



AFONSO MANUEL PINTO MEIRELES  
Licenciado em Engenharia Mecânica

# Análise Sensorial de Compósito de Matriz Metálica Auto Sensível: Efeito da Direção de Polarização e Posicionamento dos Eléttodos

DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

MESTRADO EM ENGENHARIA MECÂNICA  
Universidade NOVA de Lisboa  
Setembro, 2023





# Análise Sensorial de Compósito de Matriz Metálica Auto Sensível: Efeito da Direção de Polarização e Posicionamento dos Eléttodos

DISSERTAÇÃO PARA A OBTENÇÃO DE GRAU DE MESTRE EM  
ENGENHARIA MECÂNICA

**AFONSO MANUEL PINTO MEIRELES**

Licenciado em Engenharia Mecânica

**Orientador:** Miguel Araújo Machado,  
Professor Auxiliar, Universidade NOVA de Lisboa

**Júri:**

**Presidente:** Nuno Alberto Marques Mendes,  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

**Arguente:** Catarina Isabel Silva Vidal,  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA

**Vogais:** Miguel Araújo Machado  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA  
Catarina Isabel Silva Vidal,  
Professor Auxiliar, FCT-NOVA



## **Análise Sensorial de Compósito de Matriz Metálica Auto Sensível: Efeito da Direção de Polarização e Posicionamento dos Eléttodos**

Copyright © Afonso Manuel Pinto Meireles, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade NOVA de Lisboa.

A Faculdade de Ciências e Tecnologia e a Universidade NOVA de Lisboa têm o direito, perpétuo e sem limites geográficos, de arquivar e publicar esta dissertação através de exemplares impressos reproduzidos em papel ou de forma digital, ou por qualquer outro meio conhecido ou que venha a ser inventado, e de a divulgar através de repositórios científicos e de admitir a sua cópia e distribuição com objetivos educacionais ou de investigação, não comerciais, desde que

Este documento foi criado com o processador de texto Microsoft Word e o *template* NOVAthesis Word [55].



## AGRADECIMENTOS

A realização desta dissertação, assim como de todo o meu percurso académico, não seria possível sem o incessante apoio, apreço e orientação por parte dos meus familiares, amigos, professores e colegas. Deste modo, a todos os que contribuíram de forma direta ou indireta para a realização da dissertação, o meu profundo agradecimento:

Ao meu orientador Prof. Miguel Machado, um sincero obrigado pela disponibilidade, preocupação e pela transmissão de conhecimentos, que contribuíram para a execução desta dissertação.

Ao Eng.º Pedro Ferreira por todo o auxílio, conhecimentos, dúvidas esclarecidas e pela consideração no decorrer da investigação, sem o seu importante contributo esta dissertação não estaria completa.

A todos os colegas e monitores dos laboratórios de Tecnologia Industrial do DEMI da FCT, um profundo agradecimento em especial ao Sr. António Campos, Sr. Paulo Magalhães e ao Sr. Wagner Sabor pelo apoio técnico e pelos ensinamentos partilhados no desenvolvimento deste trabalho, nomeadamente nas operações de maquinagem.

Por fim, um agradecimento extra à minha família e amigos. Aos meus pais, que sempre fizeram de tudo para que a minha vida fosse o mais completa possível, tratando-se dos grandes impulsionadores do meu sucesso, a eles estarei eternamente grato. Aos meus avós, que sempre garantiram o meu bem-estar e que, semelhantemente aos meus pais, me inculcaram os valores pelos quais me guio. Ao meu irmão, que da sua maneira contribuiu para a pessoa que sou hoje. A toda a minha família, pela esperança e confiança que sempre depositaram em mim. A todos os meus amigos, pelas aventuras, longas conversas e desabafos ao longo do meu percurso, sem eles não teria sido possível.



"The meaning of life is just to be alive. It is so plain and so obvious and so simple. And yet, everybody rushes around in a great panic as if it were necessary to achieve something beyond themselves. Unless one is able to live fully in the present, the future is a hoax." (Alan W. Watts).



## RESUMO

A realidade atual dos sensores embutidos apresenta limitações quanto à sua integração estrutural, na garantia de recolha de dados sem utilização de fontes de alimentação externas e na fiabilidade e longevidade deste tipo de sensores, garantido uma monitorização prolongada e em tempo real. O *Self-Sensing Material* (SSM) procura resolver estas limitações, tratando-se de um compósito metálico sensível a cargas uniaxiais que, após polarizado sob a influência de um campo elétrico externo, fornece um sinal elétrico mensurável correspondente, graças à integração de partículas piezoelétricas de Titanato de Bário na sua matriz.

A presente dissertação pretende avaliar a influência de certos parâmetros no comportamento sensorial do SSM através da utilização de provetes metálicos sensíveis, para determinar as orientações de polarização e disposições dos elétrodos de medição que concedem um sinal mais expressivo.

Tracionando uniaxialmente os provetes, executaram-se ensaios com diferentes parâmetros, variando o deslocamento imposto e a frequência de solicitação.

Os resultados confirmam: a produção de provetes sensíveis, síncronos entre a carga aplicada e a resposta produzida; sensibilidade superior para ensaios de 0,125 Hz de solicitação; sensibilidades superiores para provetes com orientações de polarização ao longo da espessura e para configurações de medição ao longo da largura; a não dependência da sensibilidade consoante o deslocamento imposto no ensaio;

**Palavras-Chave:** Sensor, Compósitos Metálicos, Integridade Estrutural, Piezoelectricidade, Processamento por Fricção Linear



## ABSTRACT

The current reality of embedded sensors presents limitations in terms of their structural integration, in guaranteeing data collection without the use of external power supplies and in the reliability and longevity of this type of sensors, guaranteeing prolonged, real-time monitoring. The Self-Sensing Material (SSM) seeks to solve these limitations by being a metallic composite that, after being exposed to an external electric field, becomes sensitive to uniaxial loads and provides a corresponding measurable electric signal, all of this thanks to the integration of piezoelectric Barium Titanate particles in its matrix.

This dissertation aims to evaluate the influence of certain parameters on the sensory behavior of SSM through the use of sensitive metallic specimens, to determine the polarization orientations and arrangements of the measuring electrodes that provide the most expressive signal. Uniaxial tests were carried out with different parameters, varying the imposed displacement and the frequency of application, varying the imposed displacement and the frequency of application.

The results confirm: the production of sensitive specimens, synchronous between the load applied and the response produced; superior sensitivity for 0.125 Hz stress tests, higher sensitivity for specimens with polarization orientations along the thickness and for measurement configurations along the width; the independence of sensitivity regarding to the displacement imposed in the tests;

**Keywords:** Sensor, Metallic Composite, Structural Health Monitoring (SHM), Piezoelectricity, Friction Stir Processing (FSP)



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1	Motivação .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Trabalho Desenvolvido .....	2
1.4	Estrutura da Dissertação.....	3
1.5	Resultados e Conclusões.....	3
<b>2</b>	<b>REVISÃO DO ESTADO DA ARTE</b> .....	<b>5</b>
2.1	Introdução.....	5
2.2	Sensores.....	5
2.3	Materiais auto sensíveis.....	9
2.4	Piezoelétricos e Piezoeletricidade.....	13
2.5	Titanato de Bário .....	15
2.6	<i>Friction stir processing</i> (FSP).....	17
2.7	Polarização.....	20
<b>3</b>	<b>CRIAÇÃO DE PROVETES SENSÍVEIS</b> .....	<b>23</b>
3.1	Introdução.....	23
3.2	Processo de produção de provetes.....	23
3.2.1	Materiais utilizados.....	24
3.2.2	Geometria do perfil da placa base e disposição das partículas .....	25
3.2.3	Processamento por fricção linear .....	26
3.2.4	Retificação da placa processada .....	28

3.2.5	Processamento no equipamento CNC.....	29
3.2.6	Polarização individual dos provetes .....	30
<b>4</b>	<b>AVALIAÇÃO SENSORIAL DO MATERIAL.....</b>	<b>33</b>
4.1	Introdução.....	33
4.2	Método de avaliação das propriedades sensoriais .....	33
4.3	Criação dos equipamentos acessórios de medição .....	37
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>39</b>
5.1	Introdução.....	39
5.2	Resultados experimentais .....	39
5.3	Caracterização da sensibilidade do material .....	48
5.4	Discussão dos resultados.....	49
<b>6</b>	<b>CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS .....</b>	<b>51</b>
6.1	Introdução.....	51
6.2	Possíveis utilizações .....	51
6.3	Conclusões.....	53
6.4	Trabalho Futuro .....	54
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>56</b>
	<b>APÊNDICE.....</b>	<b>1</b>
	Resultados experimentais.....	1

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 - Representação esquemática extensómetro contacto, adaptado de [11].....	7
Figura 2.2 - Representação esquemática sensor FBG, adaptado de [13].....	8
Figura 2.3 - Representação esquemática sensor PWAS [14].....	8
Figura 2.4 - Representação esquemática dos conceitos base da tecnologia de FSP, adaptado de [47].....	19
Figura 2.5 - Ilustração de uma polarização elétrica, adaptado de [4]. .....	21
Figura 3.1 - Processo simplificado para a criação do compósito sensível SSM, adaptado de [4]. .....	24
Figura 3.2 - Especificações industriais das partículas de BaTiO <sub>3</sub> , adaptado de [54].....	25
Figura 3.3 - Abertura do rasgo recorrendo a um disco cortante. ....	25
Figura 3.4 - Perfil do rasgo, adaptado de [4]. .....	26
Figura 3.5 - Rasgo preenchido com partículas BT. ....	26
Figura 3.6 - Ferramentas FSP utilizadas, adaptado de [4]: a) Ferramenta sem pino; b) Ferramenta com pino;.....	27
Figura 3.7 - Figura ilustrativa etapas do processo FSP, adaptado de [4]. ....	27
Figura 3.8 - Aparato experimental no processamento por fricção linear: a) Montagem, b) Resultado do processamento. ....	28
Figura 3.9 - Etapas retificação placa: a) Primeira etapa, b) Segunda Etapa.....	28
Figura 3.10 - Provetes obtidos recorrendo ao equipamento CNC.....	29
Figura 3.11 - Dimensões obtidas para os provetes de ensaio, adaptado de [4]. .....	29
Figura 3.12 - Aparato Experimental para polarizar provetes. ....	30
Figura 3.13 - Orientação polarização Provetes tipo X (PX).....	31
Figura 3.14 - Orientação polarização Provetes tipo Y (PY).....	31
Figura 4.1 - Ilustração esquema experimental, adaptado [4]. ....	34

Figura 4.2 - Designações adotadas: a) Face S1 e S2, b) Configuração 1, c) Configuração 2, d) Configuração 3, e) Configuração 4, f) Configuração 5, g) Configuração 6.....	35
Figura 4.3 - Aparato experimental de ensaio sensorial.....	36
Figura 4.4 - Amarras utilizadas: a) Configuração 1, b) Configuração 2, c) Configuração 3, d) Configuração 4, e) Configuração 5, b) Configuração 6.....	37
Figura 4.5 - Exemplo colocação da amarra no provete para a configuração 1.....	38
Figura 4.6 - Exemplo colocação da amarra no provete para a configuração 6.....	38
Figura 5.1 - Exemplo demonstração dos gráficos em apêndice.....	44
Figura 5.2 - Sensibilidade Provete X: Configuração 1.....	44
Figura 5.3 - Sensibilidade Provete X: Configuração 2.....	45
Figura 5.4 - Sensibilidade Provete X: a) Configuração 3, b) Configuração 4, c) Configuração 5, d) Configuração 6.....	45
Figura 5.5 - Sensibilidade Provete Y: Configuração 1.....	46
Figura 5.6 - Sensibilidade Provete Y: Configuração 2.....	46
Figura 5.7 - Sensibilidade Provete Y: a) Configuração 3, b) Configuração 4, c) Configuração 5, d) Configuração 6.....	46
Figura 5.8 - Quociente sensibilidade configuração 1.....	47
Figura 5.9 - Quociente sensibilidade configuração 2.....	47
Figura 5.10 - Quociente sensibilidade: a) Configuração 3, b) Configuração 4, c) Configuração 5, d) Configuração 6.....	48

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades inerentes do BT, retirado de [4] e [44].....	17
Tabela 5.1 - Guia de referências Provete X.....	39
Tabela 5.2 - Guia de referências Provete Y.....	42



## NOMENCLATURA

<b>Q<sub>s</sub></b>	Quociente Sensibilidade [Valor sensibilidade PX / Valor sensibilidade PY]
<b>v</b>	Velocidade Avanço [m/s]
<b>ω</b>	Velocidade Rotação [rad/s]
<b>PLLA</b>	Ácido Poliláctico
<b>BST</b>	<i>Barium Strontium Titanate</i>
<b>DAQ</b>	<i>Data Acquisition</i>
<b>ddp</b>	Diferença de Potencial
<b>FCT</b>	Faculdade Ciências e Tecnologia
<b>FBG</b>	<i>Fiber Bragg Grating</i>
<b>FSP</b>	<i>Friction Stir Processing</i>
<b>FSW</b>	<i>Friction Stir Welding</i>
<b>FDM</b>	<i>Fused Deposition Modelling</i>
<b>IA</b>	Inteligência Artificial
<b>IoT</b>	<i>Internet of Things</i>
<b>PZT</b>	<i>Lead Zirconate Titanate (PZT)</i>
<b>MEMS</b>	Micro-Electromecânicos
<b>NDT</b>	<i>Non-Destructive Testing</i>
<b>PWAS</b>	<i>Piezoelectric Wafer Active Sensors</i>

PCL	Policaprolactona (PCL)
KNN	<i>Potassium Sodium Niobate</i>
PX	Provetes com orientação de polarização tipo X
PY	Provetes com orientação de polarização tipo Y
RTD	<i>Resistance Temperature Detector</i>
SSM	<i>Self-Sensing Material</i>
SM	<i>Smart Material</i>
SHM	<i>Structural Health Monitoring</i>
BT	Titanato de Bário, BaTiO <sub>3</sub>
WSN	<i>Wireless Sensor Networks</i>
ZTM	Zona Termomecânica

# INTRODUÇÃO

## 1.1 Motivação

Atualmente, são muitas as estruturas que recorrem a componentes metálicos como alicerce, graças às propriedades que estes conferem. Consequentemente, devido à utilização genérica destes materiais na sociedade, torna-se indispensável a monitorização da sua integridade estrutural de forma a prolongar a vida útil assim como a eficácia e intervalo das intervenções necessárias. Neste contexto, cria-se a necessidade para a conceção de soluções de monitorização de fácil implementação e praticáveis do ponto de vista económico que se integrem de maneira discreta nas estruturas e que produzam resultados fiáveis, imediatos e coerentes, independentemente do tipo de solicitação imposto.

No século XX, surge o conceito de material auto sensível e, com este, uma alteração fundamental no modo como estes materiais e componentes derivados possibilitam a monitorização de sistemas em tempo real. Os materiais auto sensíveis definem-se como materiais alterados, capazes de produzir uma resposta controlada e expectável para certos estímulos externos [1]. Assim sendo, os materiais auto sensíveis apresentam-se como uma possível solução para os acrescidos custos da inspeção, da manutenção tardia e do elevado custo do projeto preventivo que comprometa o desempenho do sistema [2], nesse sentido, oferecendo vantagens como a alteração das suas propriedades, a sua reversibilidade e a especificidade com que podem ser adequados a cada cenário [3].

Neste enquadramento, surge o elemento mecânico para a transdução de esforços mecânicos em sinais elétricos [4] ou, como será designado neste documento, *Self-Sensing Material* (SSM). Este material proporciona a integração direta das propriedades

das partículas piezoelétricas no quadro dos materiais metálicos e nas estruturas que os contêm.

## 1.2 Objetivos

O trabalho desenvolvido nesta dissertação teve como objetivos a averiguação do comportamento sensorial do SSM, investigando a existência de sensibilidade e o fenómeno de correlação consoante as cargas aplicadas, o efeito das diferentes orientações de polarização na leitura do sinal obtido, a análise da resposta do material para distintas posições dos elétrodos de medição, determinando quais as mais preponderantes na criação de uma resposta do material, finalizando na determinação da dependência da sensibilidade, e da diferença de potencial (ddp), perante o deslocamento imposto.

## 1.3 Trabalho Desenvolvido

Tendo em vista o cumprimento dos objetivos definidos, executou-se uma revisão bibliográfica das tecnologias envolvidas, nomeadamente no contexto atual dos sensores, com um foco na realidade da integridade das estruturas, na ideia geral dos materiais auto sensíveis, nos conceitos dos piezoelétricos, piezoelectricidade e polarização, no reconhecimento das propriedades do titanato de bário e na compreensão do processamento no estado sólido por fricção linear, também conhecido por *Friction Stir Processing* (FSP).

O processamento, no estado sólido (FSP), de provetes teste, cujas propriedades sensoriais se destacam pela sensibilidade adquirida quando sujeitos a solicitações do tipo uniaxial, sendo projetados com diferentes orientações de polarização, mas respeitando a mesma geometria, assim como, uma aprendizagem no manuseamento e calibração de equipamentos disponíveis nos laboratórios de Tecnologia Industrial e Mecânica Estrutural.

A conceção de equipamentos acessórios de medição para efetivar as leituras do sinal elétrico obtido, após a solicitação dos provetes.

A realização de ensaios de tração uniaxial, conjuntamente com a medição da tensão elétrica gerada (recorrendo a um nanovoltímetro), de acordo com parâmetros estabelecidos *a priori*.

A análise, por meio de *software*, com a finalidade de deduzir as especificações que conferem leituras mais perceptíveis, através de equipamentos de medição, do sinal obtido, independentemente da qualidade do sinal.

Uma ponderação acerca do tipo de utilizações que o SSM poderá cumprir em contextos industriais e laboratoriais.

## 1.4 Estrutura da Dissertação

A presente tese encontra-se estruturada em seis capítulos ao longo dos quais se distribuem as diferentes fases do trabalho desenvolvido:

No capítulo 2, apresenta-se a pesquisa bibliográfica referente aos conceitos e tecnologias abordadas. Faz-se um enquadramento geral da realidade atual dos sensores e materiais auto sensíveis, refletindo acerca das suas atuais aplicações e limitações. São abordados os conceitos de Piezoelétricos, Piezoelectricidade e Polarização, expondo o seu significado assim como recentes avanços. Apresenta-se ainda uma síntese da técnica de FSP assim como um sumário das propriedades e características prevalentes do titanato de bário.

No capítulo 3, é descrita a conceção, projeto e construção dos provetes sobre os qual incidiu o trabalho experimental

No capítulo 4, apresentam-se os métodos e os critérios empregues na recolha de dados assim como uma apresentação dos equipamentos laboratoriais desenvolvidos.

No capítulo 5, apresentam-se os resultados experimentais e conclusões referentes a esses resultados assim como propostas para desenvolvimentos futuros e possíveis utilizações para a tecnologia.

No capítulo 6, são apresentadas as conclusões do estudo realizado e propostas de trabalho futuro.

## 1.5 Resultados e Conclusões

Os ensaios executados permitiram verificar que os provetes possuem características sensoriais diferenciadas, observando-se ainda o fenómeno de correlação, confirmando resultados obtidos em trabalhos passados [4] e, de acordo com o intuito deste trabalho: uma distinção entre sinais obtidos consoante a orientação de polarização imposta, sendo que, para provetes polarizados ao longo da espessura (do tipo X, PX) a sensibilidade observada revela-se como 21% superior à sensibilidade observada em provetes polarizados ao longo da largura (do tipo Y, PY); uma diferenciação entre os tipos de configurações de medição, das quais a configuração 2 apresenta uma sensibilidade 42% superior à média; uma possível

frequência ideal de ensaio (0,125 Hz) dado que, para os ensaios que respeitam este parâmetro, a sensibilidade verificada apresenta-se como 7% superior à média; a não dependência da sensibilidade consoante o deslocamento imposto, ainda que a ddp possua uma relação de proporcionalidade direta com o aumento da imposição do deslocamento; certas propostas para fins comerciais e laboratoriais do SSM dadas as características do SSM, conforme os resultados experimentais e o conhecimento adquirido no estado da arte.

## REVISÃO DO ESTADO DA ARTE

### 2.1 Introdução

Neste capítulo serão apresentados fundamentos base para a compreensão dos tópicos abordados no presente documento. Os temas exibidos dizem respeito tanto aos métodos como aos princípios físicos essenciais para a criação do SSM.

Neste sentido, será abordada a realidade atual dos instrumentos sensoriais, será discutida a definição de material auto sensível, apresentados os principais conceitos referentes à piezoeletricidade e aos piezoelétricos, abordando as principais propriedades do titanato de bário, os fenómenos envolvidos e respetivas vantagens do processamento por fricção linear e por fim, a noção e respetivas limitações do processo de polarização em objetos metálicos.

### 2.2 Sensores

Os sensores desempenham um papel fundamental na monitorização da integridade das estruturas, ou *structural health monitoring* (SHM) [5], [6], fornecendo dados em tempo real sobre o seu estado. Este capítulo apresenta uma síntese das principais tecnologias de sensores e considerações para os sistemas SHM. O foco encontra-se nos sensores para monitorização de tensões, deformações, vibrações, danos e outros parâmetros em estruturas industriais e civis.

Um sensor trata-se de um dispositivo capaz de quantificar eventos ou alterações físicas, químicas ou biológicas, fornecendo uma saída correspondente, normalmente sob a forma de um sinal elétrico ou ótico. Os principais elementos de um sensor incluem um mecanismo de

deteção, um sistema eletrônico de conversão e de condicionamento do sinal, uma interface de saída e um acondicionamento. A presença de sensores em componentes industriais e estruturais possibilitam a detecção de defeitos para danos adquiridos assim como a recolha de dados acerca da SMH [5].

Os sensores podem ser classificados de acordo com os tipos de domínios de energia que monitorizam - mecânico, térmico, eletromagnético, químico, et cetera. Para a gestão da segurança de estruturas e componentes mecânicos, os tipos de sensores mais comuns incluem [5]:

- Sensores de movimento - acelerómetros, giroscópios, sensores de deslocamento;
- Sensores de força - células de carga, sensores de pressão, sensores de binário;
- Sensores de vibração - acelerómetros, sensores de velocidade;
- Sensores de deformação - medidores de deformação, sensores piezoelétricos;
- Sensores de temperatura - termopares, RTD, termístores;
- Sensores de emissão acústica - piezoelétricos, óticos;

Outros indicadores importantes do desempenho de um sensor consistem no intervalo de medição, na sensibilidade, linearidade, resposta em frequência, resolução, exatidão, repetibilidade e ruído. Alguns fatores do meio envolvente, como a temperatura, a presença de choques e a vibração, podem afetar as especificações dos sensores [5]. Neste sentido, de modo a desenvolver um sistema SHM eficaz, é fundamental a seleção de sensores adequados, respeitando os principais requisitos [5]:

- Sensibilidade - capacidade de deteção de pequenas alterações no parâmetro monitorizado com elevada resolução;
- Durabilidade - resistência a ambientes agressivos, como temperaturas elevadas, cargas e corrosão;
- Multiplexagem - possibilidade de integração de vários sensores numa estrutura;
- Incorporação ("*embeddability*") - possibilidade de incorporação no material sem comprometer a integridade estrutural;
- Rentabilidade - custo acessível para uma implementação em larga escala;
- Longevidade - funcionamento estável durante o tempo de vida do sistema, frequentemente décadas;

- Fiabilidade - robustez contra falhas a longo prazo;
- Eficiência energética - baixo consumo de energia, potencial para recolha de energia;

Entre os tipos de sensores mais utilizados contam-se os seguintes:

**Extensómetros:** Os extensómetros tratam-se de sensores resistivos que alteram o valor da resistência proporcionalmente à tensão aplicada [7]. São normalmente constituídos por uma grelha resistiva metálica montada num material de suporte (extensómetros de contacto), como demonstrado na Figura 2.1. A tensão provoca a deformação da grelha, alterando a sua resistência. Os extensómetros são baratos, fáceis de instalar e adequados para instalação em superfícies. São normalmente utilizados para monitorizar tensões localizadas, para avaliar a deformação de materiais ou amostras, na deteção de danos em estruturas [8]. As limitações destes equipamentos incluem problemas de colocação do extensómetro no seu ponto de ancoragem [9] e problemas de durabilidade em ambientes menos favoráveis [10].

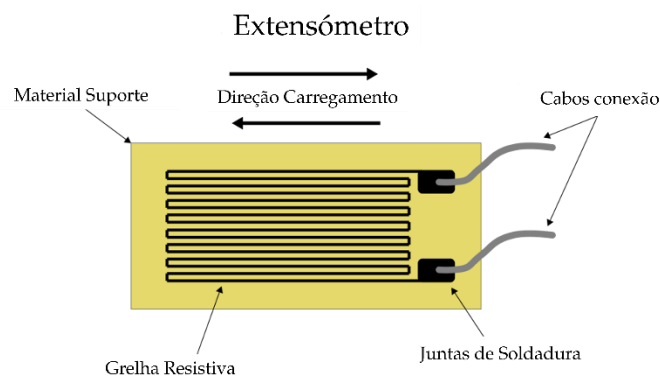


Figura 2.1 - Representação esquemática extensómetro contacto, adaptado de [11].

**Sensores de fibra ótica:** Os sensores de fibra ótica utilizam fibras óticas com propriedades de transmissão de luz que variam em função de fatores externos. Mais comumente utilizados, os sensores de redes de Bragg em fibra, ou *fiber bragg grating* (FBG), têm variações periódicas no índice de refração ao longo do comprimento da fibra. Estes atuam como filtros, refletindo comprimentos de onda específicos de luz proporcionais à tensão ou à temperatura. As vantagens dos sensores FBG incluem a elevada precisão, a possibilidade de serem incorporados em compósitos e a sua capacidade de multiplexagem. As desvantagens tratam-se de um custo mais elevado em comparação a outros sensores elétricos e a sua fragilidade [12]. A Figura 2.2 apresenta um esquema representativo dos sensores FBG.

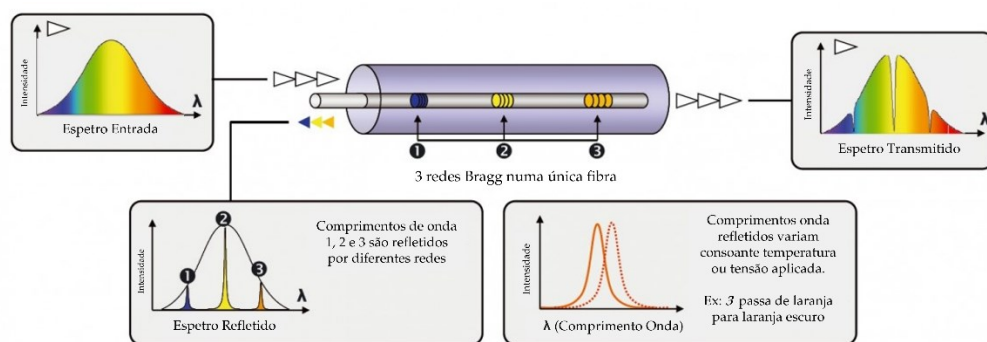


Figura 2.2 - Representação esquemática sensor FBG, adaptado de [13].

Sensores piezoelétricos: Os materiais piezoelétricos geram tensão elétrica proporcional à tensão mecânica aplicada. Podem ser utilizados como sensores e atuadores. Os sensores piezoelétricos ativos de bolacha, ou *piezoelectric-wafer active sensors* (PWAS), são normalmente utilizados para técnicas SHM baseadas na propagação de ondas ultrassônicas guiadas. As suas vantagens incluem a sensibilidade a deformações e fissuras. As limitações incluem o custo e as suas temperaturas de Curie, a partir das quais as propriedades piezoelétricas não se verificam. A Figura 2.3 ilustra uma representação de um sensor PWAS [14].

