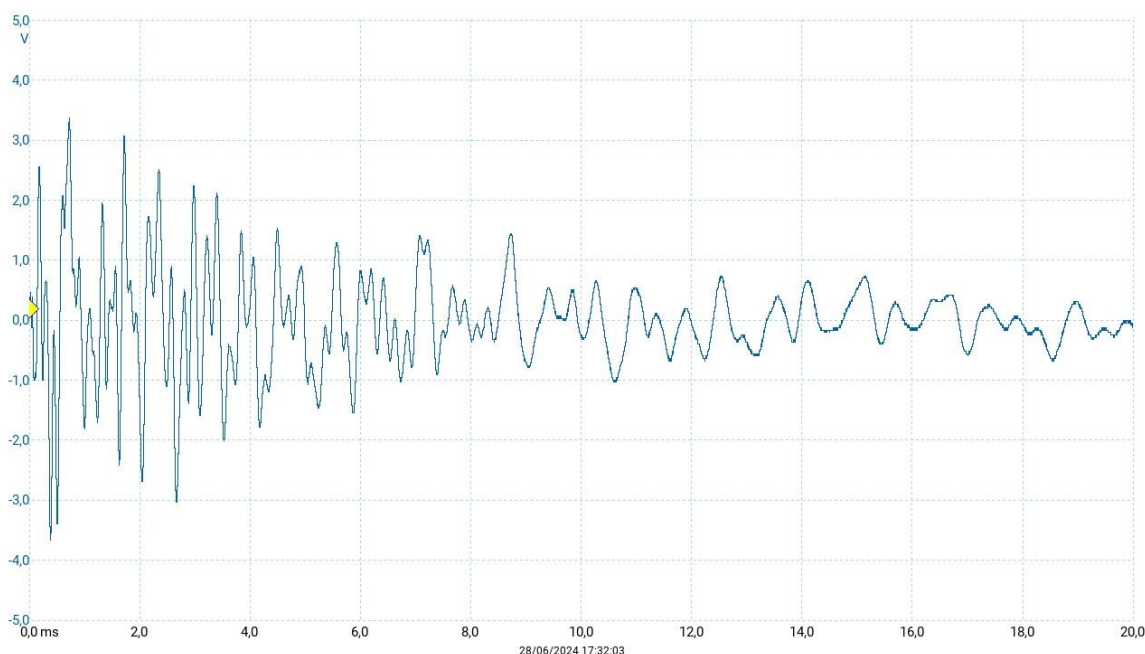


Figura 21 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio de flexão, provete 0º na horizontal

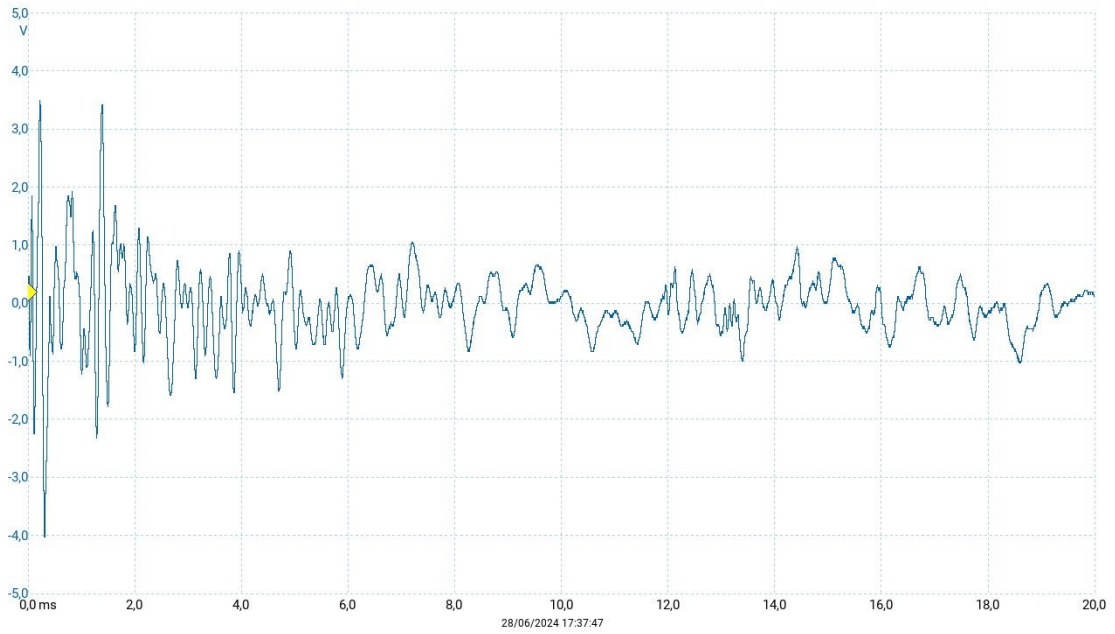


Figura 22 - Dados recolhidos pelo PicoScope no ensaio de torção, provete 0° na horizontal

