



**Sávio Wesley Oliveira Figueiredo**

**Análise da sensibilidade à deformação de  
um dispositivo ressonador de onda de  
superfície**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Arthur Martins Barbosa Braga

Coorientadora: Dra. Sully Milena Mejía Quintero

Rio de Janeiro  
Maio de 2017



**Sávio Wesley Oliveira Figueiredo**

**Análise da sensibilidade à deformação de  
um dispositivo ressonador de onda de  
superfície**

**Dissertação de Mestrado**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da PUC-Rio como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica. Aprovada pela Comissão Examinadora abaixo assinada.

**Prof. Arthur Martins Barbosa Braga**

Orientador

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dra. Sully Milena Mejia Quintero**

Coorientadora

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. José Luiz de França Freire**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Dr. Sérgio Ricardo Kokay Morikawa**

Cenpes/Petrobrás

**Dr. Roberth Waldo Angulo Llerena**

Departamento de Engenharia Mecânica – PUC-Rio

**Prof. Márcio da Silveira Carvalho**

Coordenador Setorial Centro  
Técnico Científico – PUC-Rio

Rio de Janeiro, 8 de maio de 2017

Todos os direitos reservados. É proibida a reprodução total ou parcial do trabalho sem autorização da universidade, do autor e do orientador.

### **Sávio Wesley Oliveira Figueiredo**

Graduou-se em Engenharia Mecânica na Universidade Federal do Pará – UFPa, campus Belém, em 2014. Atualmente trabalha no Laboratório de Sensores a Fibra Óptica da PUC-Rio. Tem interesse no estudo de sensores e simulação computacional, ambos aplicados à engenharia.

#### Ficha Catalográfica

Figueiredo, Sávio Wesley Oliveira

Análise da sensibilidade à deformação de um dispositivo ressonador de onda de superfície / Sávio Wesley Oliveira Figueiredo ; orientador: Arthur Martins Barbosa Braga ; co-orientadora: Sully Milena Mejia Quintero. – 2017.

98 f. : il. color. ; 30 cm

Dissertação (mestrado)–Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 2017.

Inclui bibliografia

1. Engenharia Mecânica – Teses. 2. Sensor de deformação. 3. Dispositivo OAS. 4. Sensor piezoelétrico. 5. Sensor passivo sem fio. 6. Monitoramento sem fio. I. Braga, Arthur Martins Barbosa. II. Quintero, Sully Milena Mejia. III. Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro. Departamento de Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDD: 621

Aos meus pais, Ana e Estanislau, pela confiança  
e dedicação.

Aos meus tios, Vilma e Jânio, pelo apoio e  
dedicação.

## Agradecimentos

Aos meus pais, pelo companheirismo, estímulo, educação e atenção incansáveis.

Aos meus tios, Vilma e Jânio, por sempre incentivarem minha caminhada acadêmica.

Aos meus irmãos, Wagner, Thabata e Ellen, por sempre incentivarem o meu progresso pessoal.

Ao meu orientador, Arthur Braga, pelo suporte e pela oportunidade de participar do Laboratório de Sensores a Fibra Óptica.

À minha coorientadora, Sully Quintero, pela dedicação, grande companheirismo nas atividades laboratoriais e por guiar com sabedoria o rumo do nosso trabalho.

Ao meu amigo, Victor Takahashi, pelo apoio nas atividades experimentais e pelo compartilhamento de seu conhecimento em eletrônica, que foram cruciais para o andamento deste trabalho.

Ao CNPq e à PUC-Rio, pelos auxílios concedidos, sem os quais eu não poderia realizar este trabalho.

Aos meus amigos, Luan França, Dario Prada e Hugo Gomes, pela hospitalidade na PUC-Rio.

Aos meus amigos, Reginaldo e Debora, pela companhia e demonstração de unidade diante das adversidades no decorrer da nossa estadia no Rio de Janeiro.

## Resumo

Figueiredo, Sávio Wesley Oliveira; Braga, Arthur Martins Barbosa; Quintero, Sully Milena Mejía. **Análise da sensibilidade à deformação de um dispositivo ressonador de onda de superfície**. Rio de Janeiro, 2017. 98p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

Os sensores de deformação convencionais, por exemplo, os *strain gages* resistivos e ópticos, consagrados pelo mercado, são empregados em diferentes ambientes e estruturas, oferecendo um nível de flexibilidade que permite sua integração a vários tipos de sistemas de medição. No entanto, requerem uma fonte de energia elétrica local ou não podem funcionar sem cabos, limitando o seu uso em alguns cenários, como em partes móveis de máquinas. Os dispositivos SAW (*Surface Acoustic Wave*) podem ser usados como sensores de deformação piezoelétricos, pois possuem sensibilidade à deformação e podem operar de forma passiva por meio de antenas, podendo ser integrados a sistemas de monitoramento sem fio. Seu funcionamento é baseado em ondas de superfície geradas em um meio piezoelétrico. O estado de tensão na superfície do meio altera as características dessas ondas e induz mudanças na frequência de operação. O presente trabalho analisou a sensibilidade à deformação de dispositivos SAW ressonadores feitos de quartzo ST-X com frequência central de 433,92 MHz colados com diferentes adesivos, e testou sua operação como sensores passivos sem fio. A metodologia incluiu testes de tração não destrutivos em diferentes temperaturas e também simulações com elementos finitos. Os resultados experimentais mostraram relação linear entre a variação de frequência dos ressonadores e as deformações aplicadas, concordando com a literatura. A interrogação sem fio foi bem sucedida, confirmando o grande potencial dessa tecnologia. Os resultados numéricos, combinados a um modelo teórico, foram próximos aos experimentais, validando o modelo numérico.

## Palavras-chave

Sensor de deformação; dispositivo OAS; sensor piezoelétrico; sensor passivo sem fio; monitoramento sem fio.

## Abstract

Figueiredo, Sávio Wesley Oliveira; Braga, Arthur Martins Barbosa (Adviser); Quintero, Sully Milena Mejía (Co-adviser). **Strain sensitivity analisys of a surface acoustic wave resonator device**. Rio de Janeiro, 2017. 98p. Dissertação de Mestrado – Departamento de Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro.

The conventional strain sensors, e.g., resistive and optical strain gages, established in the market, are deployed in different environments and structures, providing the flexibility of integration with different measurement systems. However, they require a local energy source to work or cables, limiting their use in some scenarios such as moving parts of machines. The SAW (Surface Acoustic Wave) devices can be used as piezoelectric strain sensors since they have sensitivity to strain, can operate passively by antennas and can be integrated to wireless monitoring systems. Its working principle is based on surface acoustic waves generated on piezoelectric medium. The stress state of the medium changes the characteristics of these waves and induces changes in the operating frequency. The present work analyzed the strain sensitivity of SAW resonators made of ST-X cut quartz operating at a central frequency of 433,92 MHz, bonded with different adhesives, and tested their operation as passive wireless sensors. The methodology included non-destructive tensile testing at different temperature, and also finite elements simulations. The experimental results showed linear relation between the frequency change and the applied strain, agreeing with the literature. The wireless interrogations was successful, confirming the great potential of this technology. The numerical results, combined to a theoretical model, matched well the experiments, validating the model.

## Keywords

Strain sensor; SAW device; piezoelectric sensor; passive wireless sensor; wireless monitoring.

## Sumário

1	Introdução	15
1.1	Justificativa	19
1.2	Objetivo geral	20
1.2.1	Objetivos Específicos	20
1.3	Estrutura da dissertação	20
2	Fundamentos teóricos	21
2.1	Os dispositivos SAW	21
2.2	Efeito piezoelétrico	24
2.2.1	Polarização e dipolo elétrico	25
2.2.2	Efeito piezoelétrico direto e inverso	27
2.2.3	Fator de acoplamento piezoelétrico $k$	30
2.2.4	Equação constitutiva da piezoeletricidade	30
2.2.5	Propriedades físicas importantes do quartzo	31
2.3	Ondas em meios elásticos	34
2.3.1	Conceitos gerais	35
2.3.2	Equação de onda em meios sólidos	36
2.3.3	Ondas em meios sólidos isotrópicos	38
2.3.4	Ondas em meios sólidos anisotrópicos	41
2.3.5	Ondas de superfície	44
3	Revisão da literatura	51
3.1	Sensibilidade à deformação dos dispositivos SAW	51
4	Metodologia experimental	59
4.1	Preparação dos espécimes	59
4.1.1	Adaptação do ressonador como um sensor de deformação	59
4.1.2	Corpo de prova	66
4.2	Aparato experimental	67
4.2.1	Descrição do procedimento experimental	69
4.3	Resultados dos experimentos	71
4.3.1	Resultados do teste de tração	71
4.3.2	Resultados do teste de sensibilidade à temperatura	82
5	Análise numérica	84
5.1	Geometria e discretização do modelo	84
5.2	Condições de contorno e materiais	85
5.3	Resultados do modelo numérico	86
6	Conclusões	94
	Referências bibliográficas	97



## Lista de figuras

Figura 1.1 - Extensômetro mecânico do tipo Berry. Fonte: DALLY e RILEY, 1965	15
Figura 1.2 - Extensômetro mecânico-elétrico do tipo <i>clip-gage</i> . Fonte: INSTRON, [s.d.]	15
Figura 1.3 - Extensômetro acústico de R. S. Jerret. Fonte: VENKATESHAN, 2015	16
Figura 1.4 - Extensômetro resistivo de um eixo, à direita um de três eixos. Fonte: OMEGA, 2017	16
Figura 1.5 – Extensômetro óptico de deformação baseado em rede de Bragg. Fonte: HBM, 2017	16
Figura 1.6 – Projeção de crescimento do mercado de MEMS até o ano de 2018. Fonte: Adaptado de JOHNSON, 2013	17
Figura 1.7 - Filtros e ressonadores SAW. Fonte: FRONTER ELECTRONICS, 2017	18
Figura 1.8 - Sensor de torque SAW. Fonte: KALININ <i>et al.</i> , 2004	18
Figura 1.9 - Sensor de pressão SAW. Fonte: NPL, 2010	18
Figura 1.10 - Sensor de deformação SAW. Fonte: HEMPEL <i>et al.</i> , 2012	18
Figura 2.1 – Dispositivo SAW <i>delay line</i> básico. Fonte: Campbell, 1989	22
Figura 2.2 – (a) Estrutura de um IDT; (b) Imagem das ondas geradas por um IDT obtida por perfilometria. Fonte: (a) Adaptado de White e Voltmer, 1965; (b) Lyncée Tec, 2016	22
Figura 2.3 – (a) Filtros e ressonadores SAW; (b) Sensor de torque SAW; (c) Sensor de pressão SAW; (d) Sensor de deformação SAW. Fonte: Adaptado de Pasternak, 2010	23
Figura 2.4 – Circuito equivalente de um SAWR. Fonte: Campbell, 1989	24
Figura 2.5 – Tipos de efeito piezoelétrico. Fonte: Adaptado de Yang, 2005	25
Figura 2.6 – Aparecimento do dipolo elétrico devido à aplicação de força numa molécula. Fonte: Adaptado de Yang, 2005	26
Figura 2.7 – Processo de polarização de um material. Fonte: Adaptado de PI US, 2017	27

Figura 2.8 – (a) Material piezoelétrico tracionado; (a) surgimento de deformação; (b) surgimento de deslocamento de carga (c). Fonte: Adaptado de Leo, 2007	28
Figura 2.9 – A aplicação de campo elétrico (a) gera deslocamento de elétrico (b) e deformação (c). Fonte: Adaptado de Leo, 2007	29
Figura 2.10 – Dois tipos de quartzo: esquerdo (levógiro) e direito (dextrógiro)	31
Figura 2.11 – Corte de uma lâmina de quartzo em pedaços menores. Fonte: Adaptado de Reeves Sound Laboratories, 1943	32
Figura 2.12 – Diferenças entre os sistemas de coordenadas adotados pelos padrões IRE 1949 e IEEE 1979. Apenas o eixo Z permanece o mesmo nos dois padrões. Fonte: Adaptado de Page, 2017	32
Figura 2.13 – Elemento de referência usado para orientar a sequência de rotações dos cortes do quartzo. Fonte: RANSLEY, 2014	33
Figura 2.14 – Vários tipos de cortes aplicados ao quartzo. Fonte: QIAJ, 2017	34
Figura 2.15 – Ilustração da perturbação gerada por (a) ondas longitudinais e (b) ondas transversais. Fonte: Adaptado de HASHIMOTO, 2000	35
Figura 2.16 – Elemento diferencial. Fonte: ROSE, 2014	36
Figura 2.17 - Curvas de vagariedade para diferentes materiais. Fonte: Adaptado de ROSE, 2014	44
Figura 2.18 – Meio semi-infinito e detalhe do sistema de coordenadas utilizado. Fonte: Adaptado de Morgan, 2007	45
Figura 2.19 – Velocidade da onda de superfície para qualquer material isotrópico. Fonte: CHEEKE, 2012	49
Figura 2.20 – Campo de deslocamento da onda de Rayleigh em um meio isotrópico. Fonte: Adaptado de Morgan, 2007	50
Figura 2.21 – Deslocamentos da onda de Rayleigh. Fonte: Adaptado de Morgan, 2007	50
Figura 3.1 – Esquema do oscilador equipado com um dispositivo SAW. Fonte: ROBERT, LABRUNIE, BOREL, 1973	51
Figura 3.2 – Alguns dos resultados obtidos por Robert <i>et al.</i> Fonte: ROBERT, LABRUNIE, BOREL, 1973	52

Figura 3.3 – Esquema do experimento de medição de sensibilidade à deformação de flexão. Fonte: CULLEN, REEDER, 1975	52
Figura 3.4 – (a) Esquema do experimento de flexão direto no substrato; (b) Efeito combinado de aumento da velocidade; (b) Efeito combinado de redução da velocidade. Fonte: NALAMWAR, EPSTEIN, 1976	53
Figura 3.5 – (a) Esquema do experimento estático de determinação da sensibilidade do quartzo ST à deformação; (b) sensibilidade do quartzo ST à deformação em várias direções. Fonte: SINHA <i>et al.</i> , 1985	54
Figura 3.6 – (a) Esquema do experimento dinâmico de determinação da sensibilidade do quartzo ST à deformação; (b) sensibilidade longitudinal; (c) sensibilidade transversal. Fonte: SINHA; LOCKE, 1987	55
Figura 3.7 – Configuração do sensor usada por Varadan <i>et al.</i> (1997). Fonte: Adaptado de Varadan <i>et al.</i> (1997)	56
Figura 3.8 – (a) Sensor SAWR; (b) Sinais enviados e recebidos pelo <i>transciever</i> . Fonte: DONOHOE <i>et al.</i> (2011)	57
Figura 3.9 – Medição sem fio e diferencial para compensar os efeitos da temperatura. Fonte: FU <i>et al.</i> , 2014	57
Figura 3.10 – Sensores colados à ferramenta de brochamento. Fonte: Adaptado de STONEY <i>et al.</i> (2014)	58
Figura 3.11 – (a) SAW com identificação por OFC; (b) Comparação com um <i>strain gage</i> resistivo. Fonte: HUMPHRIES; MALOCHA (2015)	58
Figura 4.1 – (a) Ressonador encapsulado fornecido pela HIB; (b) Curva do parâmetro $S_{11}$	60
Figura 4.2– Capsula aberta mostrando o ressonador modelo 1 fixado com adesivo e as conexões elétricas produzidas pelo processo de wire <i>bonding</i>	61
Figura 4.3 – Fotos em microscópio de reflexão com ampliação de 5X. (a) SAWR modelo 1; (b) SAWR modelo 2	61
Figura 4.4 – Imagem ampliada em 50X mostrando detalhes do transdutor interdigital. Fonte: ESCOBAR, 2016	62
Figura 4.5 – Imagens de microscópio com ampliação de 5X. (a) Camada de adesivo na superfície inferior do SAWR modelo 1; (b) Camada de adesivo removida por raspagem e acetona	62

Figura 4.6 - Posicionamento do ressonador sobre o adesivo. SAW modelo 1 no Espécime 3, utilizando o adesivo 3	63
Figura 4.7 – Posicionamento do ressonador sobre o adesivo. SAW modelo 2 no Espécime 6, utilizando o adesivo 4	64
Figura 4.8 – Detalhes do aparato através do qual aplica-se a pressão de colagem	64
Figura 4.9 – Aplicação de pressão de colagem sobre o ressonador. (a) no Espécime 3; (b) no Espécime 6	65
Figura 4.10 – Câmara climática Vötsch VCL 4010. Fonte: VÖTSCH, 2017	65
Figura 4.11 – Detalhe da aplicação de tinta condutiva. (a) no Espécime 3; (b) no Espécime 4	66
Figura 4.12 – Todos os espécimes usados nos experimentos	67
Figura 4.13 – Visão geral dos equipamentos do aparato experimental	68
Figura 4.14 – Detalhes do Espécime 3 montado na máquina de tração	69
Figura 4.15 – Ciclo de carregamento executado pela máquina de tração	70
Figura 4.16 – Energia refletida $S_{11}$ dos ressonadores dos Espécimes 1 e 2	72
Figura 4.17 - Variação de frequência do ressonador dos Espécimes 1 e 2 em função da deformação longitudinal	73
Figura 4.18 – Variação da frequência em patamares constantes de força de tração	74
Figura 4.19 - Variação de frequência do ressonador do Espécime 3 entre 30 e 70 °C em função da deformação longitudinal	75
Figura 4.20 – Comportamento da sensibilidade de ressonador do Espécime 3 em função da temperatura	75
Figura 4.21 – Energia refletida $S_{11}$ dos ressonadores longitudinal e transversal	76
Figura 4.22 - Variação de frequência dos ressonadores montados perpendicularmente entre si no Espécime 4	77
Figura 4.23 – Sensibilidade dos ressonadores longitudinal ( $s_L$ ) e transversal ( $s_T$ )	78

Figura 4.24 – Variação de frequência do ressonador do Espécime 5 em função da deformação longitudinal	78
Figura 4.25 – (a) Parâmetro $S_{11}$ no funcionamento com e sem fio; (b) Detalhe das antenas usadas na operação sem fio	79
Figura 4.26 – Variação de frequência do ressonador do Espécime 6 interrogado via cabo e via antena	80
Figura 4.27 – Reunião as retas de ajuste linear de todos os espécimes em temperaturas entre 25 e 30 °C	81
Figura 4.28 – Relação entre a temperatura e a frequência de ressonância do SAWR	83
Figura 5.1 – Geometria do modelo numérico	84
Figura 5.2 – Diferentes malhas e utilizadas na discretização do modelo	85
Figura 5.3 – Condições de contorno consideradas no modelo	86
Figura 5.4 – Matriz de constantes elásticas do quartzo. Unidades: Pa	86
Figura 5.5 – Estudo de convergência de malha	87
Figura 5.6 – Campo de deformação $\epsilon_{xx}$ do modelo com o SAWR longitudinal. Máxima deformação sobre o SAWR foi $\epsilon_{11} = 378,51 \mu\epsilon$	88
Figura 5.7 - Campo de deformação $\epsilon_{xx}$ do modelo com o SAWR transversal. A mínima deformação sobre o SAWR foi $\epsilon_{11} = -32,88 \mu\epsilon$	88
Figura 5.8 – Distribuições de tensão sobre o SAWR longitudinal. (a) tensão $T_{11}$ ao longo da linha “a”; (b) tensão $T_{22}$ ao longo da linha “b”	89
Figura 5.9 - Distribuições de tensão sobre o SAWR transversal. (a) tensão $T_{11}$ ao longo da linha “a”; (b) tensão $T_{22}$ ao longo da linha “b”	89
Figura 5.10 – Comparação entre os modelos numéricos e o experimento com o Espécime 4	90
Figura 5.11 – Distribuições da deformação $\epsilon_{xx}$ ao longo da longitudinal da área útil do corpo de prova	92
Figura 5.12 - Distribuições da deformação $\epsilon_{yy}$ ao longo da transversal da área útil do corpo de prova	93

# 1

## Introdução

A medição de deformação é uma demanda bastante antiga no ambiente da engenharia. Máquinas e estruturas podem ser monitoradas com o auxílio de vários tipos de sensores, podendo ser de deformação, pressão, temperatura, aceleração e etc. Porém, o conhecimento do estado de deformação pode fornecer acesso direto ao estado de tensão do objeto em análise; dessa forma, o responsável pela análise dos dados tem em mãos elementos suficientes para inferir sobre a sua conformidade.

Ao longo da história foram desenvolvidos diversos dispositivos e técnicas de medição de deformação. Na literatura, são encontrados divididos de acordo com o princípio de operação, podendo ser mecânicos, acústicos, ópticos e elétricos (DALLY e RILEY, 1965). Cada tipo de dispositivo medidor de deformação – comumente chamado de extensômetro – apresenta vantagens características e se encaixa em cenários ideais de uso. No entanto, os extensômetros resistivos – da classe elétrica – foram os que se adaptaram à maior quantidade de cenários de medição e apresentaram melhores características, sendo, por conta disso mais difundidos no mercado. As figuras 1.1, 1.2, 1.3 e 1.4 mostram alguns dos diversos tipos de extensômetro já criados.

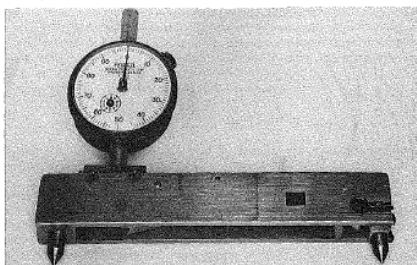


Figura 1.1 - Extensômetro mecânico do tipo Berry. Fonte: DALLY e RILEY, 1965



Figura 1.2 - Extensômetro mecânico-elétrico do tipo *clip-gage*. Fonte: INSTRON, [s.d.]