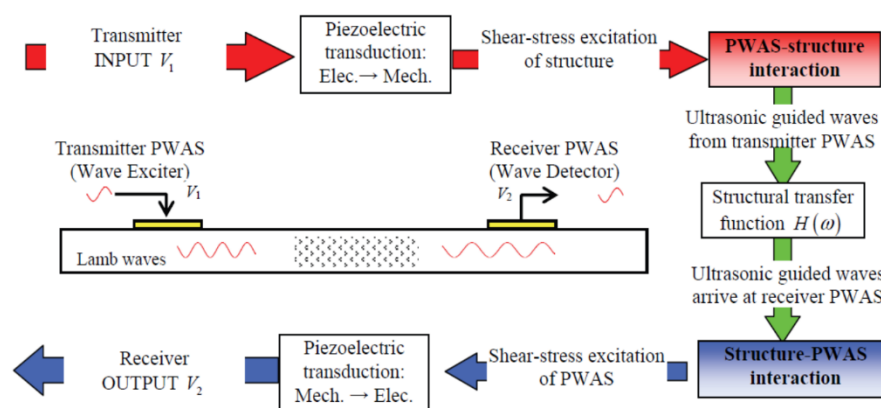


Figura 2.3 - Representação esquemática sensor PWAS [14].

Acelerómetros: Os acelerómetros medem a aceleração e a vibração para os métodos de análise modal no contexto da SHM. Os acelerómetros de sistemas micro-electromecânicos (MEMS) são pequenos, baratos, têm uma resposta em alta frequência e podem ser instalados em grandes conjuntos. Os principais desafios incluem a instalação de cabos, os requisitos de energia e a medição de vibrações a baixa frequência [15].

Sensores ultrassônicos: A inspeção ultrassônica não destrutiva utiliza uma rede de transdutores ultrassônicos para gerar e detectar ondas de tensão. Isto permite a detecção de fissuras, delaminações e outros danos em materiais e soldaduras. As vantagens incluem a sensibilidade a uma variedade de tipos de danos. As desvantagens prendem-se com a complexidade e o custo [16].

De modo a facilitar a aquisição de dados, opta-se por recorrer à utilização de sensores embutidos. A incorporação de sensores diretamente nos materiais pode aumentar a durabilidade em comparação à montagem superficial, mas pode comprometer a integridade das estruturas. As novas técnicas de fabrico aditivo revelam-se promissoras na incorporação de sensores em metais. No caso dos materiais compósitos, os sensores de fibra ótica, como os FBG, podem ainda ser incorporados em camadas com efeitos reduzidos no desempenho estrutural [5].

Os principais desafios para os sistemas de sensores SHM incluem a otimização da durabilidade, da fiabilidade, do consumo de energia e das capacidades de multiplexagem. Os ambientes agressivos, em particular, limitam a vida útil dos sensores, deste modo, revela-se como essencial o desenvolvimento de alternativas que mitiguem os efeitos destes fenómenos. As tecnologias emergentes, como os sistemas micro-electromecânicos (MEMS), os nano-materiais e a recolha de energia e o SSM podem ajudar a resolver estes desafios. Com o mesmo objetivo, igualmente a ser desenvolvidos sensores passivos, sem fios, para eliminar os inconvenientes da instalação por cabos e da fragilização estrutural [5].

Outra área de incidência consiste no desenvolvimento de interfaces e protocolos normalizados de comunicação entre sensores que permitam a permutabilidade e a interoperabilidade. Uma tendência emergente consiste na incorporação de tecnologia de sensores inteligentes com capacidades de processamento e de tomada de decisões nos nós de sensores. Deste modo, contribuindo para a redução dos requisitos de telemetria [5].

## **2.3 Materiais auto sensíveis**

Os materiais auto sensíveis enquadram-se no mundo atual dos compósitos dado que se tratam de "misturas (ao nível macroscópico) não solúveis de dois ou mais constituintes com

distintas composições, estruturas e propriedades que se combinam e em que um dos materiais garante a ligação - matriz – e o outro a resistência - reforço” [17].

Os materiais auto sensíveis podem também ser caracterizados como *Smart Materials* (SM). Os SM tratam-se de materiais alterados de modo que produzam uma resposta controlada e expectável a estímulos externos (tensões mecânicas, variações de temperatura, et cetera) [2]. A família dos SM é facilmente categorizada em vários grupos, entre os quais se destacam os seguintes [2]:

- Materiais Piezoelétricos: Capazes de transformar energia mecânica em energia elétrica e vice-versa;
- Materiais com memória de forma: Capazes de alterar a sua forma e regredir quando aplicada uma fonte de calor ou outro estímulo;
- Materiais Cromo-Ativos: Alteração da cor quando sujeito a certas temperaturas, luz, pressão;
- Materiais Magnetoreológico: Alteração das suas propriedades quando expostos a um campo magnético;
- Materiais Foto-Ativos: Capazes de emitir luz quando excitados eletricamente (eletroluminescente) ou após essa excitação (fosforescentes) e refletir luz com maior intensidade (fluorescentes);

Ainda como fator diferenciador, estes materiais podem ser classificados como ativos ou passivos. Ativos quando a sua geometria ou propriedades inerentes se alteram quando expostos a estímulos elétricos, magnéticos, mecânicos ou térmicos, adquirindo capacidade de transmitir energia. Passivos todos aqueles que não cumprem esse requisito [2].

O futuro deste tipo de materiais apresenta-se promissor, considerando a suas aplicabilidades nos mais diversos setores da indústria. A procura de materiais inovadores associado ao surgimento de tecnologias revolucionárias tem resultado no aparecimento de tecnologias como:

- Materiais bio inspirados, simulando as propriedades da seda de aranha ou do adesivo de mexilhão. Também utilizados em aplicações biomédicas, como a engenharia de tecidos, a administração de medicamentos, dispositivos implantáveis

e os biossensores, substâncias como o ácido polilático (PLLA) e a policaprolactona (PCL), têm vindo a ser desenvolvidos devido à sua biocompatibilidade e biodegradação [18];

- Estruturas adaptativas, materiais capazes de alterar as suas propriedades consoante as condições climatéricas existentes (luminosidade, temperatura, humidade, et cetera). Sendo já utilizados em edifícios, veículos ou outras estruturas [19];
- Integração com tecnologias emergentes, na integração entre materiais têxteis e dispositivos IoT (*Internet of Things*) a serem utilizados em serviços de cuidados de saúde e outras indústrias [20];
- A integração com tecnologias de inteligência artificial (IA) e *machine learning*, recorrendo a algoritmos para otimizar a performance e possibilitar a monitorização, em tempo real, do seu estado assim como a alteração das suas propriedades [21];
- O desenvolvimento de SM nano-estruturais, os quais oferecem propriedades e funcionalidades melhoradas devido à sua pequena dimensão e grande área de superfície [22]. Além disso, espera-se que a incorporação do grafeno, e de outros materiais bidimensionais, nos SM, venha a revolucionar o seu desempenho e aplicabilidade [23].

Apesar das vantagens inerentes dos SM, quando comparados com materiais tradicionais, estes possuem ainda algumas limitações, nomeadamente:

- Elevado custo, devido aos complexos processos de fabrico necessários limitar a sua adoção generalizada;
- Escalabilidade limitada, devido à produção ser, atualmente, limitada a pequenas quantidades, impedindo a produção necessária para satisfazer as exigências das aplicações industriais em grande escala. Limitação esta que contribuí para dificultar a implementação de materiais inteligentes em produtos produzidos em massa;
- Potenciais problemas de fiabilidade, sendo que os SM dependem de mecanismos e componentes eletrónicos complexos, sujeitos à falha. A falha destes mecanismos ou

componentes pode resultar na redução do desempenho ou na falha total do material, levantando questões de segurança em determinadas aplicações;

- Requisitos energéticos, em virtude de necessitarem, por vezes, de fontes de alimentação externas, aumentando assim os seus custos de operação e manutenção. Em certos casos, estes requisitos podem anular os benefícios conseguidos pelo uso do SM;
- Problemas de durabilidade. As propriedades inovadoras dos SM podem, por vezes, ser obtidas à custa da sua durabilidade. Por exemplo, certos SM podem deteriorar-se mais rapidamente que os materiais tradicionais em determinadas condições ambientais, reduzindo o seu tempo de vida útil;
- Complexidade na conceção e integração, em consequência dos conhecimentos especializados e experiência necessários para conceber, integrar e manter os SM, criando outro fator que dificultará a incorporação dos SM em designs de produto e processos de fabrico existentes;
- Questões de interoperabilidade, em consequência da ausência de compatibilidade entre si, ou com materiais tradicionais, podendo limitar a sua utilização em aplicações multimateriais.

Atualmente, estão em curso iniciativas para normalizar e resolver estes desafios, mas a curto prazo continuam a ser um obstáculo.

O aparecimento deste tipo de materiais pode ser associado à necessidade crescente da recolha de dados eficaz, imediata e ambientalmente consciente presente cada vez mais em todas as indústrias. Argumentos estes justificados pela multifuncionalidade e flexibilidade no tipo de medições possíveis através destes materiais, a sua independência de dispositivos externos que introduzam complexidade ao sistema, o melhoramento das propriedades mecânicas inerentes dos sistemas onde são incluídos, a possibilidade da sua biodegradação, as suas inúmeras aplicações na vida quotidiana de cada um, et cetera [24]. Considerando as vantagens e limitações dos SM, surge, neste contexto o SSM, como uma possível solução para a análise contínua e pouco intrusiva de elementos estruturais metálicos.

De modo a estudar a sua utilidade, realizaram-se estudos de análise sensorial a provetes que compreendem em si o SSM.

## 2.4 Piezoelétricos e Piezoeletricidade

Os piezoelétricos tratam-se de materiais capazes de gerar uma tensão elétrica em resposta a uma solicitação mecânica. Esta propriedade confere utilidade numa larga escala de aplicações, desde o uso em sensores e atuadores, em técnicas de recolha de energia, em equipamento médico, et cetera [5]. No fundamento desta propriedade, revela-se o fenómeno de piezoeletricidade.

A piezoeletricidade trata-se de um fenómeno associado a materiais que possuam a capacidade de transformar energia mecânica em energia elétrica, e vice-versa, quando solicitados. Nesta perspetiva, os fenómenos de piezoeletricidade podem ser classificados como: Diretos, no caso em que uma solicitação mecânica gera uma tensão elétrica; Inversos, quando um campo elétrico induz deformação no material; Ambos os efeitos ocorrem devido à deslocação de iões na rede cristalina, sendo a tensão elétrica gerada ou a deformação observada diretamente proporcionais à magnitude da solicitação imposta [25], [26]. Na discussão deste fenómeno, existem alguns princípios físicos a ter em conta, tais como:

- Tipo de ligação química: A piezoeletricidade encontra-se intimamente relacionada com a natureza da ligação química, entre os átomos envolvidos, em cada material. Por exemplo, a ocorrência do efeito piezoelétrico longitudinal negativo, em ligações do tipo covalente. Este efeito caracteriza-se pela contração do material, quando sujeito a um campo elétrico, na direção do campo. Apesar de raro, estudos recentes têm demonstrado que, este fenómeno, pode expressar-se significativamente em materiais ferroelétricos que apresentem uma estrutura do tipo ABC hexagonal [25];
- Regra dos sinais: Trata-se de uma regra universal, estabelece que o termo do ião fixo é negativo e o termo da tensão interna é positivo. O termo do ião fixo refere-se à polarização do material, quando não se encontra sujeito a qualquer tipo de solicitação. O termo da tensão interna refere-se à mudança da polarização devido ao relaxamento estrutural, em resposta à tensão aplicada [25], [27];
- Verifica-se a ocorrência do efeito piezoelétrico longitudinal negativo quando o termo negativo do ião fixo não é compensado pelo termo positivo da tensão interna [27];
- A importância da regra dos sinais pode ser observada na previsão da resposta piezoelétrica dos materiais, sendo utilizada como critério na triagem computacional para caracterização de materiais com efeito piezoelétrico longitudinal negativo [25];

- Coeficiente piezoelétrico: Trata-se da medida da influência do efeito piezoelétrico para um dado material, pode ser estimado estabelecendo uma relação linear entre o componente da tensão e o componente do campo elétrico, os dois vetores do tensor piezoelétrico, sendo o tensor um objeto matemático utilizado para relacionar estes dois vetores [28];

Os materiais piezoelétricos podem ser classificados em duas categorias particulares: cristais naturais (exemplo: quartzo, sal de Rochelle) e os cerâmicos sintéticos (exemplo: Titanato de zirconato de chumbo, Titanato de bário). A escolha do material a utilizar depende da aplicação e das propriedades finais desejadas. Os cristais naturais são por vezes selecionados devido à sua estabilidade e ao seu elevado coeficiente piezoelétrico, contudo, os cerâmicos sintéticos apresentam melhores propriedades mecânicas e uma temperatura de Curie mais elevada [29]. Os materiais piezoelétricos apresentam estruturas cristalográficas distintas, que determinam a sua classe de simetria, a qual relaciona o número e orientação dos eixos de simetria na rede cristalina. Por sua vez, a sua classe de simetria determina a natureza do coeficiente piezoelétrico, de um dado material [30].

Os mais recentes desenvolvimentos, no âmbito deste tipo de materiais, prendem-se pela:

- Recolha de energia, que se trata do processo de conversão e recolha de fontes de energia ambiente em energia útil, através da conversão de energia mecânica em energia elétrica. Recorrendo a tecnologia do tipo *wireless sensor networks* (WSN), baseados em microcontroladores de baixa potência, um transceptor de frequências rádio e um sensor do tipo micro-electromecânicos (MEMS) espera-se que no futuro seja possível a recolha de energia de fontes limpas como vibrações (exemplo: tráfego pedonal), a energia do vento ou através do fluxo de água para o fornecimento de energia a pequenos aparelhos ou a grandes complexos industriais [31];
- A criação de piezoelétricos sem conteúdos em chumbo, substância esta tóxica, prejudicial à saúde dos seres vivos e do meio ambiente. Neste sentido, alternativas como o *potassium sodium niobate* (KNN) e *bismuth ferrite* (BiFeO<sub>3</sub>) revelam-se como promessas promissoras devido à manifestação de coeficientes piezoelétricos altos e às suas favoráveis propriedades mecânicas [32], [33];

- A conceção de polímeros piezoelétricos flexíveis, sintetizados em laboratório. Aptos para alongar e comprimir sem que haja perdas das suas capacidades piezoelétricas. Neste contexto, materiais como as borrachas piezoelétricas facilitarão o desenvolvimento de sistemas rodoviários autossuficientes que recorram a esta fonte de energia, o fabrico de sensores altamente sensíveis e transmissores para aplicações militares, et cetera [34];
- O desenvolvimento de nano-estruturas e nano-compósitos piezoelétricos, ao manipular a estrutura e composição à escala nanométrica, resultando no melhoramento das suas propriedades piezoelétricas. Exemplos práticos revelam-se como os nano-fios piezoelétricos, nano-fitas e nano-compósitos constituídos por materiais com e sem propriedades piezoelétricas [35].

## 2.5 Titanato de Bário

De modo a conferir uma propriedade piezoelétrica ao SSM, são utilizadas partículas de titanato de bário,  $\text{BaTiO}_3$  (BT). Este material pertence à família de compostos denominada *perovskita*, a qual engloba diversos titanatos, sendo amplamente utilizados em aplicações eletrocerâmicas [36].

No caso do titanato de bário, trata-se de um material ferroelétrico com uma elevada constante dielétrica, alta permissividade, ausência de chumbo na sua constituição e elevado potencial de polarização, propriedades que o tornam um bom candidato para se atingir o propósito do SSM [37].

A estrutura cristalina do  $\text{BaTiO}_3$  apresenta-se como cúbica, sendo considerada como *perovskita* devido à posição ocupada pelos átomos de oxigénio e pelos seus catiões [38]. O  $\text{BaTiO}_3$  possui ainda quatro fases estruturais, após o aquecimento: romboédrica, ortorrômbica, tetragonal e cúbica, sendo que, para temperaturas elevadas, o  $\text{BaTiO}_3$  apresenta-se estável sob uma estrutura paraelétrica cúbica. A 393K dá-se uma modificação, na sua simetria, para uma forma tetragonal, a 278K verifica-se uma estrutura ortorrômbica e, por fim, para temperaturas iguais ou inferiores a 183K sucede-se uma simetria romboédrica e ortorrômbica [39].

O  $\text{BaTiO}_3$  trata-se de um material ferroelétrico, característica verificada devido à polarização espontânea da sua estrutura cristalina. O conceito de polarização espontânea caracteriza-se pelo momento dipolar elétrico (medida da quantidade de separação observada

das cargas elétricas, positivas e negativas, num dado sistema) constante, no interior da sua estrutura cristalina. A direção de polarização pode ser alterada aplicando um campo elétrico externo ao material (*poling*), realinhando os dipolos no sentido do campo elétrico [40].

Na sua gênese, o BaTiO<sub>3</sub> é constituído por domínios, nos quais, existe uma orientação preferencial adotada pelos dipolos elétricos das unidades estruturais. Os domínios são delimitados por paredes, regiões que verificam uma alteração da direção principal de polarização. Aplicando um campo elétrico e assim modificando a natureza das paredes, torna-se possível alterar a localização e dimensão destes domínios e por sua vez, a direção de polarização preferencial [40].

Devido à existência de múltiplos domínios, verifica-se ainda um comportamento de histerese. Este comportamento dá-se durante a aplicação e manutenção do campo elétrico externo, verificando-se um crescimento dos domínios cuja orientação de polarização seja semelhante à do campo elétrico, à custa dos domínios que apresentem uma direção oposta. Consequentemente, o ciclo de histerese caracteriza-se pelo gráfico da polarização imposta versus o campo elétrico aplicado e, com este, torna-se possível demonstrar que a polarização nem sempre ocorre no sentido previsto [40].

As propriedades dielétricas do BaTiO<sub>3</sub> destacam-se pela sua alta constante dielétrica e baixa perda dielétrica. A constante dielétrica depende, em grande parte, de fatores como a temperatura, frequência e composição do material, verificando-se um aumento do seu valor nominal à medida que se aproxima da temperatura de Curie, temperatura a partir da qual o comportamento ferroelétrico termina.

Na sua sintetização, uma vez registadas temperaturas acima da temperatura de Curie e após a fase de arrefecimento, ocorre uma distribuição aleatória dos domínios ferroelétricos, resultando numa polarização elétrica total de zero, a qual pode ser alterada quando aplicado um campo elétrico externo constante (polarização) [41]. O método utilizado na sua sintetização depende das características desejadas para o componente final e, o sucesso desta sintetização, ou seja, a obtenção das propriedades dielétricas únicas, é ditado pela pureza e estrutura cristalina finais do composto [36]. O BaTiO<sub>3</sub> pode ser sintetizado recorrendo a métodos como o da síntese hidrotermal ou da reação em estado sólido [42].

Alguns exemplos, do uso de BaTiO<sub>3</sub>, podem ser encontrados em componentes como condensadores, sensores, atuadores, transdutores, motores piezoelétricos e em *ferroelectric random access memory* (FeRAM) [43].

Tabela 2.1 - Propriedades inerentes do BT, retirado de [4] e [44].

Parâmetro	Valor
Rácio Molar, Ba/Ti	0.99 - 1.02
Polarização Espontânea [ $C/m^2$ ]	0,26
Ponto Fusão ( $T_f$ ) [ $^{\circ}C$ ]	1250
Constante Dielétrica ( $K_{33}$ )	1700
Constante Piezoelétrica ( $d_{33}$ ) [ $pC/N$ ]	190
Coeficiente de acoplamento eletromecânico ( $k_{33}$ , $k_{31}$ )	0.50, 0.21
Temperatura Curie ( $T_c$ ) [ $^{\circ}C$ ]	115
Densidade [ $g/cm^3$ ]	6.08

## 2.6 *Friction stir processing* (FSP)

A etapa do fecho do rasgo e mistura das partículas (na produção do SSM) recorre essencialmente a uma técnica de processamento no estado sólido por fricção linear, ou *friction stir processing* (FSP).

Este processo utiliza os mesmos princípios do *friction stir welding* (FSW) contudo, o FSP diferencia-se ao modificar a microestrutura da superfície para adquirir as propriedades específicas desejadas [45]. Desta técnica resulta uma intensa deformação plástica e uma elevada mistura de material na zona processada, o que possibilita a incorporação de partículas cerâmicas em substrato metálico de modo a formar compósitos superficiais. A técnica de FSP tem-se demonstrado como uma técnica de processamento eficaz, capaz de realizar modificações localizadas e controladas da microestrutura em elementos superficiais, contando com algumas vantagens, tais como [46]:

- A obtenção de refinamento, densificação e homogeneidade da microestrutura através de uma só técnica;

- O controlo preciso dos parâmetros microestruturais e das propriedades mecânicas através da otimização da ferramenta, dos seus parâmetros funcionais e do aquecimento ou arrefecimento ativo da zona de trabalho;
- Fácil ajuste da profundidade da zona processada, recorrendo à alteração do comprimento do pino da ferramenta, com uma gama de valores disponíveis entre as centenas de micrómetros e dezenas de milímetros;
- Indução de calor na peça provém da fricção e da deformação plástica, tratando-se portanto de uma técnica eficiente ao nível energético e “verde”, i.e sem grande impacto ambiental;
- A não alteração da forma e tamanho dos componentes processados.

No decorrer do processo, a ferramenta rotativa (constituída por um elemento base, com ou sem pino) é colocada em contacto com a superfície do material a maquinar sob a influência de uma carga aplicada. Iniciando-se o deslocamento transversal da ferramenta pela peça de trabalho e mantendo constantes a distância da extremidade da ferramenta à peça assim como uma carga aplicada, o movimento rotativo da base provoca um aquecimento da zona de trabalho, sendo esta denominada por zona termomecânica (ZTM). Este aumento de temperatura aliado à constante aplicação de uma carga promove a mistura dos materiais na ZTM e por sua vez a sua deformação plástica, alterando assim a sua microestrutura e criando a linha central, no interior da ZTM. O material é transferido da zona de retrocesso, da ferramenta, para a zona de avanço, existindo a possibilidade de alterar a função de cada zona consoante a orientação da rotação da ferramenta [47]. A Figura 2.4 ilustra uma representação esquemática da tecnologia de FSP.

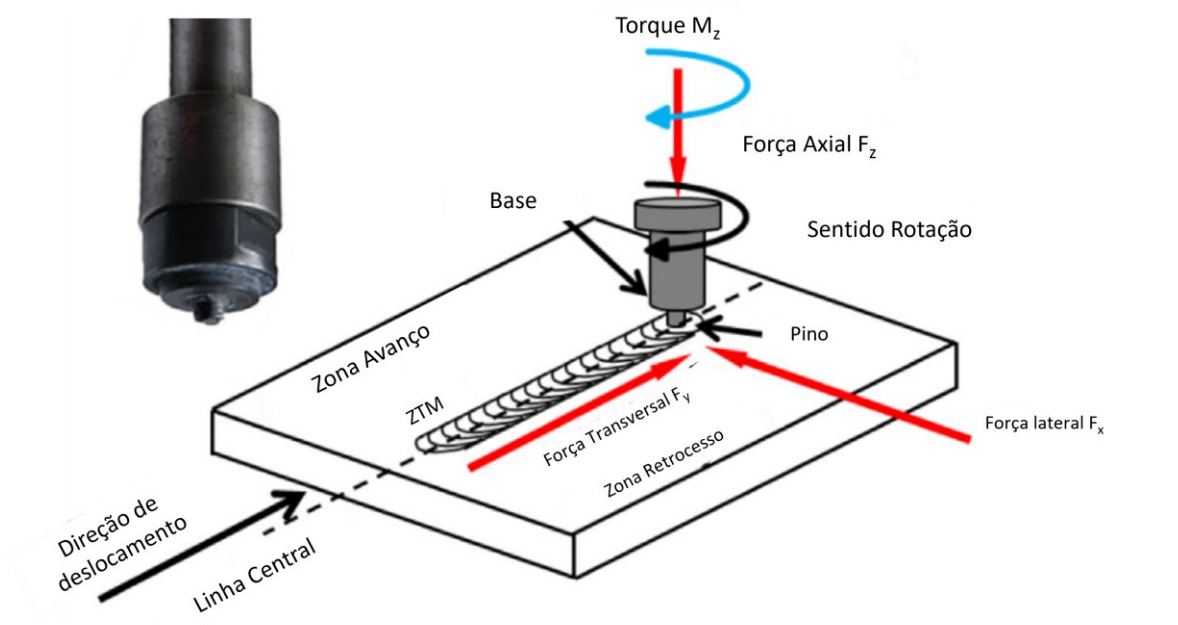


Figura 2.4 - Representação esquemática dos conceitos base da tecnologia de FSP, adaptado de [47].

Os principais parâmetros da tecnologia FSP tratam-se dos seguintes [47]:

- Velocidade de rotação;
- Carga aplicada (Força Axial);
- Velocidade de deslocamento;
- Ângulo de inclinação;
- Penetração da ferramenta na peça,
- Tipo de ferramenta;
- Tipo material a transformar;
- Sistema de arrefecimento;
- Sistema de fixação;

## 2.7 Polarização

A técnica FSP e as suas conseqüentes etapas provocam uma orientação aleatória das partículas piezoelétricas (BT). De modo a existir um efeito elétrico macroscópico mensurável nos provetes, torna-se necessário impor uma orientação preferencial aos dipolos elétricos das partículas, tal pode ser conseguido recorrendo a um processo polarização [4].

A polarização refere-se ao alinhamento de cargas elétricas, no interior de um material em resposta a um campo elétrico externo. Ao sujeitar um material a um campo elétrico externo, os eletrões no seu interior deslocam-se, criando um momento de dipolo. Este momento de dipolo surge quando os portadores de carga positiva (catiões) são atraídos para o elétrodo negativo e os portadores de carga negativa (eletrões) ao elétrodo positivo. Este alinhamento de dipolos dá origem à formação de um vetor de polarização elétrica, que é definido como a taxa de variação do fluxo elétrico através de uma superfície fechada [48].

Neste contexto, torna-se ainda necessário introduzir o conceito de polarizabilidade. A polarizabilidade trata-se de uma propriedade fundamental que descreve a tendência para que, um dado material, adquira um momento dipolar elétrico em proporção ao campo elétrico aplicado [48].

Ao nível microscópico, a polarização consiste na reorientação das partículas ferroelétricas. Recorrendo a um campo elétrico externo, superior ao campo coercivo (coercividade: propriedade dos materiais ferroelétricos, trata-se da capacidade da manutenção da polarização instantânea na presença de um campo elétrico externo) os dipolos (de cada unidade estrutural dos domínios ferroelétricos) orientam-se no sentido do campo elétrico aplicado até ao ponto de saturação, ou seja, o momento a partir do qual se encontram completamente alinhados, alterando assim a polarização elétrica espontânea do componente [29]. Ainda neste nível, tratando-se do alumínio de um material condutor, a polarização das suas cargas livres verifica-se devido à manutenção de um campo elétrico constante, criando-se um dipolo no seu interior. Quando o campo elétrico externo é retirado, a orientação dos dipolos do BT tende alterar-se no sentido de retomar a sua posição original, contudo, observa-se a manutenção do alinhamento imposto. Este fenómeno garante uma polarização permanente do componente (polarização remanescente), ainda que num nível inferior ao do ponto de saturação [4], [41]. A Figura 2.5 ilustra um exemplo de um tipo de polarização elétrica.

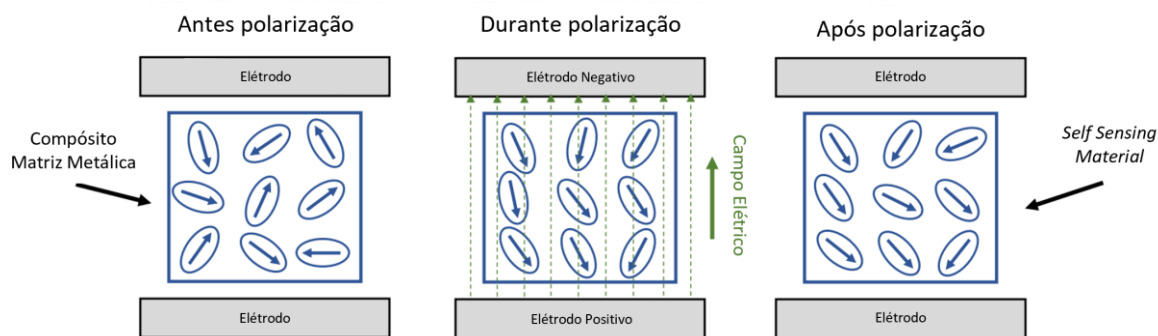


Figura 2.5 - Ilustração de uma polarização elétrica, adaptado de [4].