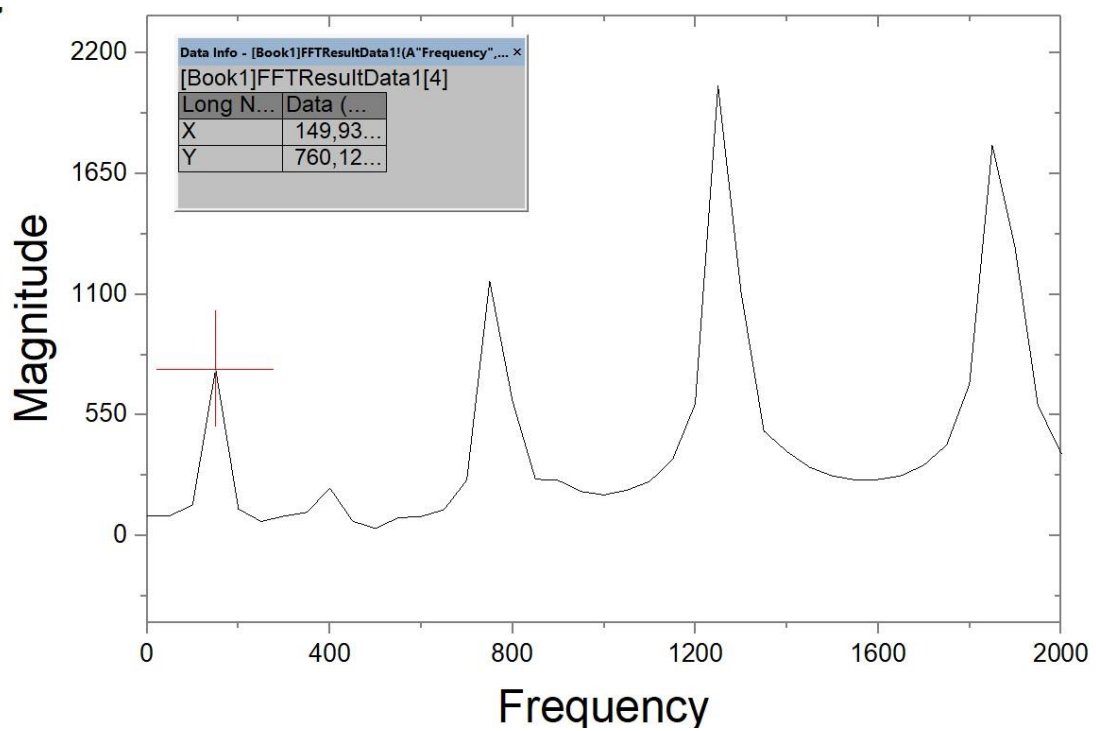


Figura 23 - Frequência recolhida no ensaio de flexão, provete 0° horizontal, X=149.93 Hz

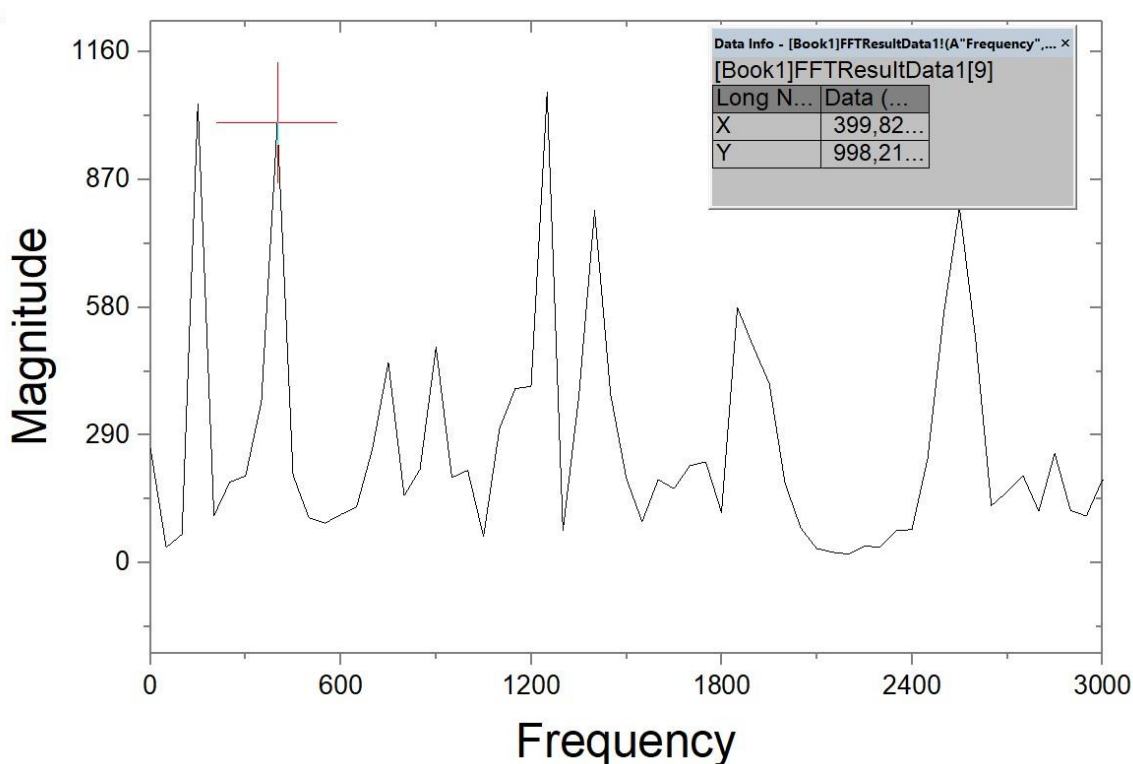


Figura 24 - Frequência recolhida no ensaio de torção, provete 0°, X=399.82 Hz

Depois de retirar os valores da frequência de flexão e da frequência de torção adicionei esses valores á tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos provetes e resultados dos ensaios de flexão e torção

Provetes	Ângulo de impressão	L mm	w,b mm	t mm	m gr	F _f Hz	F _t Hz
Provete 1	90°	167,1	37,083	3,821	27,49	249,89	549,75
Provete 2	45°	166,593	36,4	3,8561	26,49	199,91	549,75
Provete 3	0°	166,7	36,7	3,853	24,88	149,93	399,82
Provete 4	0° vertical	166,82	37,633	3,603	27	199,91	549,75

Depois de concluída esta fase dos ensaios de flexão e torção e conseguirmos obter resultados, foi construída uma folha Excel para podermos calcular os cálculos que necessitamos, na figura 25 temos a folha Excel.

m	24,88		$G = \frac{4 L m f_t^2}{b t} [B/(1 + A)]$	$\nu = \frac{E}{2G} - 1$
l	166,7			
w, b	36,7			
t	3,853			
ff	149,93			
ft	399,82			
E	1168131632	1,16813163 GPa	$E = 0.9465 \left(\frac{m f_t^2}{w} \right) \left(\frac{L^3}{t^3} \right) T$	
T	1,003517893			
b/t	9,525045419		$B = \left[\frac{b/t + t/b}{4 (t/b) - 2.52 (t/b)^2 + 0.21 (t/b)^6} \right]$	
t/b	0,104986376			
B	24,5557588			
A	0,016992223			
G	460535679,5	0,46053568	$A = \frac{[0.5062 - 0.8776 (b/t) + 0.3504 (b/t)^2 - 0.0078 (b/t)^3]}{[12.03 (b/t) + 9.892 (b/t)^2]}$	
poisson	0,268231414		$T = \left[1,000 + 6,585 \left(\frac{t}{l} \right)^2 \right]$	

Figura 25 - Excel utilizado para os cálculos

Depois de todos os cálculos efetuados para cada um dos provetes, chegamos aos valores mencionados no subcapítulo 4.1, os resultados do E, G e ν . A tabela 3 tem os resultados obtidos dos módulos de Young, módulos de torção e coeficiente de Poisson dos 4 provetes de cor branca com os diferentes ângulos de impressão.

Tabela 3 - Propriedades elásticas dinâmicas

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

Como refere no artigo 3, para conseguir obter resultados de materiais isotrópicos no plano foi utilizada a seguinte fórmula:

$$\nu_{12} = \frac{E_{11}}{2} \left(\frac{1}{G_{12}} - \frac{4}{E_{45}} + \frac{1}{E_{22}} + \frac{1}{E_{11}} \right)$$

- ν_{12} = coeficiente de Poisson no plano
- E_{11} = módulo de Young no ângulo de impressão a 0°
- E_{22} = módulo de Young no ângulo de impressão a 90°
- E_{45} = módulo de Young no ângulo de 45°
- G_{12} = módulo de torção no plano

De referir que o módulo de torção no plano G_{12} , é média do módulo de torção do ângulo de 90° com o módulo de torção do ângulo 0°, mas também pode ser apenas o módulo de torção do ângulo de 45°.