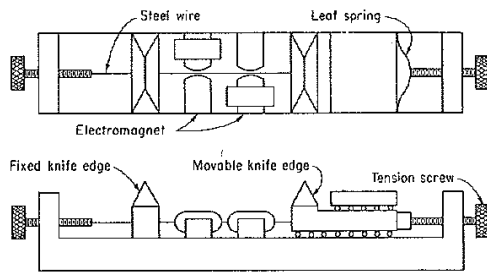


Figura 1.3 - Extensômetro acústico de R. S. Jerret. Fonte: VENKATESHAN, 2015

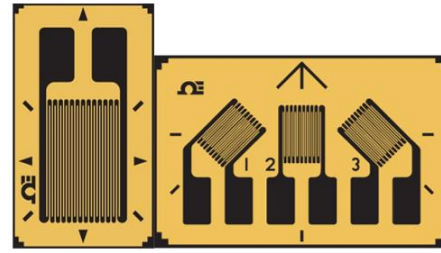


Figura 1.4 - Extensômetro resistivo de um eixo, à direita um de três eixos. Fonte: OMEGA, 2017

Recentemente, em 1995, foi desenvolvido o extensômetro a fibra óptica baseado em rede de Bragg (figura 1.5). Este apresenta muitas qualidades, que são robustez operacional, alta resolução e sensibilidade, possibilidade de vários sensores por fibra (multiplexação) e funcionamento a distâncias de até 50 km (KREUZER, 2006).

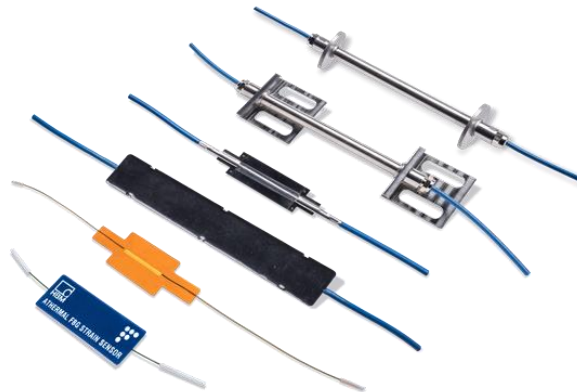


Figura 1.5 – Extensômetro óptico de deformação baseado em rede de Bragg. Fonte: HBM, 2017

Uma demanda ainda parcialmente atendida é a medição sem fio de deformação. Em situações nas quais o alvo da medição é um componente móvel (eixos, engrenagens e etc), os sistemas tradicionais com fios não são viáveis, fazendo-se necessária a adoção de sistemas *wireless*. Existem sistemas desse tipo para uso com *strain gages* resistivos disponibilizados pelas empresas Lord Microstrain, Mantracourt e Intesil, por exemplo, que permitem conectar sensores a redes operadas a partir distâncias variadas. Os *strain gages* necessitam de fonte local de energia elétrica geralmente fornecida por baterias cuja reposição deve ser periódica. No caso de medições contínuas e em longo prazo, a reposição das

baterias pode se tornar uma rotina incômoda, pois pode requerer a parada ou interdição de máquinas e estruturas.

Essa necessidade de reposição de baterias pode ser eliminada se sensores passivos foram adicionados aos sistemas de medição. Os sensores baseados em Sistemas Microeletromecânicos (do inglês, *Microelectromechanical Systems* - MEMS) são uma alternativa aos sensores tradicionais e têm grande potencial de expansão. Os sensores MEMS podem ser projetados para consumir pequenas quantidades de energia e, ao mesmo tempo, serem passivos – sem uso de um recurso local de energia. Essas características são atraentes, pois abrem caminho para o desenvolvimento de sistemas de medição com menores exigências de manutenção.

Segundo previsões feitas por Johnson (2013), o mercado de dispositivos MEMS tem perspectiva de expansão de U\$ 12 bilhões em 2012 para U\$ 22 bilhões em 2018. Esse crescimento se deu principalmente devido à flexibilidade de uso e ao preço de produção reduzido. A figura 1.6, mostra a composição desse mercado e a projeção de crescimento. Sensores de pressão e aceleração estão entre os mais consumidos. Dispositivos OAS (Onda Acústica de Superfície), em inglês *Surface Acoustic Wave* (SAW), fazem parte do grupo dos MEMS, sendo representados pelos osciladores, filtros e sensores de pressão.

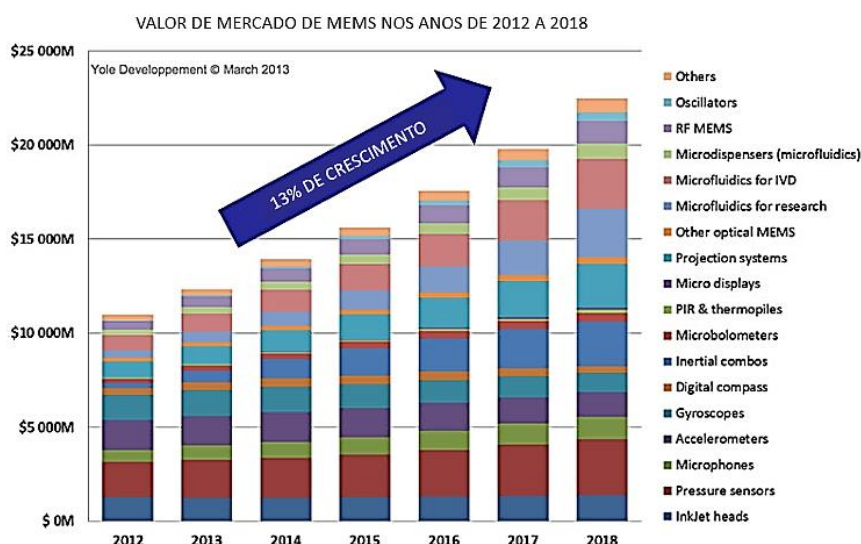


Figura 1.6 – Projeção de crescimento do mercado de MEMS até o ano de 2018. Fonte: Adaptado de JOHNSON, 2013



Os dispositivos SAW são candidatos proeminentes a sensores sem fio. Inicialmente empregados em circuitos eletrônicos como osciladores e filtros, os dispositivos SAW continuam alvo de pesquisas visando a sua aplicação como sensores de deformação, aceleração, pressão, temperatura, umidade e espécies químicas. Construídos com materiais piezoelétricos, sendo o quartzo o material mais usado, podem ser tolerantes a temperaturas elevadas; isso, combinado à possibilidade de operação sem fio e passiva, faz dos dispositivos SAW uma possível solução de sensor de deformação para ambientes severos e remotos, como o de um poço de petróleo ou partes móveis de um motor à combustão interna. As figuras 1.7, 1.8, 1.9 e 1.10 mostram alguns desses dispositivos, tanto os destinados ao uso em circuitos eletrônicos quanto os projetados para serem sensores.

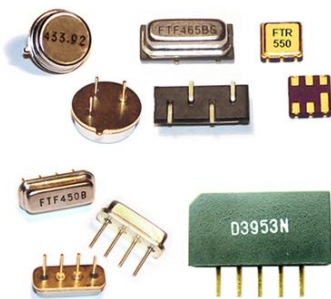


Figura 1.7 - Filtros e ressonadores SAW. Fonte: FRONTER ELECTRONICS, 2017

(a)



Figura 1.8 - Sensor de torque SAW. Fonte: KALININ *et al.*, 2004

(b)

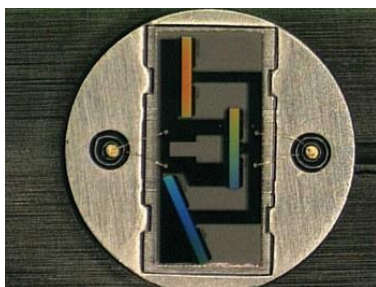


Figura 1.9 - Sensor de pressão SAW. Fonte: NPL, 2010

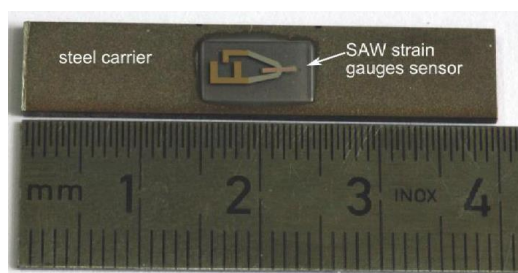


Figura 1.10 - Sensor de deformação SAW. Fonte: HEMPEL *et al.*, 2012

Este trabalho relata um estudo do comportamento da sensibilidade à deformação de dispositivos ressonadores SAW (ou SAWRs) colados sobre corpos de prova para ensaio mecânico não-destrutivo de tração. A deformação transferida

aos dispositivos SAWR induz mudanças em seu parâmetro de funcionamento, a frequência de ressonância. A monitoração dessa frequência e sua relação com o estado de deformação do corpo de prova fornece dados sobre a sensibilidade, precisão e faixa de operação dos SAWR.

O conhecimento dessas características é importante para o posterior desenvolvimento de sistemas de interrogação com e sem fio dos sensores de deformação SAWR.

## **1.1**

### **Justificativa**

Os dispositivos ressonadores de onda acústica de superfície, também conhecidos como dispositivos SAWR, podem ser projetados para apresentar sensibilidade à deformação. Seu baixo consumo de energia elétrica, aliado ao baixo custo de fabricação, tamanho reduzido e capacidade de operação passiva, o tornam uma excelente alternativa para medição de deformação em aplicações onde esses fatores são relevantes, tais como em partes móveis de máquinas e monitoração contínua da integridade de estruturas, por exemplo.

Os sensores de deformação convencionais normalmente demandam mais energia e não operam de forma passiva, sendo necessário cabeamento. Seu uso em ambientes agressivos, com alta temperatura também é limitado, pois sua eletrônica associada é delicada.

O presente trabalho aborda a validação do uso de SAWRs como sensores de deformação sem fio usando a metodologia de comparações entre experimentos e modelos numéricos e teóricos. Esse estudo é importante para se conhecer as nuances da teoria, instalação e interrogação desse tipo de sensor. Os benefícios dessa validação são a criação de modelos numéricos mais confiáveis, capazes de guiar futuros desenvolvimentos de sensores não só de deformação, mas de outras grandezas associadas, como pressão, aceleração, torque e etc.

## 1.2

### Objetivo geral

O objetivo geral desta dissertação de mestrado é validar o uso de um ressonador baseado em ondas acústicas (SAW) como sensor de deformação com possibilidade de operação sem fio.

#### 1.2.1

### Objetivos Específicos

- ✓ Estabelecer o procedimento de instrumentação que garanta estabilidade elétrica e mecânica;
- ✓ Selecionar o adesivo apropriado, que proporcione medições com baixa histerese para maiores deformações, assim como maior sensibilidade;
- ✓ Caracterizar o comportamento do sensor em função da temperatura até valores próximos da temperatura máxima de operação do ressonador (80 °C);
- ✓ Testar e validar a operação sem fio do sensor de deformação e
- ✓ Analisar o comportamento mecânico do sistema usando um modelo de elementos finitos em conjunto com um modelo teórico.

## 1.3

### Estrutura da dissertação

Este trabalho é dividido em 6 capítulos. No capítulo 2, o leitor é apresentado aos dispositivos SAW, aos conceitos básicos de piezoelectricidade e às ondas em meios sólidos.

No capítulo 3, é apresentada uma revisão bibliográfica de dispositivos SAW e sua sensibilidade à deformação. Também são apresentados sensores propostos por outros autores.

No capítulo 4, são apresentados os detalhes e os resultados dos experimentos realizados para a validação do sensor SAWR de deformação.

No capítulo 5, são apresentados os modelos numéricos em elementos finitos usados na simulação dos experimentos de tração.

Finalmente, o capítulo 6 contém as ideias conclusivas dessa validação e as sugestões para trabalhos futuros.

## 2 Fundamentos teóricos

Este capítulo é dedicado à apresentação dos conceitos básicos necessários para um melhor entendimento sobre o funcionamento dos dispositivos SAW. Inicia-se com uma apresentação sobre os dispositivos SAW e o mecanismo de geração de ondas. Comenta-se sobre os materiais piezoelétricos e os princípios físicos que permeiam o assunto. Em seguida, apresentam-se conceitos sobre ondas mecânicas de corpo em meio sólido semi-infinito isotrópico e anisotrópico, e demonstra-se a equação da onda matematicamente. Finaliza-se, então, com a abordagem sobre as ondas de superfície e sua formulação matemática para meios isotrópicos.

### 2.1 Os dispositivos SAW

Os dispositivos acústicos baseados em ondas de superfície são utilizados há bastante tempo, desde a década de 60, na indústria eletrônica, inicialmente em aplicações de radar e, mais recentemente, em circuitos osciladores e filtros empregados em telecomunicações (CAMPBELL, 1989) (MORGAN, 2007). Seu funcionamento é baseado em ondas acústicas que se propagam na superfície do substrato piezoelétrico, normalmente o quartzo ST-X. Elas são geradas no próprio substrato com o auxílio de um transdutor interdigital ou, em inglês, *interdigital transducer* (IDT), responsável por transformar a energia elétrica em energia mecânica e vice-versa, na forma de ondas acústicas. Um desenho esquemático do dispositivo é mostrado na figura 2.1.

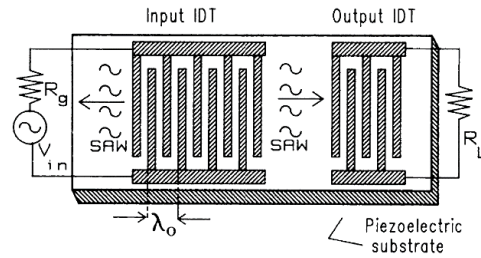


Figura 2.1 – Dispositivo SAW delay line básico. Fonte: Campbell, 1989

O IDT, apresentado pela primeira vez por White e Voltmer (1965), é uma estrutura composta por eletrodos metálicos ligados de maneira intercalada a dois barramentos (figura 2.2(a)). Quando ligado a uma fonte de corrente alternada (AC), o IDT gera ondas que se propagam na direção perpendicular aos eletrodos em ambos os sentidos (figura 2.2(b)). A geometria do IDT determina o comprimento de onda gerado.

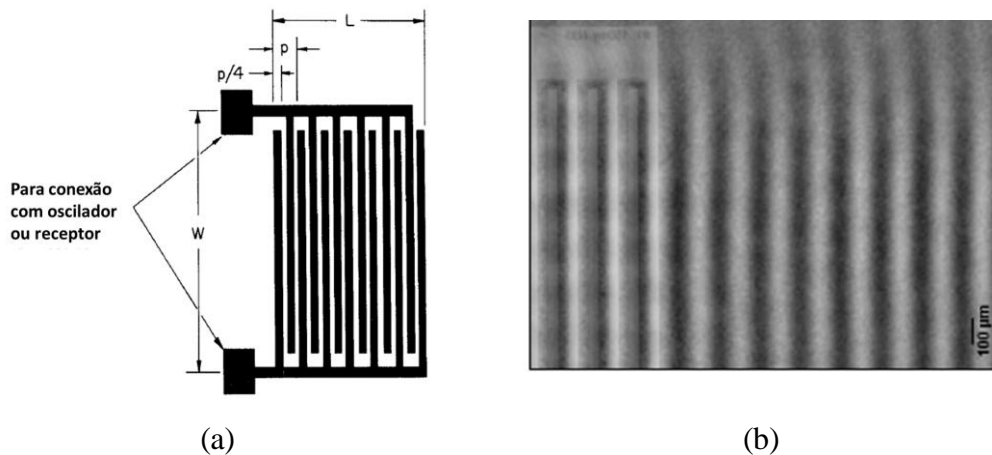


Figura 2.2 – (a) Estrutura de um IDT; (b) Imagem das ondas geradas por um IDT obtida por perfilometria. Fonte: (a) Adaptado de White e Voltmer, 1965; (b) Lyncée Tec, 2016

A intensidade das ondas é maior quando a frequência de excitação do IDT é tal que o comprimento da onda excitada é igual período  $p$ . Assim, a frequência de operação do dispositivo é dada por:

$$f = \frac{c_R}{p} \quad (2.1)$$

onde  $c_R$  é a velocidade de fase da onda de superfície, e  $p$  é o período/afastamento entre os eletrodos do IDT.

Duas configurações básicas do dispositivo são possíveis: *delay line* (figura 2.3(a) e (b)) e ressonador (SAWR) (figura 2.3(c)). Ambos podem funcionar ligados a circuitos osciladores ou funcionar de forma passiva. Neste trabalho, são usados dispositivos com configuração de ressonadores de uma porta, que possuem uma cavidade ressonante, na qual as ondas produzidas pelo IDT são refletidas em estruturas periódicas chamadas de *gratings* e interferem entre si de maneira construtiva, estabelecendo um estado com onda estacionária na superfície (CAMPBELL, 1989). A ressonância ocorre quando o comprimento de onda excitado no IDT é igual ao período ( $p$ ) dos eletrodos.

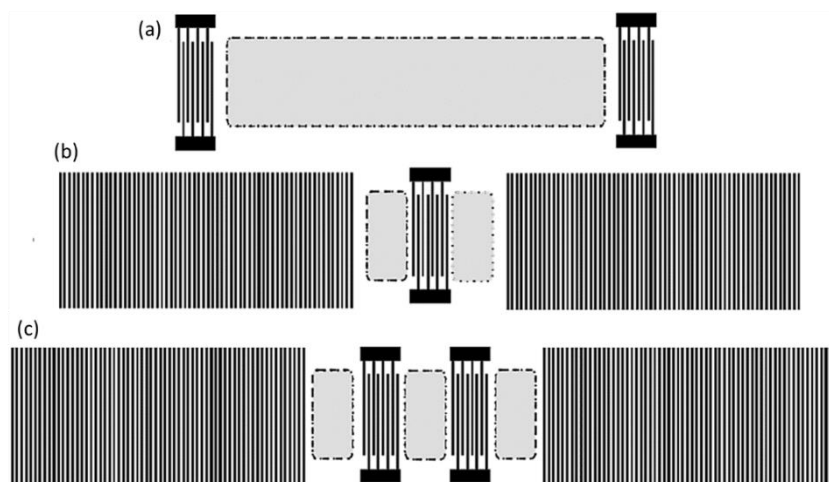


Figura 2.3 – (a) Filtros e ressonadores SAW; (b) Sensor de torque SAW; (c) Sensor de pressão SAW; (d) Sensor de deformação SAW. Fonte: Adaptado de Pasternak, 2010

O equivalente elétrico de um dispositivo SAWR de uma porta é mostrado na figura 2.4. Trata-se de um oscilador LRC de Butterworth-Van Dyke, que possui duas ressonâncias, uma em série e outra em paralelo. A ressonância em série é a que interessa para o caso do SAWR. Os parâmetros do circuito  $R_s$ ,  $L_s$  e  $C_s$  são a resistência, indutância e capacitância equivalentes do SAWR na frequência de ressonância.  $C_T$  é a capacitância fixa do SAWR, independente da frequência de operação.

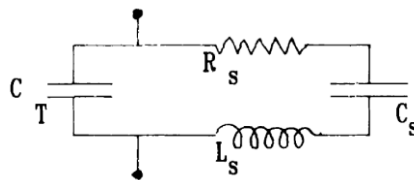


Figura 2.4 – Circuito equivalente de um SAWR. Fonte: Campbell, 1989

Recentemente, o interesse nesses dispositivos aumentou devido à sua capacidade de servir como sensores. A facilidade de se introduzir e medir mudanças nas ondas de superfície dos SAWR faz com que eles sejam atraentes no campo do sensoramento. A frequência de um SAWR pode mudar em função de vários agentes. A exemplo, já foram apresentados sensores químicos, biológicos, de pressão, temperatura, aceleração, torque e deformação. Seu tamanho reduzido, baixo consumo de energia, capacidade de operar passivamente e sem fio e baixo custo de produção são seus principais atrativos.

A variação fracional da frequência de operação (eq. (2.1)) do ressonador, em função de suas variáveis é dada por

$$\frac{\Delta f}{f} = -\frac{\Delta p}{p} + \frac{\Delta c_R}{c_R}. \quad (2.2)$$

Ela indica que, para gerar mudança na frequência de ressonância, deve-se, de alguma maneira, induzir alterações no período  $p$  e na velocidade de propagação  $c_R$ . A presença de tensões/deformações na superfície do SAWR induz os dois tipos de alteração. São essas duas alterações os fatores considerados na avaliação da sensibilidade à deformação dos dispositivos SAW.

## 2.2

### Efeito piezoelétrico

Existe um grupo de materiais chamado de inteligente, que apresenta acoplamento entre múltiplos domínios físicos. Alguns podem converter energia térmica em deformação mecânica (termomecânicos); outros podem sofrer deformações quando na presença de campos magnéticos (magnetostrictivo). Os materiais piezoelétricos fazem parte desse grupo, pois apresentam acoplamento entre os domínios mecânico e elétrico. A propriedade que se manifesta nesses

materiais é chamada de piezoelectricidade, observada pela primeira vez pelos irmãos Curie (1880), quando notaram o aparecimento de cargas positivas e negativas na superfície de cristais quando estes eram submetidos a pressão em diferentes direções. O fenômeno observado pelos irmãos Curie é o agora denominado efeito piezoelétrico direto, cuja definição é o deslocamento de cargas elétricas no material quando uma força é aplicada sobre ele (figura 2.5(a)). Também existe o efeito piezoelétrico inverso, definido como o aparecimento de deformação no corpo após este ser submetido a um campo elétrico (figura 2.5(b)). Os efeitos direto e inverso revelam que existe um acoplamento eletromecânico no material, que é bastante útil na fabricação de atuadores e sensores (LEO, 2007).

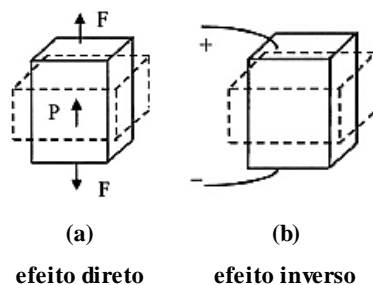


Figura 2.5 – Tipos de efeito piezoelétrico. Fonte: Adaptado de Yang, 2005

A seguir são apresentados alguns conceitos básicos sobre piezoelectricidade, que serão úteis no entendimento do funcionamento de dispositivos piezoelétricos.