Ao nível macroscópico, graças ao fenómeno de polarização remanescente, permite-se a possibilidade de se obterem componentes sensíveis, para certas solicitações [41].

Existem dois métodos prevalentes de polarização [49]:

- Polarização elétrica, ocorre quando um campo elétrico externo é aplicado sobre um material, fazendo com que as cargas elétricas contidas no material se alinhem. O vetor de polarização resultante é proporcional à força e à direção do campo elétrico externo;
- Polarização magnética, ocorre quando um campo magnético é aplicado num material, fazendo com que os momentos magnéticos (dipolos) existentes no material se alinhem. O vetor de polarização resultante será proporcional à força e à direção do campo magnético externo;

A polarização de um material pode ser descrita através de vários modelos matemáticos, dependendo da natureza do material e da frequência do campo aplicado. A baixas frequências, a polarização de um material pode ser descrita pelo modelo de Lorentz, o qual assume que os eletrões no interior do material se movem numa órbita circular em torno do núcleo e que o campo elétrico introduz um binário nestes eletrões, provocando a sua precessão. A frequências mais elevadas, a polarização de um material pode ser descrita pelo modelo de *Drude-Lorentz*, que tem em conta a densidade de eletrões livres e a frequência do plasma do material [50].

A investigação de ponta no campo da polarização abrange o desenvolvimento de novos materiais e técnicas para controlar e manipular a polarização. Uma dessas técnicas é a utilização de impulsos elétricos para mudar o estado de polarização dos materiais, conhecida como "*polarization switching*". Esta técnica foi demonstrada em materiais como o *Barium*

*Strontium Titanate* (BST) e o *Lead Zirconate Titanate* (PZT) e tem potenciais aplicações em dispositivos de memória, portas lógicas e computação neuro-mórfica. Ao aplicar impulsos elétricos controlados, é possível manipular o estado de polarização do material, criando efetivamente um interruptor binário. Esta tecnologia tem o potencial de revolucionar o armazenamento e o processamento de dados, permitindo sistemas de computação mais rápidos e eficientes [51].

Outra área de investigação consiste no estudo da polarização topológica, que envolve a manipulação de estados de polarização em materiais com estruturas de banda não triviais, levando ao aparecimento de fenômenos exóticos como o efeito *Hall* de spin quântico. A polarização topológica resulta da interação entre a estrutura cristalina e as propriedades eletrônicas de certos materiais. Ao conceber cuidadosamente a estrutura cristalina, é possível criar materiais com propriedades de polarização únicas que não se verificam em materiais naturais. O efeito *Hall* de spin quântico, por exemplo, trata-se de um fenômeno no qual a polarização do material se encontra vinculada ao spin dos elétrons, resultando na formação de estados de borda topologicamente protegidos e imunes à retrodifusão. Este efeito tem potenciais aplicações na criação de dispositivos eletrônicos robustos e tolerantes a falhas [52].

Além disso, a integração de materiais sensíveis à polarização com outros materiais avançados, como o grafeno e os nanotubos de carbono, tem vindo a ser estudada com o objetivo de criar estruturas híbridas com propriedades sinérgicas. O grafeno, possui uma condutividade excepcionalmente elevada e pode ser utilizado para melhorar o desempenho de materiais sensíveis à polarização. Combinando o grafeno com BST ou PZT, torna-se possível criar dispositivos de armazenamento de energia e sensores ultra eficientes. Os nanotubos de carbono, por outro lado, oferecem uma excelente resistência mecânica e podem ser utilizados para criar materiais compósitos com propriedades mecânicas e térmicas melhoradas [53].

## CRIAÇÃO DE PROVETES SENSÍVEIS

### 3.1 Introdução

Tendo como objetivo a melhor compreensão do comportamento do SSM, recorreu-se à produção de provetes, contendo em si uma zona processada sensível, de modo a aferir acerca das suas propriedades sensoriais.

Os tópicos abordados neste capítulo incidem sobre os métodos e os critérios utilizados na conceção e produção dos provetes ensaiados, sendo explicitamente apresentadas todas as etapas fundamentais para a reprodução dos mesmos.

### 3.2 Processo de produção de provetes

A produção de provetes teste segue a metodologia apresentada no documento [4]. A Figura 3.1 ilustra uma representação esquemática das etapas necessárias à criação dos provetes [4].

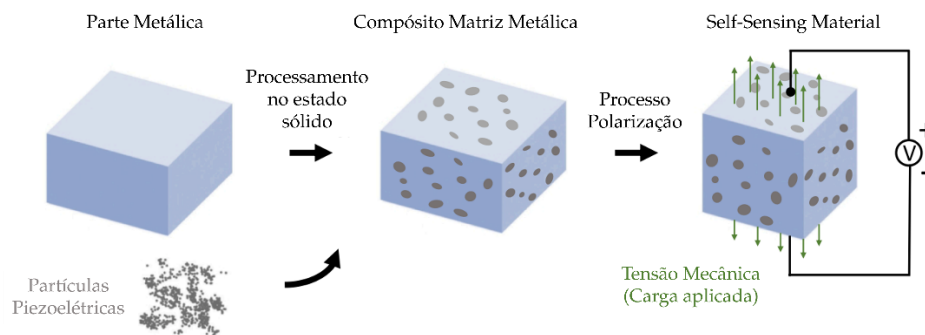


Figura 3.1 - Processo simplificado para a criação do composto sensível SSM, adaptado de [4].

De modo a estabelecer um grau de comparação com estudos prévios acerca do SSM [4], recorreu-se aos mesmos materiais, aos mesmos métodos e adotando os mesmos parâmetros, já validados, para a produção de provetes. Deste modo, os seguintes subcapítulos servirão para explicitar as matérias-primas, os métodos e os parâmetros empregues, sabendo que respeitam o critério da semelhança a estudos prévios. Através do critério da semelhança, obtêm-se provetes que demonstram características, do ponto de vista sensorial, semelhantes às observadas em estudos prévios, conferindo exatidão aos resultados obtidos na avaliação sensorial.

A divisão do capítulo será consoante a aplicação de cada método, sendo apresentados de acordo com a ordem pela qual foram empregues na produção, inicialmente apresentando os materiais utilizados.

### 3.2.1 Materiais utilizados

Optou-se pela utilização dos seguintes materiais base:

- Placa Alumínio, AA5083-H111;
- Partículas Titanato de Bário, BaTiO<sub>3</sub>;

As placas de AA5083-H111 comercial, respeitam as seguintes dimensões: 220 mm comprimento, 102 mm de largura e 10 mm de espessura (203 x 103 x 10 mm<sup>3</sup>). As partículas de BaTiO<sub>3</sub> apresentam um grau de pureza de 99,7%, tratando-se de partículas funcionais e de reforço, com propriedades piezoelétricas. A Figura 3.2 ilustra as especificações industriais das partículas de BaTiO<sub>3</sub> utilizadas.

**Product Name:** Barium titanium oxide, 99.7% (metals basis), Thermo Scientific Chemicals  
**Catalog Number:** 088267.36

**CAS Number:** 12047-27-7  
**Molecular Formula:** BaO<sub>3</sub>Ti  
**Molecular Weight:** 233.19  
**MDL Number:** MFCD00003447  
**InChI Key:** WNKMTAQXMLAYHX-UHFFFAOYSA-N  
**SMILES:** [Ba++].[O-][Ti]([O-])=O  
**Synonym:** barium(2+) oxotitaniumbis(olate)

**Product Specification**

**Total Metal Impurities:** 0.3% max.

Figura 3.2 - Especificações industriais das partículas de BaTiO<sub>3</sub>, adaptado de [54].

### 3.2.2 Geometria do perfil da placa base e disposição das partículas

Recorrendo a uma fresadora *ENRIQUE HOLKE SL EHF1010*, procedeu-se à abertura de um rasgo na placa de alumínio, fixando a placa num torno e utilizando um disco cortante. A Figura 3.3 ilustra o aparato empregue.

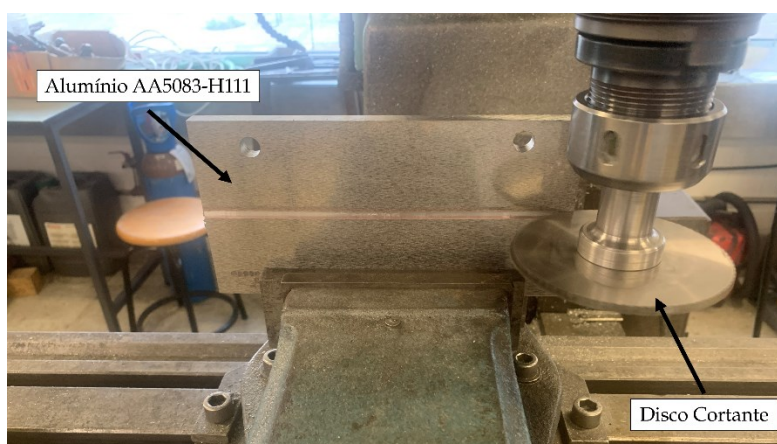


Figura 3.3 - Abertura do rasgo recorrendo a um disco cortante.

As dimensões do perfil do rasgo seguem as seguintes medidas: 220 mm comprimento, 4 mm de largura e 3 mm de profundidade, a Figura 3.4 explicita as dimensões do rasgo.

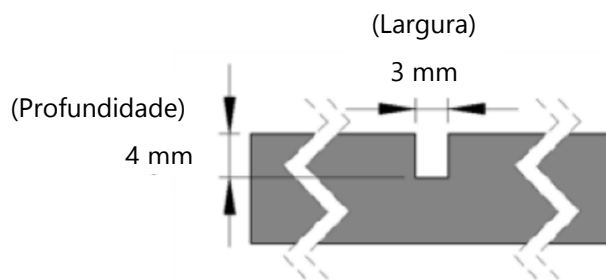


Figura 3.4 - Perfil do rasgo, adaptado de [4].

O preenchimento do rasgo, recorrendo à deposição uniforme e homogénea de partículas de BaTiO<sub>3</sub> ao longo do comprimento, encontra-se representado na Figura 3.5.

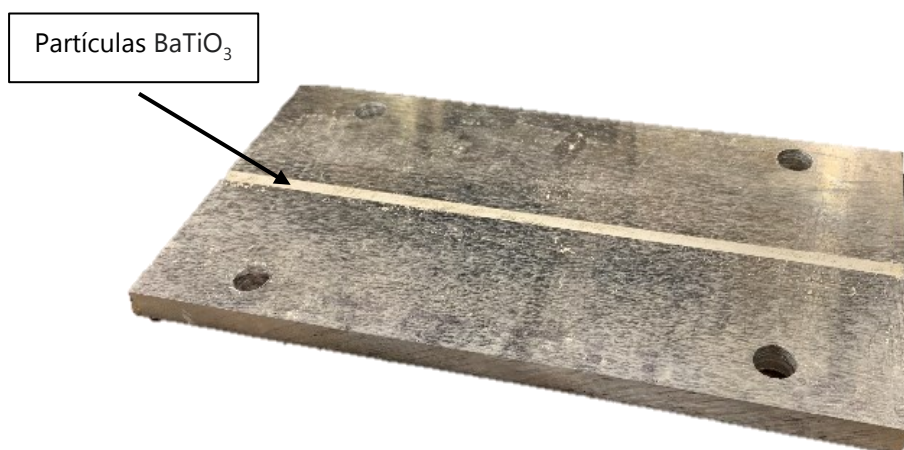


Figura 3.5 - Rasgo preenchido com partículas BT.

Ainda que, a quantidade exata de partículas depositadas não tenha sido calculada, torna-se possível estimar dada quantidade recorrendo à geometria do rasgo e às propriedades inerentes do BaTiO<sub>3</sub>:

$$\text{Volume do Rasgo: } 4 \times 3 \times 100 = 1200\text{mm}^3 = 1,2\text{cm}^3$$

$$\text{Densidade partículas} = 6,02 \text{ g/cm}^3$$

Assumindo uma deposição com uma taxa de sucesso de 85%,

$$\text{Massa estimada} = 0,85 \times (6,02 \times 1,2) = 5,78\text{g (por placa)}$$

### 3.2.3 Processamento por fricção linear

Recorrendo a uma fresadora *JAROCIN FWD32*, adaptada para processamento por fricção linear, dá-se o fecho do rasgo, utilizando uma ferramenta sem pino e com base, Figura 3.6 a). Uma segunda ferramenta, com pino, Figura 3.6 b), é utilizada para distribuir,

homogeneizar e misturar as partículas. A Figura 3.6 apresenta as ferramentas utilizadas, ambas possuem uma base de diâmetro 19 mm, já a ferramenta b) possui um pino cônico, de ângulo 14°, com um diâmetro inferior de 5 mm, parâmetros escolhidos de acordo com as conclusões de trabalhos passados [4].

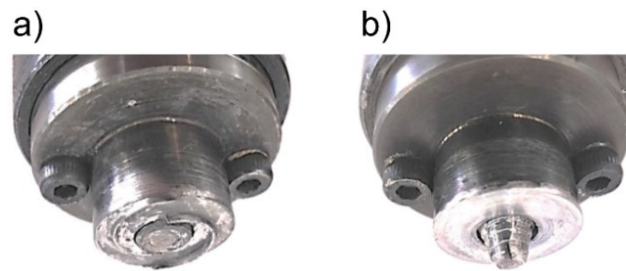


Figura 3.6 - Ferramentas FSP utilizadas, adaptado de [4]: a) Ferramenta sem pino; b) Ferramenta com pino;

Na primeira etapa do processo, sucede-se apenas uma passagem com a ferramenta a), enquanto, na segunda etapa do processo, recorre-se à ferramenta b) para se realizarem passagens, sendo estas passagens necessárias para garantir uma melhor distribuição e homogeneidade no *nugget* [4]. A Figura 3.7 ilustra as etapas chave do processo [4]. O resultado da soma destas etapas é o da obtenção de uma placa processada.



Figura 3.7 - Figura ilustrativa etapas do processo FSP, adaptado de [4].

Todas as passagens adotaram os seguintes parâmetros de funcionamento [4]: 1120 rev/min velocidade rotação ( $\omega$ ), 112 mm/min Velocidade avanço ( $v$ ), 1° inclinação em relação à base. A Figura 3.8 a) apresenta o aparato empregue e a Figura 3.8 b) apresenta o resultado do processamento da placa.

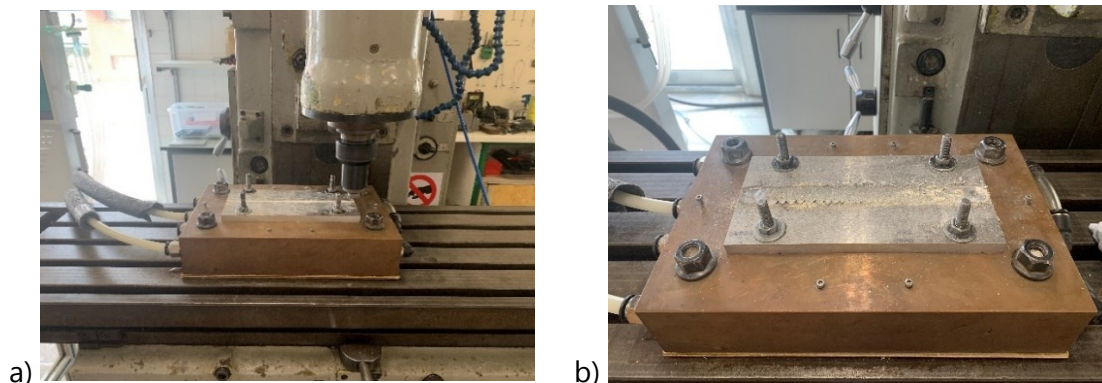


Figura 3.8 - Aparato experimental no processamento por fricção linear:  
a) Montagem, b) Resultado do processamento.

### 3.2.4 Retificação da placa processada

Recorrendo novamente à fresadora *ENRIQUE HOLKE, SL EHF1010*, deu-se uma primeira fase de retificação com o fim de reduzir a espessura da placa processada a valores próximos dos 3 mm, a

Figura 3.9 a) demonstra essa fase. Numa segunda fase, recorrendo a uma retificadora *Sunlike SSG-2550AB*, cumpriu-se o processo de retificação ao se obter uma placa com uma espessura na ordem dos  $2,5 \pm 0,05$  mm, a

Figura 3.9 b) apresenta essa etapa final.

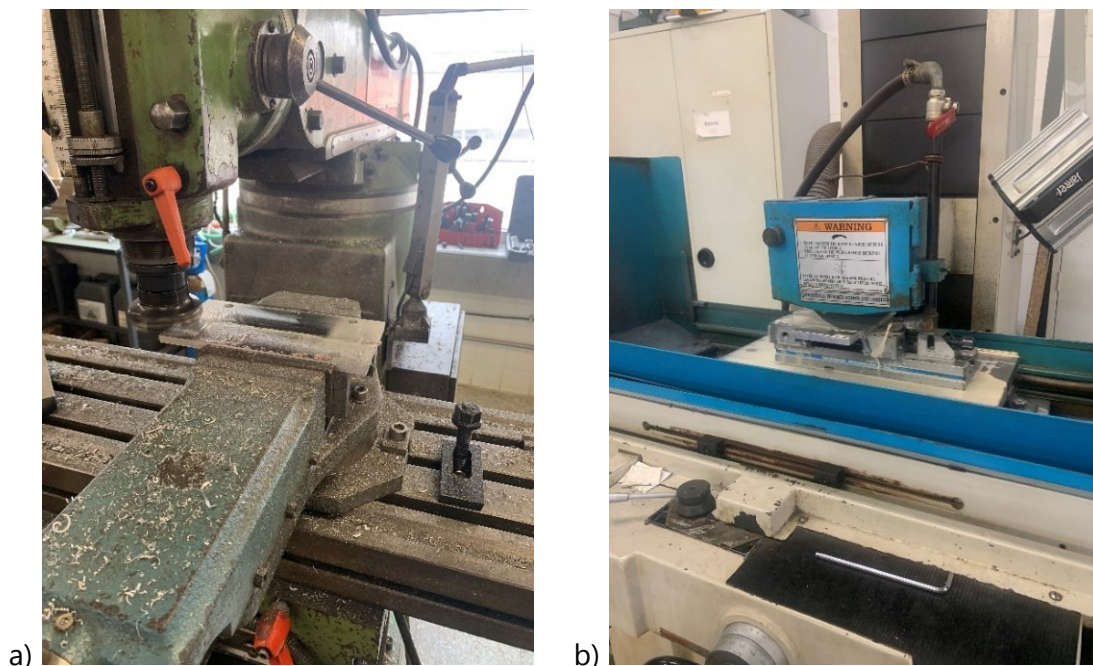


Figura 3.9 - Etapas retificação placa: a) Primeira etapa, b) Segunda Etapa.

### 3.2.5 Processamento no equipamento CNC

A etapa de recorte de cada provete, a partir da placa original, recorre a um equipamento CNC, seguindo as normas estipuladas para ensaios de tração uniaxial, ASTM E8/E8M-13a standard, a Figura 3.10 apresenta o resultado da maquinação. Utilizando o software *Solidworks* e os recursos do equipamento *HAAS Super Mini Mill 2 CNC Machining Center* foram obtidos provetes (espessura 2,5 mm), cujas dimensões podem ser consultadas na Figura 3.11 a).

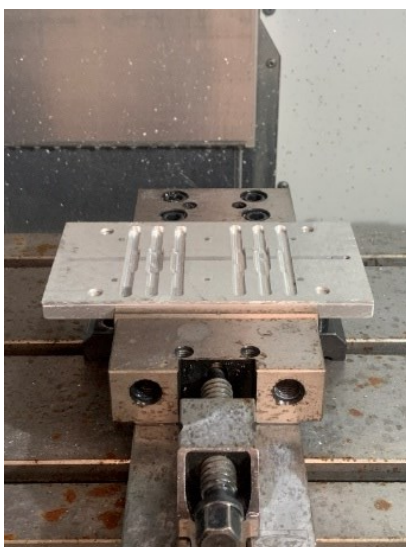


Figura 3.10 - Provetes obtidos recorrendo ao equipamento CNC.

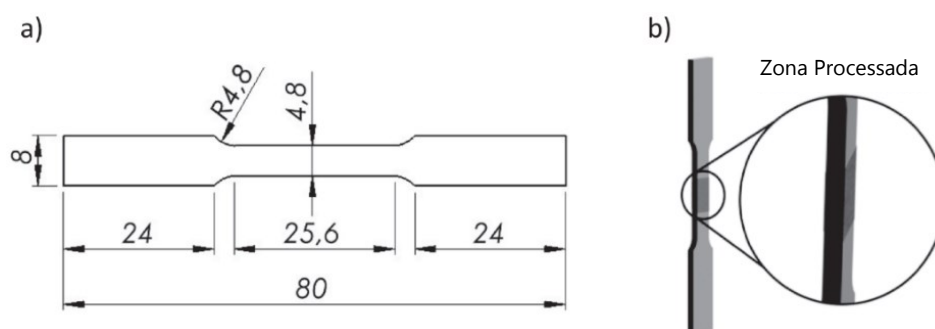


Figura 3.11 - Dimensões obtidas para os provetes de ensaio, adaptado de [4].

### 3.2.6 Polarização individual dos provetes

A etapa de polarização deu-se à custa de um aparato, apresentado na Figura 3.12, criado em laboratório, constituído por:

- Fonte de alimentação RS PRO RS-3005D, operando a 12,00 V e 1,976 A em modo C.V;
- Fonte variável de tensão OFICEL UFL10H, operando a 10 kV em DC;
- Placa de fixação em PLA, composta por dois elétrodos diretamente ligados à fonte variável de tensão;
- Controlador *Raspberry Pi 3*;
- Tanque de imersão em alumínio;
- Óleo de silicone XIAMETER FLUID - 350 CS, para embeber a placa de fixação;

A Figura 3.12 apresenta o aparato experimental utilizado para polarizar os provetes ensaiados. O sentido do campo elétrico segue a orientação dos elétrodos contidos na placa de fixação, ou seja, da placa superior para a inferior.

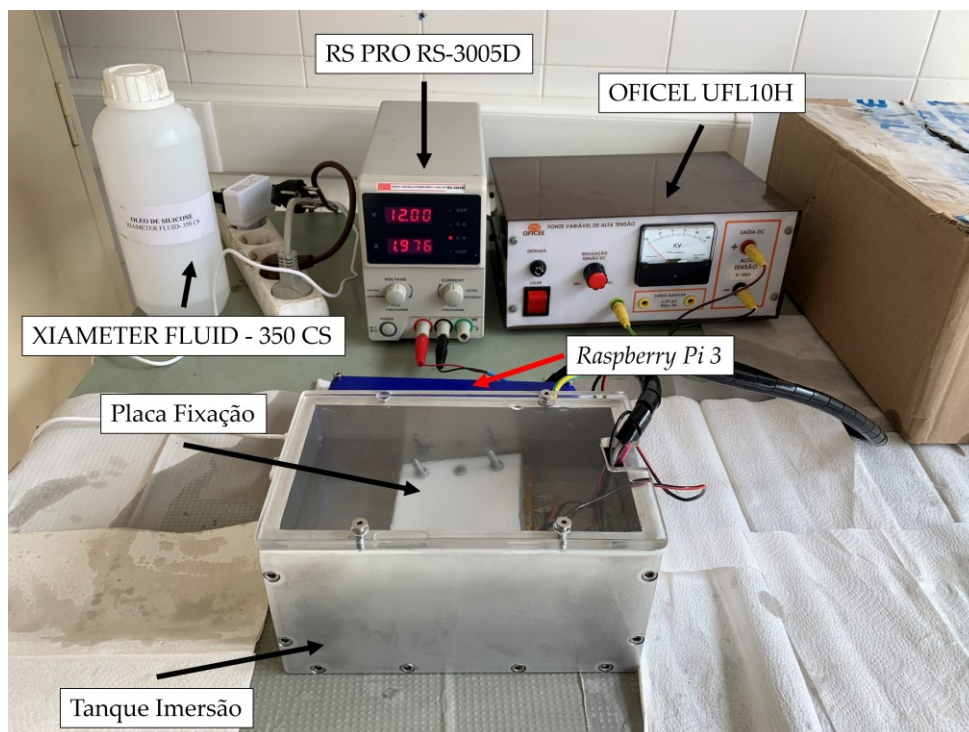


Figura 3.12 - Aparato Experimental para polarizar provetes.

A etapa de polarização inicia-se pela colocação do provete entre os elétrodos e pelo aquecimento, até aos 90 °C, do óleo de silicone, no decorrer de uma hora. Após verificada a temperatura, segue-se a imposição de uma ddp, nos elétrodos, de 10 kV, no decorrer de duas horas. Durante todo o processo, visa-se a manutenção da temperatura, mantendo ligada a fonte de alimentação um total de três horas, ou seja, o tempo total para se dar a polarização.

Com a finalidade de estudar o comportamento sensorial para diferentes configurações de polarização, foram preparados dois tipos de provetes, com as seguintes orientações de polarização: polarização ao longo da espessura (Provete X ou PX), Figura 3.13, e uma polarização ao longo da largura (Provete Y ou PY), Figura 3.14.

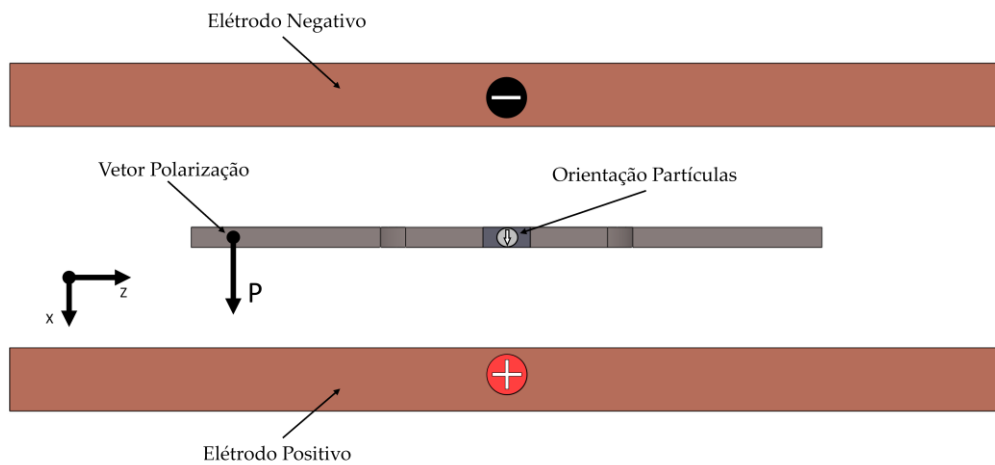


Figura 3.13 - Orientação polarização Provetes tipo X (PX).

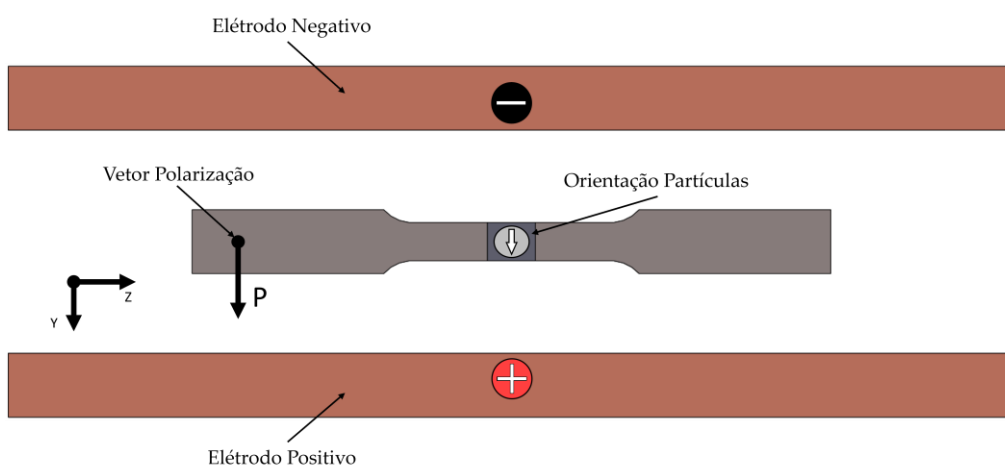


Figura 3.14 - Orientação polarização Provete tipo Y (PY).