Após realizar o cálculo obtive os seguintes resultados na tabela 4:

Tabela 4 - Propriedades elásticas dinâmicas

E_{11} <i>GPa</i>	E_{22} <i>GPa</i>	ν_{12} -	ν_{23} -	G_{12} <i>GPa</i>	G_{23} <i>GPa</i>	E_{33} <i>GPa</i>
1,1678	3,6642	0,2553	0,145	0,9421	1,1762	2,2813

- E_{11} = módulo de Young no ângulo de impressão a 0°
- E_{22} = módulo de Young no ângulo de 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 no ângulo de impressão a 45°

4.2. Análise dos resultados

Antes de comparar os resultados obtidos vou fazer uma pequena análise aos valores que obtivemos no subcapítulo anterior.

Olhando para os resultados, podemos afirmar que o provete 1 (ângulo de impressão de 90°) o módulo de Young é maior que os restantes provetes, o que significa que tem bastante resistência à deformação quando submetido a forças.

No coeficiente de Poisson o provete 1 também tem um valor maior que os restantes, ou seja, contrai mais facilmente deformando lateralmente.

4.3. Comparação de resultados

Após uma breve análise acerca dos resultados que obtive dos provetes brancos, neste subcapítulo irá ser feita uma comparação com os resultados do colega que tem todas as mesmas dimensões e características, mas altera a cor para vermelho, e também irei fazer mais uma comparação com os resultados do artigo [4], onde a cor utilizada foi preto. Na tabela 5 estão os resultados obtidos das propriedades elásticas dinâmicas dos provetes de cor vermelha, por sua vez a tabela 6 apresenta os resultados do artigo [4].

Tabela 5 - Propriedades elásticas dinâmicas de cor vermelha obtido pelo colega

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

Tabela 6 - Propriedades elásticas dinâmicas de cor preta determinadas no artigo [4]

E_{11} <i>GPa</i>	E_{22} <i>GPa</i>	ν_{12} -	ν_{23} -	G_{12} <i>GPa</i>	G_{23} <i>GPa</i>	E_{33} <i>GPa</i>
2,785	3,512	0,323	0,279	1,032	1,151	2,945

- E_{11} = módulo de Young no ângulo de impressão a 0°
- E_{22} = módulo de Young no ângulo de 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 no ângulo de impressão a 45°

Comparando todos os resultados, observamos algumas diferenças entre todos os provetes.

No módulo de elasticidade do provete branco com impressão a 0° , observamos que tem um valor mais baixo em relação ao provete vermelho e preto, o que significa que o provete branco a 0° tem menos resistência á deformação quando é submetido a forças, ou seja, é mais flexível. Os provetes vermelho e preto tem valores parecidos neste módulo e são significativamente mais rígidos.

Na impressão a 90° os resultados do módulo de elasticidade são bastante idênticos nas 3 cores (branco, vermelho e preto).

Relativamente ao coeficiente de Poisson, na impressão vertical o provete preto (ν_{23}), tem um valor um pouco superior em relação aos outros resultados, que nos diz que quando é alongada ou comprimida, contrai lateralmente de uma forma mais significativa, enquanto os outros dois provetes vermelho e branco têm menos deformação lateral mantendo melhor as suas dimensões laterais.

O coeficiente de Poisson no plano verificamos o branco com um resultado um pouco mais baixo que no preto, significa que tem menor deformação lateral quando submetido a tensões, o preto contrai mais lateralmente.

5. Conclusão

Concluindo podemos afirmar que os objetivos propostos foram concluídos com sucesso, conseguimos retirar resultados e comparar com outras cores.

A técnica de excitação por impulso, utilizada para avaliar as propriedades, permitiu uma medição precisa e não destrutiva, foi ideal para analisar como a cor pode alterar o comportamento mecânico do Tough PLA.

Relativamente aos provetes Tough PLA branco, concluí que tem um módulo de elasticidade mais baixo em relação aos outros resultados dos outros provetes.

No coeficiente de Poisson o provete Tough PLA branco apresenta valores mais baixos em relação aos restantes provetes.

No ângulo de impressão a 90° verifica-se que em todos os provetes de todas as cores tem os valores mais altos, registando mais rigidez, mas tende a contrair lateralmente mais significativamente sob forças de tração ou compressão.

A compreensão das variações nas propriedades elásticas introduzidas pela cor permite a escolha mais informada dos materiais para aplicações específicas, garantindo confiabilidade, precisão e segurança na produção.

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>

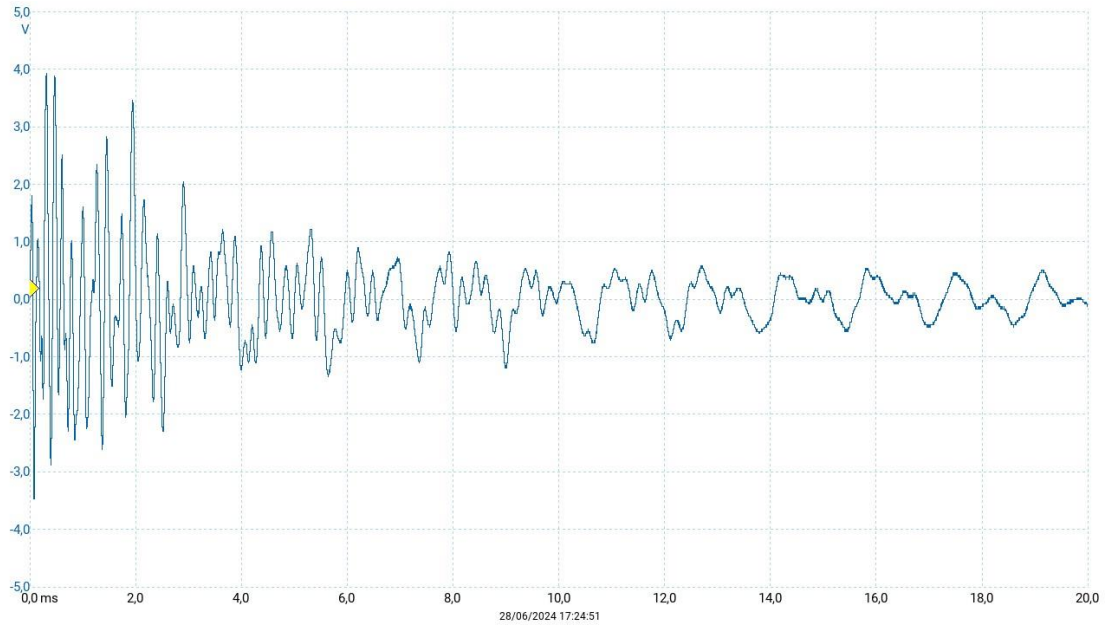
[4] Ramalho, Armando; Gonçalves, Luís; Couto, Gonçalo. "The influence of layer height in the orthotropic elastic properties of PLA material obtained by additive processes". Third European Conference on the Structural Integrity of Additively Manufactures Materials (ESIAM23) | 2024