### 2.2.1 Polarização e dipolo elétrico

Quando um material dielétrico é submetido a um campo elétrico, há uma redistribuição das cargas elétricas de suas moléculas (YANG, 2005), induzindo a sua polarização. A figura 2.6 mostra um modelo simples de molécula. O centro de gravidade das cargas negativas coincide com das cargas positivas, o que resulta no cancelamento recíproco dos efeitos das cargas negativas e positivas, e aparecimento de neutralidade da molécula (VIVES; SOARES, 2008). Quando uma força é aplicada sobre a molécula, há deformação de sua estrutura inicial, causando separação entre os centros de gravidade das cargas positivas e negativas, e indução de um dipolo elétrico  $P$ .



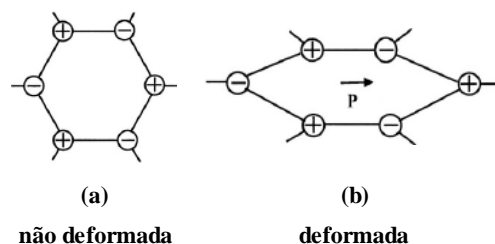


Figura 2.6 – Aparecimento do dipolo elétrico devido à aplicação de força numa molécula.  
Fonte: Adaptado de Yang, 2005

A piezoelectricidade está presente em alguns materiais naturalmente, porém os materiais mais utilizados atualmente são sintéticos. Geralmente materiais em pó são misturados e conformados a altas temperaturas na faixa de 1200 a 1500 °C. O resultado é uma cerâmica cujo alinhamento dos dipolos ainda é bastante aleatório, resultando em pouca propriedade piezoeletrica. Para aumentar a piezoelectricidade, submete-se o material a um processo chamado de polarização, que consiste no alinhamento dos dipolos do material via aplicação de campos elétricos intensos e a temperaturas acima da temperatura de Curie do material (temperatura acima da qual as propriedades piezoeletricas são perdidas). No material aquecido, dipolos podem girar mais facilmente, alinhando-se com o forte campo elétrico aplicado (LEO, 2007).

Após o resfriamento e retirada do campo elétrico, o material passa a exibir piezoelectricidade mais pronunciada. Os dipolos em seu interior estão alinhados preferencialmente em uma direção de polarização, que foi a direção de aplicação do campo elétrico. Esse alinhamento não é perfeito, existindo ainda a possibilidade de giro dos dipolos sob influência de campo elétrico. A partir de agora, um campo elétrico na direção de polarização irá induzir o giro dos dipolos no interior do material e produzirá deformação no corpo. A figura 2.7 ilustra o processo de polarização e seus efeitos nos dipolos.

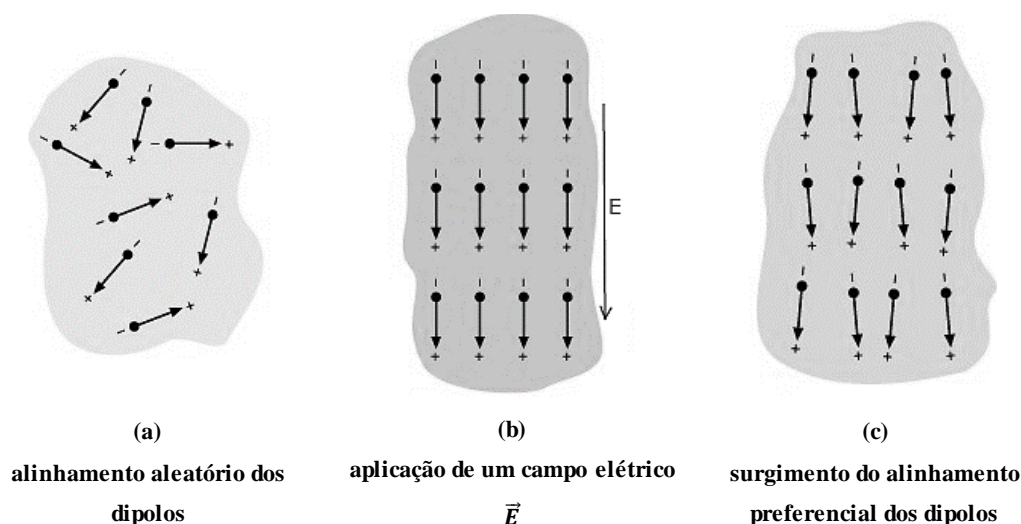


Figura 2.7 – Processo de polarização de um material. Fonte: Adaptado de PI US, 2017

### 2.2.2

#### Efeito piezoelétrico direto e inverso

Para facilitar a compreensão dos efeitos piezoelétricos direto e inverso, faz-se, inicialmente, uma análise unidimensional. O corpo da figura 2.8 é feito de um material piezoelétrico, possui apenas um grau de liberdade (alongamento) e possui eletrodos nas extremidades. A aplicação de força de tração nas suas extremidades produz deformação uniaxial na direção de aplicação.

Ao se aplicar a força são induzidos deformação  $S$  e fluxo de cargas nos eletrodos. A força deforma o material elasticamente e provoca o giro dos seus dipolos, gerando o deslocamento de cargas. Esse fluxo de carga, dividido pela área dos eletrodos, é equivalente ao deslocamento elétrico  $D$ . Enquanto os níveis de deformação estão na região linear da relação tensão-deformação do material, a relação entre o deslocamento elétrico  $D$  e a tensão axial  $T$  também é linear. A inclinação da reta é chamada de coeficiente piezoelétrico  $d$ .

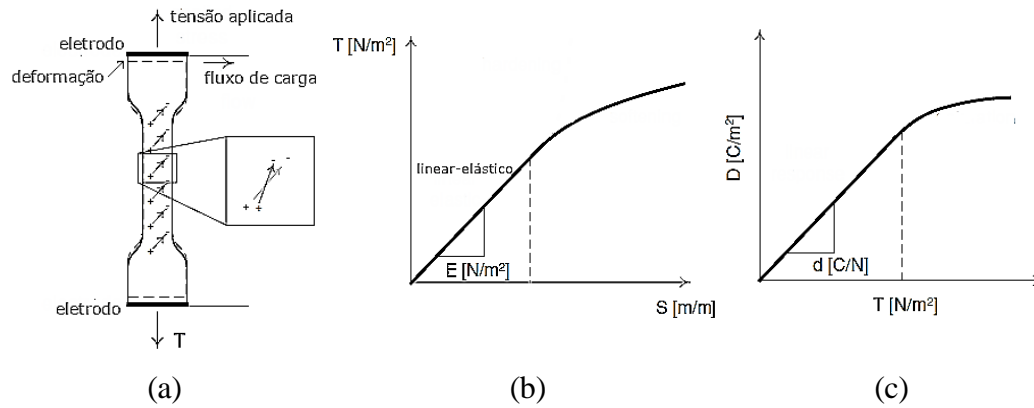


Figura 2.8 – (a) Material piezoelétrico tracionado; (a) surgimento de deformação; (b) surgimento de deslocamento de carga (c). Fonte: Adaptado de Leo, 2007

Conclui-se que a tensão de tração  $T$  induz simultaneamente deformação e deslocamento elétrico. A validade dessas observações se aplica somente para pequenos valores de deformação no material (regime linear-elástico). As relações matemáticas que descrevem o comportamento piezoelétrico direto são

$$S = \frac{T}{E} = sT \text{ e} \quad (2.1)$$

$$D = dT, \quad (2.2)$$

onde  $E$  é o módulo de Young,  $d$  é o coeficiente piezoelétrico e  $s = 1/E$  é a complacência mecânica do material.

Considerando agora a situação de efeito piezoelétrico inverso, ilustrado na figura 2.9, na qual um potencial elétrico  $V$  constante é aplicado aos eletrodos localizados nas extremidades do corpo, e um campo elétrico  $E$  surge no interior do corpo. Esse campo  $E$  induz a atração e repulsão entre as cargas nos eletrodos e as cargas que formam os dipolos do material, resultando no giro dos dipolos e aparecimento de deslocamento elétrico  $D$ . Devido ao giro dos dipolos, há o aparecimento de deformação  $S$  no corpo, alterando suas dimensões. Nesse caso a relação de proporcionalidade entre o campo elétrico  $E$  e a deformação  $S$  também é  $d$ .

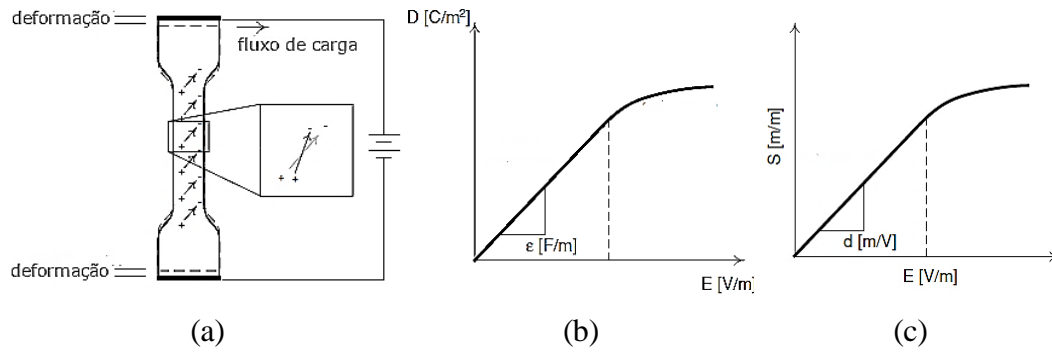


Figura 2.9 – A aplicação de campo elétrico (a) gera deslocamento de elétrico (b) e deformação (c). Fonte: Adaptado de Leo, 2007

As relações que se aplicam ao caso do efeito inverso são

$$D = \epsilon E \quad (2.3)$$

$$S = dE, \quad (2.4)$$

onde  $\epsilon$  é a permissividade dielétrica.

O comportamento do material piezoelétrico no qual a deformação ocorre apenas em uma direção poder modelado, então, pelo seguinte sistema de equações:

$$S = sT + dE \quad (2.5)$$

$$D = dT + \epsilon E$$

As equações resumem o observado nos efeitos direto e inverso: a tensão  $T$  provoca tanto deformação quanto deslocamento elétrico; e o campo elétrico  $E$  também induz deformação e deslocamento elétrico. O sistema pode ser representado em forma de matriz como

$$\begin{Bmatrix} S \\ D \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} s & d \\ d & \epsilon \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} T \\ E \end{Bmatrix} \quad (2.5)$$

### 2.2.3

#### Fator de acoplamento piezoelétrico $k$

A fração de energia elétrica convertida em energia mecânica, para o caso unidimensional é expressa pelo coeficiente de acoplamento piezoelétrico  $k$ , cujo valor pode variar entre 0 e 1. Ele é um dos principais indicadores da qualidade do acoplamento eletromecânico e pode ser expresso por

$$k = \frac{d}{\sqrt{s\varepsilon}} \quad (2.6)$$

### 2.2.4

#### Equação constitutiva da piezoeletricidade

Para um volume infinitesimal de material piezoelétrico genérico, pode-se estabelecer uma expressão geral que relacione deformação, tensão, deslocamento elétrico e campo elétrico em seu interior, nas três direções do espaço. Usando notação indicial, as deformações podem ser representadas pelo tensor  $S_{ij}$ , com  $i, j = 1, 2, 3$ . O mesmo se aplica ao caso das tensões, que são representadas pelo tensor  $T_{kl}$ , com  $k, l = 1, 2, 3$ . O campo elétrico pode ser representado por  $E_i$ , e o deslocamento elétrico por  $D_i$ , pois só existem ao longo das três direções. A partir dessas considerações, a equação constitutiva da piezoeletricidade para um caso geral pode ser escrita como

$$\begin{aligned} S_{ij} &= s_{ijkl}^E T_{kl} + d_{ijn} E_n \\ D_m &= d_{mkl} T_{kl} + \varepsilon_{mn}^T E_n \end{aligned} \quad (2.7)$$

onde  $s_{ijkl}^E$  é o tensor de complacência mecânica, que possui 81 elementos;  $\varepsilon_{mn}^T$  é o tensor de permissividade dielétrica, que possui 9 elementos; e  $d_{ijn}$  é o tensor de coeficientes piezoelétricos, com 27 elementos.

Dependendo do tipo de material piezoelétrico, a quantidade de elementos nos tensores das propriedades pode variar.

### 2.2.5

#### Propriedades físicas importantes do quartzo

Os materiais piezoelétricos monocristalinos são os mais usados na fabricação de dispositivos SAW. Além de possuírem a propriedade básica (a piezoelectricidade) muitos oferecem baixa perda de energia. Outras propriedades importantes são a velocidade de fase da onda de superfície, o fator de acoplamento piezoelétrico, os efeitos da temperatura, difração, atenuação e nível de geração de onda de corpo não desejada.

O quartzo ( $\text{SiO}_2$ ) é um material anisotrópico monocristalino que ocorre com abundância na natureza. Seu cristal tem seção hexagonal e extremidades piramidais. É um material enantiomórfico, isto é, ocorre na forma direita (dextrógiro) e esquerda (levógiro). Todas as suas propriedades físicas são espelhadas em sua geometria (CADY; DYKE, 1942). A figura 2.10 mostra desenhos desses dois tipos.

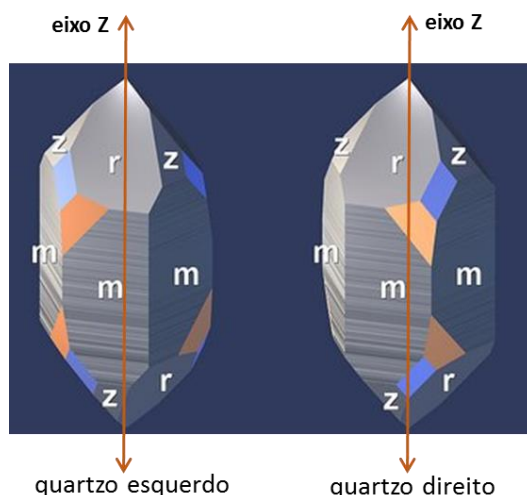


Figura 2.10 – Dois tipos de quartzo: esquerdo (levógiro) e direito (dextrógiro)

Do cristal de quartzo são extraídas lâminas, a partir das quais podem ser construídos diversos dispositivos, dentre eles os dispositivos SAW. Os parâmetros usados para realizar os cortes no cristal ditam para qual tipo de aplicação as lâminas serão destinadas. A figura 2.11 mostra uma cena do filme “Crystals Go to War”, de 1943 na qual, após ser extraída do cristal, uma lâmina de quartzo é cortada em pedaços menores para fabricação de ressonadores usados em rádios da Força Aérea Americana durante a Segunda Guerra Mundial.

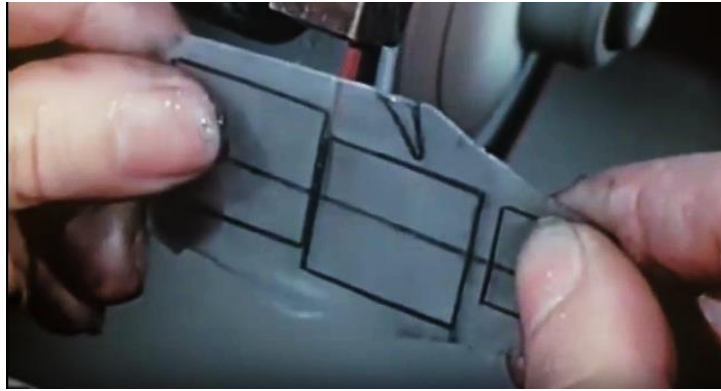


Figura 2.11 – Corte de uma lâmina de quartzo em pedaços menores. Fonte: Adaptado de Reeves Sound Laboratories, 1943

Visando eliminar confusões na definição das propriedades das lâminas de quartzo devido às duas variantes de cristal (esquerdo e direito), foram criados dois padrões, o IRE 1949 e o IEEE 1978. Dependendo do padrão adotado, o sinal de algumas das propriedades (constantes mecânicas e piezoelétricas) pode mudar. Os sinais das constantes elásticas permanecem os mesmos para o quartzo esquerdo e direito; porém, todas as constantes piezoelétricas têm sinais diferentes. A figura 2.12 mostra as diferenças existentes entre os dois padrões. Os padrões adotam diferentes orientações dos eixos X e Y para os diferentes tipos quartzo. Por isso, ao se especificar as propriedades de um substrato de quartzo, o padrão usado deve ser especificado.

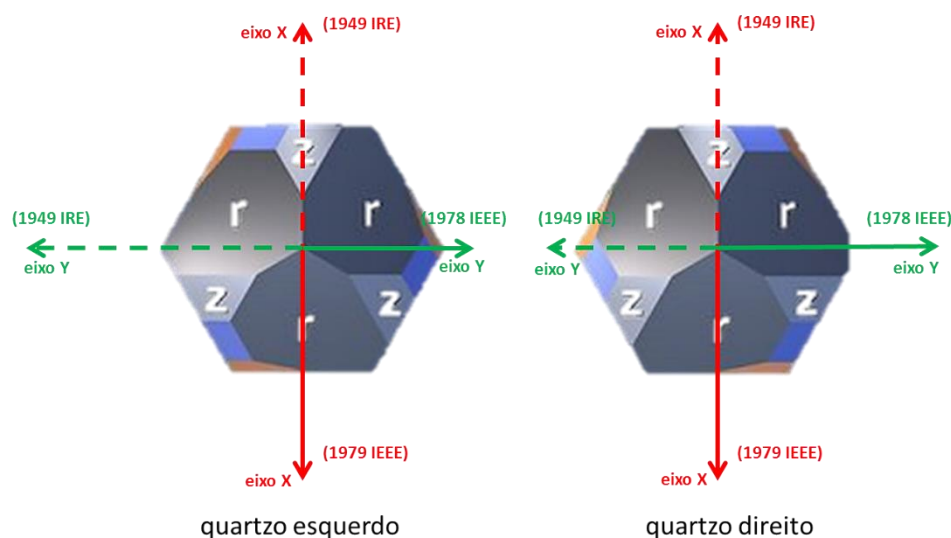


Figura 2.12 – Diferenças entre os sistemas de coordenadas adotados pelos padrões IRE 1949 e IEEE 1979. Apenas o eixo Z permanece o mesmo nos dois padrões. Fonte: Adaptado de Page, 2017

Para especificar a orientação do corte de uma lâmina usando os padrões, deve-se realizar uma sequência de rotações levando em conta um elemento representando essa lâmina (figura 2.13). Inicia-se indicando a quais eixos as dimensões da placa são paralelas, depois especifica-se as rotações de corte tendo como eixo de giro as direções dessas dimensões. Esse conjunto de informações pode ser apresentado na forma de um código comum aos dois padrões. Para exemplificar esse processo, pode-se citar o quartzo ST. Seu código é (YXI)  $42,75^\circ$  no padrão IEEE 1979, e (YXI)  $-42,75^\circ$  no padrão IRE 1949. Isso significa que, inicialmente, a placa foi orientada com sua espessura e comprimento paralelos aos eixos Y e X, respectivamente, e depois rotacionada ao longo de seu comprimento  $l$  em  $42,75^\circ$  horários. A figura 2.13 mostra a configuração inicial da lamina e a linha tracejada representando a sua inclinação final.

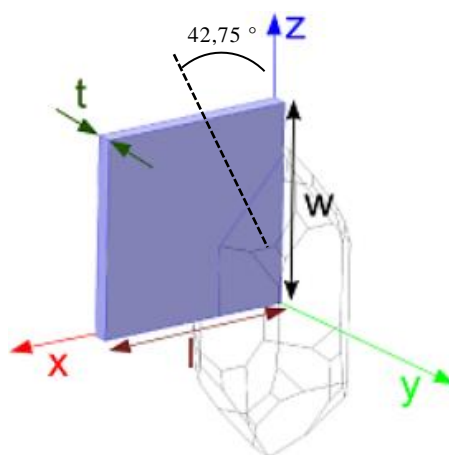


Figura 2.13 – Elemento de referência usado para orientar a sequência de rotações dos cortes do quartzo. Fonte: RANSLEY, 2014

Diversos tipos de corte foram estudados para suprir necessidades especiais das aplicações desejadas (GAUSTSCHI, 2002). A figura 2.14 ilustra os cortes mais frequentes, dentre eles o corte ST, usado neste trabalho. Eles são orientados em relação aos eixos cristalográficos X, Y e Z do quartzo.





Tabela 2.1 – Principais propriedades dos materiais usados em dispositivos SAW. Fonte: adaptado de Campbell, 1989

## 2.3 Ondas em meios elásticos

Este tópico apresenta os principais conceitos envolvidos na propagação de ondas e serve como base teórica para o melhor entendimento dos conceitos tratados mais à frente. Ele é dedicado à descrição e formulação matemática do comportamento de ondas em meios sólidos, partindo da formulação geral da

equação de onda em 3 dimensões e particularizando para o caso de ondas acústicas de superfície (ondas de Rayleigh).

### 2.3.1 Conceitos gerais

Segundo Jr *et al.* (1997) e Morgan (2007), de maneira geral, ondas acústicas são perturbações que se propagam pelo espaço preenchido por matéria. Quando elas se propagam livremente em um sólido, de maneira que não sofram influência de nenhuma borda, são chamadas de ondas de corpo, e podem ser longitudinais e transversais (figura 2.15). Em sólidos isotrópicos, a forma mais simples de onda acústica são as ondas planas, isto é, ondas nas quais todas as variáveis são constantes num plano chamado frente de onda. A direção de propagação é normal à frente de onda. Ondas acústicas são de dois tipos básicos. A primeira é do tipo longitudinal, na qual o deslocamento e a direção de propagação são paralelos. A segunda, do tipo transversal, tem deslocamento em qualquer direção paralela à frente de onda, normal à direção de propagação. Ambas se propagam independentemente da existência de barreiras e são não-dispersivas, pois suas velocidades independem da frequência.