## AVALIAÇÃO SENSORIAL DO MATERIAL

### 4.1 Introdução

Tendo em mente a melhor compreensão do comportamento do SSM, no âmbito das suas propriedades sensoriais, procedeu-se à avaliação da sensibilidade, para diferentes orientações de polarização, assim como a avaliação da influência, da posição dos elétrodos, na leitura do sinal. Neste sentido, o capítulo demonstra os critérios aplicados para as decisões tomadas e o aparato experimental utilizado.

### 4.2 Método de avaliação das propriedades sensoriais

Para compreender a resposta sensorial do material, optou-se por realizar medições da diferença de potencial (ddp), conforme ilustrado na Figura 4.1 [4], com a finalidade de determinar a sensibilidade dos provetes. Deste modo, recorrendo:

- ao equipamento *MTS 312.21*, para criar solicitações dinâmicas (na direção Z, Figura 4.1), cujos parâmetros de funcionamento ser consultados na Tabela 5.1 e Tabela 5.2;
- aos equipamentos acessórios de medição (elétrodos fabricados em laboratório), apresentados na Figura 4.4, estabelecendo um contacto direto com os provetes;
- ao equipamento de aquisição *Keithley Nanovoltmeter 2182A* (configurado para 9k ganho), conectado a um equipamento *National Instruments DAQ* e assistido por software *LabView*, para monitorizar, processar e armazenar a informação referente à resposta elétrica;

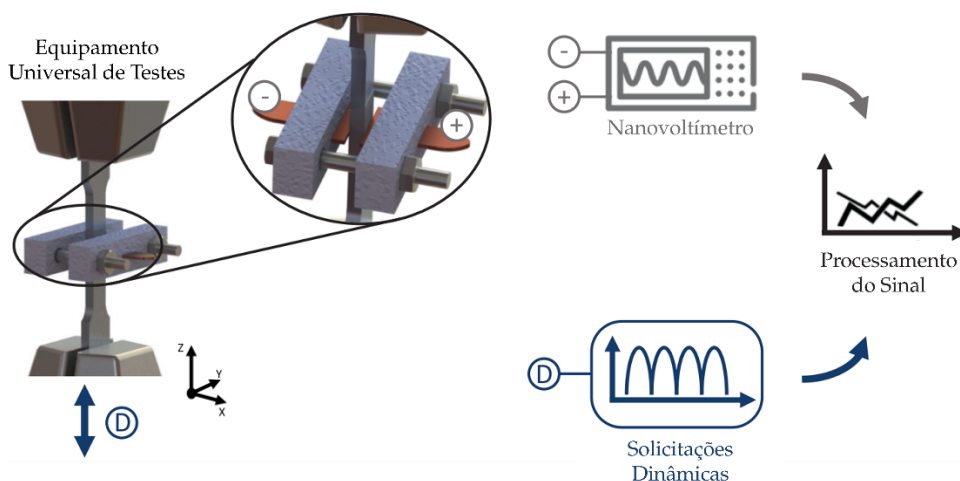


Figura 4.1 - Ilustração esquema experimental, adaptado [4].

A Figura 4.2 apresenta a distinção entre cada face e as designações dos diferentes tipos de configurações adotadas para os elétrodos (*Nota: Para a configuração 1 e 2, foram utilizados elétrodos em faces opostas do provete, i.e havendo um elétrodo na face S1, o correspondente elétrodo da amarra, estará na outra face S1 do provete, sendo o elétrodo na face oposta representado a vermelho não saturado na Figura 4.2*). Por fim, através desta abordagem, torna-se possível aferir acerca da melhor disposição dos elétrodos na leitura do sinal.

Posição dos elétrodos: ●  
 $D$ : Distância entre elétrodos

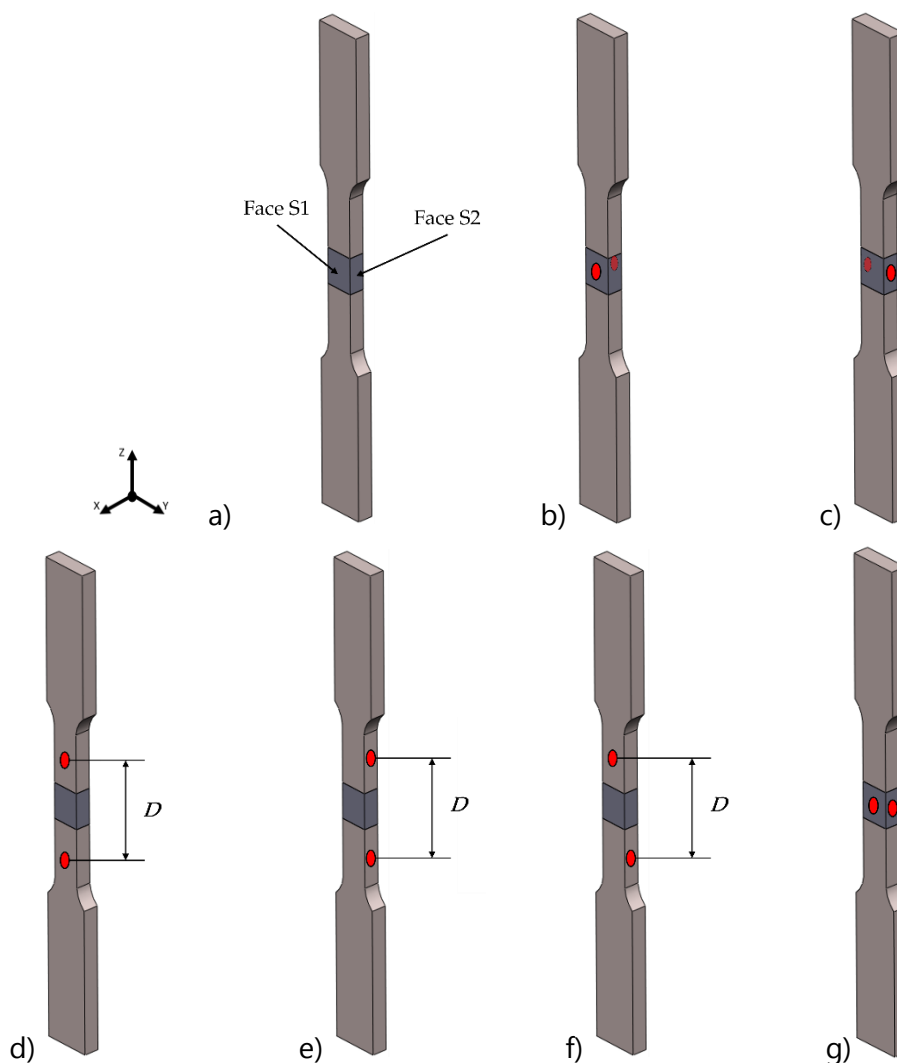


Figura 4.2 - Designações adotadas: a) Face S1 e S2, b) Configuração 1, c) Configuração 2, d) Configuração 3, e) Configuração 4, f) Configuração 5, g) Configuração 6.

Deu-se a medição da ddp para cada face do provete, variando ainda a distância entre os elétrodos e a sua posição relativa ao provete. Considerando trabalhos passados [4], optou-se por ensaiar, em cada provete, os seguintes parâmetros:

- Para as configurações 1 e 2: 15 ciclos a quatro extensões diferentes: [0,02; 0,04; 0,08; 0,1] mm e, para cada deslocamento, três frequências diferentes [0,25; 0,125; 0,063] Hz, com o propósito de apurar os fatores que conferem uma leitura mais significativa do sinal gerado.

- Para as configurações 3, 4, 5, e 6: 15 ciclos a um deslocamento [0,04] mm e uma frequência de [0,25] Hz, variando a distância entre elétrodos em [8; 12] mm uma vez constatado que, estes parâmetros, conferem boas leituras do sinal, minimizando assim o risco de rutura do provete, o tempo de ensaio, e consequentemente, o risco de sobreaquecimento do equipamento de solicitações dinâmicas (*MTS 312.21*).

É de salientar que a amplitude da carga nos diferentes ensaios conduziu a tensões uniaxiais abaixo do limite de elasticidade, ou seja, garantindo que todos os ensaios foram efetuados na região linear elástica de modo a satisfazer as condições de serviço às quais os componentes estarão sujeitos no seu ciclo de vida. A Figura 4.3 ilustra o aparato experimental no seu todo.

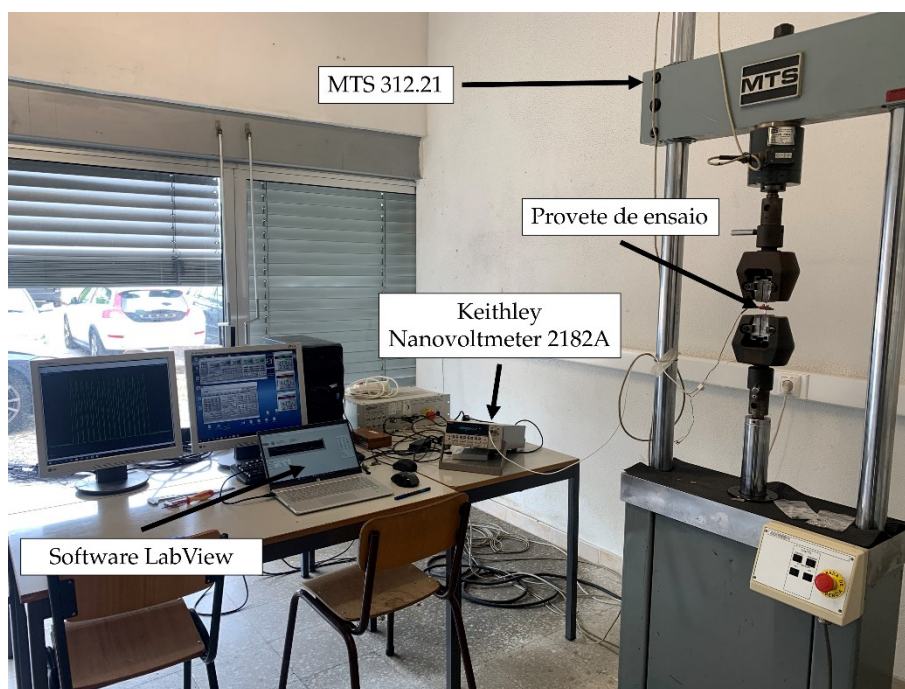


Figura 4.3 - Aparato experimental de ensaio sensorial.

De modo a interpretar os dados obtidos pelas medições dos equipamentos, foi projetado um algoritmo, para discriminar na forma de dois gráficos: gráfico das amplitudes e o gráfico da sensibilidade, a eficácia de cada configuração na medição.

O algoritmo, criado para a medição das diferenças de potencial entre faces (amplitudes), em *MATLAB*, baseia-se nos valores recolhidos das amplitudes máximas e mínimas observadas (em  $\Delta\mu V$ ), criando uma média para as 15 maiores amplitudes, concordantes com os 15 ciclos de solicitação impostos pelo equipamento de ensaio de tração

uniaxial. O gráfico da sensibilidade, para cada ensaio, trata-se do quociente entre o valor médio da amplitude ddp pela tensão máxima aplicada pelo equipamento de ensaio, resultando num valor cujas unidades se expressam em  $(\Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4})$ .

### 4.3 Criação dos equipamentos acessórios de medição

A criação dos equipamentos acessórios de medição deu-se recorrendo a um equipamento de fabrico aditivo *Prusa i3 MK3S+* por via da tecnologia *Fused Deposition Modelling (FDM)*, criando amarras capazes de alojar os eléctrodos que estabelecem contacto com o SSM. A Figura 4.4 ilustra o projeto desenvolvido em *Solidworks*.

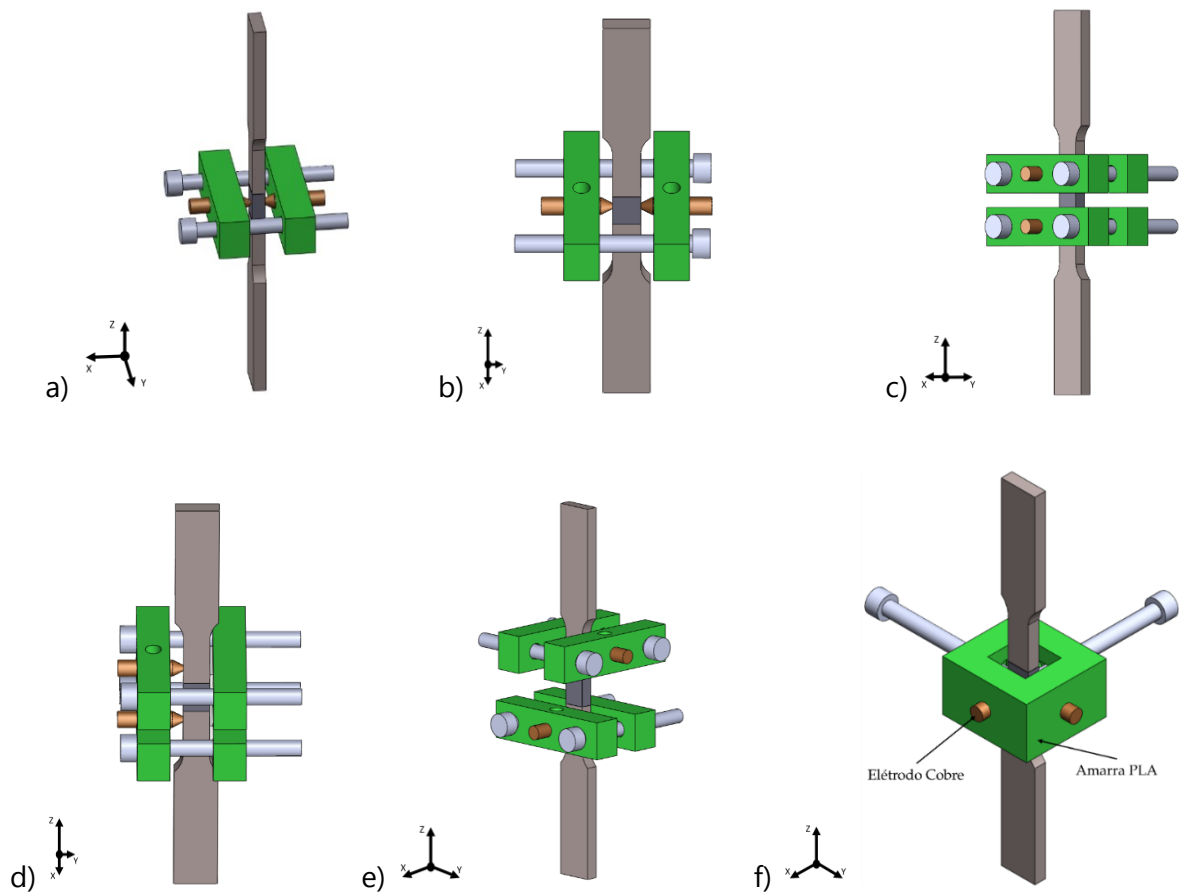


Figura 4.4 - Amarras utilizadas: a) Configuração 1, b) Configuração 2, c) Configuração 3, d) Configuração 4, e) Configuração 5, b) Configuração 6.

Aplicando uma soldadura a estanho, conectaram-se os fios de ligação aos elétrodos de cobre e por fim, esses ao instrumento de medição. A Figura 4.5 e Figura 4.6 ilustram o resultado como exemplos, ou seja, as amarras utilizadas nos ensaios da configuração 1 e configuração 6, respectivamente.

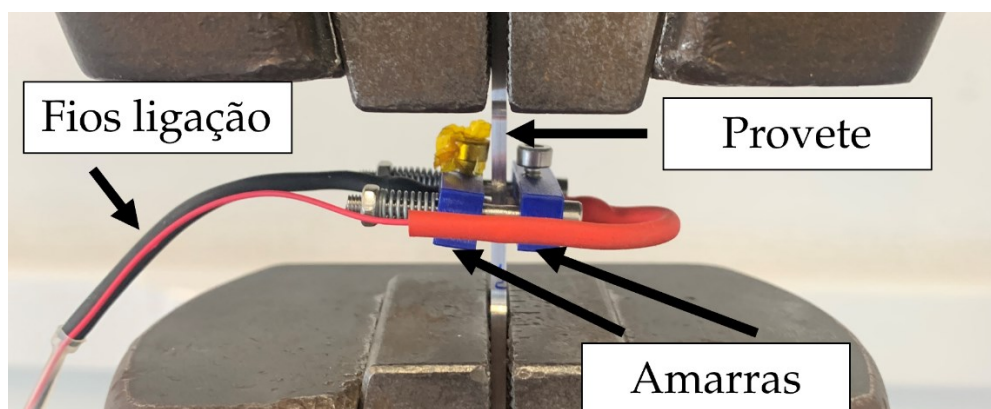


Figura 4.5 - Exemplo colocação da amarra no provete para a configuração 1.

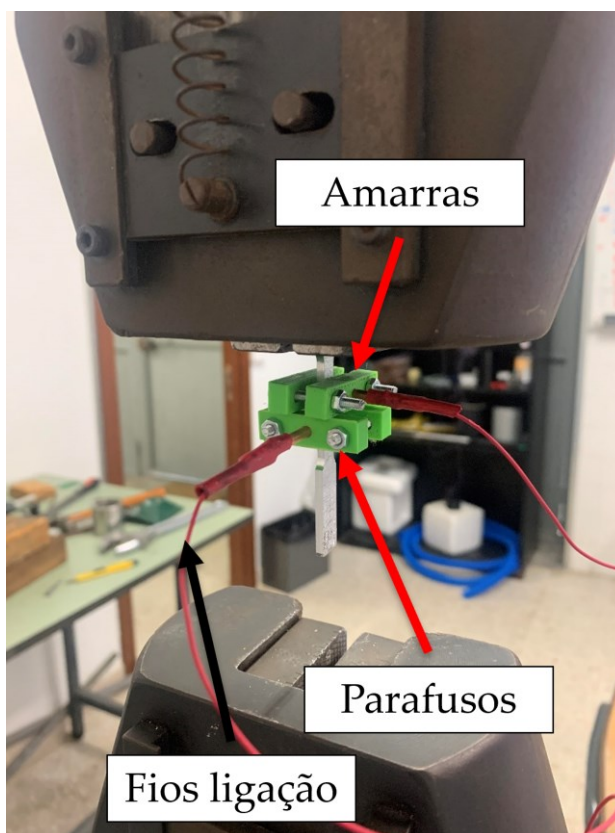


Figura 4.6 - Exemplo colocação da amarra no provete para a configuração 6.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Introdução

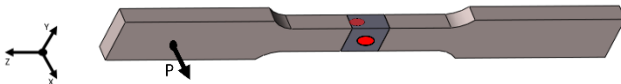
São apresentados os resultados dos ensaios descritos no capítulo 4.2 - Método de avaliação das propriedades sensoriais, exibindo ainda um guia, com as respectivas designações para cada provete, de modo a facilitar a interpretação e distinção dos gráficos apresentados, tendo em conta as diferentes orientações de polarização, faces testadas e disposições dos elétrodos.

Com base nos resultados apresentados, dá-se ainda início à discussão dos mesmos, comparando as propriedades observadas, a eficácia das configurações consideradas e fundamentos para os fenómenos observados.

### 5.2 Resultados experimentais

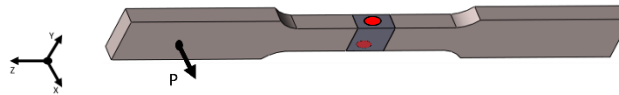
As Tabela 5.1 e Tabela 5.2 apresentam uma numeração distinta, utilizada para referenciar cada ensaio, servindo ainda como um guia para a interpretação dos resultados e dos gráficos apresentados neste capítulo e no apêndice "Resultados Experimentais".

Tabela 5.1 - Guia de referências Provette X

Provette X					
Ref.	Deslocamento (mm)	Frequência (Hz)	$D$ (mm)	DDP Absoluto ( $\Delta\mu\text{V}$ )	Sensibilidade ( $\Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4}$ )
Configuração 1					
					
#xc1_1	0,02	0,25	---	0,00265	1,177

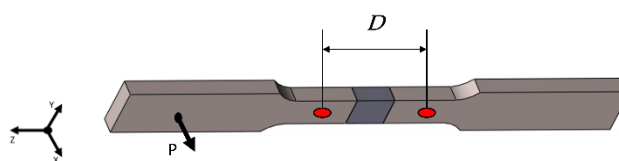
#xc1_2	0,02	0,125	---	0,00295	1,311
#xc1_3	0,02	0,063	---	0,00226	1,004
#xc1_4	0,04	0,25	---	0,00563	1,501
#xc1_5	0,04	0,125	---	0,00554	1,582
#xc1_6	0,04	0,063	---	0,00368	1,051
#xc1_7	0,08	0,25	---	0,00979	1,506
#xc1_8	0,08	0,125	---	0,00980	1,507
#xc1_9	0,08	0,063	---	0,00755	1,161
#xc1_10	0,1	0,25	---	0,01155	1,540
#xc1_11	0,1	0,125	---	0,00448	0,560
#xc1_12	0,1	0,063	---	0,00313	0,391

Configuração 2



#xc2_1	0,02	0,25	---	0,00162	0,720
#xc2_2	0,02	0,125	---	0,00472	2,097
#xc2_3	0,02	0,063	---	0,00350	1,750
#xc2_4	0,04	0,25	---	0,00794	2,117
#xc2_5	0,04	0,125	---	0,00908	2,421
#xc2_6	0,04	0,063	---	0,00873	2,182
#xc2_7	0,08	0,25	---	0,00722	1,112
#xc2_8	0,08	0,125	---	0,00450	0,642
#xc2_9	0,08	0,063	---	0,00351	0,540
#xc2_10	0,1	0,25	---	0,00880	1,173
#xc2_11	0,1	0,125	---	0,01266	1,582
#xc2_12	0,1	0,063	---	0,01488	1,750

Configuração 3



#xc3_1	0,04	0,25	8	0,00239	0,637
--------	------	------	---	---------	-------

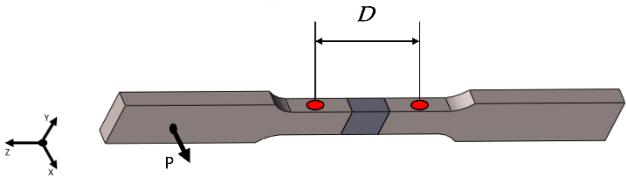
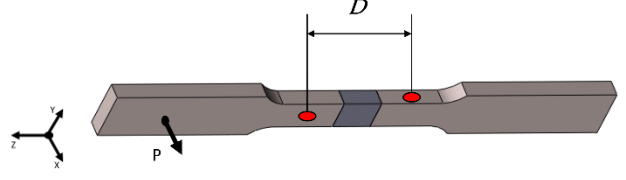

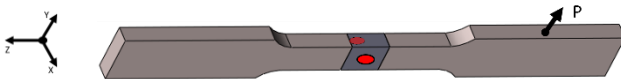
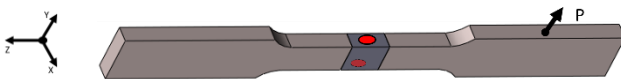
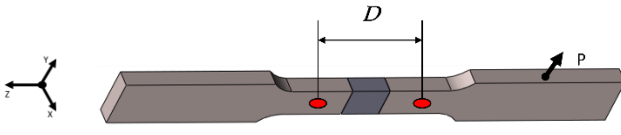
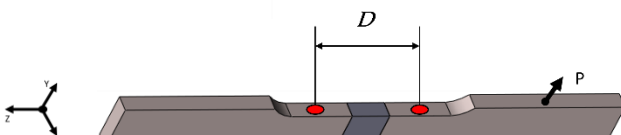
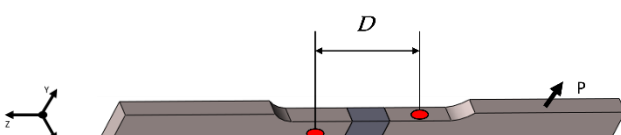
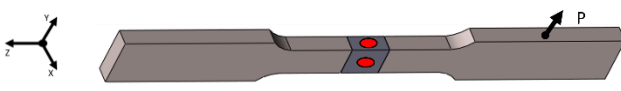
#xc3_2	0,04	0,25	12	0,00206	0,588
Configuração 4					
					
#xc4_1	0,04	0,25	8	0,00233	0,621
#xc4_2	0,04	0,25	12	0,00411	1,096
Configuração 5					
					
#xc5_1	0,04	0,25	8	0,00302	0,805
#xc5_2	0,04	0,25	12	0,00772	1,272
Configuração 6					
					
#xc6_1	0,04	0,25	---	0,00290	0,828

Tabela 5.2 - Guia de referências Provete Y

Provete Y					
Ref.	Deslocamento (mm)	Frequência (Hz)	$D$ (mm)	DDP Absoluto ( $\Delta\mu\text{V}$ )	Sensibilidade ( $\Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4}$ )
Configuração 1					
					
#yc1_1	0,02	0,25	---	0,00270	1,350
#yc1_2	0,02	0,125	---	0,00247	1,235
#yc1_3	0,02	0,063	---	0,00213	0,946
#yc1_4	0,04	0,25	---	0,00415	1,106
#yc1_5	0,04	0,125	---	0,00313	0,894
#yc1_6	0,04	0,063	---	0,00289	0,770
#yc1_7	0,08	0,25	---	0,00629	0,967
#yc1_8	0,08	0,125	---	0,00779	1,198
#yc1_9	0,08	0,063	---	0,00461	0,682
#yc1_10	0,1	0,25	---	0,00810	1,045
#yc1_11	0,1	0,125	---	0,00927	1,158
#yc1_12	0,1	0,063	---	0,00737	0,921
Configuração 2					
					
#yc2_1	0,02	0,25	---	0,00267	1,186
#yc2_2	0,02	0,125	---	0,00281	1,248
#yc2_3	0,02	0,063	---	0,00201	0,893
#yc2_4	0,04	0,25	---	0,00451	1,202
#yc2_5	0,04	0,125	---	0,00528	1,408
#yc2_6	0,04	0,063	---	0,00380	0,950
#yc2_7	0,08	0,25	---	0,01014	1,560
#yc2_8	0,08	0,125	---	0,00291	0,415
#yc2_9	0,08	0,063	---	0,00197	0,303

#yc2_10	0,1	0,25	---	0,01223	1,528
#yc2_11	0,1	0,125	---	0,01373	1,716
#yc2_12	0,1	0,063	---	0,01268	1,585
Configuração 3					
					
#yc3_1	0,04	0,25	8	0,00185	0,493
#yc3_2	0,04	0,25	12	0,0165	0,471
Configuração 4					
					
#yc4_1	0,04	0,25	8	0,00492	1,405
#yc4_2	0,04	0,25	12	0,00200	0,571
Configuração 5					
					
#yc5_1	0,04	0,25	8	0,00254	0,725
#yc5_2	0,04	0,25	12	0,0193	0,551
Configuração 6					
					
#yc6_1	0,04	0,25	---	0,00321	0,917

Presentes no apêndice "Resultados experimentais", apresentam-se gráficos semelhantes ao da Figura 5.1, que surge neste contexto como um exemplo de demonstração para os resultados apresentados em apêndice. No caso da Figura 5.1, trata-se de uma apresentação das leituras para PX em a) e PY em b), para o ensaio de parâmetros 0,1 mm de

deslocamento e 0,125 Hz de solitação, do tipo de configuração 1. No eixo esquerdo de Y são discriminados os valores da ddp, enquanto no eixo direito de Y, os valores da tensão aplicada pelo equipamento de tração uniaxial *MTS 312.21*.