[5] <https://www.scielo.br/j/rmat/a/K3RXq6PCSdYMDfyfY6q3PPm/#>

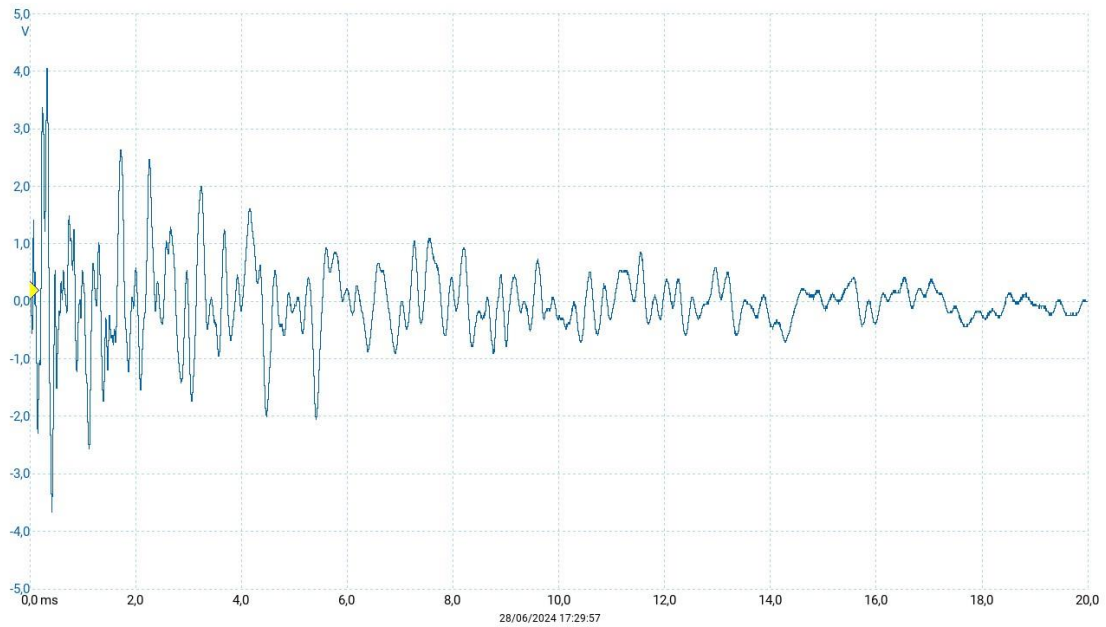
[6] <https://www.mecanicaindustrial.com.br/634-o-que-e-um-sensor-piezoelétrico/>