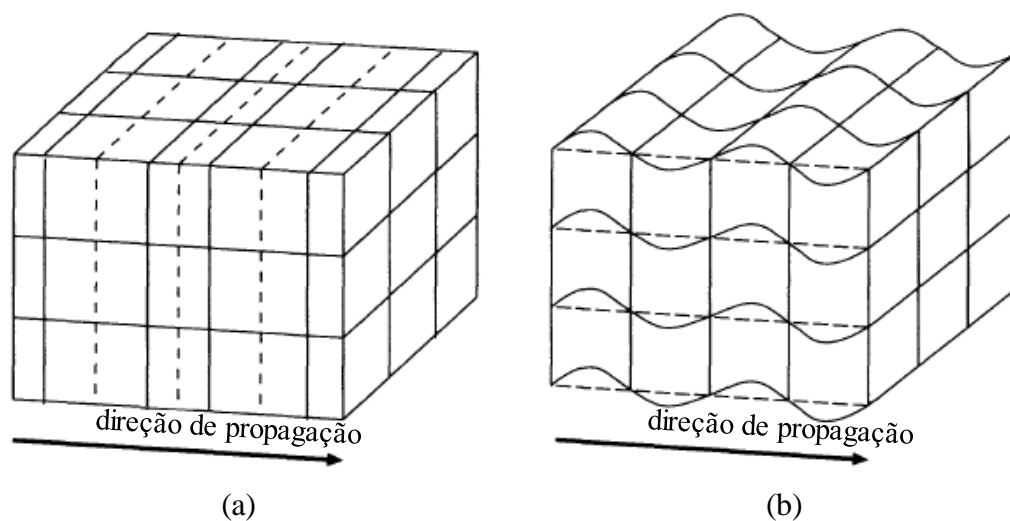


Figura 2.15 – Ilustração da perturbação gerada por (a) ondas longitudinais e (b) ondas transversais. Fonte: Adaptado de HASHIMOTO, 2000

Para se ter uma onda elástica de superfície faz-se necessária a introdução de uma condição de contorno plana, que forma um sólido semi-infinito e permite a

propagação de ondas elásticas de superfície (SAW) ao longo desse único contorno (JR *et al.*, 1997).

### 2.3.2 Equação de onda em meios sólidos

As deduções matemáticas a seguir podem ser encontradas com maior nível de detalhamento em Morgan (2007), Rose (2014), Cheeke (2012) e Timoshenko e Goodier, 1934)

Considerando um elemento infinitesimal com dimensões  $dx$ ,  $dy$  e  $dz$ , de um sólido elástico (figura 2.16) submetido a um estado tridimensional tensões, o equilíbrio de forças é obtido somando-se as forças em cada direção ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ). Caso o equilíbrio seja estático, os somatórios serão nulos. No caso de equilíbrio dinâmico, que é de interesse, os somatórios serão iguais a  $m \cdot a$ , sendo  $a$  aceleração na direção de interesse.

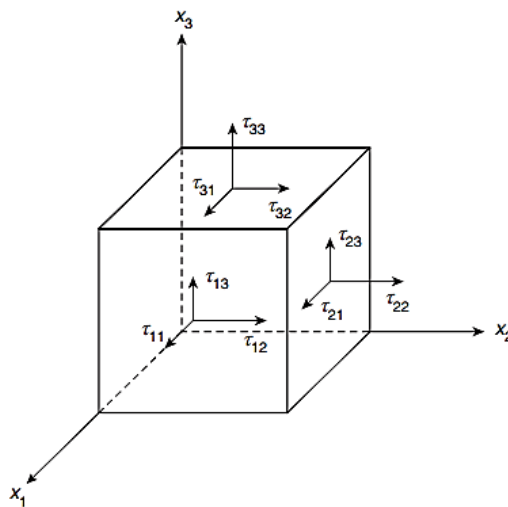


Figura 2.16 – Elemento diferencial. Fonte: ROSE, 2014

Assim como nas outras direções, o equilíbrio de forças na direção  $x$  considera as forças exercidas em cada uma das seis faces do cubo infinitesimal. Dessa forma, o equilíbrio na direção  $x$  é dado por

$$T_{xx} dzdy + \left( -T_{xx} dzdy + \frac{\partial T_{xx}}{\partial x} dx dz dy \right) + T_{yx} dx dz + \left( -T_{yx} dx dz + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} dy dx dz \right) + T_{zx} dx dy + \left( -T_{zx} dx dy + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} dz dx dy \right) = 0,$$

que, após simplificação se torna

$$\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} = 0. \quad (2.3)$$

Procede-se de maneira semelhante para as direções  $y$  e  $z$ , e chega-se às expressões abaixo para o equilíbrio estático:

$$\frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} = 0, \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} = 0. \quad (2.5)$$

No caso de equilíbrio dinâmico, o somatório das forças agindo sobre o elemento infinitesimal deve ser igual ao produto da massa pela aceleração. Assumindo que os deslocamentos nas direções  $x$ ,  $y$  e  $z$  são  $u_x$ ,  $u_y$  e  $u_z$ , respectivamente, resulta nas expressões

$$\frac{\partial T_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zx}}{\partial z} = \rho \frac{\partial^2 u_x}{\partial t^2}, \quad (2.6)$$

$$\frac{\partial T_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial T_{zy}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xy}}{\partial x} = \rho \frac{\partial^2 u_y}{\partial t^2}, \quad (2.7)$$

$$\frac{\partial T_{zz}}{\partial z} + \frac{\partial T_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial T_{yz}}{\partial y} = \rho \frac{\partial^2 u_z}{\partial t^2}, \quad (2.8)$$

onde  $\rho$  é a massa específica.

Tomando como referência a eq. (2.6), para a direção  $x$ , observa-se no membro esquerdo, que  $\frac{\partial T_{xx}}{\partial x}$  equivale a uma medida de força resultante por unidade de volume. O mesmo vale para as outras direções. Nota-se, também, que as expressões nas três direções são parecidas, sendo possível adotar uma notação mais compacta e também generalizada. Para isso, adota-se a notação indicial, na qual os deslocamentos  $u_x$ ,  $u_y$  e  $u_z$  são escritos como  $u_1$ ,  $u_2$  e  $u_3$  respectivamente, ou, de maneira generalizada, por  $u_i$ , sendo que  $i = 1, 2, 3$ . A mesma lógica se aplica para as direções  $x$ ,  $y$  e  $z$ , sendo elas notadas apenas como  $x_i$ . No caso da representação das tensões, são necessários dois índices independentes  $i = 1, 2, 3$  e  $j = 1, 2, 3$ . Utiliza-se o índice  $i$  para indicar a direção da normal à face do elemento na qual a tensão atua, e  $j$  para indicar a direção do eixo ao qual a componente da tensão. As eqs (2.6), (2.7) e (2.8), em notação compacta são, então

$$\frac{\partial T_{ij}}{\partial x_i} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} \quad (2.9)$$

### 2.3.3

#### Ondas em meios sólidos isotrópicos

A equação da onda pode ser manipulada para se obter o comportamento de diversas quantidades tais como deslocamentos, tensões, energia e etc. No entanto, deseja-se obter uma equação governante cuja solução seja composta por expressões dos deslocamentos  $u_i$  em um meio sólido. Portanto, deve-se recorrer ao uso de uma expressão que relacione as tensões  $T_{ij}$  às deformações as quais o elemento infinitesimal pode estar submetido, e inseri-la na equação governante em questão. A lei de Hooke generalizada, eq. (2.10), juntamente com expressão das deformações  $S_{kl}$  nos pontos, eq. (2.11), mostradas abaixo, suprem essa necessidade:

$$T_{ij} = c_{ijkl} S_{kl}, \quad (2.10)$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad (2.11)$$

em que  $c_{ijkl}$  é o tensor de rigidez e  $S_{kl}$  é o tensor de deformações, sendo  $i, j, k, l = 1, 2, 3$ .

O tensor de deformação  $S_{kl}$  é de segunda ordem e é simétrico. Sendo  $S_{ij} = S_{ji}$ , portanto, apenas seis das novas componentes são independentes. O mesmo ocorre com o tensor de tensões  $T_{ij}$ , sendo  $T_{ij} = T_{ji}$ . O tensor de rigidez  $c_{ijkl}$  é de quarta ordem e possui apenas duas componentes independentes, no caso de materiais isotrópicos. Após considerações sobre simetria,  $c_{ijkl}$  pode ser escrito em função das constantes de Lamè  $\lambda$  (primeiro parâmetro) e  $\mu$  (segundo parâmetro ou módulo de cisalhamento):

$$c_{ijkl} = \lambda \delta_{ij} \delta_{kl} + \mu (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}), \quad (2.12)$$

onde  $\delta_{ij}$  é o delta de Kronecker, definido como

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se } i = j, \\ 0 & \text{se } i \neq j; \end{cases}$$

Substituindo a eq. (2.11) na eq. (2.10), a expressão para as tensões torna-se

$$T_{ij} = \lambda \delta_{ij} S_{ii} + 2\mu S_{ij} \quad (2.13)$$

O próximo passo para chegar à equação de movimento para o caso de um sólido isotrópico é introduzir a eq. (2.13) na eq. (2.9). Sendo assim, chega-se às equações governantes de Navier:

$$(\lambda + \mu) \frac{\partial S_{ii}}{\partial x_j} + \mu \nabla^2 u_j = \rho \frac{\partial^2 u_j}{\partial t^2}, \quad (2.14)$$

onde

$$\nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_2^2} + \frac{\partial^2}{\partial x_3^2}.$$

A parcela  $(\lambda + \mu)\partial S_{ii}/\partial x_j$  do membro da direita da equação diz respeito à deformação devido à expansão volumétrica do corpo, enquanto  $\mu\nabla^2 u_j$  representa a deformação devido à distorção e rotação somente. A equação do movimento pode ser expressa de forma escalar em notação Cartesiana, como a seguir:

$$\begin{aligned} (\lambda + \mu)\frac{\partial}{\partial x_1}\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3}\right) + \mu\nabla^2 u_1 &= \rho \frac{\partial^2 u_1}{\partial t^2}, \\ (\lambda + \mu)\frac{\partial}{\partial x_2}\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3}\right) + \mu\nabla^2 u_2 &= \rho \frac{\partial^2 u_2}{\partial t^2}, \\ (\lambda + \mu)\frac{\partial}{\partial x_3}\left(\frac{\partial u_1}{\partial x_1} + \frac{\partial u_2}{\partial x_2} + \frac{\partial u_3}{\partial x_3}\right) + \mu\nabla^2 u_3 &= \rho \frac{\partial^2 u_3}{\partial t^2}, \end{aligned} \quad (2.15)$$

onde se assume notação  $\bar{u} = (u_1, u_2, u_3)$  para os deslocamentos.

Para obter as soluções que representem as ondas causadoras perturbações de dilatação e distorção no meio, pode-se decompor a equação do movimento em outras duas equações simplificadas. O vetor deslocamento  $\bar{u}$  pode ser expresso através da decomposição de como o gradiente de um escalar e o rotacional de vetor de divergência nula:

$$\begin{aligned} \bar{u} &= \nabla\Phi + \nabla \times \bar{H} \\ \nabla \cdot \bar{H} &= 0 \end{aligned} \quad (2.16)$$

onde  $\Phi$  e  $\bar{H}$  são os potenciais escalar e vetorial, respectivamente. Substituindo a eq. (2.16) na eq. (2.14), de Navier, tem-se, após alguns passos de manipulação matemática, a expressão

$$\nabla \left[ (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi - \rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right] + \nabla \times \left[ \mu \nabla^2 \bar{H} - \rho \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \right] = 0. \quad (2.17)$$

Nota-se que, como desejado, ela representa a superposição de deformação volumétrica e de distorção. Ao separá-la, o resultado são as eqs. (2.18) e (2.19), que representam ondas de dilatação e de distorção, respectivamente.

$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c_L^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad (2.18)$$

$$\nabla^2 \bar{H} = \frac{1}{c_T^2} \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \quad (2.19)$$

Os termos  $c_L$  e  $c_T$  representam a velocidade de fase das ondas longitudinais e transversais, respectivamente, que se propagam no meio. Elas são dadas por

$$c_L = \sqrt{\frac{\lambda + 2\mu}{\rho}}, \quad (2.20)$$

$$c_T = \sqrt{\frac{\mu}{\rho}}. \quad (2.21)$$

Por inspeção, observa-se que a velocidade de propagação da onda longitudinal é maior que a da transversal. Essas ondas são independentes entre si quando se propagam em meios infinitos ou semi-infinitos, porém se acoplam quando estão na fronteira do meio elástico.

#### 2.3.4 Ondas em meios sólidos anisotrópicos

Quando o meio no qual as ondas se propagam é anisotrópico, ou seja, suas propriedades mecânicas variam com a direção, a eq. (2.12), do tensor de rigidez  $c_{ijkl}$  não é mais aplicável, pois leva a resultados que independem da direção de



propagação escolhida para análise. No caso de meios anisotrópicos, os elementos que formam o tensor de rigidez  $c_{ijkl}$  caracterizam o comportamento das ondas em cada direção.

O tensor de rigidez  $c_{ijkl}$  é de quarta ordem, possuindo 81 elementos; porém, muitos desses elementos estão relacionados. Considerando que os pares de índices  $i$  e  $j$ , e  $l$  e  $k$  são intercambiáveis, o número de elementos se reduz a 21, e pode diminuir ainda mais dependendo do material anisotrópico abordado. Essas observações se resumem nas expressões abaixo:

$$c_{jikl} = c_{ijkl}, \quad c_{ijlk} = c_{ijkl} \quad \text{e} \quad c_{klij} = c_{ijkl}.$$

Para obter a equação governante para o caso de meio anisotrópico, pode-se iniciar introduzindo a eq. (2.13), do tensor de tensões  $T_{ij}$ , na eq. (2.9). Com isso, obtém-se

$$c_{ijkl} \frac{\partial^2 u_k}{\partial x_i \partial x_j} = \rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2}. \quad (2.22)$$

Assumindo que a solução da equação é composta por ondas harmônicas planas, os deslocamentos  $u_i$  podem ser dados por

$$u_i = A_i e^{i(k_j x_j - \omega t)}, \quad (2.23)$$

onde  $A_i$  representa a polarização da onda;  $k_j$  é o vetor de onda, cujo módulo é o número de onda na direção considerada, e sua direção corresponde à direção de propagação da frente de onda;  $x_j$  é a coordenada do ponto na direção de propagação.

Inserindo a eq. (2.23) na eq. (2.22), fazendo algumas manipulações e considerações matemáticas, chega-se à famosa equação de Christoffel para meios anisotrópicos:

$$\left[ \rho \omega^2 \delta_{ik} - c_{ijkl} k_l k_j \right] A_k = 0. \quad (2.24)$$

Sabendo que  $k_i = n_i k$  e  $k_j = n_j k$ , define-se o tensor acústico de Christoffel como

$$\Gamma_{ik} = c_{ijk1} n_i n_j, \quad (2.25)$$

onde  $n_i$  e  $n_j$  são os cossenos diretores da normal à superfície da frente de onda.

O tensor acústico  $\Gamma_{ik}$  depende da simetria do material do meio e da orientação das ondas. Substituindo  $\Gamma_{ik}$  na eq. (2.24) tem-se

$$\left[ \rho c^2 \delta_{ik} - \Gamma_{ik} \right] A_k = 0, \quad (2.26)$$

em que  $c = \sqrt{\omega/k}$  é a velocidade de fase da onda.

A equação acima é um problema de autovetor e autovalor. Sua solução é composta por três valores de velocidade  $c$ . A solução não-trivial é obtida calculando o seu determinante e igualando a zero. Expandindo o problema, tem-se

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho c^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} - \rho c^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} - \rho c^2 \end{bmatrix} = 0$$

As velocidades de fase calculadas são mutualmente perpendiculares são em função da direção escolhida ao se estipular  $n_i$  e  $n_j$ , os cossenos diretores. As três velocidades resultantes correspondem um valor de velocidade de onda longitudinal e dois de ondas transversais. Uma vez que esses valores estão disponíveis, a direção de deslocamento das partículas pode ser calculada a partir dos cossenos diretores. Assim, tem-se

$$\begin{bmatrix} \Gamma_{11} - \rho c^2 & \Gamma_{12} & \Gamma_{13} \\ \Gamma_{21} & \Gamma_{22} - \rho c^2 & \Gamma_{23} \\ \Gamma_{31} & \Gamma_{32} & \Gamma_{33} - \rho c^2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{Bmatrix} = 0$$

A partir dos valores de velocidade e dos cossenos diretores do vetor direção de propagação das ondas, pode-se construir um gráfico de varagiosidade, uma medida inversa da velocidade de fase da onda. A figura 2.17 mostra diferentes perfis de varagiosidade de diferentes materiais em função da direção.

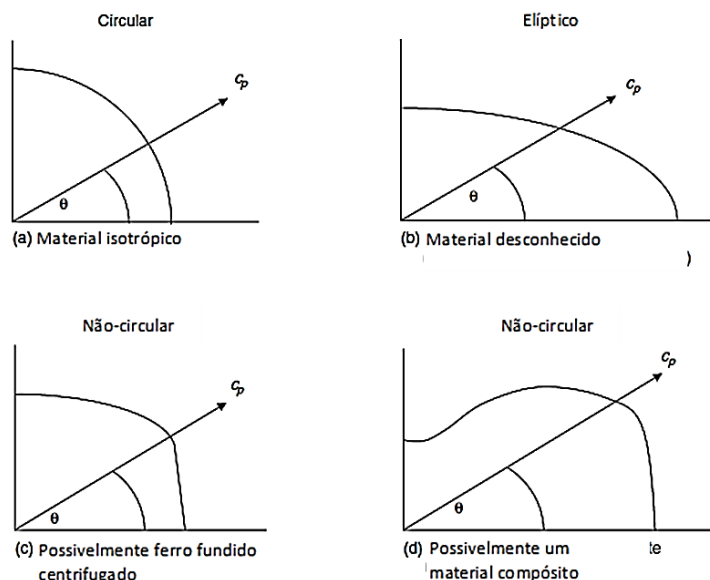


Figura 2.17 - Curvas de varagiosidade para diferentes materiais. Fonte: Adaptado de ROSE, 2014

### 2.3.5 Ondas de superfície

Rayleigh (1885) demonstrou a existência de um tipo de onda chamada de superfície ondas acústicas de superfície. Ele a descreveu como uma perturbação que se propaga em um semi-espaco sólido ao longo de uma superfície plana, com amplitude que decai exponencialmente ao longo da espessura do meio, perpendicularmente à direção de propagação. Ela é composta por uma componente de onda longitudinal e outra transversal, fazendo com que o movimento das partículas seja elíptico. Seu movimento ocorre no plano chamado de sagital, que contém o vetor direção da propagação e o vetor normal da superfície. Essa onda possui velocidade inferior à de uma onda transversal, e não é dispersiva (MORGAN, 2007).

A dedução matemática da onda acústica de superfície pode ser encontrada com maior nível de detalhamento em Morgan (2007), Rose (2014) e Cheeke, (2012).

Considerando o meio isotrópico mostrado na figura 2.18, que possui extensões infinitas nas direções  $x_1$  e  $x_2$ , com limite em  $x_3=0$ , as componentes dos deslocamentos e das velocidades de uma onda de superfície estão nas direções  $x_1$  e  $x_3$ . O espaço  $x_3 > 0$  é modelado como vácuo. Nessa configuração, a propagação ocorre na direção  $x_1$ , e as frentes de onda são normais à direção  $x_2$ . O plano formado por  $x_1$  e  $x_3$  é conhecido como plano sagital. Para satisfazer a equação do movimento, as tensões  $T_{33}$  e  $T_{13}$ , na superfície, devem ser nulas, e apenas as componentes  $u_1$  e  $u_3$  dos deslocamentos devem ser não nulas.

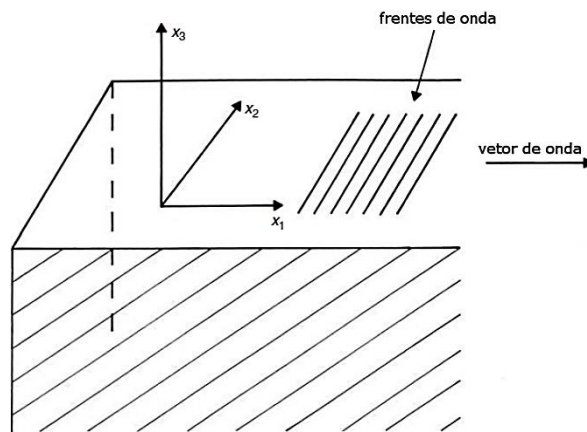


Figura 2.18 – Meio semi-infinito e detalhe do sistema de coordenadas utilizado. Fonte: Adaptado de Morgan, 2007

Assim como no caso de ondas de corpo, o campo de deslocamentos pode ser representado pela decomposição de Helmholtz:

$$\bar{u} = \nabla \Phi + \nabla \times \bar{H} . \quad (2.27)$$

Os componentes  $H_1$  e  $H_3$  da função  $\bar{H}$  são nulas, pois os deslocamentos estão no plano sagital ( $x_1, x_3$ ). As velocidades longitudinal e transversal são representadas pelas suas funções potenciais  $\Phi$  e  $\bar{H}$ . Inserindo a eq. (2.27) na eq. (2.14), de (Navier), obtém-se

$$\nabla \left[ (\lambda + 2\mu) \nabla^2 \Phi - \rho \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \right] + \nabla \times \left[ \mu \nabla^2 \bar{H} - \rho \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2} \right] = 0 , \quad (2.28)$$

que pode ser separada em duas equações mais simples, uma para ondas longitudinais (eq. (2.29)) e outra para ondas transversais (eq.(2.30)):

$$\frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_3^2} = k_L^2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2}, \quad (2.29)$$

$$\frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial x_3^2} = k_T^2 \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial t^2}, \quad (2.30)$$

onde  $k_L$  e  $k_T$  são os vetores de onda longitudinal e transversal já conhecidas. Elas são dadas por  $k_L = \sqrt{\rho/(\lambda + 2\mu)}$  e  $k_T = \sqrt{\mu/\rho}$ .