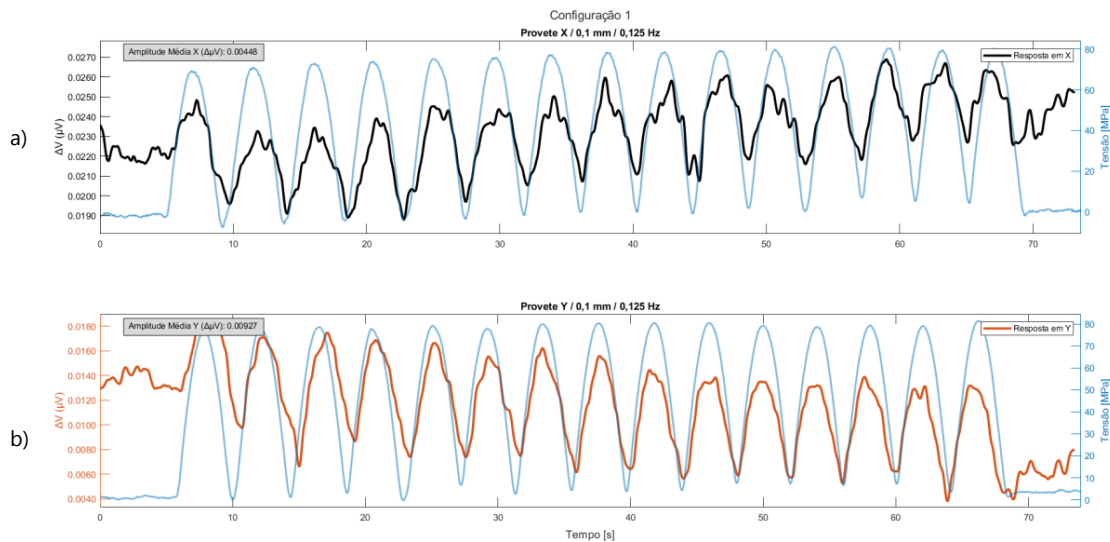


Figura 5.1 - Exemplo demonstração dos gráficos em apêndice.

Da

Figura 5.2 à Figura 5.7 apresenta-se uma compilação dos resultados experimentais de acordo com os valores da sensibilidade recolhidos, tornando-se assim possível comparar a sensibilidade de todos os ensaios.

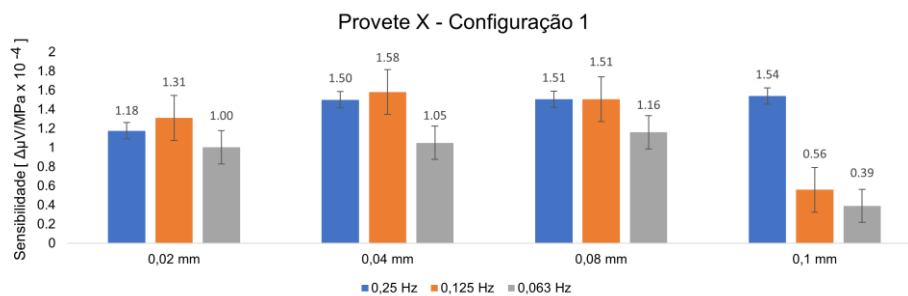


Figura 5.2 - Sensibilidade Provet X: Configuração 1.

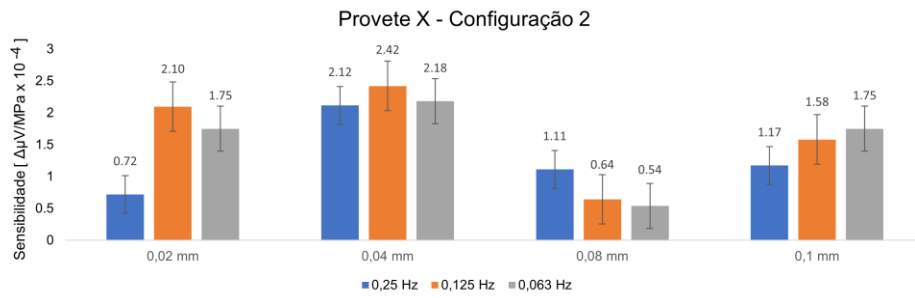
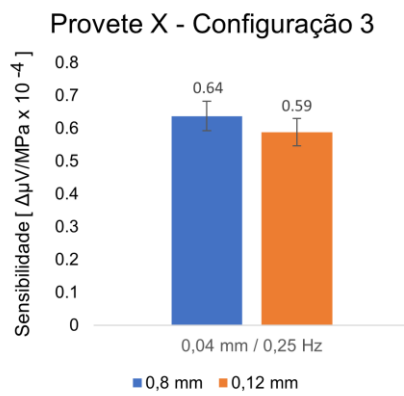
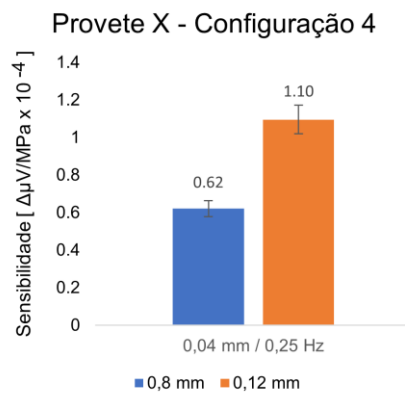


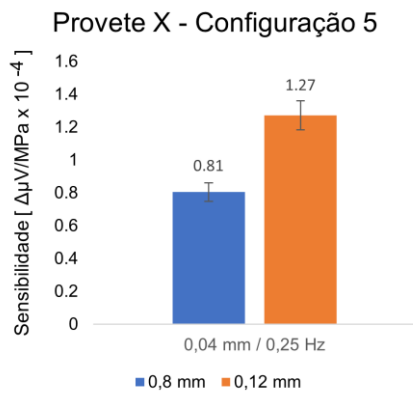
Figura 5.3 - Sensibilidade Provete X: Configuração 2.



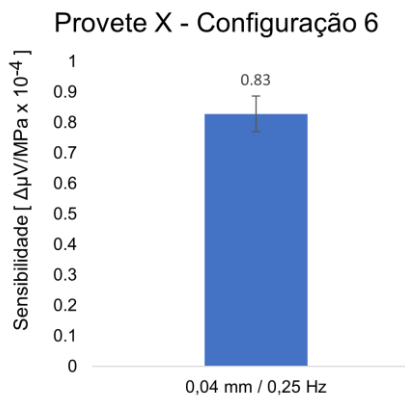
a)



b)



c)



d)

Figura 5.4 - Sensibilidade Provete X: a) Configuração 3, b) Configuração 4, c) Configuração 5, d) Configuração 6.

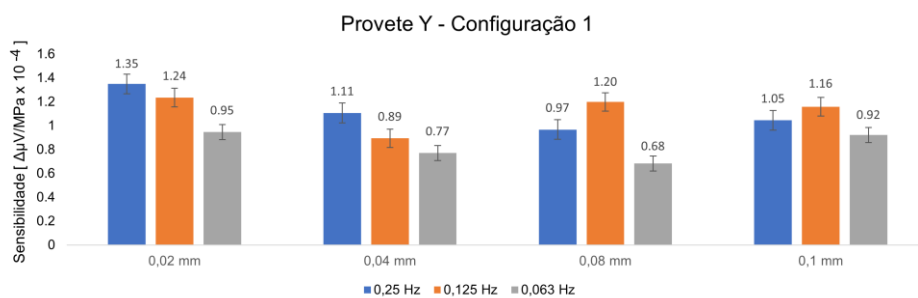


Figura 5.5 - Sensibilidade Provete Y: Configuração 1.

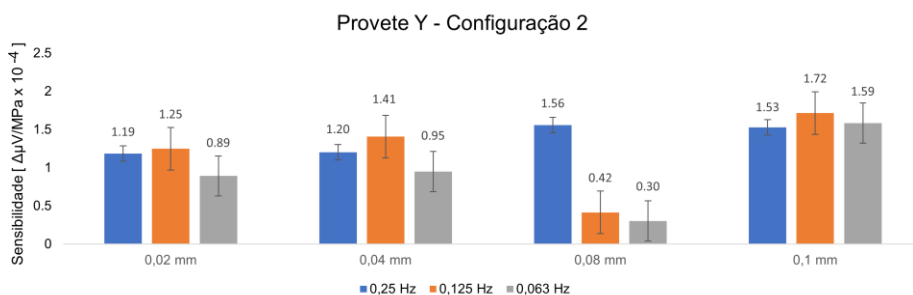


Figura 5.6 - Sensibilidade Provete Y: Configuração 2.

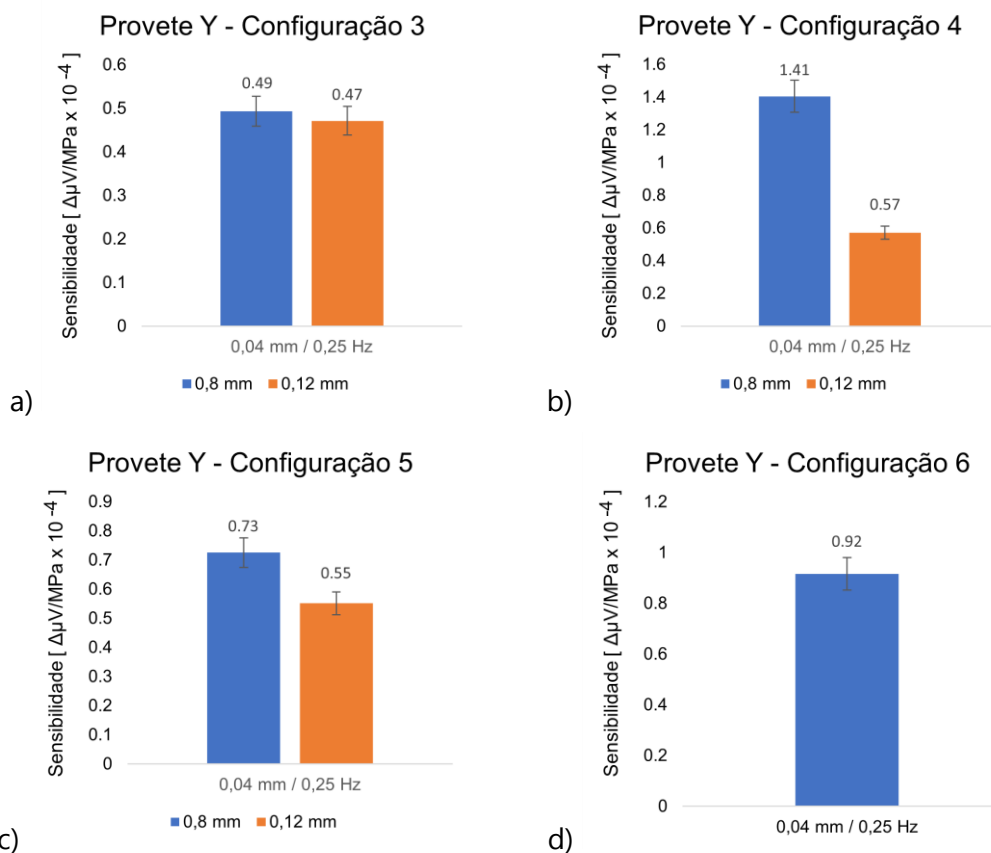


Figura 5.7 - Sensibilidade Provete Y: a) Configuração 3, b) Configuração 4, c) Configuração 5, d) Configuração 6.

Para os provetes estudados, considerando os mesmos parâmetros de ensaio, nas mesmas configurações, observam-se os quocientes de sensibilidade, dados pelo quociente entre os valores de sensibilidade entre PX e PY para cada configuração, apresentados da Figura 5.8 à Figura 5.10. Este parâmetro permite a fácil comparação das sensibilidades, para as mesmas configurações de leitura, entre os tipos de orientação de polarização nos provetes. A Equação (5.1) permite compreender o raciocínio exemplificado.

$$\text{Quociente de Sensibilidade: } Q_s = \frac{\text{Valor Sensi. Provete tipo X}}{\text{Valor Sensi. Provete tipo Y}} \quad (5.1)$$

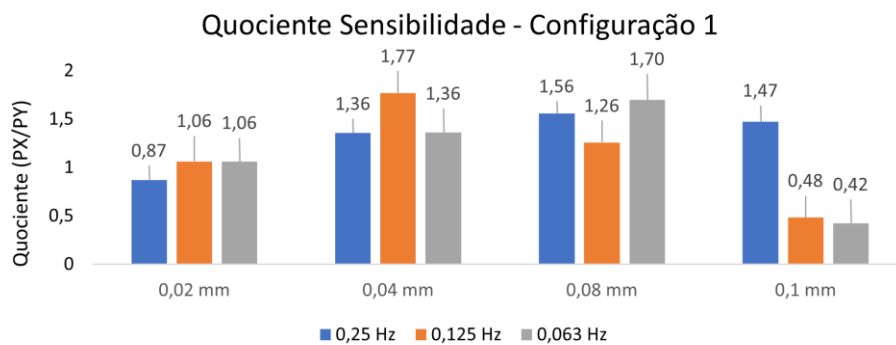


Figura 5.8 - Quociente sensibilidade configuração 1.

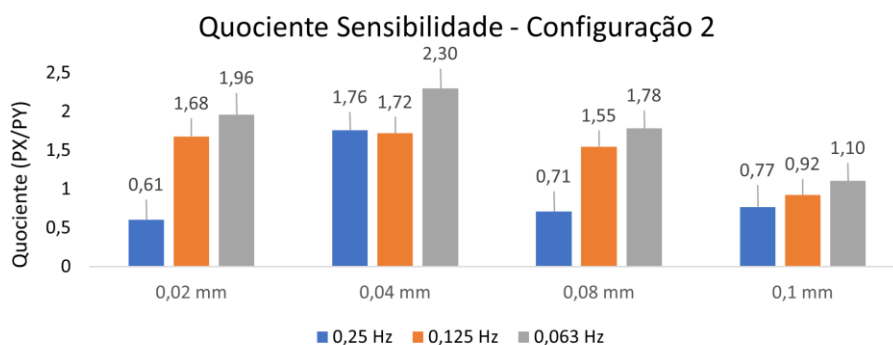


Figura 5.9 - Quociente sensibilidade configuração 2.

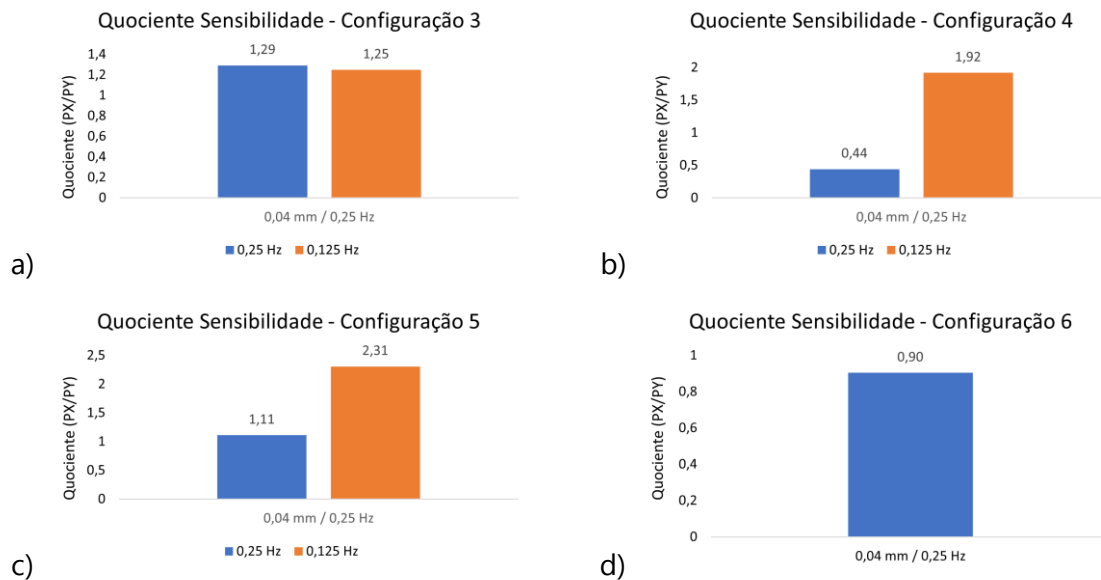


Figura 5.10 - Quociente sensibilidade: a) Configuração 3, b) Configuração 4, c) Configuração 5, d) Configuração 6.

### 5.3 Caracterização da sensibilidade do material

Com base nos dados adquiridos, podemos aferir acerca das propriedades sensoriais de cada provete e, da eficácia de cada configuração de eléctrodos estudada:

Os resultados obtidos permitem confirmar que as solicitações dinâmicas de maior amplitude (0,1 mm deslocamento) possibilitam respostas sensoriais mais evidentes do ponto de vista da ddp, com valores 62% superiores à média. Contudo, da perspetiva da sensibilidade, não se verifica uma relação de proporcionalidade direta, isto é, a sensibilidade do provete não depende do deslocamento imposto.

Em contrapartida, para ensaios com solicitações de 0,125 Hz (nas configurações 1 e 2), observam-se valores de sensibilidade 7% superiores à média.

Para frequências inferiores a 0,125Hz, a facilidade da leitura de resposta diminuí, podendo haver instâncias em que o ruído do meio e do equipamento se confunde com a resposta gerada. Para as configurações 3, 4 e 5, observa-se uma tendência positiva na leitura do sinal quando configurados os eléctrodos para 8 mm de distância entre si, apresentando valores 18% superiores quando comparados com os ensaios de 12 mm, com exceção nos ensaios #xc4\_2 e #xc5\_2, consultar Tabela 5.1.

Graças ao parâmetro do quociente de sensibilidade, é possível concluir que, os provetes do tipo X (PX) adquirem valores de sensibilidade superiores aos valores observados para PY, existindo apenas alguns ensaios nos quais essa propriedade não se verifica. Dito isto, considerando todos os ensaios apresentados, para PX apresenta-se um valor médio de sensibilidade na ordem dos  $1,233 \Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4}$ , superior ao valor médio de sensibilidade observado em PY de  $1,013 \Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4}$ .

Para o provete X, o sinal que permitiu observar o maior valor de sensibilidade obteve-se para o ensaio #xc2\_5, na ordem dos  $2,421 \Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4}$ , consultar Tabela 5.1.

Para o provete Y, o sinal que permitiu observar o maior valor de sensibilidade obteve-se para o ensaio #yc2\_11, na ordem dos  $1,716 \Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4}$ , consultar Tabela 5.2.

Os valores médios de sensibilidade para cada configuração, expressos em  $\Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4}$ , são os seguintes: Configuração 1: 1,107; configuração 2: 1,337; configuração 3: 0,548; configuração 4: 0,924; configuração 5: 0,839; configuração 6: 0,873.

Os ensaios realizados com uma frequência de solitação de 0,125 Hz apresentam um valor médio de sensibilidade na ordem dos  $1,311 \Delta\mu\text{V}/\text{MPa} \times 10^{-4}$ .

Os resultados obtidos encontram-se em conformidade com as caracterizações realizadas anteriormente [4], confirmando o sucesso da integração das partículas de BT na matriz de alumínio para a criação de um componente sensível, quando sujeito a cargas dinâmicas. De acordo com os resultados apresentados no apêndice "Resultados experimentais", a carga aplicada mais elevada conduziu a uma tensão de tração de 80 MPa.

## 5.4 Discussão dos resultados

Tal como concluído em trabalhos passados [4] é possível aferir que, as etapas de processamento experienciadas pelo SSM, tornam possível adquirir um material sensível a solitações dinâmicas do tipo uniaxial. Neste mesmo contexto, os resultados apresentados permitem confirmar a correlação da resposta, observando-se um maior grau de correlação para os ensaios da configuração 1. Sendo a matriz base metálica, seria de esperar que o processo de polarização causasse um efeito residual na reorientação dos dipolos elétricos, contudo, a incorporação das partículas BT assistida por um processo de refinamento de grão (FSP) terá provocado uma diminuição da condutividade elétrica na região, contribuindo para a redução da mobilidade dos elétrons e consequentemente, para o aumento da eficácia da polarização [4].

Com base nos resultados obtidos, torna-se ainda possível confirmar a influência, em cada provete, dos diferentes deslocamentos e frequências aplicadas em cada ensaio, tendo como consequência os diferentes valores de sensibilidade observados, verificando-se um aumento da diferença de potencial com um aumento da carga aplicada.

Ainda que as dimensões dos provetes ensaiados sejam reduzidas, a direção de polarização desempenha um papel significativo na leitura dos sinais elétricos gerados (considerando ensaios com os mesmos parâmetros, para as mesmas configurações de leitura), ou seja, conclui-se que a direção de polarização adotada por PX é a mais adequada na criação de sinais elétricos, assim como a diferença observada para os ensaios de 0,125 Hz de solicitação, que indicam que se trata de uma frequência ideal de ensaio. Porém, apenas com estudos incidentes nestes temas será possível confirmar a existência destes fenômenos. Contudo, ao contrário do esperado, observaram-se sinais elétricos favoráveis em configurações menos comuns de ensaio, tal como observado no valor médio da sensibilidade da configuração 2, o qual se revela como 20% superior ao valor médio da sensibilidade da configuração 1.

Considerando os resultados dos ensaios #xc1\_11, #xc1\_12, #xc2\_1, #yc2\_8 e #yc2\_9, acredita-se que os valores obtidos não sejam concordantes com o comportamento esperado pelo provete, devido à disparidade entre valores vizinhos. Tal situação poderá ocorrer em virtude de ocorrências como: uma má colocação do provete no equipamento de ensaio, os parâmetros de ensaio colocarem o provete perto da zona limite da elasticidade, ao uso de equipamentos acessórios não especializados para o efeito, sendo colocados em pontos diferentes no provete em cada ensaio e, em último caso, à danificação destes equipamentos, derivada pelo uso recorrente, levando a alterações das suas características.

Os resultados das configurações 3, 4 e 5 permitem deduzir que, por norma, os valores de sensibilidade tornam-se mais quantificáveis consoante a proximidade à zona processada, no entanto, este fenómeno não apresenta a preponderância esperada, sendo 18% a superioridade da sensibilidade do cenário de 8 mm versus o de 12 mm de distância. A redução da sensibilidade observada (considerando os valores médios) nas configurações 3, 4, 5 e 6 poderá indicar que estas configurações não serão ideais, quando comparadas com as configurações 1 e 2.

# CONCLUSÕES E DESENVOLVIMENTOS FUTUROS

## 6.1 Introdução

De modo a concluir a dissertação, serve este capítulo para resumir as conclusões alcançadas, referindo ainda sugestões de trabalho futuro investigativo assim como, possíveis utilizações industriais e laboratoriais para o SSM.

## 6.2 Possíveis utilizações

Graças às propriedades inovadoras do SSM, as possíveis utilizações nos diferentes ramos da engenharia, indústria, et cetera são vastas. Tal como referido em trabalhos passados, no ponto de vista industrial, sugere-se que o SSM possa vir a ser incorporado em equipamentos que detetem alterações de temperatura, ou até mesmo, em instrumentos de deteção de fissuras ou defeitos [4], [55]. Contudo, graças à sensibilidade para baixas frequências sugere-se ainda que, o SSM, possa vir a ser utilizado em aplicações, cujos esforços aplicados, surjam conforme os parâmetros ensaiados nesta dissertação, ou seja, em aplicações industriais tais como:

Operações de corte e furação de precisão, com recurso a ferramentas que utilizem sistemas de acionamento de baixa frequência. Devido às cargas aplicadas e à contínua utilização, o esforço experimentado por estes equipamentos revela-se como superior quando comparados com outros aparatos industriais e, conseqüentemente, a períodos de manutenção mais curtos. Dito isto, o SSM poderia desempenhar um papel importante na manutenção preventiva destes equipamentos, permitindo intervenções adequadas ao propósito de cada, através de leituras constantes do estado dos componentes integrantes;

Sistemas de transporte que utilizem correias para o transporte de mercadorias e matéria-prima pesadas a longas distâncias. Dada a importância desta etapa no contexto industrial, a integração do SSM neste tipo de aparelhos poderia contribuir para a diminuição do risco de paragem abrupta e reparações extensivas ao longo do aparato, através da monitorização constante do tipo de esforços experienciados pelos sistemas de correias;

Sistemas de bombas e compressores de deslocamento positivo, usados em processamento de fluidos, compressão de gás e refrigeração. A integração do SSM nos pistões de movimento lento ou diafragmas poderia contribuir para a manutenção da transferência eficiente e acumulação de pressão experienciada por estes equipamentos, através da monitorização do estado dos seus componentes integrais, minimizando as perdas de eficiência a longo prazo;

Sistemas de transmissão e caixas de velocidades empregues em turbinas eólicas, gruas e equipamento de extração mineira. As baixas frequências de funcionamento destes dispositivos permitem transmitir o binário e potência gerados a diferentes gamas de velocidade, o SSM poderia garantir o bom funcionamento destes aparatos ao averiguar acerca do estado dos seus componentes;

Na robótica e automação, o SSM poderia servir como um sensor para tarefas de *pick-and-place*, manipulação de peças e inspeção, garantindo o sucesso da tarefa através das leituras obtidas, especialmente para itens delicados ou frágeis;

Num âmbito laboratorial, prevê-se que o SSM possa vir a ser utilizado em condições semelhantes às condições impostas pelo meio industrial, contudo, num registo mais rigoroso do ponto de vista da exatidão e precisão, a fim de garantir o cumprimento das exigências científicas exigidas. Neste sentido, algumas propostas futuras seriam:

Integração do SSM em testes e simulações estruturais, nomeadamente em equipamentos de teste especializado como mesas agitadoras para testes de vibração e calibração, dado que utilizam vibrações de baixa frequência para simular condições do mundo real, servindo para testar a integridade estrutural de edifícios, pontes, aeronaves e outras infraestruturas críticas. Esta opção possibilitaria a redução dos custos destes equipamentos ao reduzir a complexidade introduzida pelos aparelhos acessórios à estrutura e necessários para as medições;

Em equipamentos de recolha de energia, cuja potência de funcionamento seja reduzida. Uma tecnologia como o SSM poderia desempenhar um papel fundamental na alimentação de dispositivos de pequenas dimensões, minimizando o uso de fontes de energia externa ou integrada (por meio de baterias);

No âmbito dos ensaios não destrutivos (NDT), ao incorporar o SSM em zonas específicas de falha de equipamentos laboratoriais, facilitando a monitorização e manutenção do bom funcionamento dos mesmos, contribuindo para a realidade da manutenção preventiva, através da implementação de técnicas NDT, melhoramento da qualidade, segurança e performance de equipamentos e sistemas, contribuindo em larga escala para avanços em indústrias como a manufatura, automóvel, aeroespacial, saúde, et cetera.

Devido às propriedades piezoelétricas do SSM, à sua constituição metálica e à sua natureza duradoura [4], torna-se viável utilizá-lo como um "sensor" integral e definitivo em muitos materiais, e estruturas, suscetíveis a desgaste, inclusive em ambientes menos favoráveis, substituindo aparelhos frágeis e a necessidade de os proteger.

Consequentemente, o SSM poderia ser utilizado como uma ferramenta indispensável no âmbito da manutenção preventiva, permitindo uma conexão contínua e permanente a outros mecanismos de deteção, graças às características já mencionadas e à aparente ausência de decaimento sensorial.

Em síntese, espera-se que as aplicações do SSM passem pela avaliação de risco, cumprimento dos requisitos de indicador da integridade das estruturas, redução dos custos na inspeção e controlo de rotina, amostragem menos frequente e por consequência, no estabelecimento de planos de segurança com base na avaliação dos princípios de gestão de risco.

## 6.3 Conclusões

Tendo em conta as metas estabelecidas, os objetivos inicialmente estabelecidos para a presente dissertação foram atingidos com êxito. O estado de arte permitiu conhecer a realidade atual dos sensores assim como o enquadramento do SSM na família dos materiais auto sensíveis, as limitações do BaTiO<sub>3</sub> e a sua integração através do processo de FSP e por fim, os conceitos base dos piezoelétricos, piezoelectricidade e da polarização, concluindo acerca

dos parâmetros que influenciam a leitura do sinal, informação essencial para especular sobre as possíveis utilizações do SSM.