Anexo 1: Provete 1, ângulo de impressão a 90°

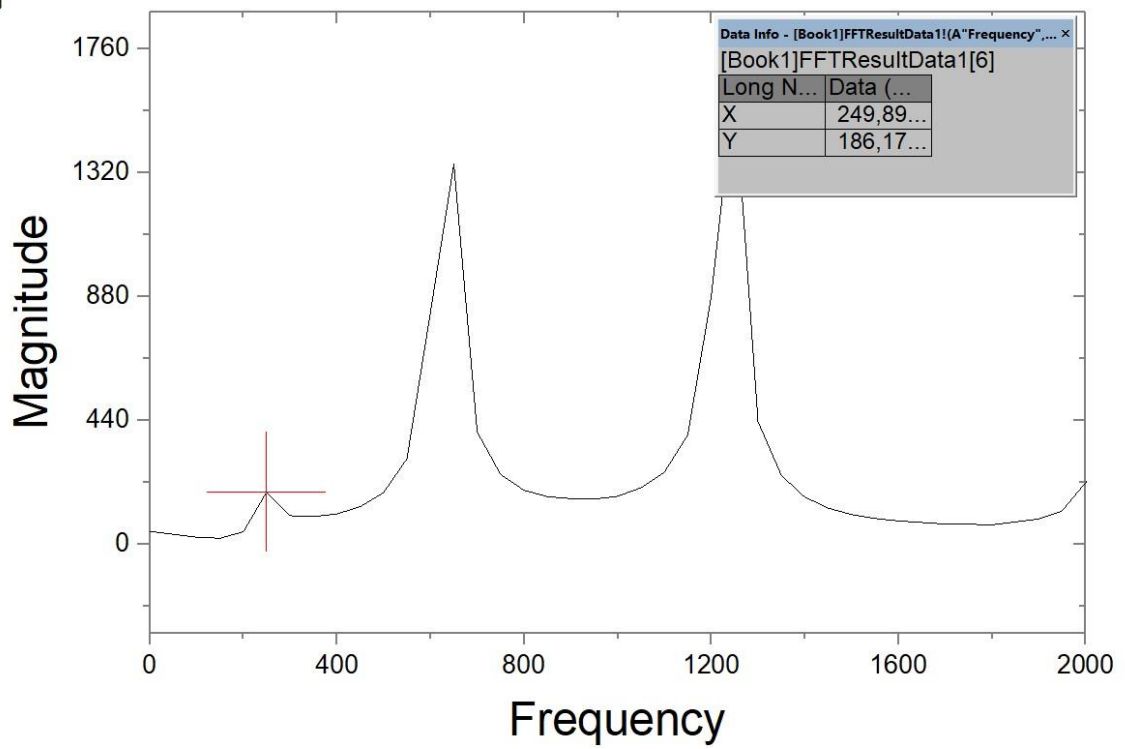
PicoScope em flexão



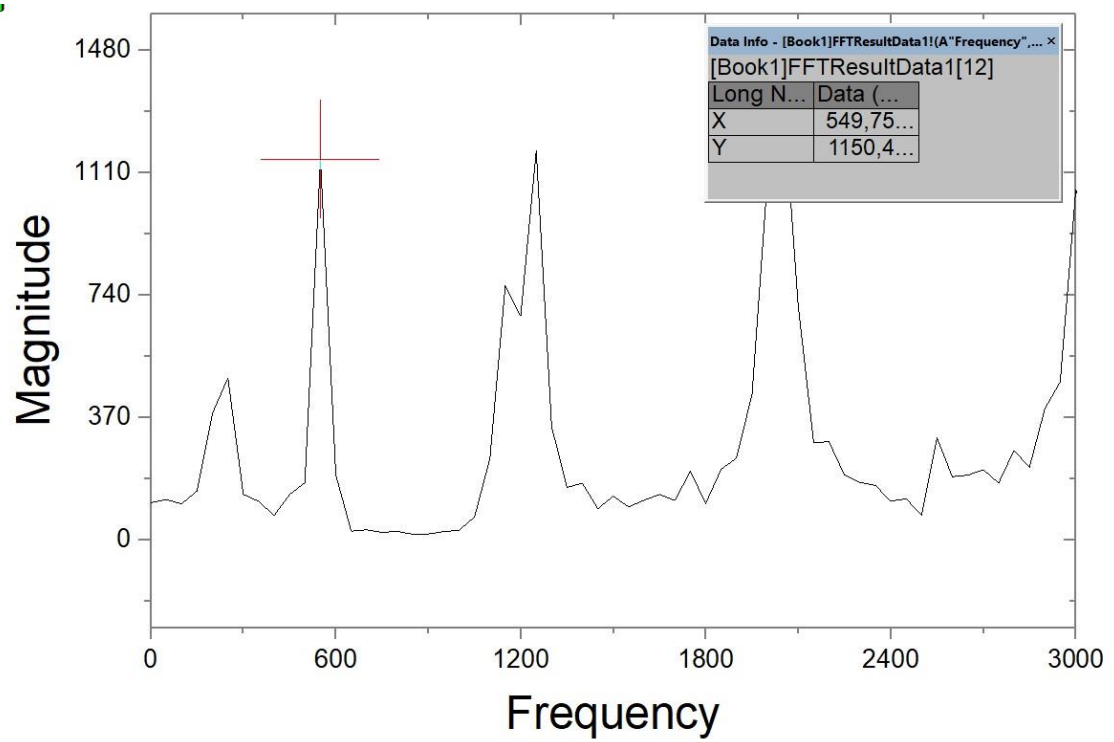
PicoScope em torção



Origin2017 em flexão

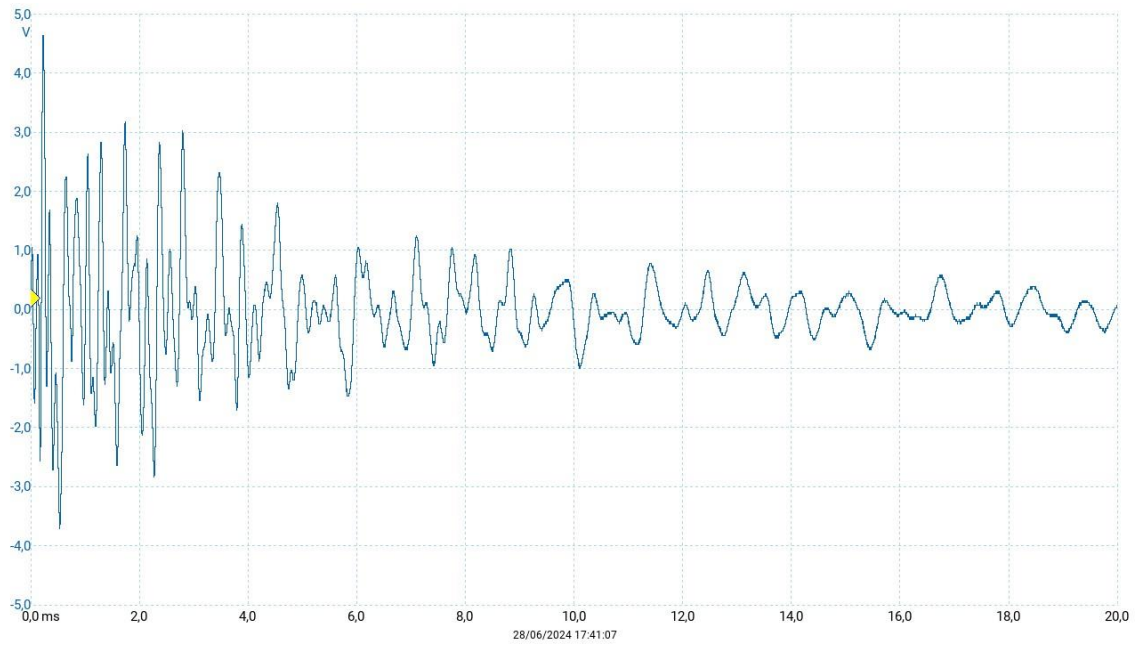