A solução para as equações da onda de superfície inclui duas ondas com polarizações diferentes - uma longitudinal e outra transversal -, e as duas terão o mesmo número de onda. As soluções para as funções  $\Phi$  e  $\bar{H}$  podem ser ondas harmônicas se propagando ao longo do eixo  $x_1$  com número de onda  $\beta = k_{x_1}$  e com variação ao longo do eixo  $x_3$  (ondas que se propagam abaixo da superfície e atenuam em função da profundidade). Como o movimento deve ocorrer somente no plano sagital, os deslocamentos são

$$\bar{u} = (u_1, 0, u_3) \quad (2.31)$$

Como as soluções são dadas em termos das funções  $\Phi$  e  $\bar{H}$ , tem-se que a representação das ondas harmônicas se propagando na direção  $x_1$  é

$$\Phi = F(x_3) e^{i(\omega t - \beta x_1)}, \quad (2.32)$$

$$\bar{H} = G(x_3) e^{i(\omega t - \beta x_1)}. \quad (2.33)$$

As funções  $F(x_3)$  e  $G(x_3)$  modelam a diminuição das amplitudes de vibração das ondas longitudinal e transversal, respectivamente, ao longo da direção  $x_3$ , no interior do meio. Substituindo essas funções nas eqs. (2.29) e (2.30) resulta em:

$$\frac{d^2 F}{dx_3^2} - (\beta^2 - k_L^2) F = 0, \quad (2.34)$$

$$\frac{d^2 G}{dx_3^2} - (\beta^2 - k_T^2) G = 0. \quad (2.35)$$

Solucionando as eqs. (2.34) e (2.35), e substituindo os resultados negativos (os que possuem sentido físico) nas eqs. (2.32) e (2.32), resulta em

$$\Phi = A e^{-(\beta^2 - k_L^2)x_3} e^{i(\omega t - \beta x_1)}, \quad (2.36)$$

$$\bar{H} = B e^{-(\beta^2 - k_T^2)x_3} e^{i(\omega t - \beta x_1)}, \quad (2.37)$$

Onde  $A$  e  $B$  são amplitudes, porém não há interesse em determiná-las agora. O interesse está direcionado em conhecer  $\beta$ , pois, através dele, a velocidade da onda de superfície ( $c_R$ ) pode ser determinada, assim como a variação dos deslocamentos ao longo de  $x_3$ .

A superfície livre ( $x_3 = 0$ ) impõe que as condições de contorno sejam tensões normais ( $T_{33}$ ) e tangenciais ( $T_{13}$ ) nulas, restando saber apenas as expressões para os deslocamentos. As formas gerais para as tensões e os deslocamentos são

$$u_1 = \frac{\partial \Phi}{\partial x_1} - \frac{\partial \bar{H}}{\partial x_3}, \quad (2.38)$$

$$u_2 = \frac{\partial \Phi}{\partial x_3} - \frac{\partial \bar{H}}{\partial x_1}, \quad (2.39)$$

$$T_{33} = \lambda \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} + \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_3^2} \right) + 2\mu \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} - \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial x_1 \partial x_3} \right), \quad (2.40)$$

$$T_{13} = \mu \left( \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1^2} + 2 \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x_1 \partial x_3} - \frac{\partial^2 \bar{H}}{\partial x_1^2} \right). \quad (2.41)$$

Aplicando as condições  $T_{33} = T_{13} = 0$  e em  $x_3 = 0$  e fazendo uso das expressões de  $\Phi$  e  $\bar{H}$  (eqs. (2.36) e (2.37), respectivamente), tem-se

$$\Phi = Ae^{i[\omega t - \beta x_1 - (\beta^2 - k_L^2)x_3]}, \quad (2.42)$$

$$\bar{H} = -iAe^{i[\omega t - \beta x_1 - (\beta^2 - k_T^2)x_3]}. \quad (2.43)$$

Igualando a zero o determinante dos coeficientes das equações acima, obtém-se a equação característica para  $\beta$ :

$$4\beta^2 \gamma_L \gamma_T - (\beta^2 + \gamma_T^2)^2 = 0, \quad (2.44)$$

onde  $\gamma_L = \sqrt{\beta^2 - k_L^2}$  e  $\gamma_T = \sqrt{\beta^2 - k_T^2}$

Substituindo as expressões de  $\gamma_L$  e  $\gamma_T$  na eq. (2.44) e definindo a velocidade de fase da onda de superfície como  $c_R = \omega/\beta$ , tem-se:

$$\left( 2 - \frac{c_R^2}{c_T^2} \right)^2 = 4 \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_T^2}} \sqrt{1 - \frac{c_R^2}{c_L^2}}. \quad (2.45)$$

A solução da eq. (2.45) é a velocidade da onda de Rayleigh ( $c_R$ ), que deve ser positiva e menor do que  $c_T$ . A velocidade da onda de Rayleigh, para qualquer material isotrópico, é mostrada na figura 2.19 normalizada pela velocidade  $c_T$ .

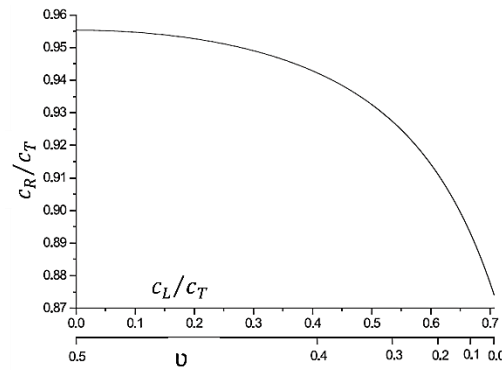


Figura 2.19 – Velocidade da onda de superfície para qualquer material isotrópico. Fonte: CHEEKE, 2012

Conhecendo  $\beta$  e fazendo as devidas substituições das eqs. (2.42) e (2.43) nas eqs. (2.38) e (2.39), respectivamente, os deslocamentos que compõem a onda de superfície são dados por

$$u_1 = A\beta \left( e^{-\gamma_L x_3} - \frac{2\gamma_L \gamma_T}{\beta^2 + \gamma_T^2} e^{-\gamma_T x_3} \right) \sin(\omega t - \beta x_1) \quad (2.46)$$

$$u_3 = A\gamma_L \left( e^{-\gamma_L x_3} - \frac{2\beta^2}{\beta^2 + \gamma_T^2} e^{-\gamma_T x_3} \right) \cos(\omega t - \beta x_1) \quad (2.47)$$

A figura 2.20 ilustra o campo de deslocamentos gerado pela perturbação da onda de superfície. A maior parte da energia está confinada a uma espessura de, aproximadamente um comprimento de onda  $\lambda_s$ . Os deslocamentos medidos na superfície são pequenos. Por exemplo, num dispositivo SAW operando a 100 MHz, consumindo potência 10 mW, a onda de superfície tem comprimento  $\lambda_s = 30 \mu\text{m}$  e pico de deslocamento vertical medindo  $10^{-10}$  m.



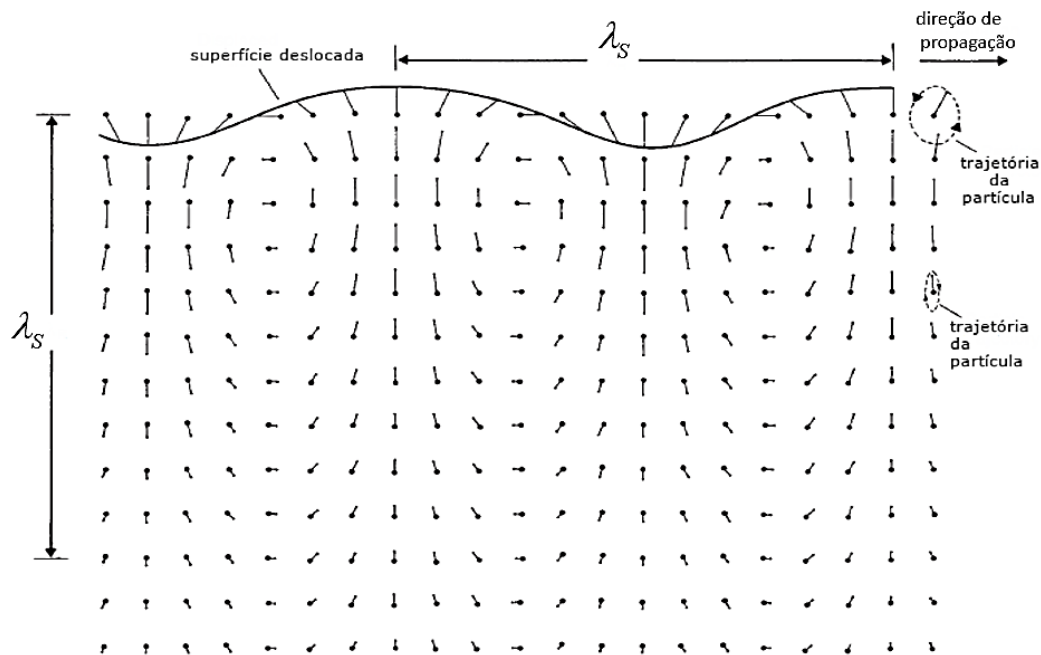


Figura 2.20 – Campo de deslocamento da onda de Rayleigh em um meio isotrópico.  
Fonte: Adaptado de Morgan, 2007

Um exemplo real de decaimento das amplitudes para o caso de uma onda se propagando na superfície de quartzo fundido é mostrado na figura 2.21, abaixo. Nas proximidades de  $x_3/\lambda_s = 0,2$ , o deslocamento relativo de  $u_1$  muda de sinal, indicando que a trajetória da partícula muda de sentido de giro.

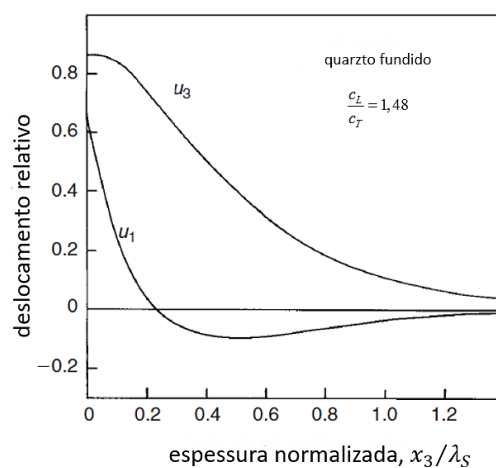


Figura 2.21 – Deslocamentos da onda de Rayleigh. Fonte: Adaptado de Morgan, 2007

### 3 Revisão da literatura

Neste capítulo é apresentada uma revisão da literatura sobre a sensibilidade à deformação de dispositivos SAW. Também são mostrados alguns dos sensores SAW de deformação propostos por outros autores e alguns dos principais resultados obtidos tanto por simulação quanto por experimentos.

#### 3.1 Sensibilidade à deformação dos dispositivos SAW

Um dos primeiros artigos relatando a influência do estado de tensões no funcionamento de um dispositivo SAW foi escrito por Robert *et al.* (1973). Os pesquisadores empregaram dispositivos SAW do tipo linha de atraso (*delay line*) no qual dois transdutores interdigitais, localizados em extremidades opostas do substrato de quartzo, eram conectados na linha de retorno de um amplificador de banda larga, constituindo um oscilador (figura 3.1).

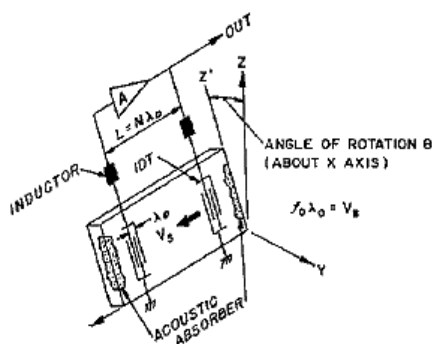


Figura 3.1 – Esquema do oscilador equipado com um dispositivo SAW. Fonte: ROBERT, LABRUNIE, BOREL, 1973

Sabendo que a frequência de oscilação do circuito era dependente da mudança de fase do sinal, que por sua vez era dependente da velocidade de propagação da onda de superfície, induziram mudanças nessa frequência por meio de alteração do estado de tensões no meio de propagação. Testaram a

sensibilidade dos dispositivos a aplicação de força e pressão em diferentes cenários de condição de contorno. A figura 3.2 mostra alguns dos resultados das configurações testadas. Os pesquisadores mostraram que a sensibilidade do dispositivo à força e à pressão dependia da orientação da aplicação dos esforços em relação ao substrato, da direção de propagação da onda, das condições de contorno e do tipo de corte do quartzo.

	BOTH ENDS CLAMPED CENTRALLY LOADED	CANTILEVER FREE END LOADED	CANTILEVER FREE END LOADED	RECT. COLUMN IN SIMPLE TENSION	RECTANGULAR PLATE IN SHEAR
CONFIGURATION					
PARAMETERS	$h = 0.1 \text{ in.}, l = 1.5 \text{ in.}$ $l_2 = 1.25 \text{ in.}, b = 0.5 \text{ in.}$ $F = 0 \text{ to } 2 \text{ lbs}$ $\theta = 38^\circ, f \approx 41 \text{ MHz}$	$h = 0.1 \text{ in.}, l = 1.5 \text{ in.}$ $l_2 = 1.25 \text{ in.}, b = 0.5 \text{ in.}$ $F = 0 \text{ to } 2 \text{ lbs}$ $\theta = 38^\circ, f \approx 41 \text{ MHz}$	$h = 0.1 \text{ in.}, l_0 = 1.0 \text{ in.}$ $l_1 = 1.25 \text{ in.}, b = 1.5 \text{ in.}$ $F = 0 \text{ to } 2 \text{ lbs}$ $\theta = 38^\circ, f \approx 41 \text{ MHz}$	$h = 0.1 \text{ in.}, l = 1.5 \text{ in.}$ $l_0 = 1.0 \text{ in.}, b = 0.5 \text{ in.}$ $F = 0 \text{ to } 2 \text{ lbs}$ $\theta = 38^\circ, f \approx 41 \text{ MHz}$	$h = 0.085 \text{ in.}, l = 1.50 \text{ in.}$ $l_0 = 1.00 \text{ in.}, b = 0.5 \text{ in.}$ $F = 0 \text{ to } 2 \text{ lbs}$ $\theta = 38^\circ, f \approx 41 \text{ MHz}$
$\Delta f / \Delta F$	$+1808 \text{ Hz/lb}$ ( $+4 \text{ Hz/gm}$ )	$-6012 \text{ Hz/lb}$ ( $-13.3 \text{ Hz/gm}$ )	$+2815 \text{ Hz/lb}$ ( $+6.2 \text{ Hz/gm}$ )	$-510.8 \text{ Hz/lb}$ ( $-1.1 \text{ Hz/gm}$ )	$-100 \text{ Hz/lb}$ ( $-0.22 \text{ Hz/gm}$ )

Figura 3.2 – Alguns dos resultados obtidos por Robert *et al.* Fonte: ROBERT, LABRUNIE, BOREL, 1973

A necessidade de saber mais sobre a influência de tensões superficiais do substrato dos dispositivos SAW levou os pesquisadores Cullen e Reeder (1975) a investigarem a mudança na frequência dos osciladores. A influência das deformações superficiais na velocidade de propagação foi analisada experimentalmente; para isso, ensaios de flexão direta sobre dispositivos feitos de quartzo com cortes ST-X e YX foram realizados, como mostra a figura 3.3.

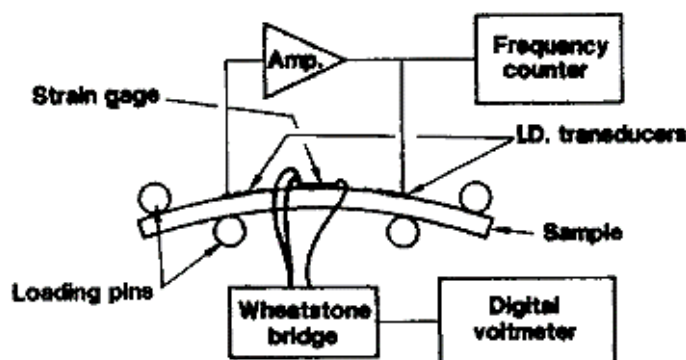
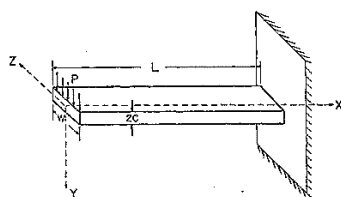


Figura 3.3 – Esquema do experimento de medição de sensibilidade à deformação de flexão. Fonte: CULLEN, REEDER, 1975

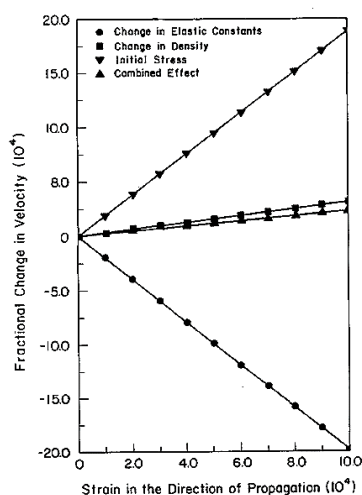
As deformações na superfície do substrato - uma paralela à direção de propagação das ondas, e a outra perpendicular - foram relacionadas à velocidade

de propagação de onda através de coeficientes de sensibilidade à deformação. Os resultados dos experimentos com quartzo ST-X indicaram sensibilidades de  $-0,002$  e  $-0.146 \mu s^{-1}$ , às deformações longitudinal e transversal, respectivamente.

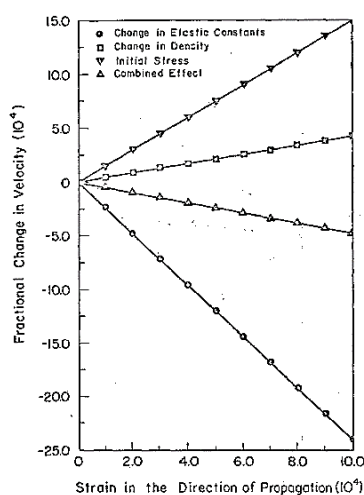
Nalamwar e Epstein (1976) publicaram um artigo com uma abordagem teórica e experimental da influência de tensões iniciais na velocidade de propagação da onda de superfície. Foram considerados dispositivos SAW do tipo linha de atraso, feitos de quartzo YX e niobato de lítio ( $LiNbO_3$ ) XZ conectados a um circuito oscilador e sujeitos a esforços de flexão (figura 3.4(a)). A relação entre o estado de tensão inicial do meio, as constantes elásticas e a densidade foi alvo desse estudo, que mostrou que essas grandezas contribuem individualmente para a mudança de velocidade de propagação. Os resultados da abordagem teórica revelaram que o efeito combinado das variações dependia do material do meio, e podia ser um aumento (figura 3.4(b)) ou uma diminuição (figura 3.4(c)) da velocidade de propagação.



(a)



(b)

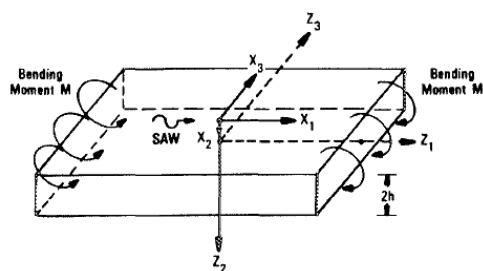


(c)

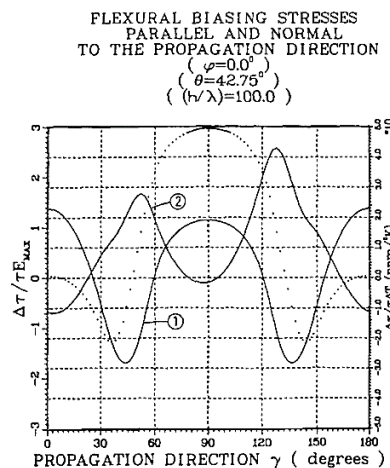
Figura 3.4 – (a) Esquema do experimento de flexão direto no substrato; (b) Efeito combinado de aumento da velocidade; (c) Efeito combinado de redução da velocidade.  
Fonte: NALAMWAR, EPSTEIN, 1976

Apesar de existirem dados sobre a influência de tensões iniciais na velocidade da onda de superfície, ainda faltavam informações sobre a influência de diferentes tipos de deformação (flexão ou planar) e da direção de aplicação sobre a variação da velocidade de propagação.

Nos trabalhos de Sinha *et al.* (1985,1987), foram reportadas comparações entre os resultados de um modelo teórico - que considera a presença de um campo estático de deformação superposto ao campo dinâmico de deformação gerado pela perturbação da onda de superfície - e os de experimentos responsáveis por determinar a sensibilidade às deformações originárias de esforços de flexão de origem estática (SINHA *et al.*, 1985) (figura 3.5) e dinâmica (SINHA; LOCKE, 1987) (figura 3.6) em placas retangulares. As barras de quartzo possuíam transdutores interdigitais em uma de suas superfícies, constituindo assim um dispositivo SAW. Os experimentos quantificaram a dependência direcional da sensibilidade à deformação e comprovaram a aplicabilidade do método analítico para determinar as sensibilidades. A figura 3.5(b) mostra resultados experimentais e teóricos da variação fracional do tempo de voo das ondas de superfície em função do estado de deformação gerado por flexão e do ângulo de propagação da onda. No caso do quartzo ST-X, esse ângulo é  $\gamma = 0$ .



(a)



(b)

Figura 3.5 – (a) Esquema do experimento estático de determinação da sensibilidade do quartzo ST à deformação; (b) sensibilidade do quartzo ST à deformação em várias direções. Fonte: SINHA *et al.*, 1985

A partir dos resultados dos experimentos e do modelo teórico, Sinha *et al.*, (1985) chegaram à seguinte expressão para a variação fracional da frequência do

dispositivo SAW em função das deformações:  $\frac{\Delta f}{f} = -1,39\varepsilon_{11} + 0,69\varepsilon_{22}$ , onde  $\varepsilon_{11}$  e  $\varepsilon_{22}$  são as deformações na direção paralela e normal à direção de propagação da onda, respectivamente no quartzo ST.