Os ensaios realizados permitiram concluir que os processos sofridos pelo SSM possibilitam a criação de um material sensível a solicitações do tipo uniaxial. Do mesmo modo, foi ainda possível confirmar a existência de sensibilidade para orientações de polarização distintas a trabalhos passados [4]. Observou-se o fenômeno de correlação em cada ensaio realizado, sendo mais aparente nos ensaios de maior amplitude de deslocamento e de menor duração (maior frequência). Verificou-se que as diferenças entre os parâmetros estudados influenciam os resultados obtidos, sendo que, para provetes PX, a sensibilidade observada revela-se como 21% superior em comparação a provetes PY, a configuração 2 apresenta valores 42% superiores à média e, tornou-se ainda possível identificar uma possível frequência ideal para este tipo de ensaios (0,125 Hz) sendo que, para ensaios que respeitam este parâmetro, a sensibilidade observada apresenta valores 7% superiores à média. Esta dissertação permitiu ainda adquirir conhecimentos em relação aos materiais piezoelétricos metálicos, às suas propriedades mecânicas e sensoriais, permitindo aprofundar o conhecimento numa área emergente da tecnologia atual.

## 6.4 Trabalho Futuro

Em âmbito laboratorial, seria relevante realizar ensaios que permitam averiguar a existência do fenômeno de decadência da polarização e se, para as aplicações futuras do SSM, se revela como significativa. Ainda nesta ótica, propõem-se as seguintes análises:

- Estudo da influência que outras partículas piezoelétricas possam ter na qualidade e percepção do sinal de resposta deste tipo de provetes;
- Estudo de provetes cuja zona processada seja superior à estudada ou de provetes cuja geometria difira, considerando ainda uma alteração no posicionamento da zona processada;
- A produção (ou adaptação) de elétrodos especializados para a medição sensorial, neste tipo de materiais, considerando novas configurações para o

seu posicionamento e até mesmo tecnologias emergentes capazes de otimizar a leitura da resposta;

- Solicitações dissemelhantes aquelas experienciadas no ensaio de tração uniaxial, considerando ensaios com tensões de corte, torção, flexão, impacto, et cetera, avaliando e comparando o comportamento do material com os ensaios presentes nesta dissertação;
- A polarização múltipla de provetes com o intuito de avaliar a influência no comportamento sensorial;
- Estudos no âmbito da orientação de polarização preferencial, criando provetes cujo vetor polarização seja concordante com as solicitações impostas;
- Pesquisa aprofundada sobre a influência da distância dos eletrodos à zona processada;
- Análise ao possível decaimento sensorial do SSM;
- Em contexto prático e até industrial, o estudo do desempenho do SSM em aplicações concretas, concluindo acerca da sua utilidade nestas situações;

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] C. Rogers e I. Ahmad, "SMART MATERIALS, STRUCTURES and MATHEMATICAL ISSUES," U. S. Army Research Office Workshop, Blacksburg, Virginia, 1988.
- [2] S. Kamila, "Introduction, classification and Applications of Smart Materials: An overview," *American Journal of Applied Sciences*, vol. 10, nº 8, DOI: 10.3844/ajassp.2013.876.880, pp. 870-880, 24 Julho 2013.
- [3] I. N. QADER, M. KÖK, F. DAGDELEN e Y. AYDOGDU, "A Review of Smart Materials: Researches and Applications," *El-Cezerî Journal of Science and Engineering*, vol. 6, nº 3, DOI: 10.31202/ecjse.562177, pp. 755-788, 25 Junho 2019.
- [4] P. M. Ferreira, M. A. Machado, M. S. Carvalho e C. Vidal, "Granting Sensorial Properties to Metal Parts through Friction Stir Processing," *Measurement*, vol. 207, nº 112405, DOI: 10.1016/j.measurement.2022.112405, 2023.
- [5] P. M. Ferreira, M. A. Machado, M. S. Carvalho e C. Vidal, "Embedded Sensors for Structural Health Monitoring: Methodologies and Applications Review," *sensors*, vol. 22, nº 8320, DOI: 10.3390/s22218320, 2022.
- [6] P. M. Ferreira, M. A. Machado e M. Carvalho, "Self-sensing metallic material based on PZT particles produced by friction stir processing envisaging structural health monitoring applications," *Materials Characterization*, vol. 205, nº 113371, DOI: 10.1016/j.matchar.2023.113371, 2023.
- [7] G. Vial, "Automatic extensometers.(TECH SPOTLIGHT)," *Advanced Materials & Processes*, 2005.
- [8] E. Tech, "Extensometer Basics," 2023. [Online]. Available: <https://www.epsilontech.com/extensometer-basics/>. [Acedido em 28 8 2023].
- [9] W. Chang, "The application and limitation of extensometer for tunnel monitoring," em *Rock Mechanics Contributions and Challenges*, Golden, Colorado, The 31st U.S. Symposium on Rock Mechanics (USRMS), 1990.

- [10] A. Materials, "Advantages of Video Non-Contact Extensometers," 14 Março 2008. [Online]. Available: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=3684>. [Acedido em 28 Junho 2023].
- [11] M. S. Corporation, "What is a Strain Gauge and How Does it Work?," [Online]. Available: <https://www.michsci.com/what-is-a-strain-gauge/?cn-reloaded=1>. [Acedido em 29 Agosto 2023].
- [12] B. Glisic e D. Inaudi, *Fibre Optic Methods for Structural Health Monitoring*, Wiley, 2007.
- [13] scaime, "Fibre Bragg grating sensor technology," [Online]. Available: <https://scaime.com/fibre-bragg-grating-technology>. [Acedido em 29 Agosto 2023].
- [14] V. Giurgiutiu, "Structural Damage Detection with Piezoelectric," *Journal of Physics: Conference Series*, nº 305, DOI: 10.1088/1742-6596/305/1/012123, 2011.
- [15] M. Andrejašič, "MEMS ACCELEROMETERS," University of Ljubljana, 2008.
- [16] C. Devices, "The Basics of Ultrasonic Sensors," [Online]. Available: <https://www.cuidevices.com/blog/the-basics-of-ultrasonic-sensors>. [Acedido em 28 Agosto 2023].
- [17] A. Moreira, *Compósitos: 2. Definição e composição*, Tomar, Santarém: Politécnico de Santarém, 2008, pp. 1-1.
- [18] Y. Zheng, N. Tang, R. Omar, Z. Hu, T. Duong, J. Wang, W. Wu e H. Haick, "Smart Materials Enabled with Artificial Intelligence for Healthcare Wearables," *Advanced Functional Materials*, nº DOI: 10.1002/adfm.202105482, 2021.
- [19] Y.-Q. Feng, M.-L. Lv, M. Yang, W.-X. Ma, G. Zhang, Y.-Z. Yu, Y.-Q. Wu, H.-B. Li, D.-Z. Liu e Y.-S. Yang<sup>1</sup>, "Application of New Energy Thermochromic Composite Thermosensitive Materials of Smart Windows in Recent Years," *Molecules*, nº DOI: 10.3390/molecules27051638, 2022.
- [20] G. G. Njema e J. K. Kibet, "A Review of the Technological Advances in the Design of Highly Efficient Perovskite Solar Cells," *International Journal of Photoenergy*, vol. 2023, nº DOI: 10.1155/2023/3801813, 2023.
- [21] P. Jiao e A. H. Alavi, "Artificial intelligence-enabled smart mechanical metamaterials: advent and future trends," *International Materials Reviews*, vol. 66, nº 6, DOI: 10.1080/09506608.2020.1815394, pp. 365-393, 2021.

- [22] Z. L. Q. Fan e Y. Yin, "Colloidal Self-Assembly Approaches to Smart Nanostructured Materials," *Chemical Reviews*, vol. 5, n° 122, DOI: 10.1021/acs.chemrev.1c00482, p. 4976–5067, 2022.
- [23] X. Yu, H. Cheng, M. Zhang, Y. Zhao, L. Qu e G. Shi, "Graphene-based smart materials," *Nature Reviews Materials*, vol. 2, n° 17046, DOI: 10.1038/natrevmats.2017.46, 2017.
- [24] I. Chopra e J. Sirohi, SMART STRUCTURES THEORY, Cambridge University Press & Assessment, 2013.
- [25] Z. Ling e J. Liu, "Piezoelectricity in binary wurtzite semiconductors: a first-principles study," *Applied Physics Express*, vol. 14, n° 12, DOI: 10.35848/1882-0786/ac36b3, 4 Novembre 2021.
- [26] S. Liu e R. E. Cohen, "Origin of Negative Longitudinal Piezoelectric Effect," *PHYSICAL REVIEW JOURNALS*, vol. 119, n° 20, DOI: 10.1103/PhysRevLett.119.207601, 17 Novembre 2017.
- [27] Y. Qi e A. M. Rappe, "Widespread Negative Longitudinal Piezoelectric Responses in Ferroelectric Crystals with Layered Structures," *PHYSICAL REVIEW JOURNALS*, vol. 126, n° 21, DOI: 10.1103/PhysRevLett.126.217601, 2021.
- [28] A. V. Turik, A. A. Yesis e L. A. Reznitchenko, "Piezoelectric Effect and Electrostriction in Ceramic Ferroelectrics," *Ferroelectrics*, vol. 359, n° 1, DOI: 10.1080/00150190701515808, pp. 111-116, 2007.
- [29] H. Elahi, K. Munir, M. Eugeni, M. Abrar, A. Khan, A. Arshad e P. Gaudenzi, "A Review on Applications of Piezoelectric Materials in Aerospace Industry," *Integrated Ferroelectrics*, vol. 211, n° 1, DOI: 10.1080/10584587.2020.1803672, pp. 24-44, 2020.
- [30] A. Mirkowska, R. Kacprzyk e K. Rozmaryniewicz, "Piezoelectric Structure With a 3-D Printed Mesh Layer," *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, vol. 29, n° 3, DOI: 10.1109/TDEI.2022.3168366, pp. 823-828, 2022.
- [31] A. Nechibvute, A. Chawanda e P. Luhanga, "Piezoelectric Energy Harvesting Devices: An Alternative Energy," *Smart Materials Research*, vol. 2012, n° 853481, DOI: 10.1155/2012/853481, p. 13, 2012.
- [32] M. Akmal, "Physical and electrical properties enhancement of rare-earth doped-potassium sodium niobate (KNN): A review," *Ceramics - Silikaty*, n° 59, pp. 158-163, 2015.
- [33] G. Catalan e J. F. Scott, "Physics and Applications of Bismuth Ferrite," *Advanced Materials*, vol. 21, n° 24, DOI: 10.1002/adma.200802849, pp. 2463-2485, 2009.

- [34] K.-I. Park, C. K. Jeong, N. K. Kim e K. J. Lee, "Stretchable piezoelectric nanocomposite generator," *Nano Convergence*, vol. 3, n° 12, DOI: 10.1186/s40580-016-0072-z, 2016.
- [35] P. C. M. A. I. A. Susmriti Das Mahapatra, G. Christie, Y. K. Mishra, S. Hofmann e V. K. Thakur, "Piezoelectric Materials for Energy Harvesting and Sensing Applications: Roadmap for Future Smart Materials," *Advanced Science*, vol. 8, n° 17, DOI: 10.1002/adv.202100864, 2021.
- [36] M. M. Vijatović, J. D. Bobić e B. D. Stojanović, "History and Challenges of Barium Titanate: Part I," *Science of Sintering*, vol. 40, n° DOI: 10.2298/SOS0802155V, pp. 155-165, 2008.
- [37] B. Ertuğ, "The Overview of The Electrical Properties of Barium Titanate," *American Journal of Engineering Research (AJER)*, vol. 2, pp. 1-7, 2013.
- [38] S. Islam, "Synthesis and Characterization of Bismuth Doped Barium Titanate," 2016.
- [39] M. Uludoğan, T. Çagin e W. Goddard, "Ab Initio Studies On Phase Behavior of Barium Titanate," *MRS Online Proceedings Library*, vol. 718, n° 101, DOI: 10.1557/PROC-718-D10.1, 2002.
- [40] L. M. Garten, M. Burch, A. Gupta, R. C. Haislmaier, V. Gopalan, E. Dickey e S. Trolrier-McKinstry, "Relaxor Ferroelectric Behavior in Barium Strontium Titanate," *Journal of the American Ceramic Society*, n° DOI: 10.1111/jace.14109, pp. 1645-1650, 2016.
- [41] S. I. Shkuratov e C. S. Lynch, "A review of ferroelectric materials for high power devices," *Journal of Materiomics*, vol. 8, n° 4, DOI: 10.1016/j.jmat.2022.04.002, pp. 739-752, 2022.
- [42] T. Wang, X. Pang, B. Liu, J. Liu, J. Shen e C. Zhong, "A Facile and Eco-Friendly Hydrothermal Synthesis of High Tetragonal Barium Titanate with Uniform and Controllable Particle Size," *Materials (Basel)*, n° DOI: 10.3390/ma16114191, 2023.
- [43] V. Anh, N. Dung, C. Chai, P. T. T. Mai e N. X. Hoan, "The Isoelectric Point and the Surface Charge of Barium Titanate Nanoparticles/Graphene Oxide Determined Using the Electrophoretic Mobility Technique," *VNU Journal of Science: Natural Sciences and Technology*, vol. 37, n° 1, DOI: 10.25073/2588-1140/VNUNST.5114, 2021.
- [44] G. Wypych, "2.1.17 BARIUM TITANATE," em *2 - FILLERS – ORIGIN, CHEMICAL COMPOSITION, PROPERTIES, AND MORPHOLOGY*, 2016.
- [45] R. Mishra e Z. M. b, "Friction stir welding and processing," *Materials Science and Engineering: R: Reports*, vol. 50, n° 1-2, DOI: 10.1016/j.mser.2005.07.001, pp. 1-78, 2005.

- [46] Z. MA, "Friction Stir Processing Technology: A Review," *The Minerals, Metals & Materials Society and ASM International 2008*, vol. 39A, n° DOI: 10.1007/s11661-007-9459-0, pp. 642-658, 2008.
- [47] M. S. Węglowski, "Friction stir processing — State of the art," *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, vol. 18, pp. 114-129, 2017.
- [48] D. J. Griffiths, *Introduction to Electrodynamics*, Upper Saddle River, New Jersey: Prentice Hall, 1999.
- [49] C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, 8th Edition, Wiley, 2004.
- [50] J. D. Jackson, *Classical Electrodynamics*, 3rd Edition, Wiley, 1998.
- [51] D. Wang, S. Hao, B. Dkhil, B. Tian e C. Duan, "Ferroelectric materials for neuroinspired computing applications," *Fundamental Research*, n° DOI: 10.1016/j.fmre.2023.04.013, 2023.
- [52] I. Garate e M. Franz, "Inverse Spin-Galvanic Effect in the Interface between a Topological Insulator and a Ferromagnet," *PHYSICAL REVIEW LETTERS*, vol. 104, n° 14, DOI: 10.1103/PhysRevLett.104.146802, 2010.
- [53] P. Costa, J. Nunes-Pereira, N. Pereira, N. Castro, S. Gonçalves e S. Lanceros-Mendez, "Recent progress on piezoelectric, pyroelectric and magnetoelectric polymer based energy harvesting devices," *Energy Technology*, vol. 7, n° 7, DOI: 10.1002/ente.201800852, 2019.
- [54] Thermo Fisher Scientific, "Barium titanium oxide, 99.7% (metals basis), Thermo Scientific Chemicals," [Online]. Available: <https://www.thermofisher.com/order/catalog/product/088267.22>. [Acedido em 20 agosto 2023].
- [55] J. M. Lourenço, "The NOVAthesis LATEX Template User's Manual. NOVA University Lisbon.," 2021. [Online]. Available: [https://github.com/joaomlourenco/novathesis\\_word/raw/master/novathesis\\_word-FINAL-EN.pdf](https://github.com/joaomlourenco/novathesis_word/raw/master/novathesis_word-FINAL-EN.pdf). [Acedido em 31 março 2023].

# APÊNDICE

## Resultados experimentais

Figuras A.1 a A.12, referentes aos ensaios de tração uniaxial da configuração 1:

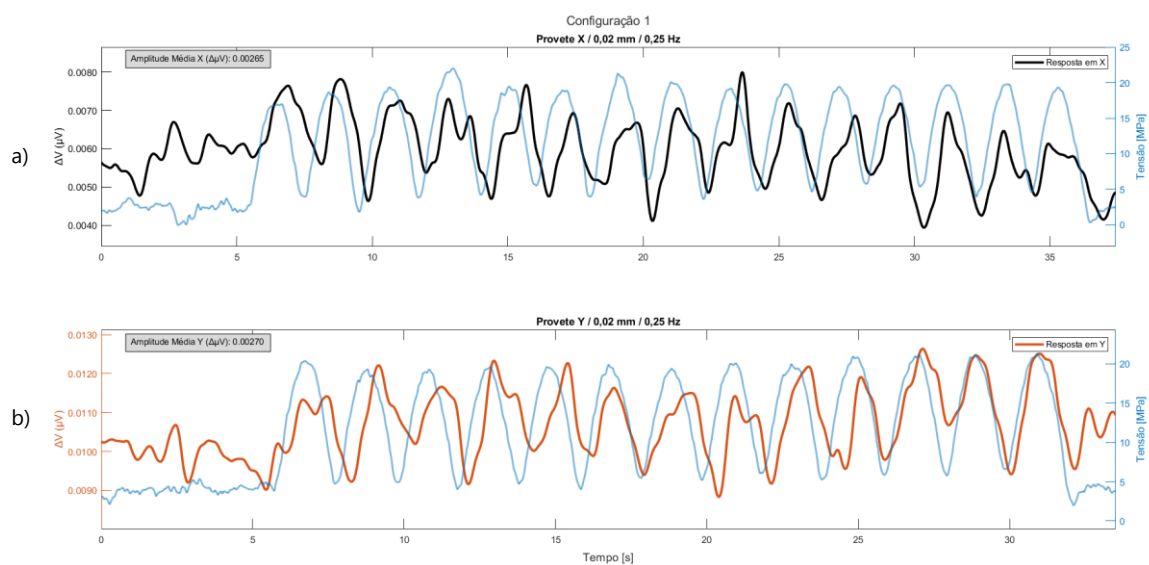


Figura A.1 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_1, b) Ensaio #yc1\_1.

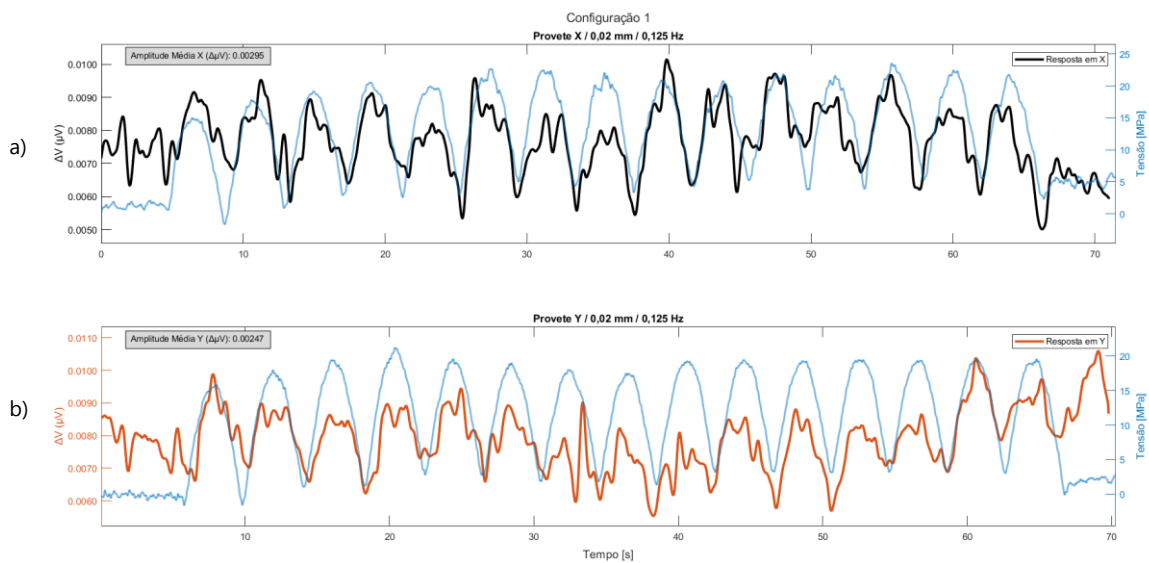


Figura A.2 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_2, b) Ensaio #yc1\_2.

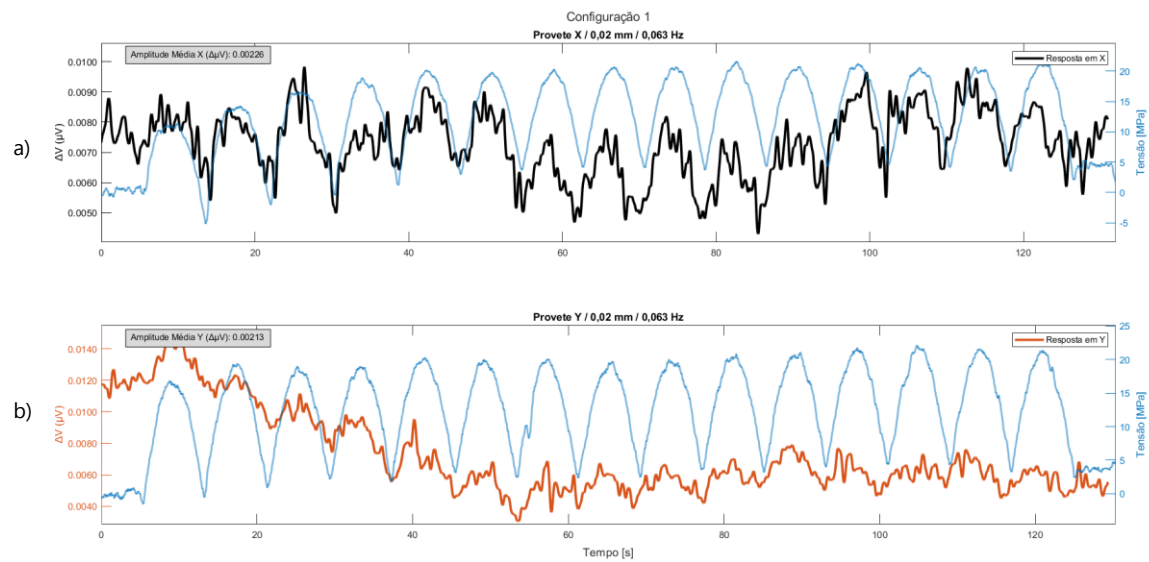


Figura A.3 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_3, b) Ensaio #yc1\_3.

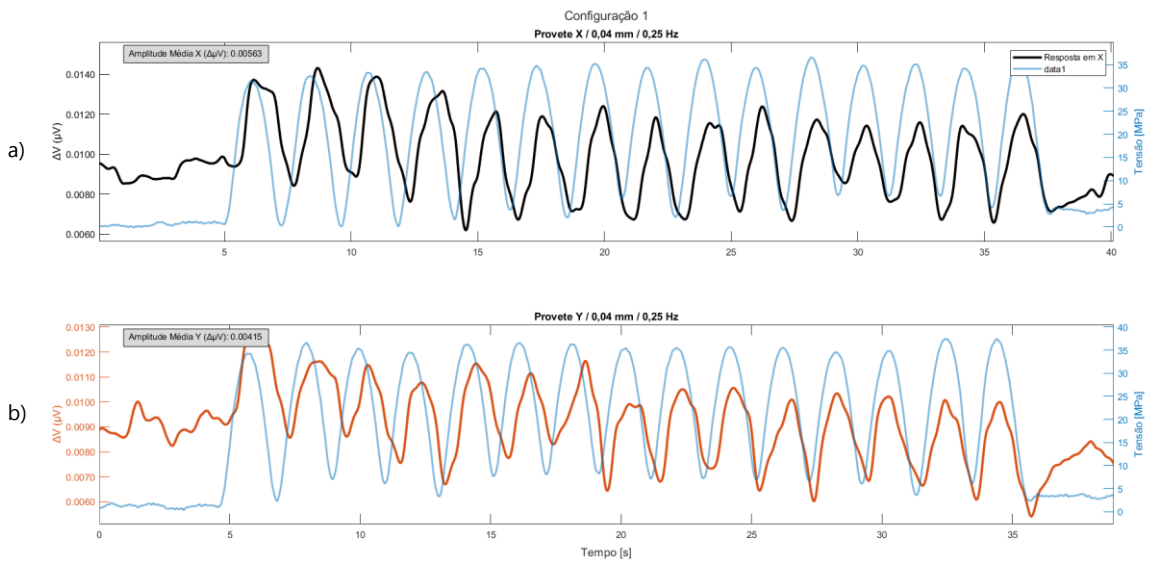


Figura A.4 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_4, b) Ensaio #yc1\_4.

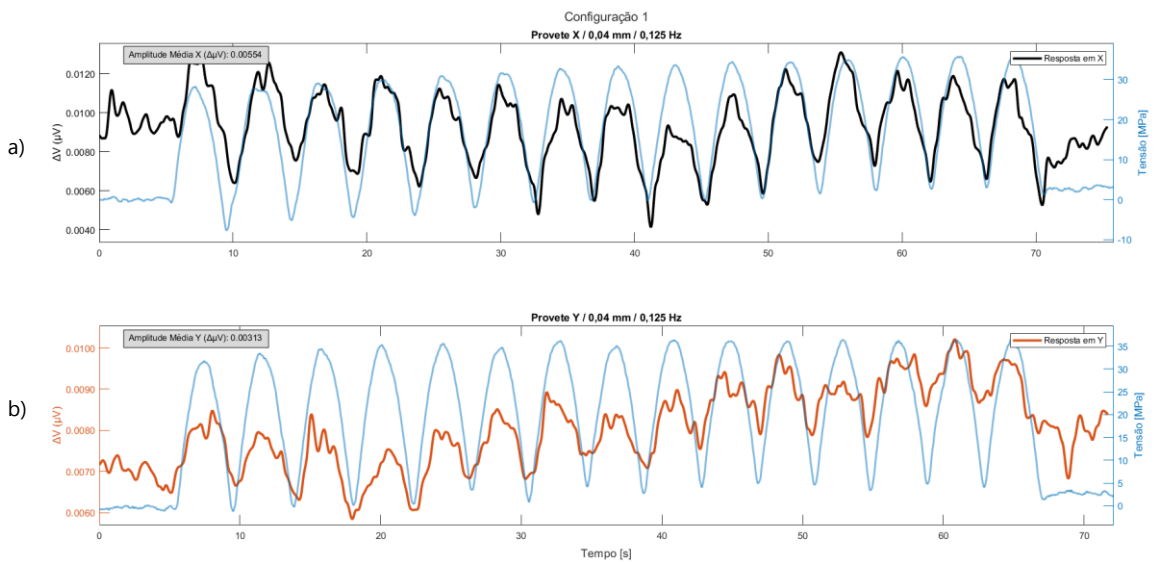


Figura A.5 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_5, b) Ensaio #yc1\_5.

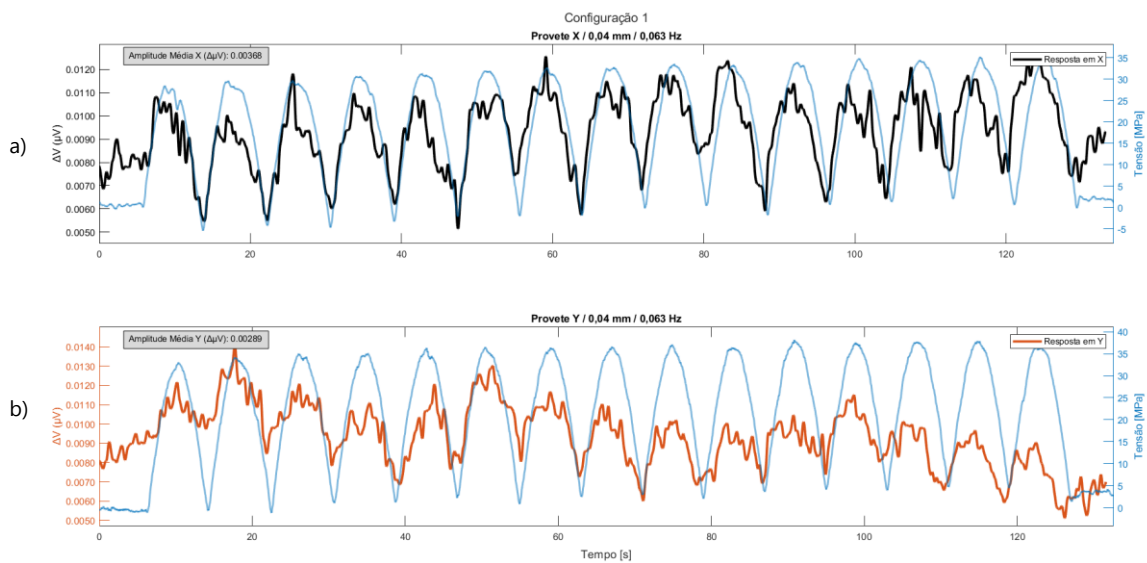


Figura A.6 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_6, b) Ensaio #yc1\_6.