Origin2017 em torção

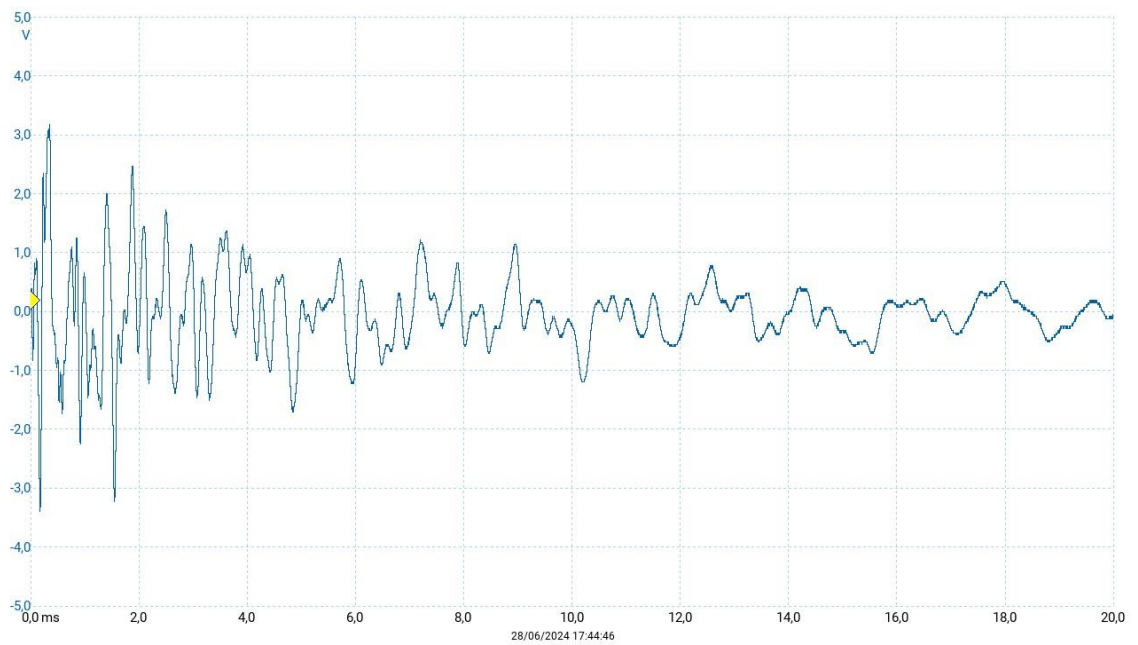


Anexo 2: Provete 2, ângulo de impressão a 45°

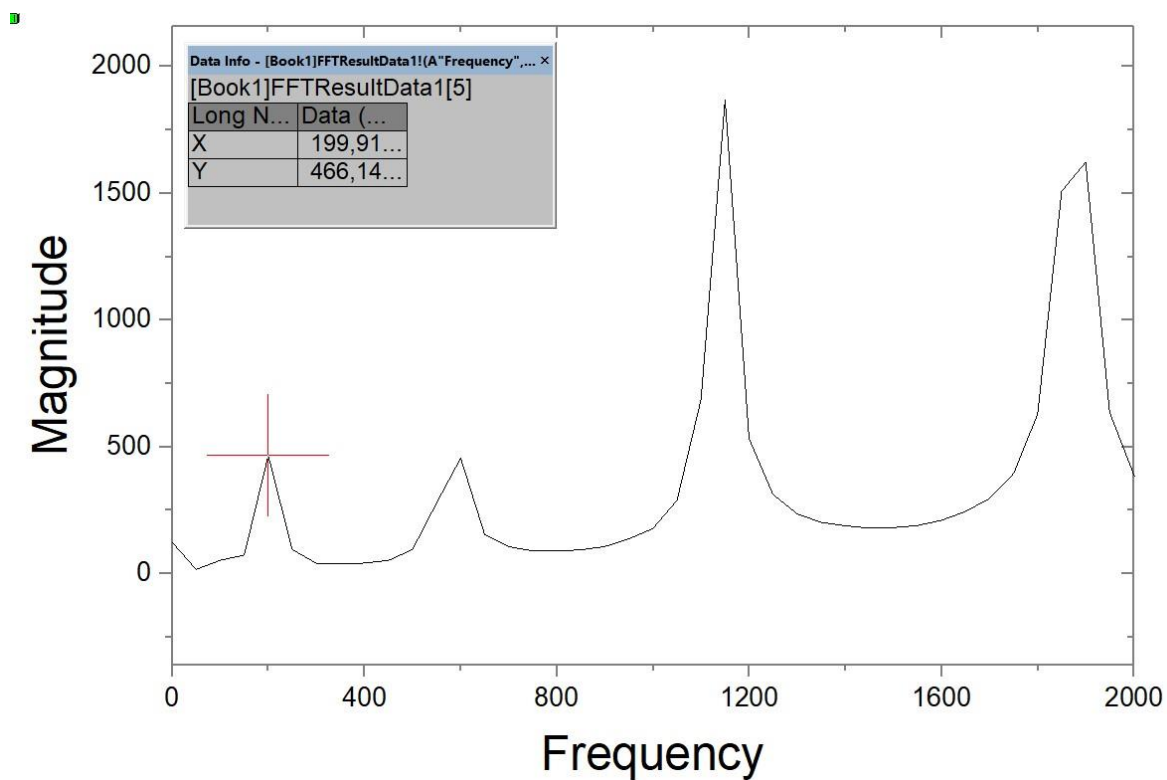
PicoScope em flexão



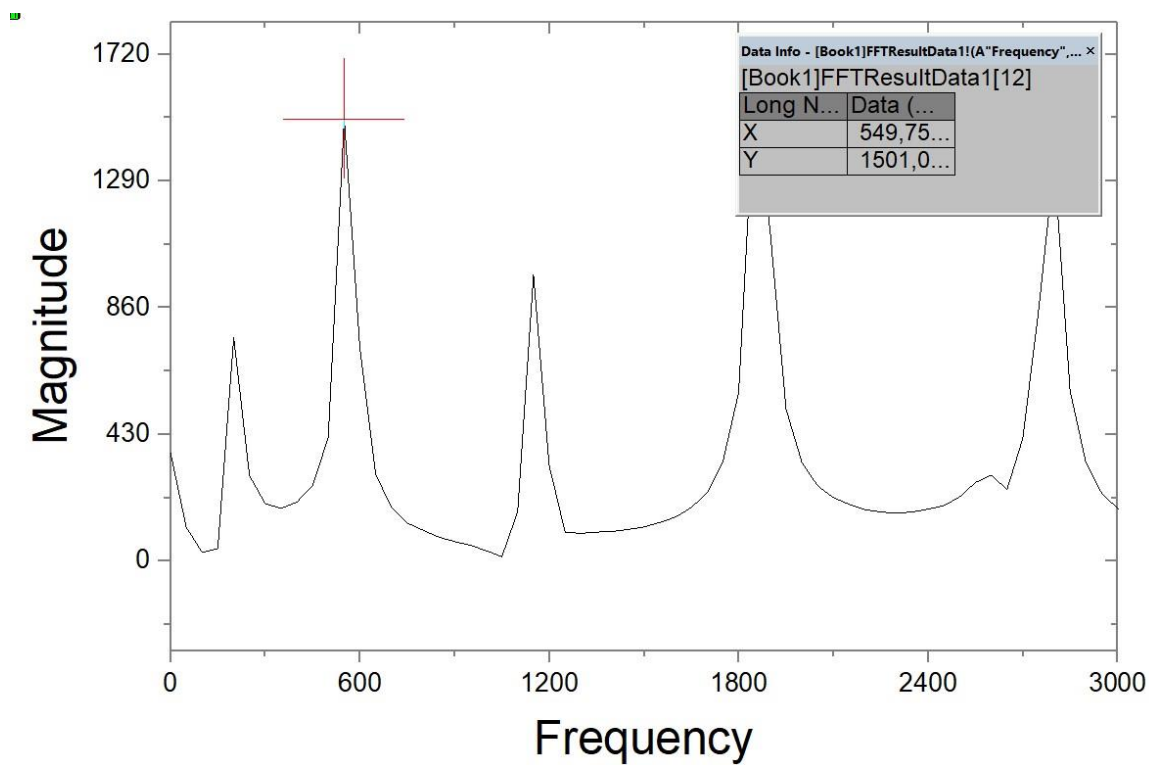