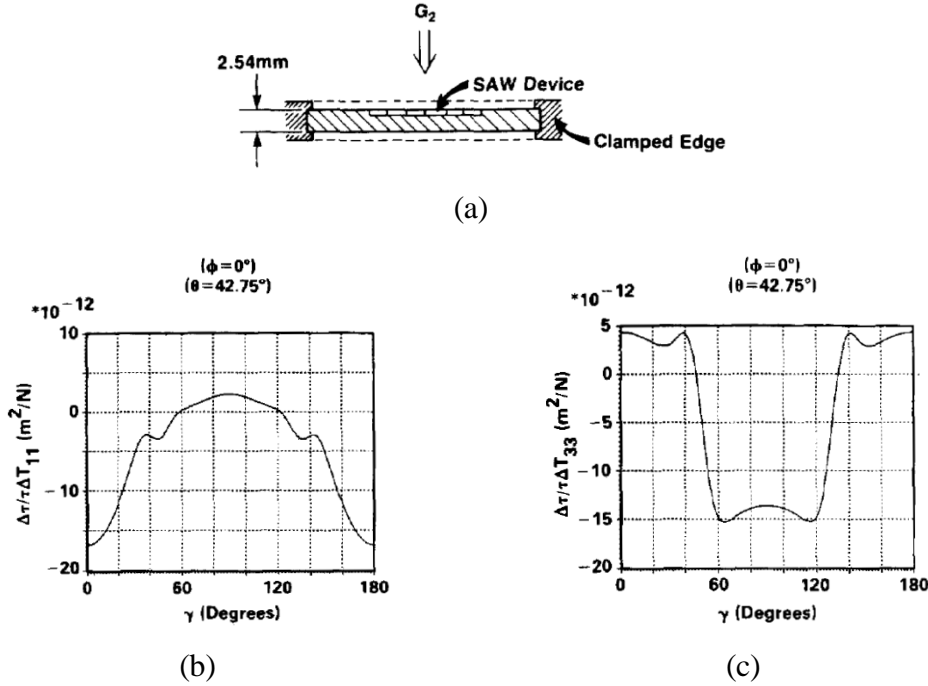


Figura 3.6 – (a) Esquema do experimento dinâmico de determinação da sensibilidade do quartzo ST à deformação; (b) sensibilidade longitudinal; (c) sensibilidade transversal.  
Fonte: SINHA; LOCKE, 1987

Os experimentos dinâmicos de Sinha e Locke (1987) levaram à seguinte expressão:

$$\frac{\Delta f}{f} = (-16,8T_{11} + 4,4T_{22}) \times 10^{-12}, \quad (3.1)$$

onde  $T_{11}$  e  $T_{22}$  são as tensões na direção paralela e normal à direção de propagação, respectivamente, no quartzo ST. A eq. (3.1) será usada no capítulo 5 para comparar os resultados dos modelos numéricos com os experimentais e validá-los.

Recentemente, sensores SAW de deformação foram desenvolvidos e testados em diferentes condições de temperatura e interrogação (método de medição). A maioria realizou experimentos com interrogação sem fio, visto que

esta é uma das principais vantagens dos dispositivos SAW. Também foram usados dispositivos mais comuns, como os ressonadores e os *delay line*, e outros menos comuns, como os baseados em *delay line* com codificação, que permitem identificação dos sensores através de um código incorporado ao sinal de resposta.

Varadan *et al.* (1997) apresentaram um sensor SAW de formação *delay line* de feito com niobato de lítio - um substrato com maior fator de acoplamento piezoelétrico do que o do quartzo - e o interrogaram via antena dipolo usando um rádio *transciever* (capaz de emitir e receber sinais eletromagnéticos). O objetivo dos pesquisadores era validar o sensor para utilizá-lo na medição de deformação e controle de pás de helicóptero. Eles impuseram deformações até  $600 \mu\epsilon$  e mediram variações de até 5 rad na fase das ondas. A Figura 3.7 mostra a configuração usada.

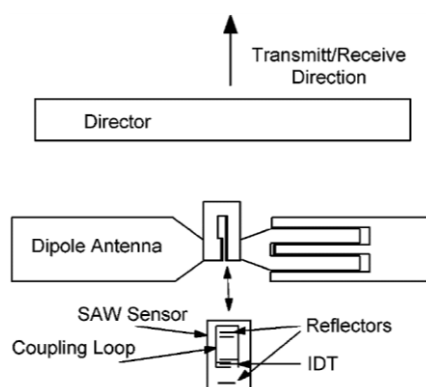


Figura 3.7 – Configuração do sensor usada por Varadan *et al.*(1997). Fonte: Adaptado de Varadan *et al.*(1997)

Donohoe *et al.* (2011) reportaram o procedimento de calibração de um sensor SAWR de uma porta de feito de quartzo AT-36°, por apresentar melhor estabilidade à temperatura. Eles propuseram um sensor de deformação para aplicações gerais e incluíram o estudo das sensibilidade longitudinal e transversal. A interrogação foi feita com antenas e um *transciever* dedicado que envia pulsos eletromagnéticos e recebe o sinal refletido pelo SAWR. As sensibilidade longitudinal e transversal conseguidas foram de  $-472$  e  $241 \text{ Hz}/\mu\epsilon$ , à  $20^\circ\text{C}$ . Detalhes do sensor e do sinal emitido e recebido estão na figura 3.8.

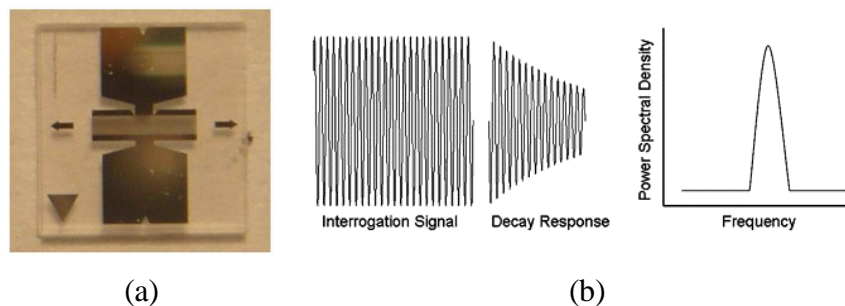


Figura 3.8 – (a) Sensor SAWR; (b) Sinais enviados e recebidos pelo *transciever*. Fonte: DONOHOE *et al.* (2011)

Fu *et al.* (2014) desenvolveram um sensor SAW *delay line* feito com substrato  $128^\circ$  YX  $\text{LiNbO}_3$  e o estudaram segundo uma abordagem numérica e outra experimental. Nos experimentos, incluíram um segundo SAW *delay line* não colado à superfície de teste para que fosse influenciado apenas pela temperatura ambiente. A medição foi, portanto, diferencial e eliminou a influência da temperatura nas medições de deformação. A figura 3.9 mostra detalhes dessa medição diferencial e dos SAW. Na abordagem numérica, simularam em elementos finitos o SAW e analisaram o estado de deformação. A sensibilidade obtida foi de  $126 \text{ Hz}/\mu\epsilon$ .

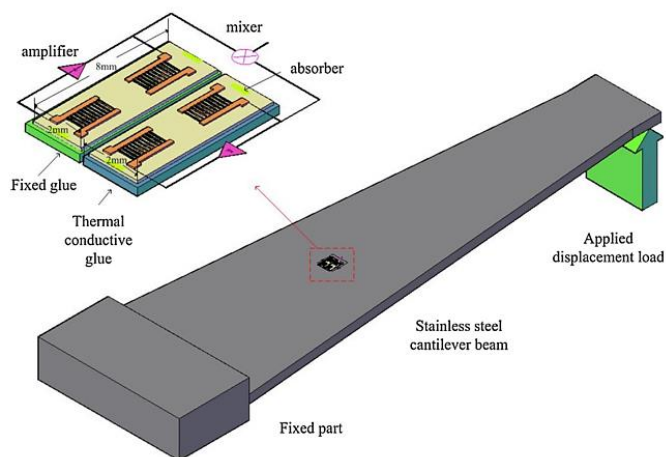


Figura 3.9 – Medição sem fio e diferencial para compensar os efeitos da temperatura. Fonte: FU *et al.*, 2014

Stoney *et al.* (2014) aplicaram um sensor SAWR no monitoramento da deformação na ferramenta de uma máquina usinagem por brochamento. A interrogação do sensor foi feita sem fio, por um *transciever*. A resposta do sensor foi comparada à de um *strain gage* resistivo instalado na mesma ferramenta. Os



resultados foram satisfatórios, porém, para pequenas as deformações presentes na ferramenta de corte, a sensibilidade não foi adequada devido ao alto ruído no sinal da interrogação sem fio. A figura 3.10 mostra os sensores SAWR e *strain gage* resistivo colados à ferramenta de corte.

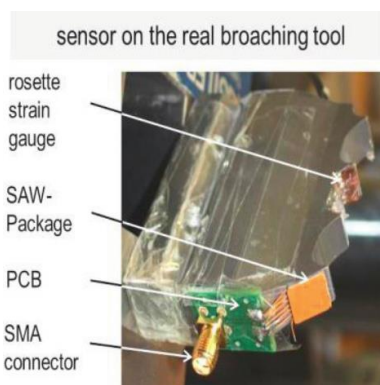
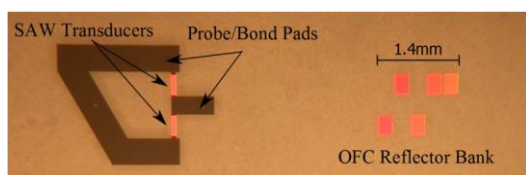
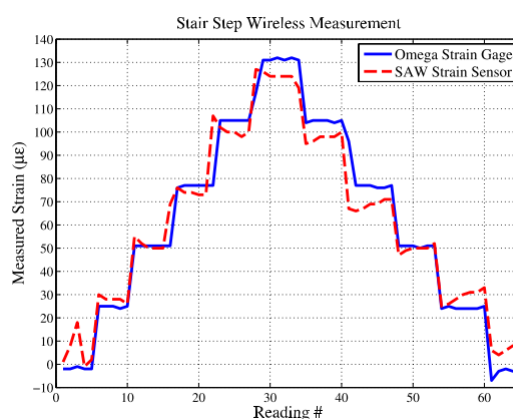


Figura 3.10 – Sensores colados à ferramenta de brochamento. Fonte: Adaptado de STONEY *et al.* (2014)

Humphries e Malocha (2015) criaram um sensor SAW feito com YZ- $\text{LiNbO}_3$  e que usava codificação ortogonal da frequência (OFC) para identificação. O estudo comparou o desempenho do sensor SAW com o de um *strain gage* resistivo. A identificação por OFC se mostrou satisfatória. A sensibilidade obtida foi de  $-1647 \text{ Hz}/\mu\epsilon$ . A figura 3.11 mostra alguns detalhes do SAW e do experimento.



(a)



(b)

Figura 3.11 – (a) SAW com identificação por OFC; (b) Comparação com um *strain gage* resistivo. Fonte: HUMPHRIES; MALOCHA (2015)

## 4 Metodologia experimental

Ao sofrer deformação, o ressonador muda sua frequência de ressonância. A deformação na superfície livre do ressonador induz a alteração da distância entre os *interdigitals*, o que implica na alteração do comprimento de onda gerado; também induz a alteração da velocidade de fase da onda superficial devido à mudança do estado de tensões no meio de propagação. Cada um dos efeitos é responsável por uma parcela de mudança de frequência, e a superposição destes resulta na mudança total da frequência de ressonância do dispositivo.

O procedimento experimental visa obter os valores de frequência de ressonância para vários valores de carregamento uniaxial e, assim, determinar a sensibilidade à deformação do SAWR. A dependência da sensibilidade em relação a temperatura também é investigada.

### 4.1 Preparação dos espécimes

Os próximos sub-tópicos desta capítulo abordam a preparação do corpo de prova, incluindo as instalações do ressonador e do sensor a fibra óptica. São apresentados também algumas das características do ressonador e os detalhes de sua preparação para uso como um sensor de deformação. Ao final, o roteiro do experimento de tração é apresentado e comentado.

#### 4.1.1 Adaptação do ressonador como um sensor de deformação

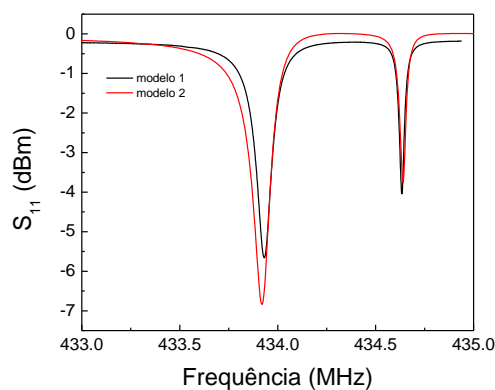
Os cristais ressonadores utilizados neste estudo são, originalmente, aplicados como filtros de RF em circuitos eletrônicos para telecomunicações. Eles são comercializados devidamente encapsulados para fins de proteção e estabilidade de funcionamento. O corpo do ressonador é fixado à capsula por

intermédio de um adesivo de baixa tensão mecânica. As conexões elétricas são feitas com fios finos instalados pelo processo de *wire bonding*. A atmosfera interna da capsula é preenchida com um gás inerte para que se tenha umidade nula.

Neste estudo são utilizados dois modelos diferentes de filtros SAWR (figura 4.1(a)) fornecidos pela empresa HIB para a confecção de seis espécimes. Durante a realização das atividades experimentais, a empresa mudou o modelo comercializado, por isso foram testados os dois. A frequência nominal de ressonância de ambos é 433,92 MHz. A curva do parâmetro  $S_{11}$  (figura 4.1(b)) mostra o comportamento do ressonador em função da frequência em seus terminais. Os valores de seus parâmetros característicos estão agrupados na Tabela 4.1.



(a)



(b)

Figura 4.1 – (a) Ressonador encapsulado fornecido pela HIB; (b) Curva do parâmetro  $S_{11}$

Tabela 4.1 – Parâmetros típicos dos ressonadores usados. Fonte: HIB, 2017

Parâmetro	Símbolo	Valor típico	Unidade
Frequência nominal	$f_0$	433,92	MHz
Faixa de temperatura de operação	$T_{\Delta op}$	-40 a 85	°C
Coeficiente de temperatura	$c_T$	-32	$10^{-3}$ ppm/C <sup>2</sup>
Capacitância estática de <i>shunt</i>	$C_0$	4	pF
Resistência ao movimento	$R_M$	50	$\Omega$
Fator de qualidade	$Q$	8000	-
Perda de inserção	$I_L$	3	dB

Para torná-lo sensível à deformação, este deve ser removido do encapsulamento e colado à superfície onde as deformações ocorrem. Com um corte na lateral da cápsula e sua remoção, tem-se acesso ao corpo do ressonador. A figura 4.2 mostra detalhes da parte do encapsulamento. Na figura 4.3, as imagens feitas por microscópio de reflexão e com ampliação de 5X mostram detalhes dos ressonadores como as estruturas dos *interdigitals* e dos refletores. Com o auxílio de uma lente com ampliação de 50X (figura 4.4), foram medidos os parâmetros geométricos dos transdutores *interdigitals* e do banco de refletores; os valores estão disponíveis na Tabela 4.2.

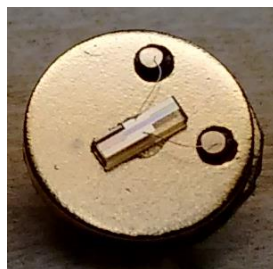
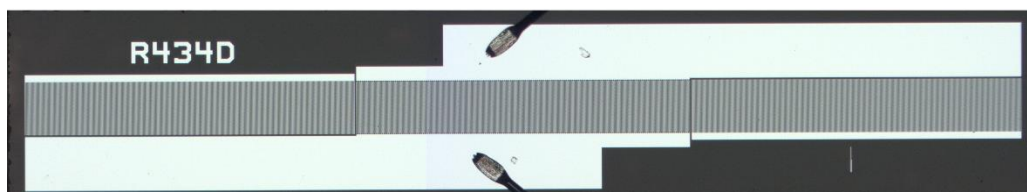


Figura 4.2– Capsula aberta mostrando o ressonador modelo 1 fixado com adesivo e as conexões elétricas produzidas pelo processo de wire *bonding*



(a)



(b)

Figura 4.3 – Fotos em microscópio de reflexão com ampliação de 5X. (a) SAWR modelo 1; (b) SAWR modelo 2

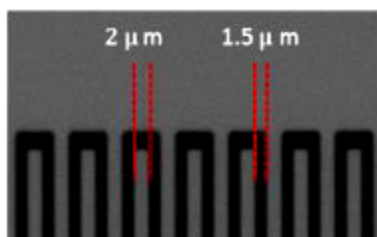


Figura 4.4 – Imagem ampliada em 50X mostrando detalhes do transdutor interdigital.  
Fonte: ESCOBAR, 2016

Tabela 4.2 – Dimensões dos *interdigitals* e dos refletores do SAWR modelo 1. Fonte: Adaptado de Escobar, 2016

	<i>Interdigitals</i>	Refletores
<i>Pitch</i>	1,5 $\mu\text{m}$	1,5 $\mu\text{m}$
Largura	2 $\mu\text{m}$	2 $\mu\text{m}$

A figura 4.5(a) mostra uma foto do adesivo utilizado na fixação do ressonador durante o encapsulamento, que ainda permanece sobre a superfície inferior do cristal. Essa camada é removida por raspagem sucedida por um procedimento de limpeza com acetona. O resultado da retirada do adesivo é mostrado na foto da figura 4.5(b). A superfície limpa é essencial para uma boa aderência do adesivo ao corpo do ressonador, garantindo a transmissão de deformação até este.



(a)



(b)

Figura 4.5 – Imagens de microscópio com ampliação de 5X. (a) Camada de adesivo na superfície inferior do SAWR modelo 1; (b) Camada de adesivo removida por raspagem e acetona

Após a limpeza, o ressonador está pronto para ser colado à superfície do corpo e prova. Esta é uma etapa crítica, que reúne uma série de procedimentos visando como resultado a maior transmissão possível da deformação da superfície

do corpo de prova até a superfície superior do ressonador. Os procedimentos são ordenados da seguinte maneira:

**Primeiro:** é a preparação da superfície do corpo de prova, o que inclui lixamento para a retirada de camadas de óxidos e outras impurezas;

**Segundo:** é a aplicação de adesivo nos locais do corpo de prova destinados à instalação do ressonador e do sensor de deformação a fibra óptica. Foram testados quatro adesivos, sendo eles designados por números de 1 a 4. A Tabela 4.3 reúne as informações sobre os adesivos utilizados e sobre os parâmetros de cura e pós-cura:

Tabela 4.3 – Informações de tempo e temperatura usados na cura e pós-cura dos adesivos

Adesivo	Cura		Pós-cura		Temp. de operação	Tipo
	Temperatura	Tempo	Temperatura	Tempo		
1	70 °C	20 min	70 °C	2 h	-200 a 60 °C	sensoriamento
2	60 °C	4 h	80 °C	4 h	80 °C	estrutural
3	40 °C	1h 20 min	80 °C	30 h	-150 a 265 °C	estrutural
4	80 °C	2 h	90 °C	4 h	80 °C	sensoriamento

**Terceiro:** é a colocação do ressonador e sensor a fibra sobre o adesivo;

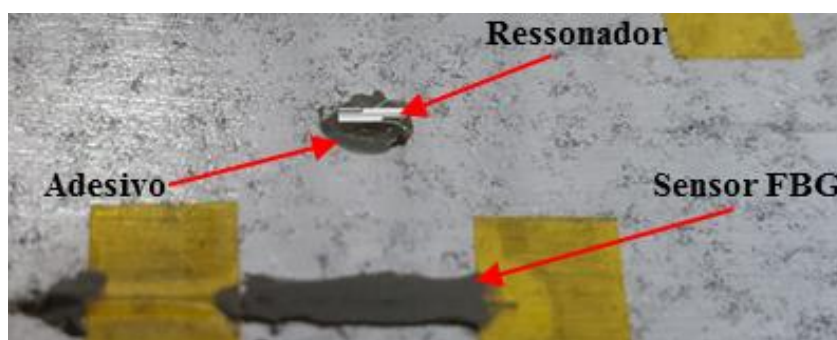


Figura 4.6 - Posicionamento do ressonador sobre o adesivo. SAW modelo 1 no Espécime 3, utilizando o adesivo 3



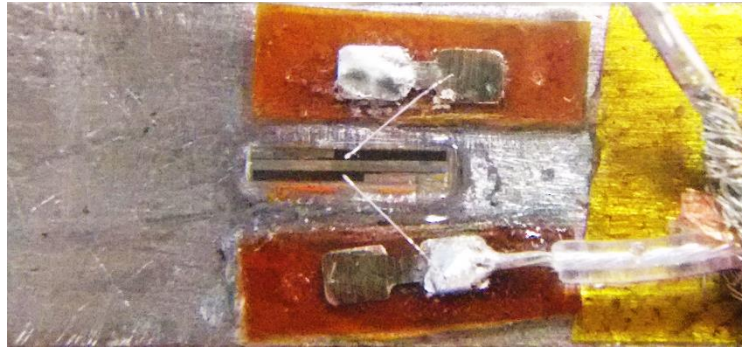


Figura 4.7 – Posicionamento do ressonador sobre o adesivo. SAW modelo 2 no Espécime 6, utilizando o adesivo 4

**Quarto:** bastante delicado, consiste em aplicar pressão sobre ressonador. Com o auxílio de um aparato, a pressão é aplicada nas extremidades, onde se localizam os refletores. Essa pressão é necessária para se obter um filme fino de adesivo, e assim cumprir a recomendação dos fabricantes de adesivo para uma ótima colagem. O aplicador de pressão é composto por uma base metálica na qual estão fixados uma viga e um parafuso para controle desta última (figura 4.8). O corpo de prova é colocado sobre a base e nela fixado. A ponta da viga possui geometria em forma de “U” responsável por pressionar o ressonador contra o corpo de prova. O parafuso vertical serve para controlar o deslocamento da viga.