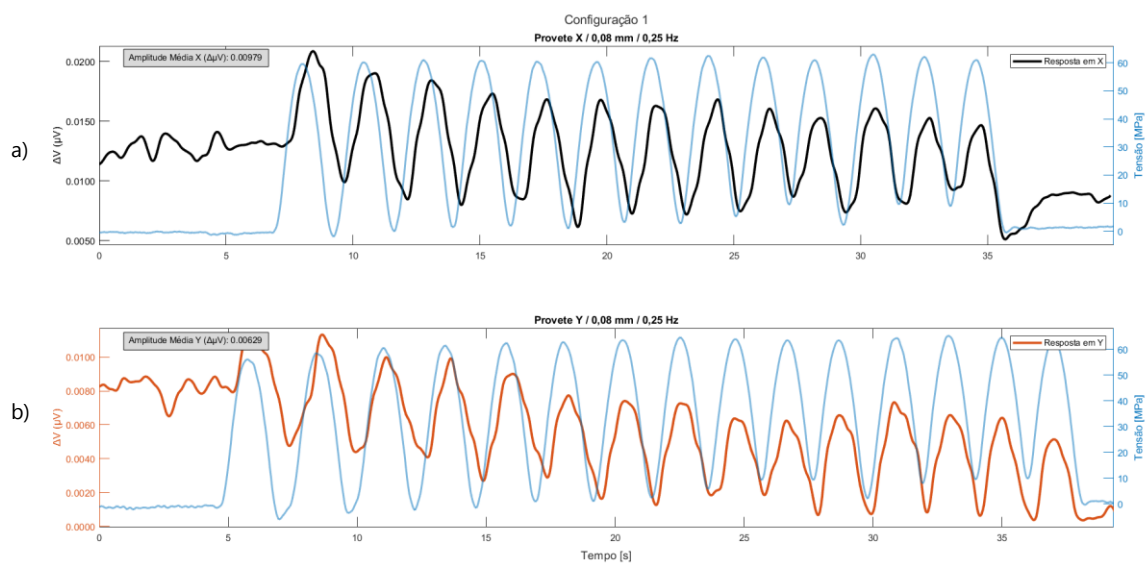


Figura A.7 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_7, b) Ensaio #yc1\_7.

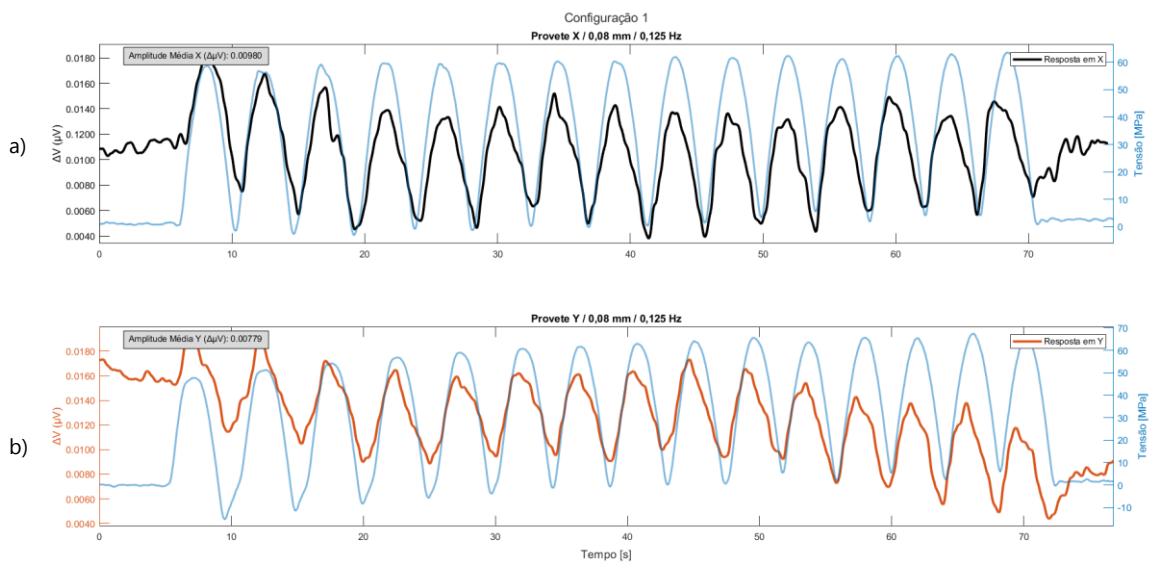


Figura A.8 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_8, b) Ensaio #yc1\_8.

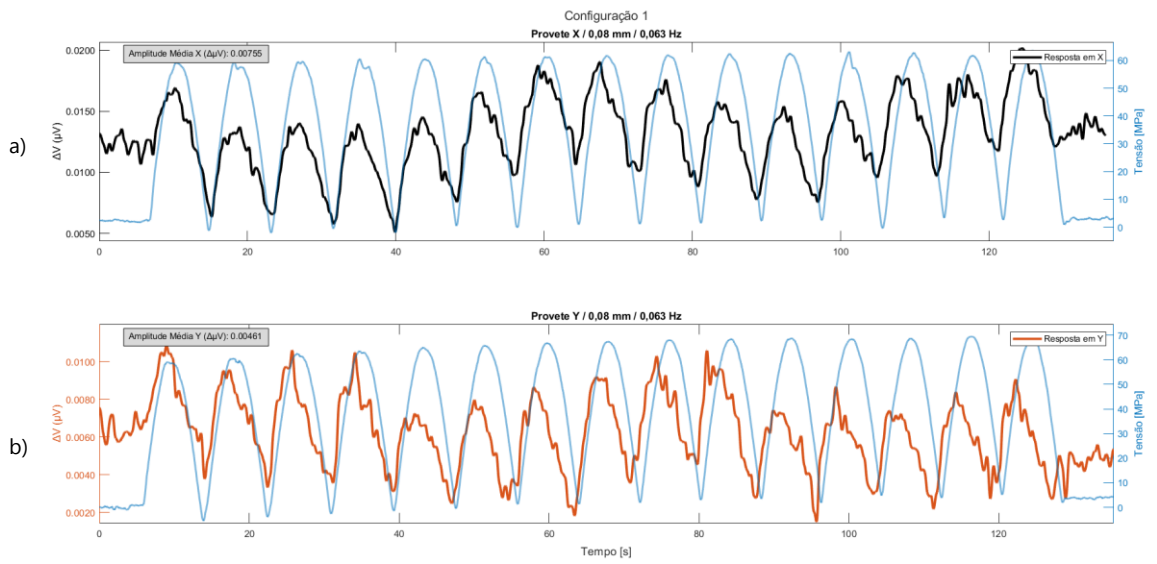


Figura A.9 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_9, b) Ensaio #yc1\_9.

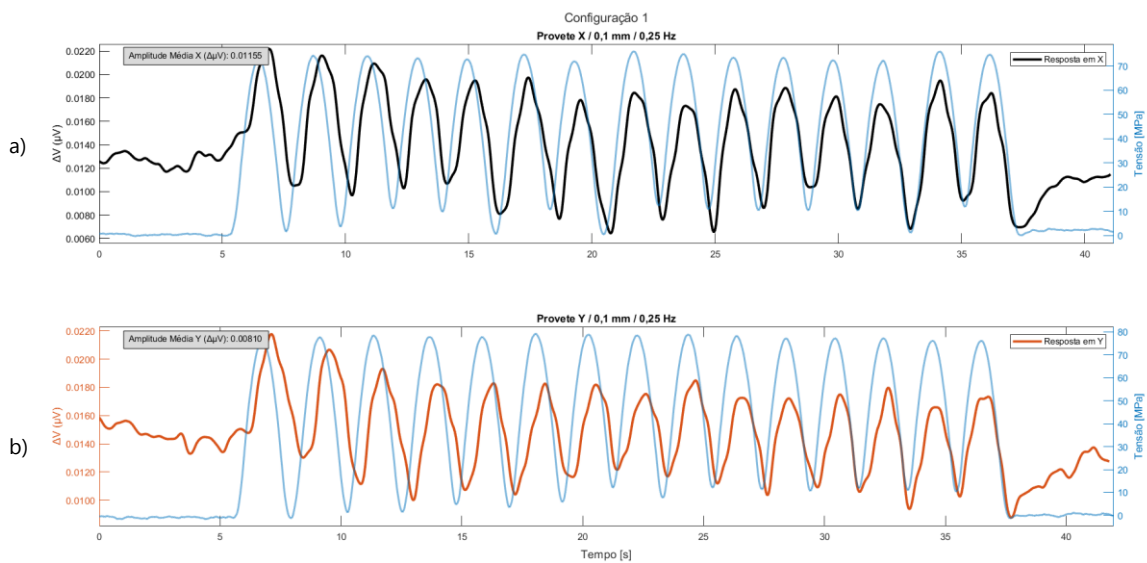


Figura A.10 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_10, b) Ensaio #yc1\_10.

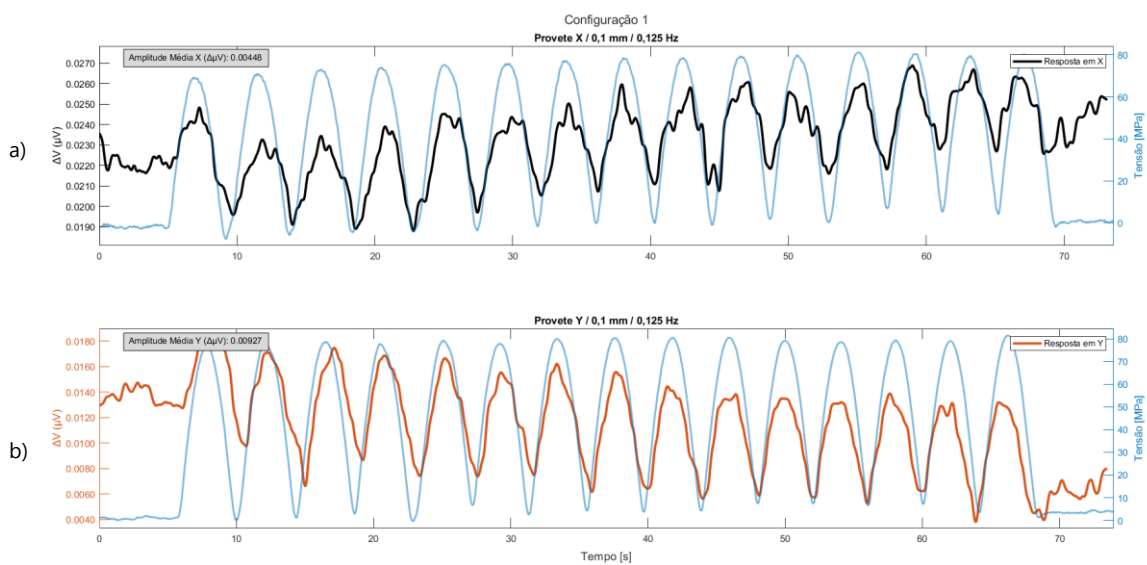


Figura A.11 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_11, b) Ensaio #yc1\_11.

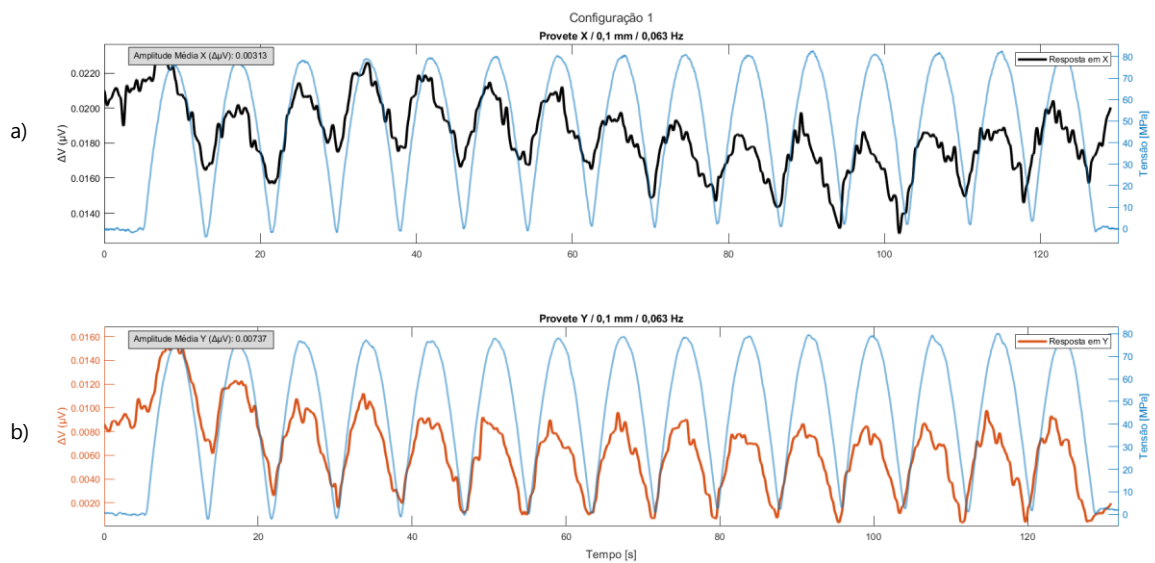


Figura A.12 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc1\_12, b) Ensaio #yc1\_12.

Figuras A.13 a A.24 referentes aos ensaios de tração uniaxial da configuração 2:

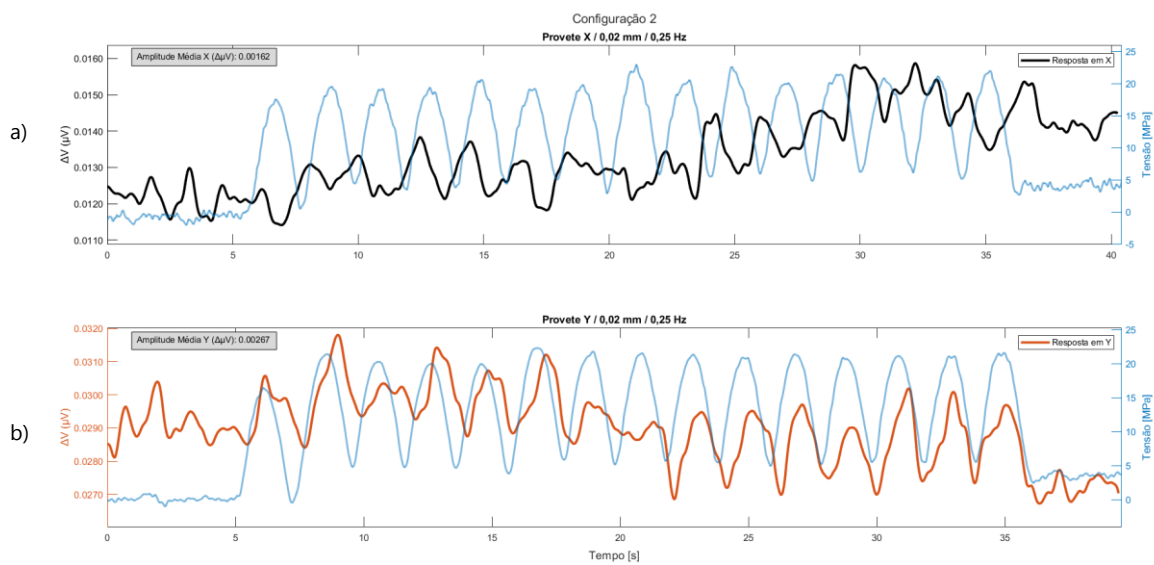


Figura A.13 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_1, b) Ensaio #yc2\_1.

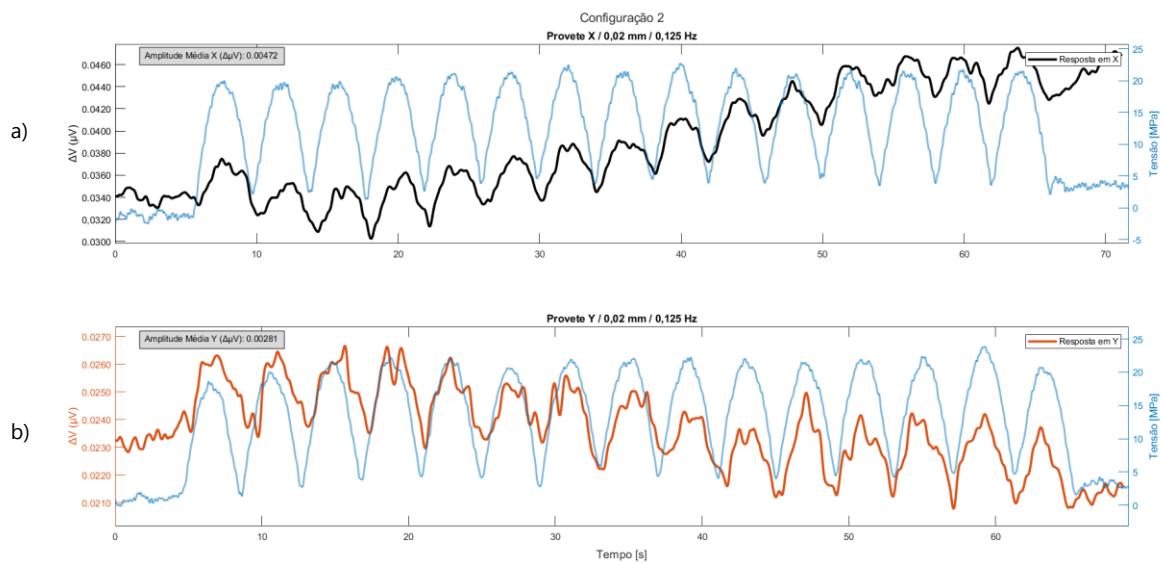


Figura A.14 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_2, b) Ensaio #yc2\_2.

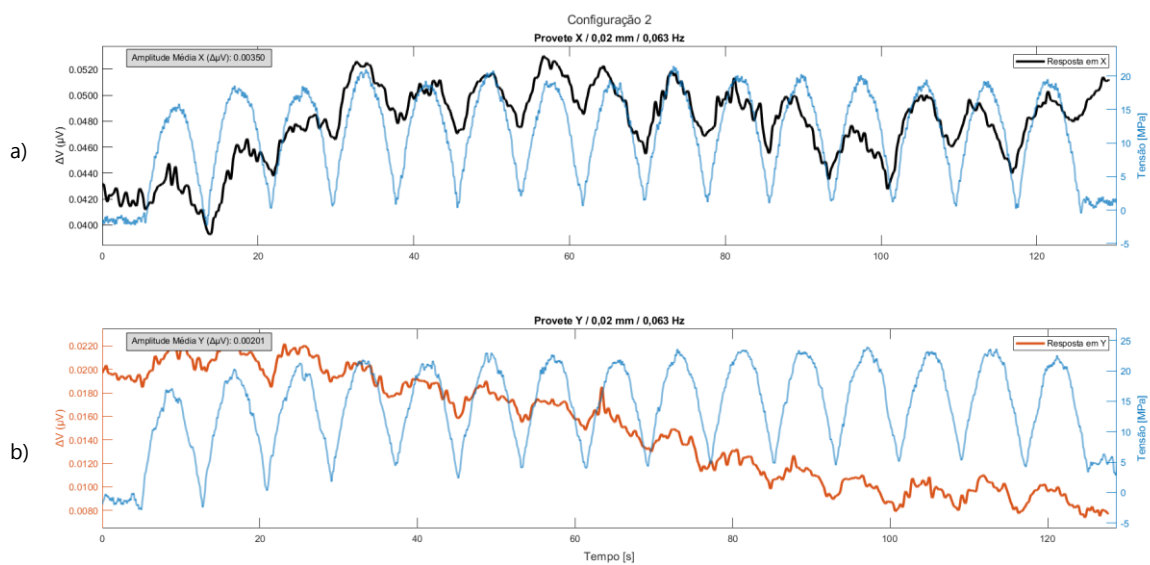


Figura A.15 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_3, b) Ensaio #yc2\_3.

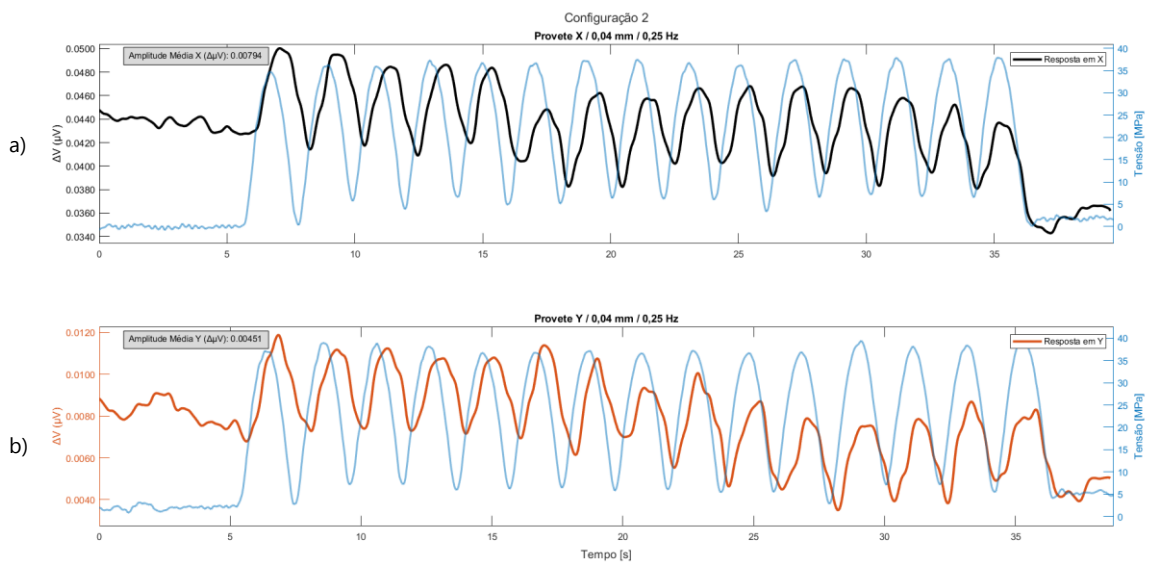


Figura A.16 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_4, b) Ensaio #yc2\_4.

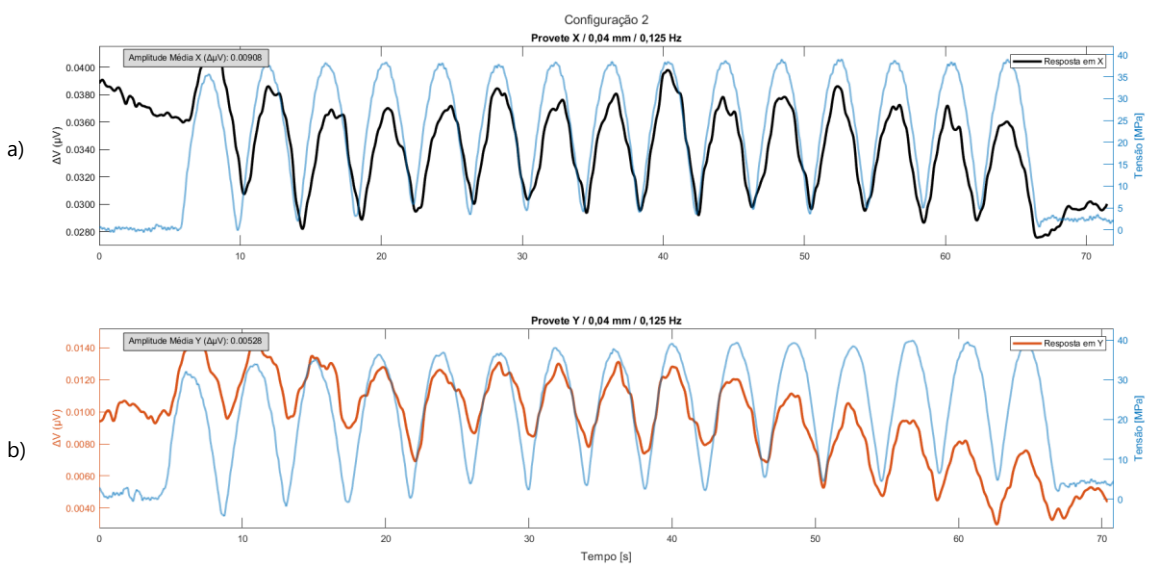


Figura A.17 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_5, b) Ensaio #yc2\_5.

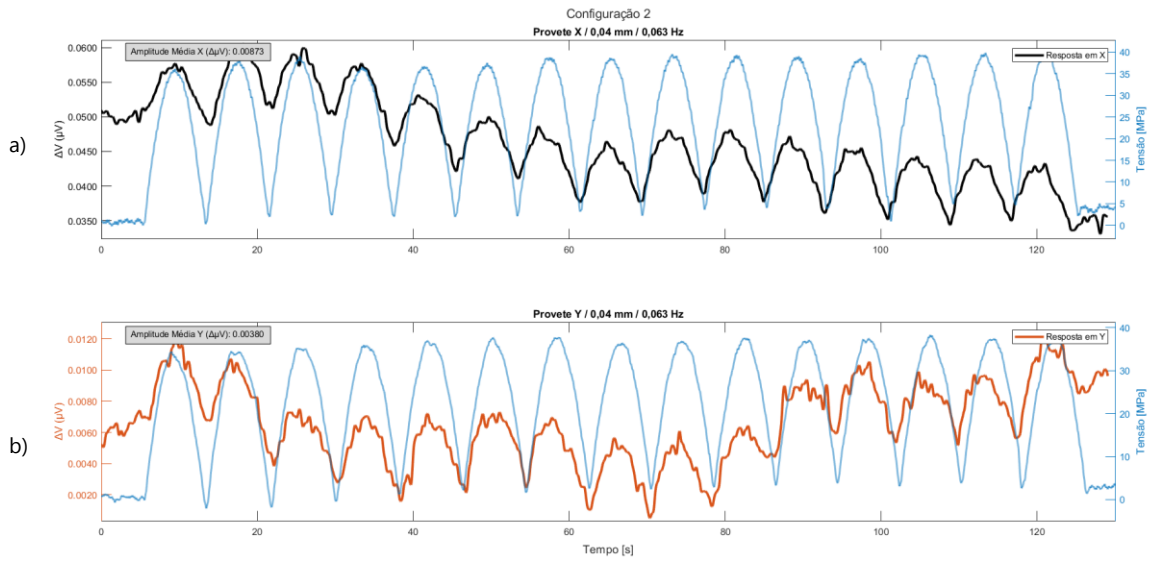


Figura A.18 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_6, b) Ensaio #yc2\_6.