PicoScope em torção



Origin2017 em flexão

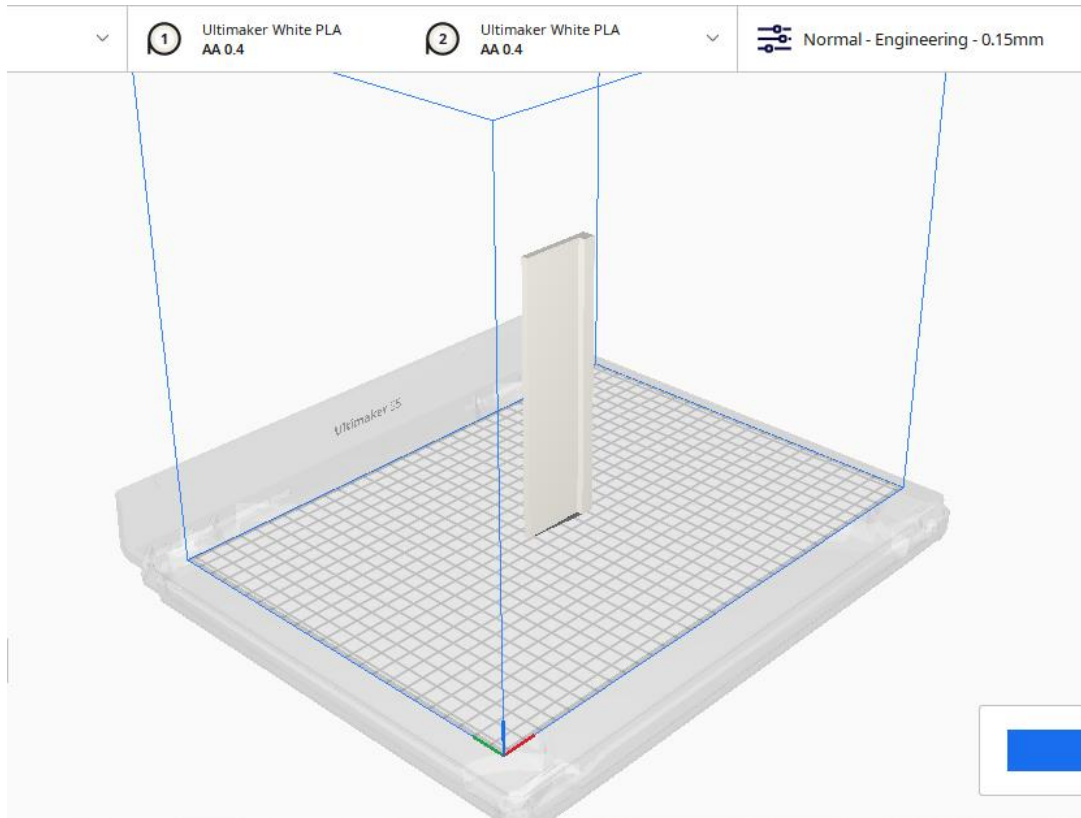


Origin2017 em torção

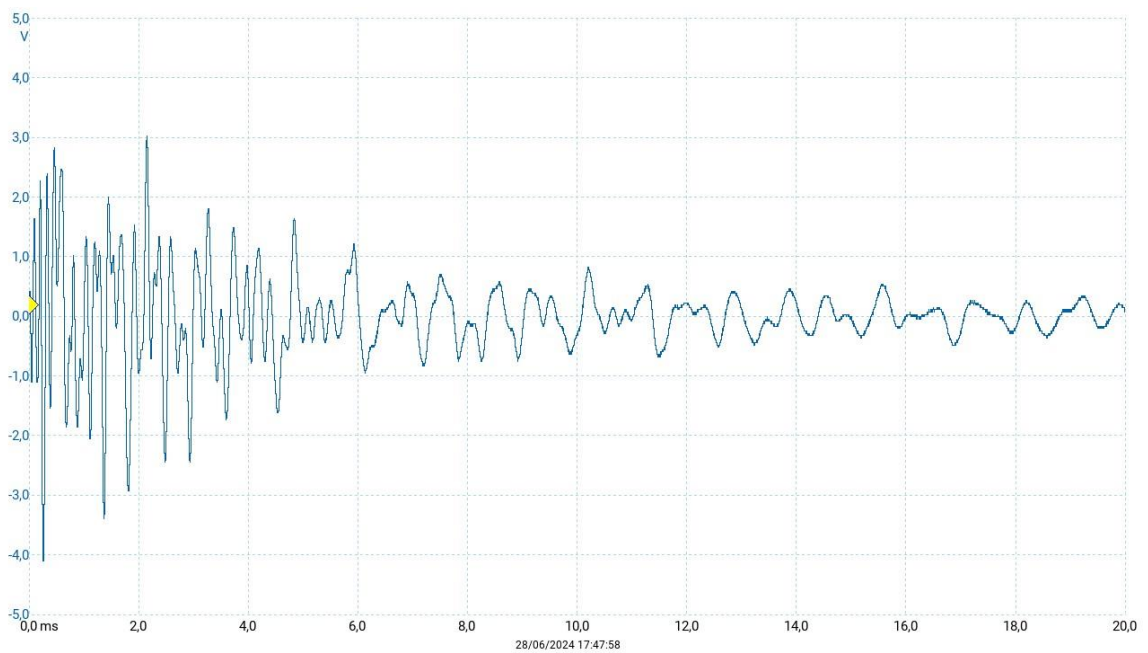


Anexo 3: Provette 4, ângulo de impressão a 0° vertical

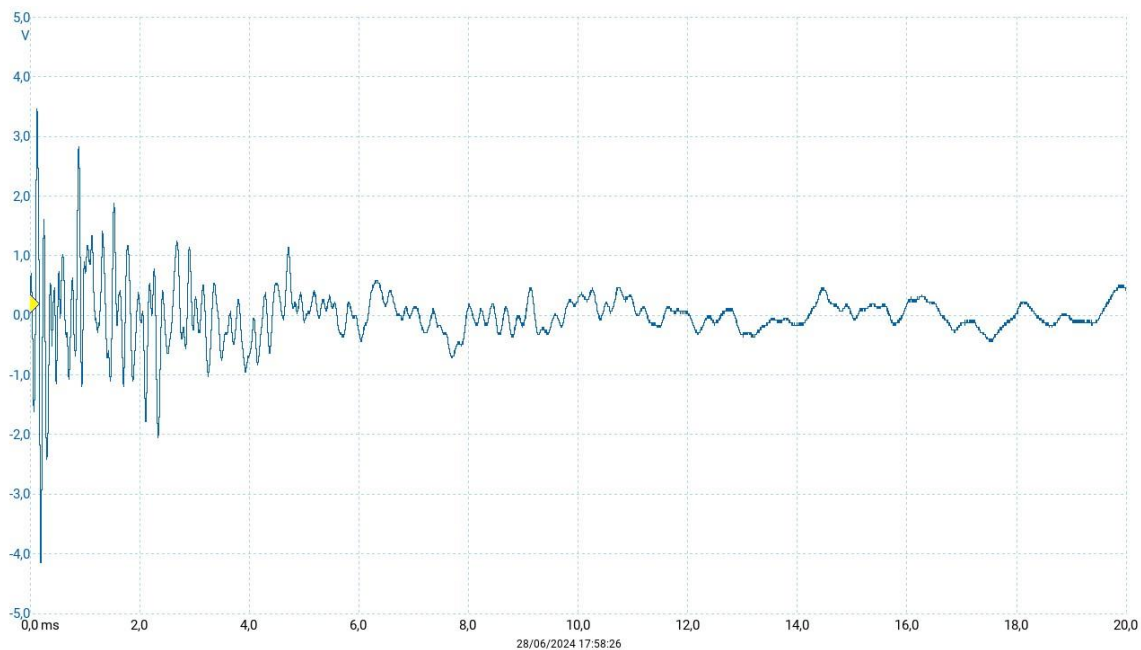