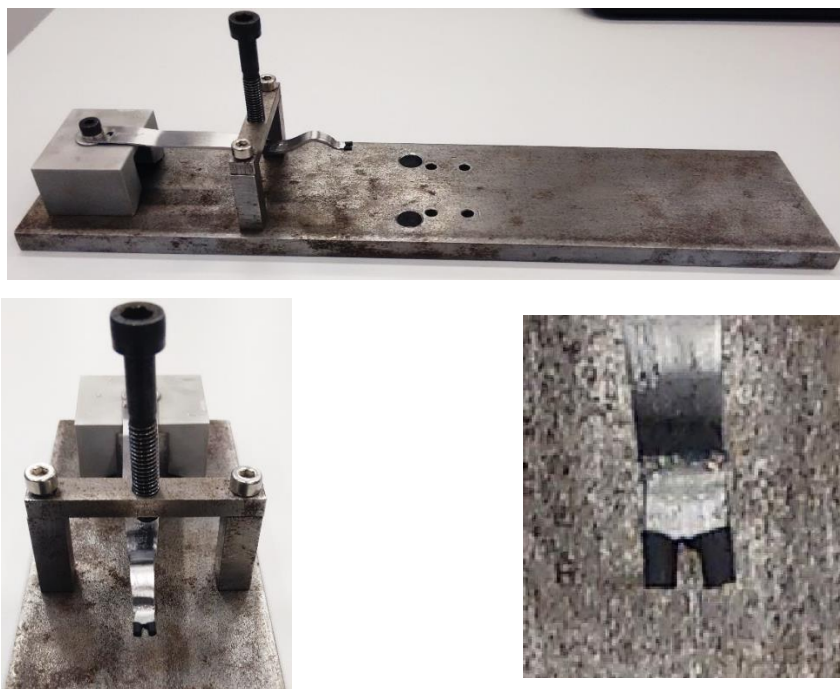
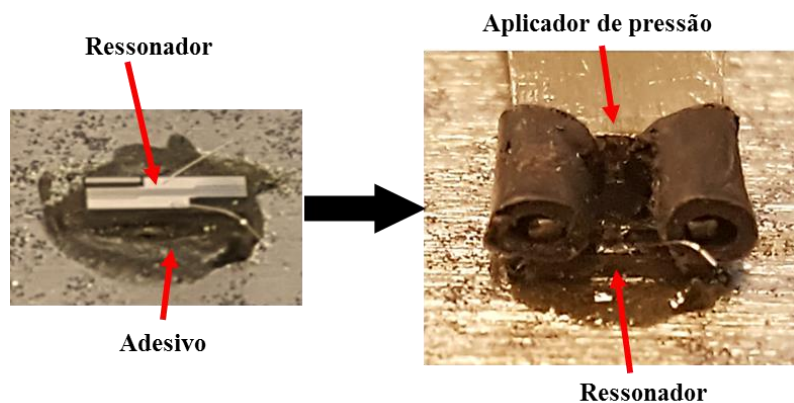
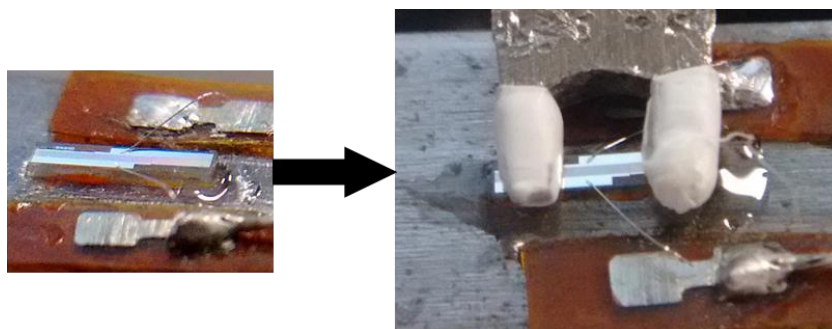


Figura 4.8 – Detalhes do aparato através do qual aplica-se a pressão de colagem



(a)



(b)

Figura 4.9 – Aplicação de pressão de colagem sobre o ressonador. (a) no Espécime 3; (b) no Espécime 6

**Quinto:** o corpo de prova segue para a etapa cura do adesivo, que ocorre dentro de uma câmara climática (figura 4.10) com temperatura e tempo ajustados de acordo com as exigências de cura de cada adesivo.

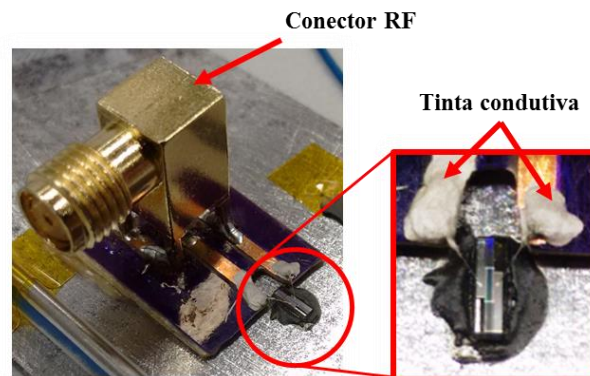


Figura 4.10 – Câmara climática Vötsch VCL 4010. Fonte: VÖTSCH, 2017

**Sexto:** a viga é levantada, cessando assim a pressão sobre o ressonador. Os fios elétricos do ressonador são, então, ligados com o uso de tinta condutiva a uma



placa com um conector RF do tipo SMA (Espécimes 1, 2 e 3) (figura 4.11(a)), ou cabo RF (Espécimes 4, 5, e 6) (figura 4.11(b));



(a)



(b)

Figura 4.11 – Detalhe da aplicação de tinta condutiva. (a) no Espécime 3; (b) no Espécime 4

**Sétimo:** o conjunto retorna à estufa para ser submetido ao processo de pós-cura visando melhoria no desempenho do adesivo seguindo as orientações dos fabricantes..

Passada a pós-cura, o ressonador está pronto para ser testado como um sensor de deformação. O sensor à fibra óptica tem a função de servir como referência para medir a deformação sofrida pelo corpo de prova.

#### 4.1.2 Corpo de prova

Ao todo, foram usados seis corpos de prova na montagem dos espécimes. Os Espécimes 1, 2 e 3 foram feitos com corpo de prova em forma de tiras de aço SAE 1020 medindo 165,5 x 33,81 x 1,25 mm. Os Espécimes 4, 5 e 6 foram feitos em outro formato, obedecendo a geometria de um corpo de prova para testes de tração destrutivos (figura 4.12).

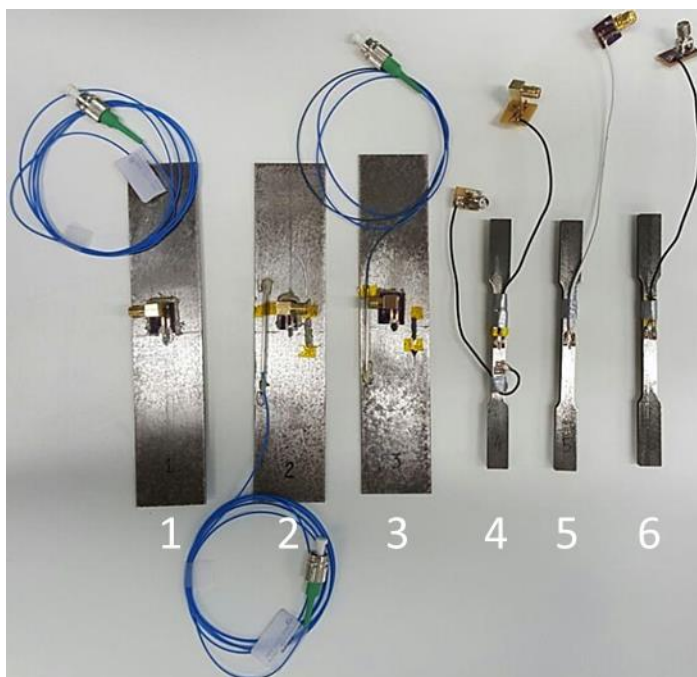


Figura 4.12 – Todos os espécimes usados nos experimentos

Nesse tipo de corpo de prova, que é submetido a esforços trativos, a região ao centro – afastada dos pontos de fixação na máquina – apresenta um campo de tensão uniforme. É nessa região onde os sensores de deformação devem ser instalados para se obter as medidas.

## 4.2 Aparato experimental

O aparato experimental (figura 4.13) tem capacidade de aplicação de carregamento uniaxial, medição de deformação do corpo de prova e leitura da frequência do SAWR. Além disso, a temperatura dos ensaios é controlada. Os equipamentos do aparato são:

**Máquina de ensaio mecânico:** comandada via programa de computador, é responsável por solicitar mecanicamente o corpo de prova. Seu atuador é totalmente eletromecânico. Possui capacidade máxima de aplicação de força de 10000 N com precisão de leitura de  $\pm 0,5 \%$ . Seu modelo é ElectroPlus E10000, da fabricante Instron®;

**Câmara térmica:** é usada para controlar a temperatura do ambiente no qual o corpo de prova está situado. Opera em conjunto com a máquina de ensaio mecânico, e também é comandada por computador;

**Interrogador óptico:** tem a função de interrogar sensores de deformação baseados em rede de Bragg. É uma fonte de luz que abrange comprimentos de onda variando desde 1510 até 1590 nm, com precisão de  $\pm 1$  pm. Sua operação é via um programa de computador específico. Seu modelo é sm125, da fabricante Micron Optics®;

**Analisador de rede vetorial:** do Inglês, *Vector Network Analyser* (VNA), é o equipamento cujo princípio de operação é a geração sequenciada de sinal de radiofrequência dentro de intervalos pré-definidos de frequência. É utilizado para determinação das frequências de ressonância e antirressonância de dispositivos elétricos. O modelo utilizado, designado E5061b, do fabricante Keysight, pode operar entre frequências que vão desde 5 Hz até 3 GHz, com precisão de  $\pm 7$  ppm.

**Computador central:** responsável pelo comando dos demais equipamentos do aparato. A partir dele pode-se dar início e fim aos experimentos de tração. Nele são armazenados os dados oriundos da máquina de ensaio mecânico, do analisador de sinal e do interrogador óptico.

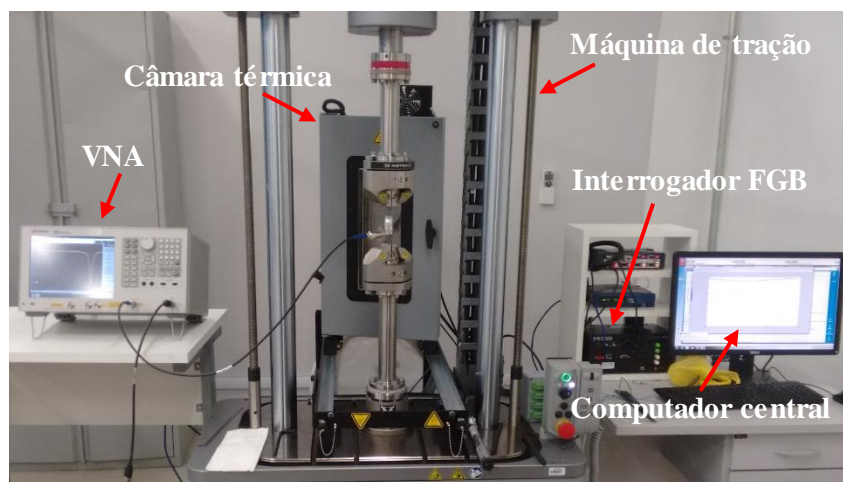


Figura 4.13 – Visão geral dos equipamentos do aparato experimental

Nesse aparato, a máquina de ensaio de tração é responsável por solicitar o corpo de prova. Nele estão colados o ressonador e o sensor de deformação a fibra óptica (Espécimes 1, 2 e 3, somente), cuja função é servir como referência para medição de deformação. O sensor FBG não foi instalado nos Espécies 4, 5 e 6 por motivos melhoria da praticidade de montagem do espécime sem a fibra óptica. A frequência de ressonância do dispositivo SAWR é monitorada e registrada com o auxílio do VNA. A medição da deformação no sensor a fibra óptica é feita com o

interrogador óptico. Tanto a máquina de tração quanto o VNA e o interrogador óptico são conectados a uma rede do tipo *ethernet* ao computador central, de onde são controlados.

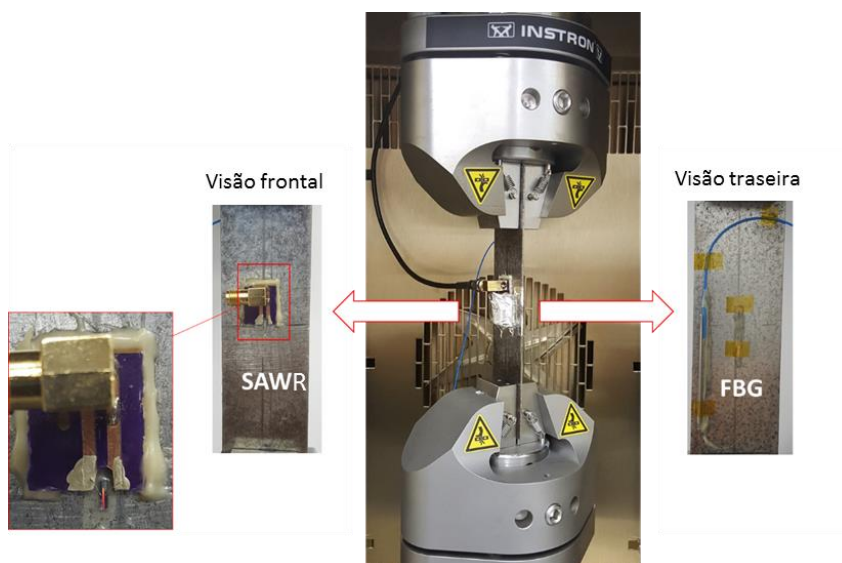


Figura 4.14 – Detalhes do Espécime 3 montado na máquina de tração

Durante a etapa de preparação do corpo de prova foram necessários os seguintes aparatos:

#### 4.2.1

##### Descrição do procedimento experimental

A máquina de ensaio de tração executa o programa de ensaio mecânico enviado pelo computador. O programa é arquitetado para que a máquina solicite o corpo de prova segundo um ciclo formado por degraus de força, progredindo do menor até o maior carregamento e, em seguida, retornando ao menor nível de carregamento. Nenhum dos patamares ultrapassa o valor da tensão de escoamento do material do corpo de prova, uma vez que se deseja realizar apenas um ensaio mecânico não-destrutivo. O ciclo é executado quatro vezes para fins de conhecimento da histerese presente no sistema.

Cada patamar de força é mantido por dois minutos e depois conduzido progressivamente, a uma taxa de 200 N/s, até o próximo nível de carregamento. Nos experimentos com os Espécimes 1, 2 os valores de força são 50, 200, 400, 600, 800, 1000, 200 e 1400 N pois, acima disso, o comportamento da frequência não é estável, configurando falha do adesivo. Nos experimentos com os

Espécimes 3, os valores de força aplicados são 100, 1000, 2000, 3000 e 4000 N. Para os Espécimes 4, 5 e 6, a força de pré-tensão do teste foi elevada de 100 para 200 N, pois a seção transversal do corpo de prova era maior. O gráfico da figura 4.15 mostra o comportamento esperado da força aplicada pela máquina ao corpo de prova durante a execução de um ciclo do programa de ensaio.

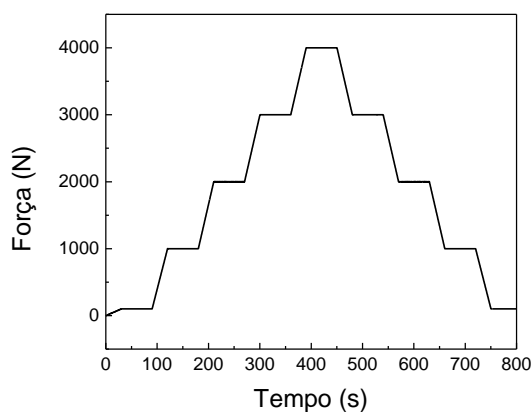


Figura 4.15 – Ciclo de carregamento executado pela máquina de tração

A Tabela 4.4 reúne as principais informações sobre os espécimes estudados e as condições de experimento.

Tabela 4.4 – Informações essenciais sobre as condições experimentais de cada espécime

Espécime	Geometria	Adesivo	SAWR	Temperatura [°C]	Carga [N]	Interrogação	Comparação
1		1	1 x 3,2 x 0,49 mm	25	50-1400	cabo	FBG
2		2	1 x 3,2 x 0,49 mm	25	50-1400	cabo	FBG
3		3	1 x 3,2 x 0,49 mm	30 - 70	100-4000	cabo	FBG
4		4	0,7 x 3,6 x 0,35 mm	30 - 70	200-4000	cabo	$\varepsilon = F/AE$
5		4	0,7 x 3,6 x 0,35 mm	25	200-4000	cabo	$\varepsilon = F/AE$
6		4	0,7 x 3,6 x 0,35 mm	25	200-7000	cabo/antena	$\varepsilon = F/AE$

### 4.3

#### Resultados dos experimentos

Os resultados experimentais e numéricos são reportados a seguir. Eles estão divididos seguindo os objetivos específicos definidos no capítulo 1. Inicialmente são apresentados os resultados experimentais associados à histerese e sensibilidade, passando pela caracterização térmica, seguida de ajustes no tipo de conexão e chegando na validação da interrogação sem fio. Essas etapas são resumidas abaixo:

- ✓ **Caracterização em função da deformação e Histerese:** tendo disponíveis quatro adesivos, a histerese e a sensibilidade à deformação do SAW foram os critérios para escolher o melhor adesivo para esta aplicação. Apenas os adesivos 3 e 4 foram satisfatórios. A sensibilidade dos espécimes com o adesivo 4 foi aproximadamente o dobro da obtida com os outros;
- ✓ **Caracterização em função da temperatura:** os Espécimes 3 (com adesivo 3) e 4 (com adesivo 4) foram submetidos a temperaturas variando de 30 a 70 °C. O melhor desempenho obtido foi o do Espécime 4 credenciando o adesivo 4 para as etapas seguintes.
- ✓ **Mudança na conexão:** a ligação elétrica com o ressonador foi alterada durante os testes para se alcançar maior praticidade e menor risco de danos ao ressonador durante a instrumentação. A placa com conector foi substituída por um cabo RF nos Espécimes 4, 5 e 6.
- ✓ **Operação sem fio:** última etapa, conduzida com o Espécime 6 (com adesivo 4), avaliou as diferenças entre a comunicação com cabo e com antenas. Constatou-se a viabilidade da operação sem fio, não sendo registradas alterações significativas na sensibilidade à deformação do sensor.

Por último, os resultados experimentalmente são comparados com um modelo analítico-numérico para validar e entender mais detalhamento o comportamento mecânico do sistema.

#### 4.3.1

##### Resultados do teste de tração

Os resultados dos experimentos realizados com os espécimes são apresentados a seguir. Em todos eles, os SAWR colados apresentaram frequência

de ressonância diferente da nominal (433,92 MHz) especificada pelo fabricante. As tensões geradas no processo de colagem e eventuais descasamentos de impedância elétrica podem ter sido os responsáveis por tais mudanças. Os espécimes passaram por uma etapa de pós-cura do adesivo sem a presença do aplicador de pressão sobre o SAWR para aliviar tensões residuais no adesivo.

Em todos os experimentos, a relação entre a variação de frequência do ressonador e a deformação do espécime se mostra com tendência linear forte. A influência dos adesivos na sensibilidade à deformação dos espécimes também é notável, resultando, na faixa de temperatura de 25 a 30 °C, em variações de até 56%, por exemplo.

A curva de do parâmetro  $S_{11}$  dos Espécimes 1 e 2 é reproduzida na figura 4.16, e evidencia que, apesar de ser usado o mesmo modelo de ressonador (modelo 1) nos dois espécimes, a frequência de operação pode mudar em função do processo de colagem e a conectorização.

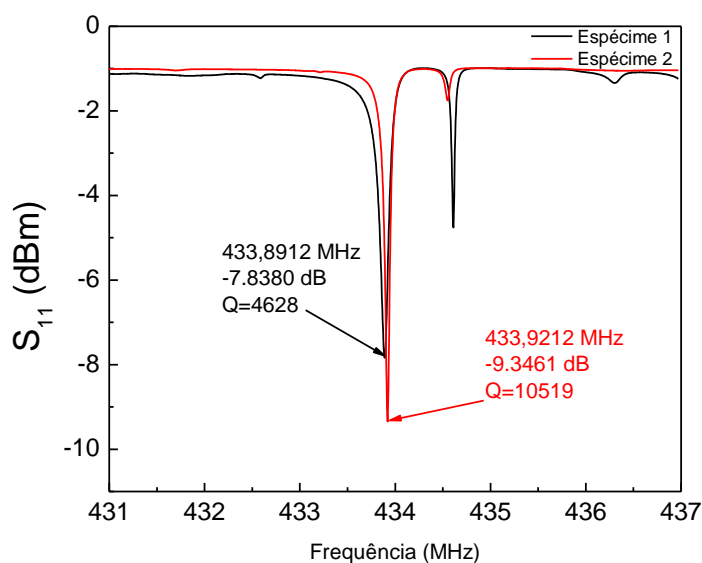


Figura 4.16 – Energia refletida  $S_{11}$  dos ressonadores dos Espécimes 1 e 2

A figura 4.17 mostra a variação de frequência de ressonância dos SAWR, instalados nos Espécimes 1 e 2, em função da deformação medida pelos sensores FBG. O desvio padrão e a histerese das medições com os sensores FBG são reduzidos, o que assegura a utilização desses como referência para a deformação presente nos espécimes. Quanto ao comportamento da frequência dos SAWR, ela decresce proporcionalmente ao valor de deformação, indicando que a superfície superior do ressonador está sob tensões positivas ao longo do eixo de propagação



da onda. Observa-se também, baixo desvio padrão nos patamares de carga, porém os valores de frequência, para um mesmo valor de carregamento, divergem no ciclo em função da histerese do conjunto. As sensibilidades dos Espécimes 1 e 2, obtidas por meio de ajuste linear, usando o método dos mínimos quadrados, foram de  $-185,1483$  e  $-181,3412$  Hz/ $\mu\epsilon$ , respectivamente, indicando que o comportamento mecânico dos adesivos 1 e 2 é semelhante, apesar do primeiro ser para uso em transdutores, e o segundo, para uso estrutural.