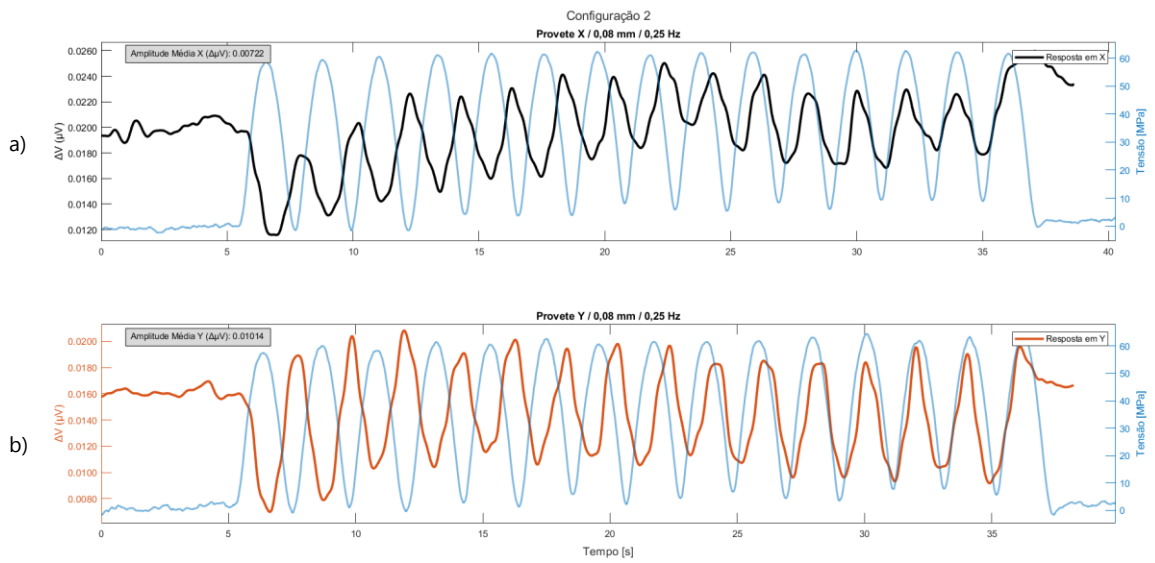


Figura A.19 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_7, b) Ensaio #yc2\_7.

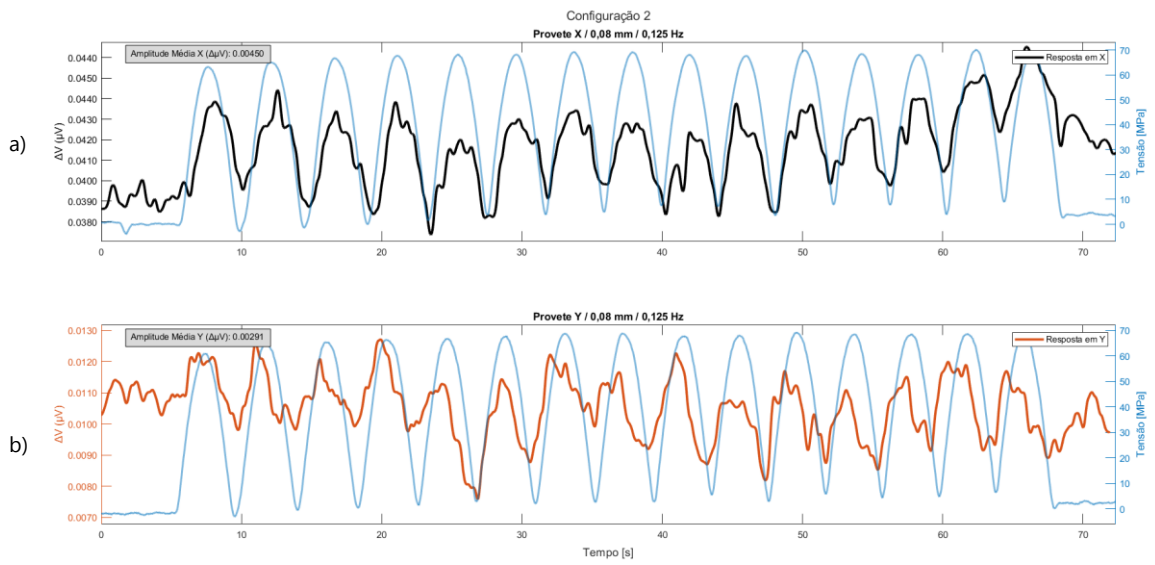


Figura A.20 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_8, b) Ensaio #yc2\_8.

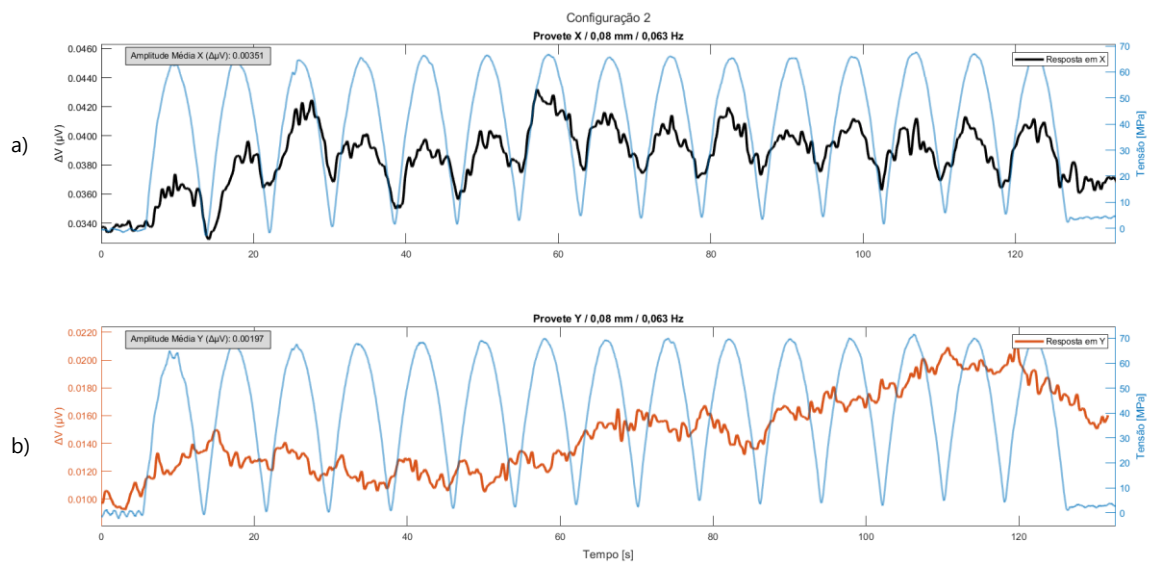


Figura A.21 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_9, b) Ensaio #yc2\_9.

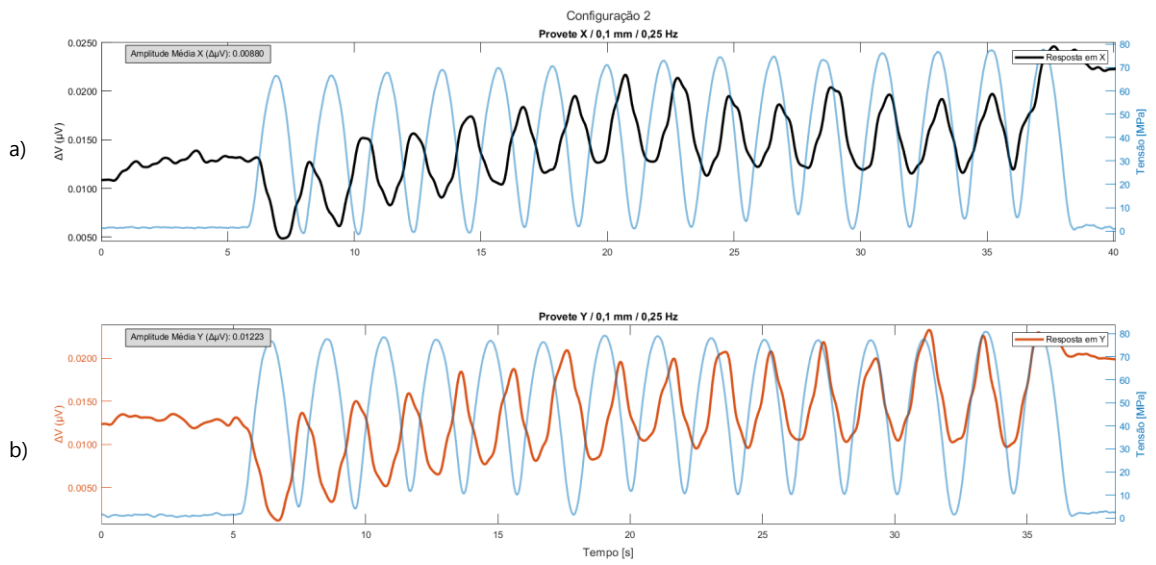


Figura A.22 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_10, b) Ensaio #yc2\_10.

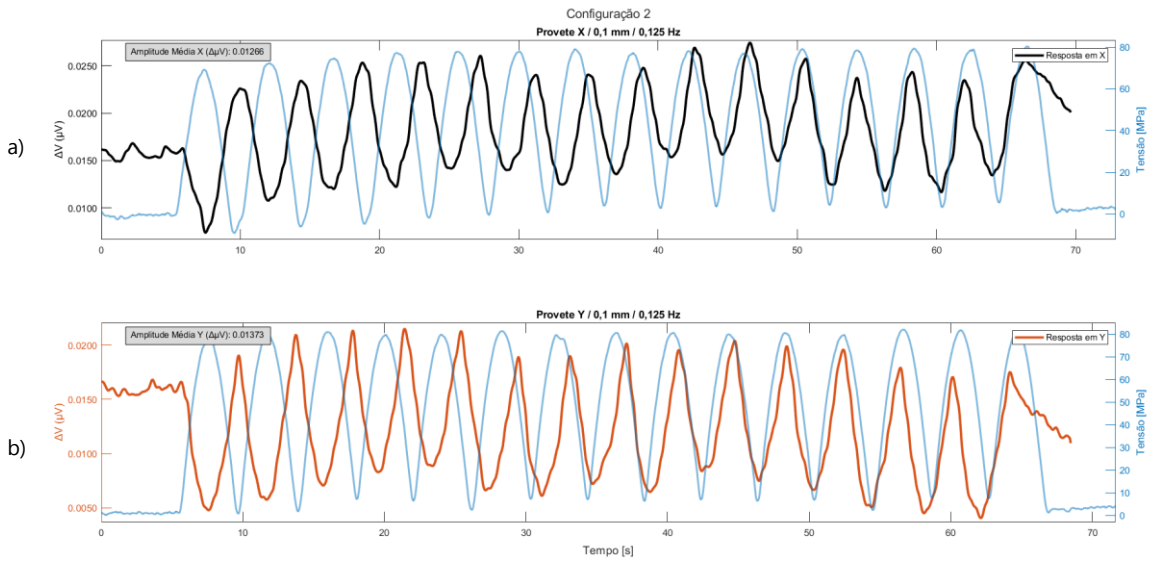


Figura A.23 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_11, b) Ensaio #yc2\_11.

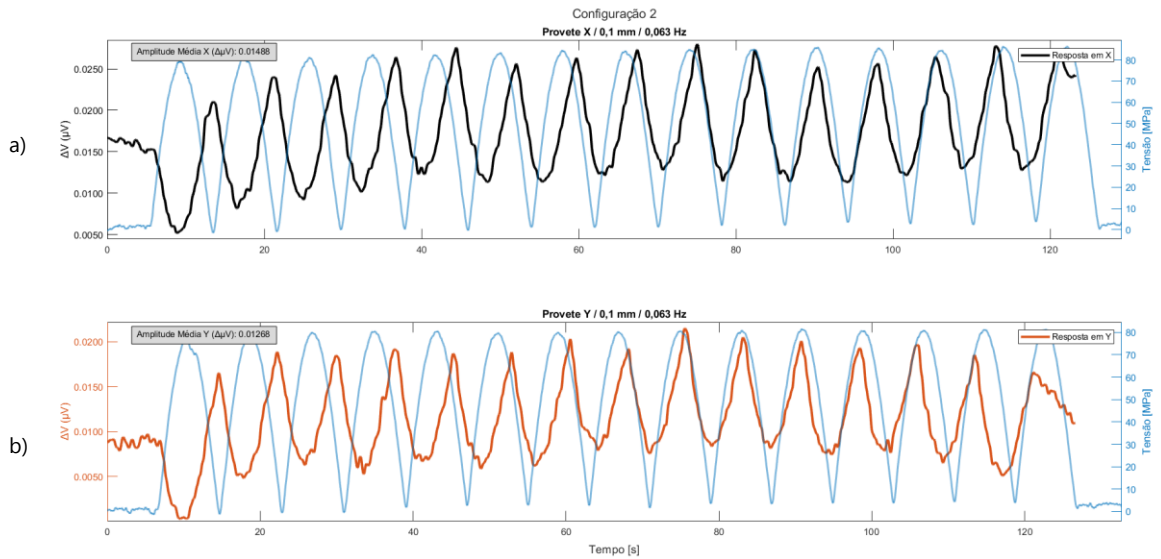


Figura A.24 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc2\_12, b) Ensaio #yc2\_12.

Figuras A.25 e A.26, referentes aos ensaios de tração uniaxial da configuração 3:

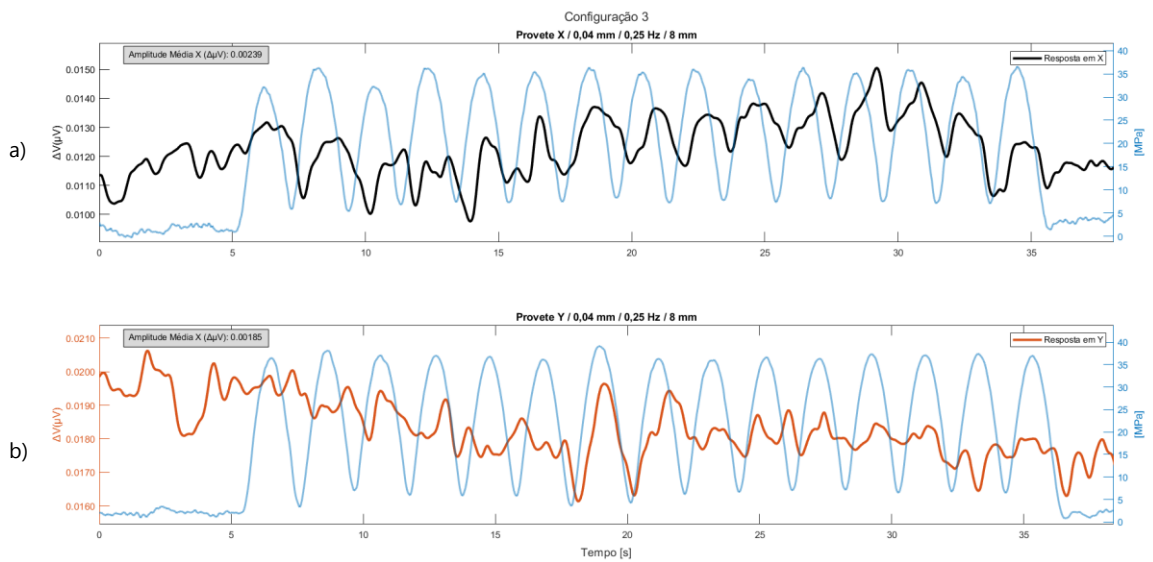


Figura A.25 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc3\_1, b) Ensaio #yc3\_1.

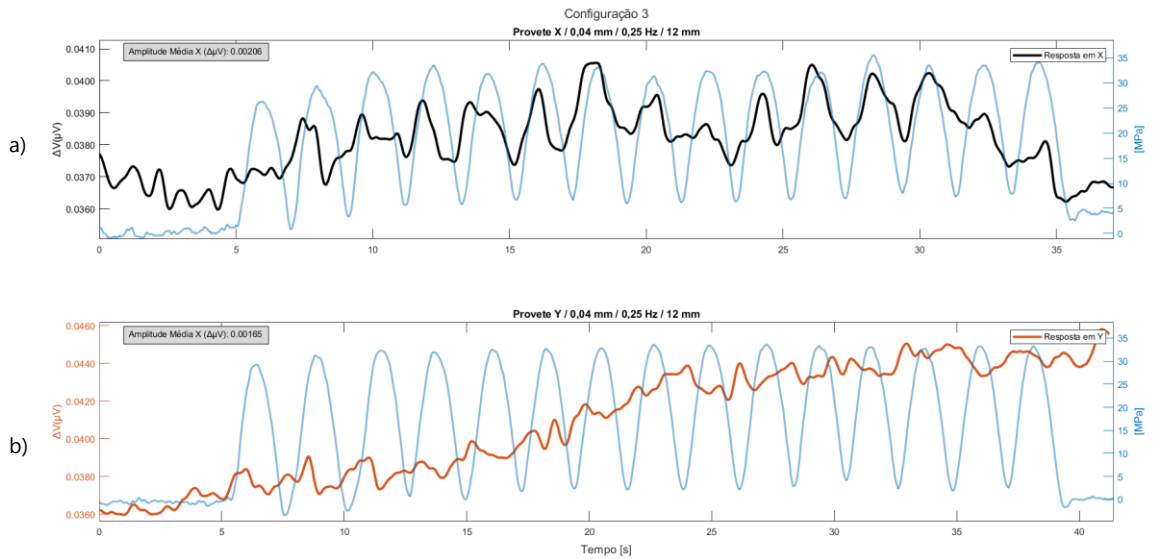


Figura A.26 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc3\_2, b) Ensaio #yc3\_2.

Figuras A.27 e A.28, referentes aos ensaios de tração uniaxial da configuração 4:

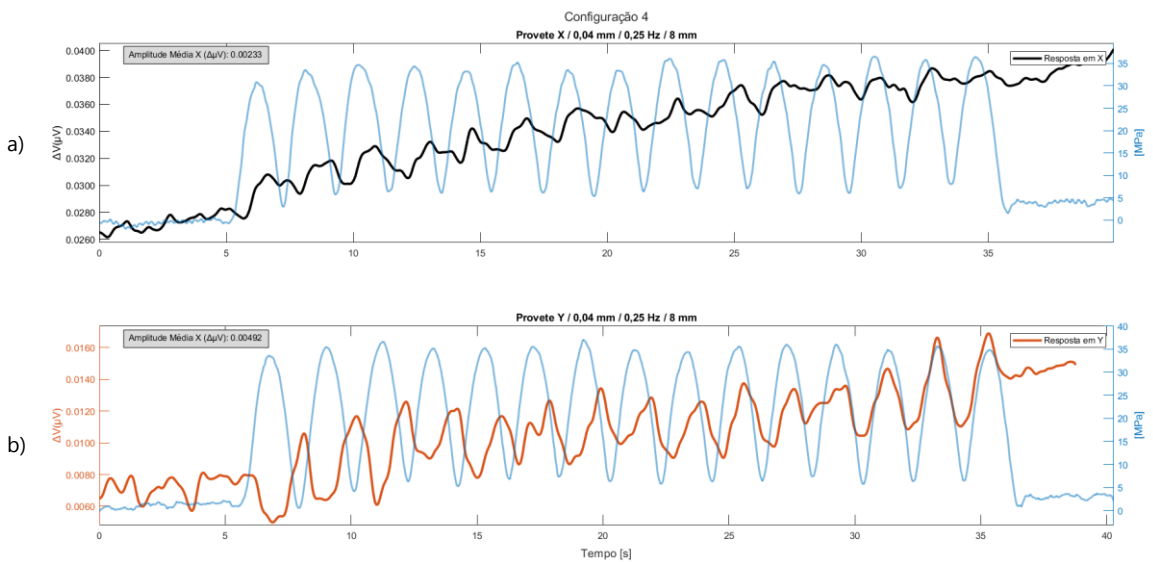


Figura A.27 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc4\_1, b) Ensaio #yc4\_1.

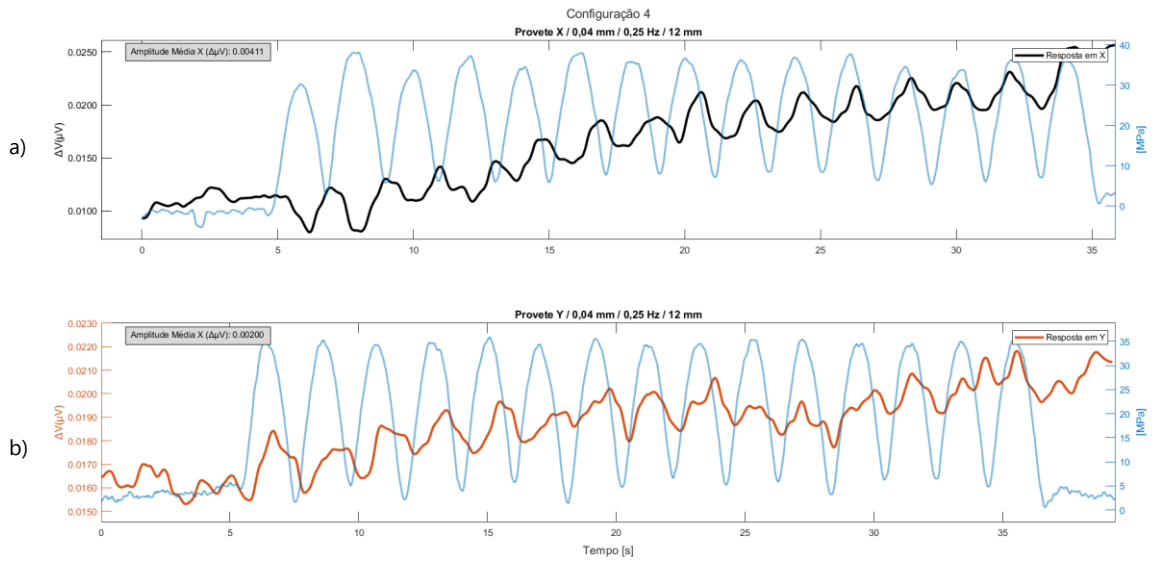


Figura A.28 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc4\_2, b) Ensaio #yc4\_2.

Figuras A.29 e A.30, referentes aos ensaios de tração uniaxial da configuração 5:

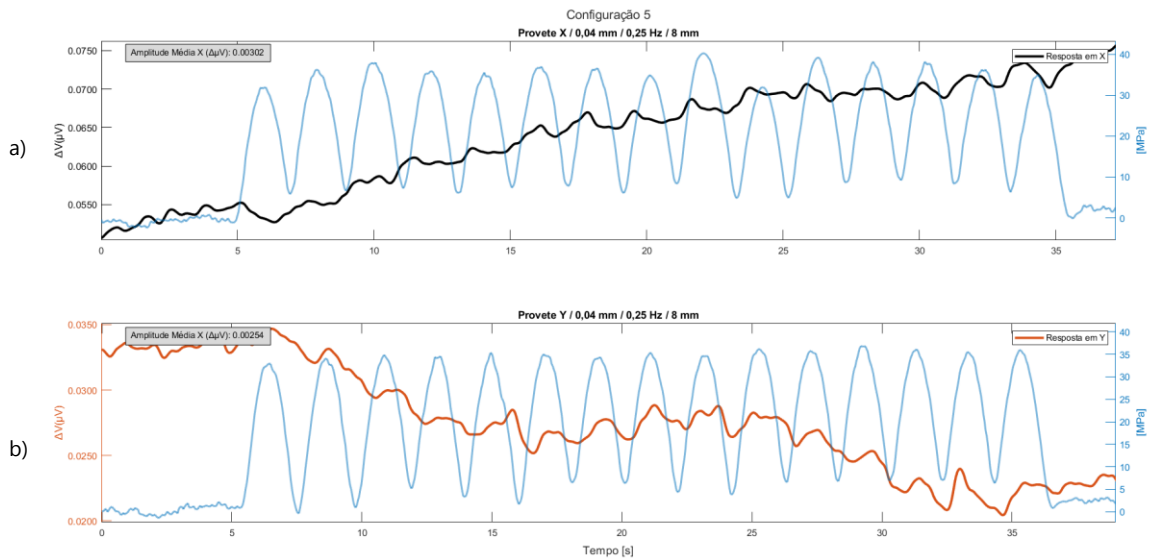


Figura A.29 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc5\_1, b) Ensaio #yc5\_1.

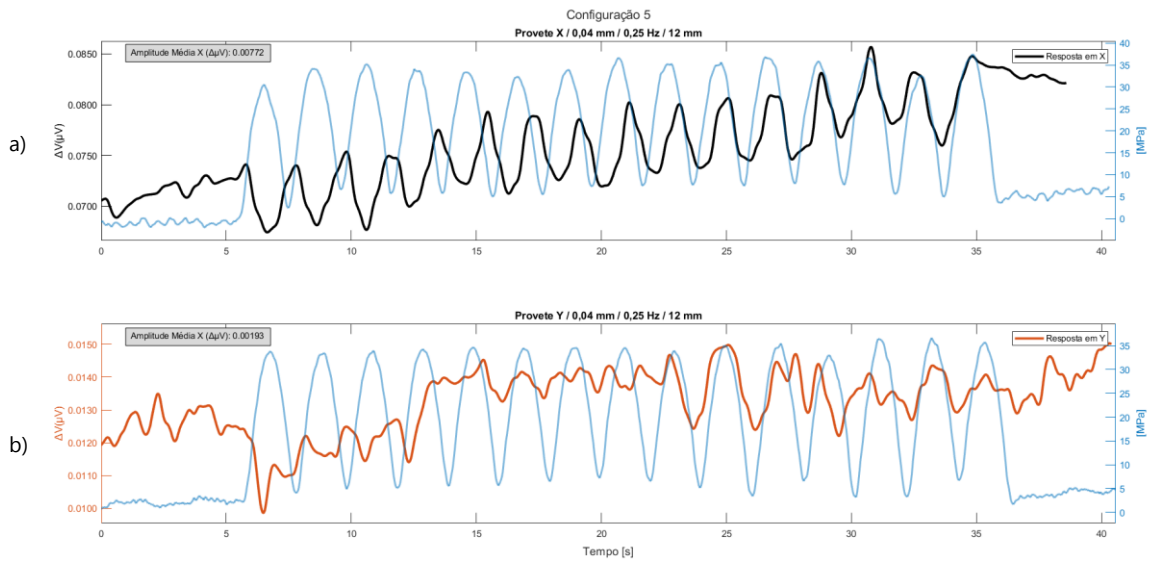


Figura A.30 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc5\_2, b) Ensaio #yc5\_2.

Figura A.31, referente aos ensaios de tração uniaxial da configuração 6:

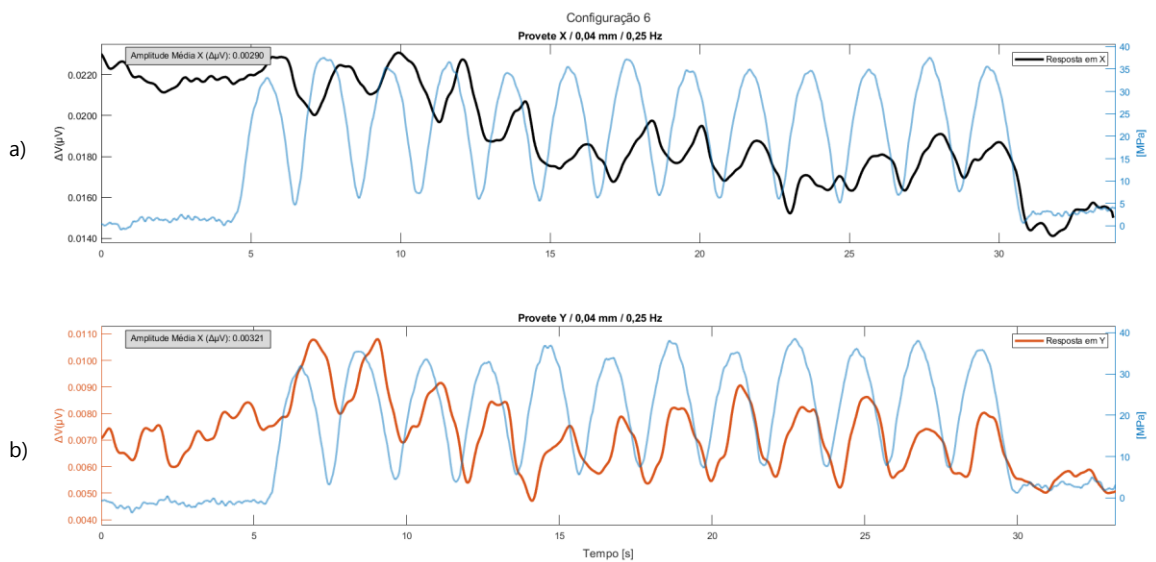


Figura A.31 - Gráfico Amplitudes: a) Ensaio #xc6\_1, b) Ensaio #yc6\_1.