Software Ultimaker Cura



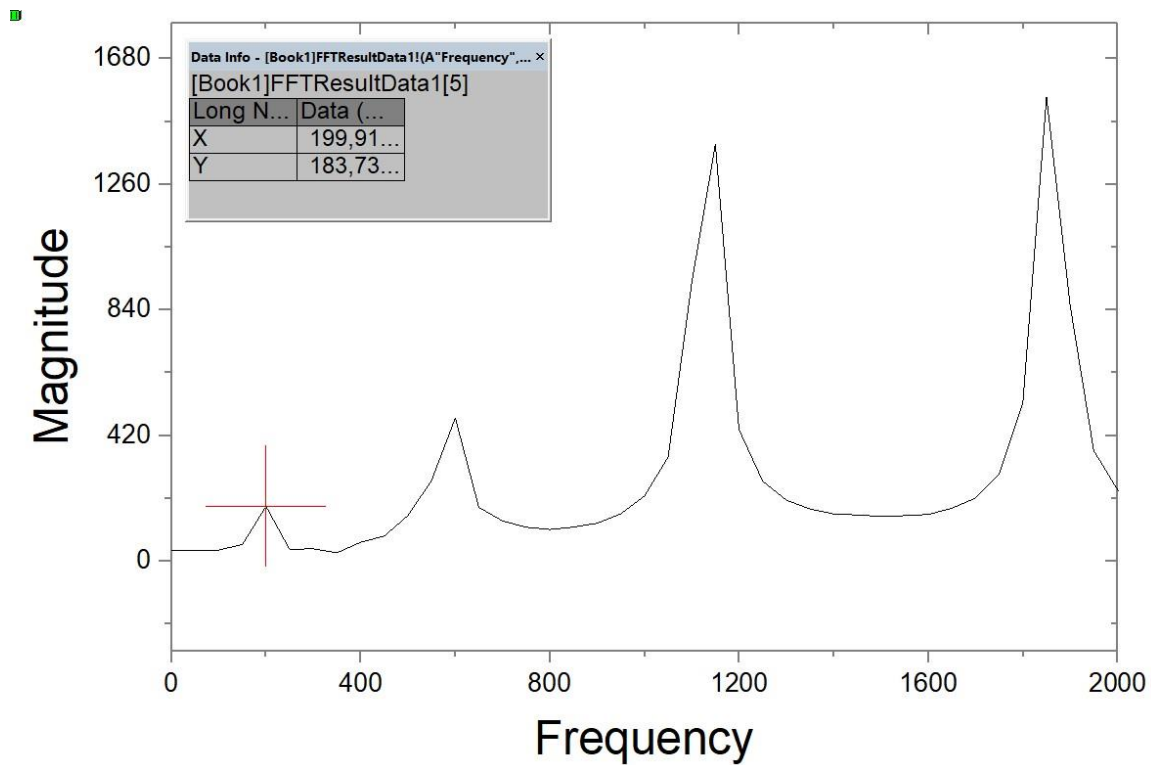
PicoScope em flexão



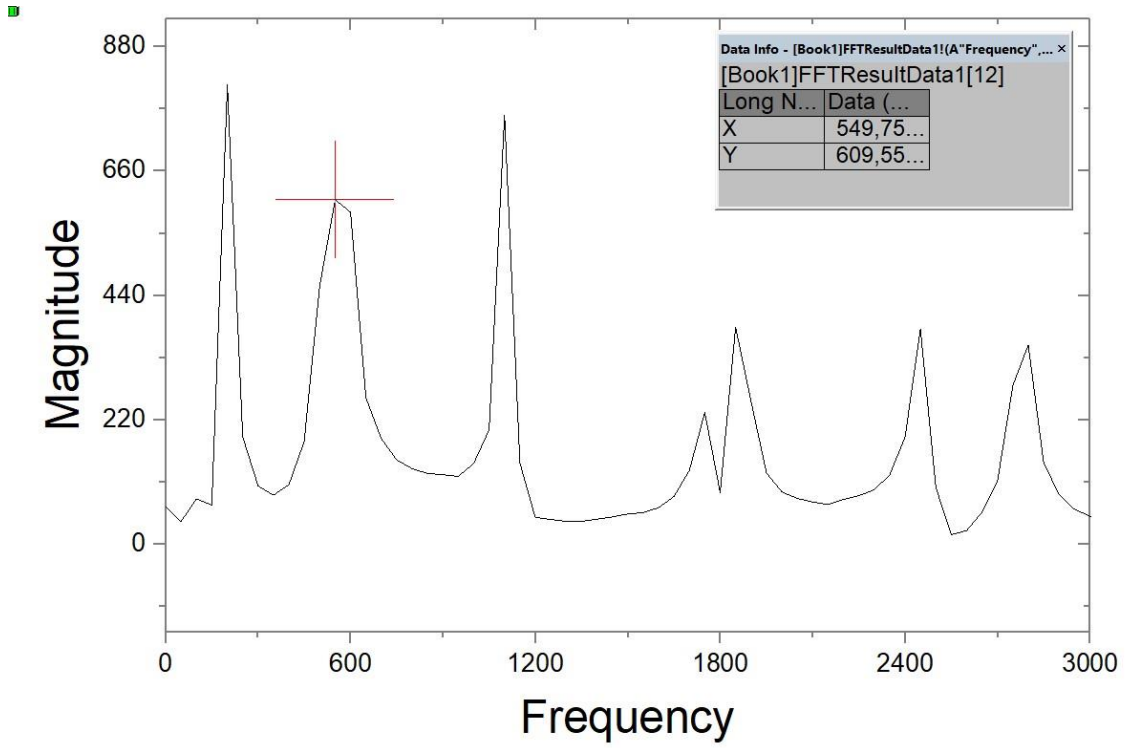
PicoScope em torção



Origin2017 em flexão



Origin2017 em torção



Fotografias