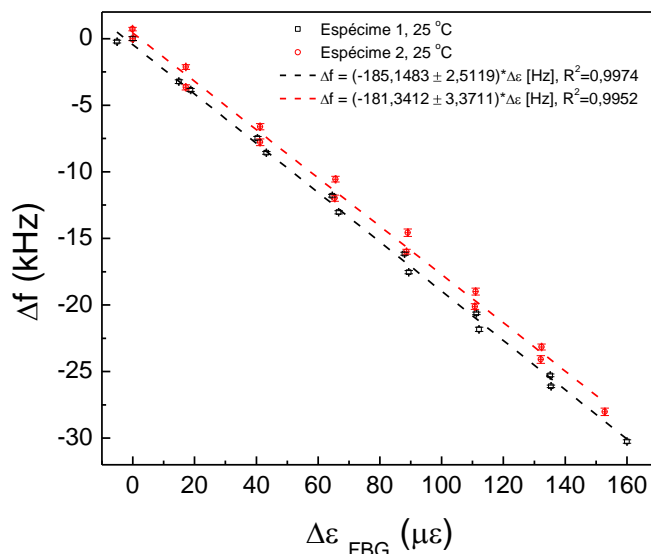


Figura 4.17 - Variação de frequência do ressonador dos Espécimes 1 e 2 em função da deformação longitudinal

Quando testados em degraus de força acima de 1400 N (ou 160  $\mu\epsilon$ ), o sinal de frequência dos Espécimes 1 e 2 não se manteve mais estável, variando continuamente no tempo (figura 4.18). Esse comportamento pode ser devido à falha da junta colada, causada por descolamento da interface do adesivo com SAWR ou com o metal, e/ou fluência do adesivo devido ao nível da tensão mecânica gerada.



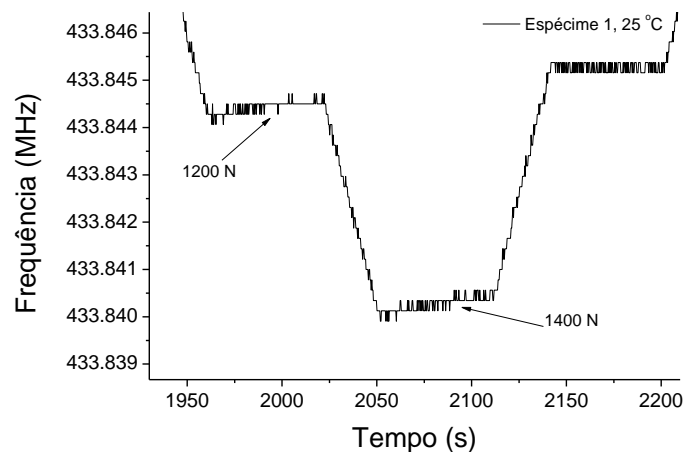


Figura 4.18 – Variação da frequência em patamares constantes de força de tração

A figura 4.19 apresenta resposta da frequência do Espécime 3 (com adesivo 3) em diferentes condições de temperatura (30, 50 e 70 °C) e sob maiores carregamentos (de até 4000 N). Nessas condições, as sensibilidades foram -189,7283, -176,3144 e 154,7436 Hz/ $\mu\epsilon$ , respectivamente. A 30 °C, a sensibilidade é semelhante à calculada para os Espécimes 1 e 2, porém, maiores valores de deformação foram alcançados (até 490  $\mu\epsilon$ ). É importante notar que o sensor FBG do Espécime 3 apresentou maior histerese do que nos casos anteriores, mas ainda pôde ser utilizado como referência. Por ser um adesivo estrutural, o adesivo 3 pode não oferecer boa aderência com a superfície da fibra óptica. Para evitar danificar ou sujar a superfície exposta do SAWR, não foi aplicada pressão sobre a fibra para realizar a colagem, pois qualquer descuido do operador poderia lançar partículas sobre o SAWR. A ausência da pressão pode reduzir a eficiência da colagem.

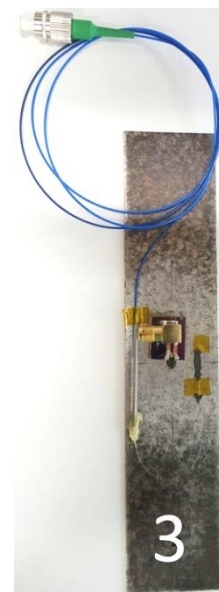
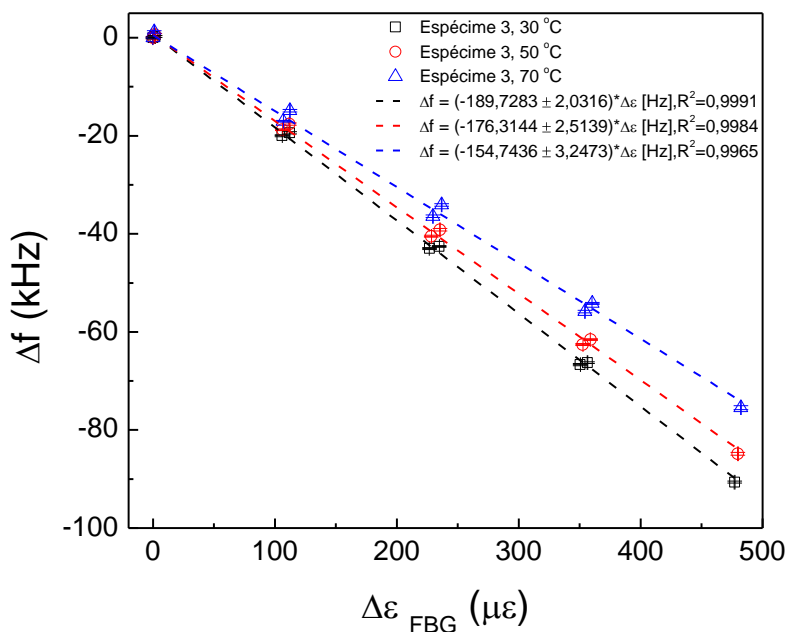


Figura 4.19 - Variação de frequência do ressonador do Espécime 3 entre 30 e 70 °C em função da deformação longitudinal

O gráfico da figura 4.20 demonstra que a sensibilidade do espécime diminui a uma taxa de 0,8420 Hz/ $\mu\epsilon$ °C, entre 30 e 70 °C. Por não se tratar de um adesivo para uso em transdutores, o adesivo 3 pode ter suas propriedades mecânicas alteradas em temperaturas acima da temperatura ambiente, refletindo em menor desempenho na transferência de deformação entre as superfícies da junta colada.

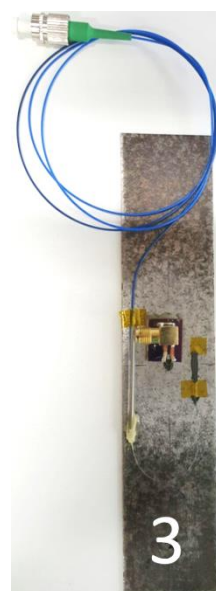
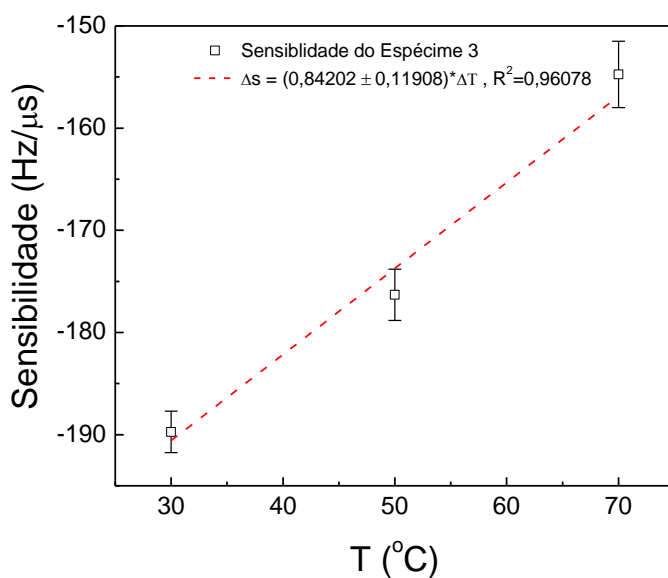


Figura 4.20 – Comportamento da sensibilidade de ressonador do Espécime 3 em função da temperatura

A seguir, na figura 4.21 estão as curvas de  $S_{11}$  do ressonador longitudinal (linha preta) e transversal (linha vermelha) instalados no Espécime 4, ambos colados com o adesivo 4.

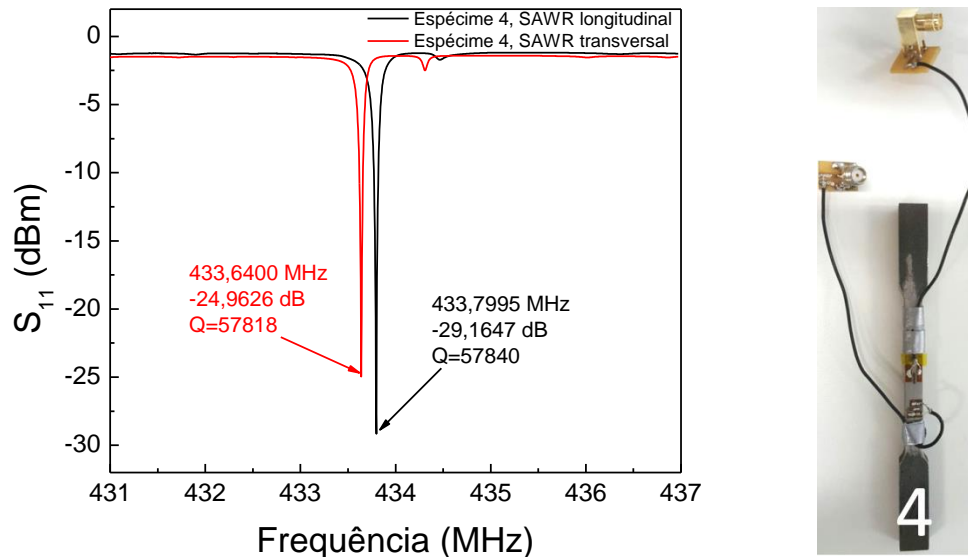


Figura 4.21 – Energia refletida  $S_{11}$  dos ressonadores longitudinal e transversal

A Figura 4.22 mostra que, enquanto a variação da frequência do SAWR longitudinal é negativa – assim como ocorreu nos casos anteriores –, a variação de frequência do SAWR transversal é positiva, indicando que o ressonador está sob ação da deformação negativa resultante da estricção no espécime. A sensibilidade de  $-391,8418 \text{ Hz}/\mu\epsilon$  calculada para o SAWR longitudinal, na temperatura de  $30^\circ\text{C}$  é quase o dobro da sensibilidade do Espécime 3 nessa mesma temperatura.

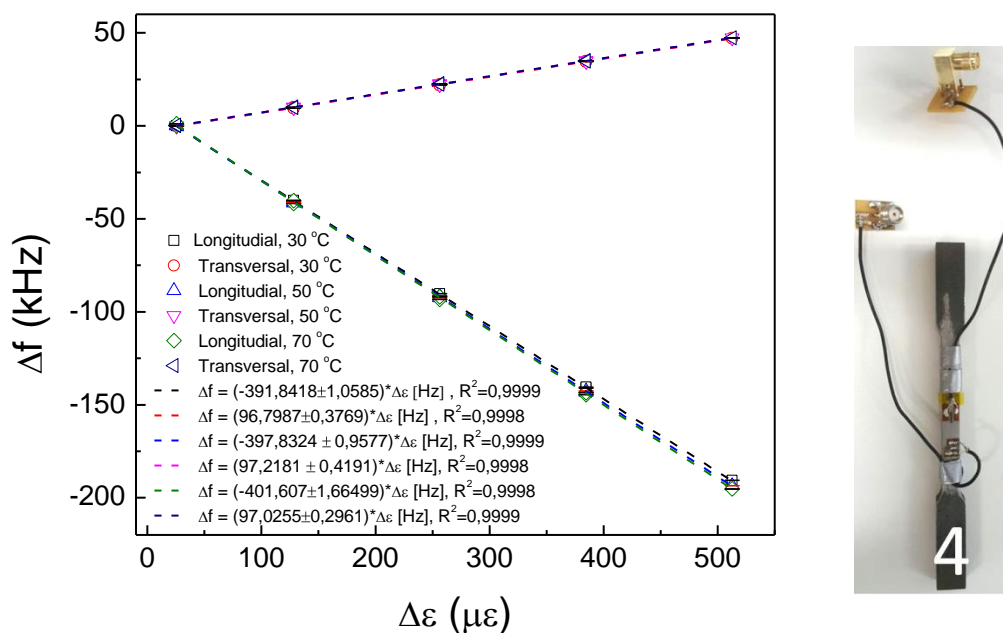


Figura 4.22 - Variação de frequência dos ressonadores montados perpendicularmente entre si no Espécime 4

A figura 5.9 compara as sensibilidades dos dois ressonadores entre 30 e 70 °C. O efeito da temperatura sobre ambos SAWR é de leve aumento da sensibilidade, apesar de também haver aumento nos desvios padrão das medições. Esperava-se que a sensibilidade do Espécime 4 se mantivesse constante, pois o fabricante especifica que o adesivo 4 pode funcionar em 80 °C sem que haja prejuízo da junta colada. Esse comportamento é o inverso do registrado com o Espécime 3, cuja sensibilidade reduziu em função da temperatura.

O maior desvio padrão registrado nas medições do SAWR transversal se deve, principalmente, ao fato de que o intervalo de frequência varrido pelo VNA (*span*) durante a procura do pico é configurado tendo em vista a maior variação de frequência que pode ocorrer no experimento, que é a do SAWR longitudinal, pois este está sob maiores deformações. Na prática, o pico negativo – que representa a frequência de ressonância do SAWR transversal – se movimenta em um menor intervalo. Portanto, o ideal é que cada ressonador seja interrogado dentro de sua faixa de variação de frequência para que a resolução seja a melhor possível.

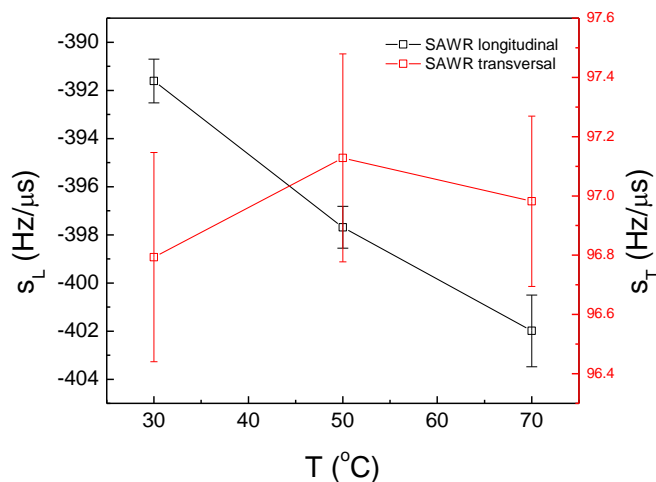


Figura 4.23 – Sensibilidade dos ressonadores longitudinal ( $s_L$ ) e transversal ( $s_T$ )

Os dados do experimento com o Espécime 5 são exibidos no gráfico da figura 4.24. Neste caso, a sensibilidade calculada de  $-405,5851 \text{ Hz}/\mu\epsilon$  é superior aos valores relatados anteriormente. Os grandes diferenciais do Espécime 5 são a utilização do adesivo 4 e a substituição da placa com conector por um cabo RF. A substituição da placa pelo cabo RF se deu por motivos de mais praticidade de instalação e uso. Com o adesivo 4 foi possível solicitar o espécime até deformações próximas de  $900 \mu\epsilon$  (equivalente a 7000 N na máquina de tração) sem o aumento apreciável da histerese.

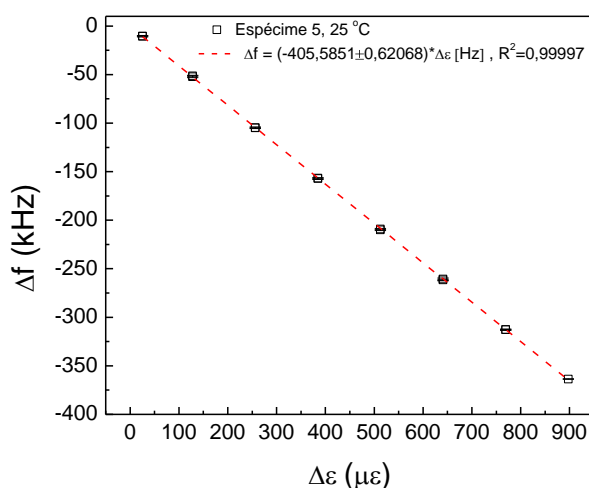
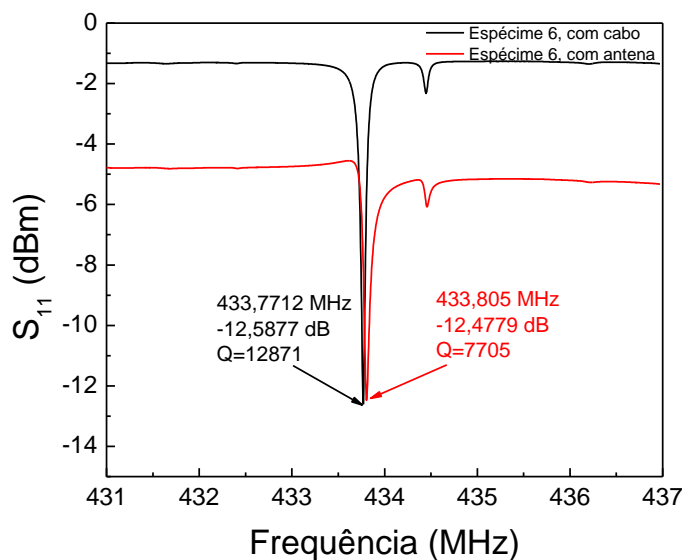
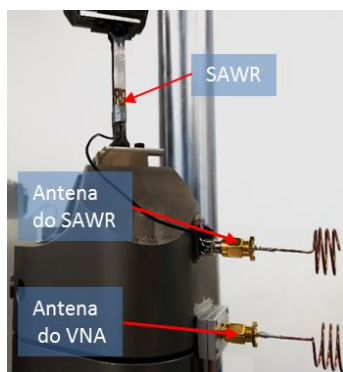


Figura 4.24 – Variação de frequência do ressonador do Espécime 5 em função da deformação longitudinal

Os experimentos com o Espécime 6, também montado usando o adesivo 4, seguiram duas abordagens: uma usando apenas o cabo RF; e outra passiva, usando antenas como meio de comunicação (figura 4.25(a)). As curvas de energia

refletida ( $S_{11}$ ), para os dois casos, são mostradas na figura 4.25(b). A energia provida pelo VNA é irradiada pela antena para ambiente em um espectro de frequência mais largo do que o do cabo. Como consequência, dentro desse espectro, a curva  $S_{11}$  é mais negativa do que a curva de  $S_{11}$  do circuito por cabo, e menos energia está disponível para alimentar o SAWR. Com o cabo, a amplitude do pico e fator de qualidade  $Q$  são, aproximadamente, 12871 e 11,23 dBm (linha preta); com as antenas, diminuem para 7705 e 7,32 dBm (linha vermelha). Outra mudança que ocorreu foi um pequeno desvio no valor da frequência de ressonância, indo de 433,7712 MHz para 433,8050 MHz com as antenas instaladas. Tal alteração pode ter sido provocada por diferenças de impedância elétrica do canal de comunicação quando operado com antenas.



(a)

(b)

Figura 4.25 – (a) Parâmetro  $S_{11}$  no funcionamento com e sem fio; (b) Detalhe das antenas usadas na operação sem fio

A mudança de frequência do Espécime 6, interrogado via cabo e antena, é exibido na figura 4.26 a seguir. A sensibilidade, nos dois casos, foi praticamente igual, sendo de -412,7578 e -411,5626 Hz/ $\mu\epsilon$  para a montagem sem e com antena, respectivamente. Com o emprego das antenas, o desvio padrão das amostras aumentou ligeiramente, pois o pico negativo tornou-se menos agudo e isso diminui a precisão de busca de pico feita pela VNA. A adoção de conexão por antenas resultou em números de sensibilidade similares aos de uma conexão por cabo RF, mostrando que a operação sem fio de um SAWR é aplicável. Apesar

disso, a frequência de ressonância pode mudar em função das variáveis do ambiente e levar a medidas errôneas da deformação. Uma maneira de compensar a variação da frequência devido a fatores externos é instalar um outro SAWR junto ao SAWR colado e proceder a interrogação avaliando sempre a diferença entre as frequências dos dois. Como estão conectados juntos, as alterações externas induzirão mudanças iguais nos dois. Portanto, basta medir a diferença das frequências para ter a informação de deformação real.

A medição com antena não foi realizada com o Espécime 4, que possui os ressonadores perpendiculares entre si, porque as frequências de operação dos dois era muito próxima e não haveria como de diferenciar uma da outra. Para usar as antenas, são necessários ressonadores com frequências de operação mais afastadas, de maneira que, em toda a faixa de trabalho, elas não sejam iguais, pois haverá confusão na identificação do sensor.

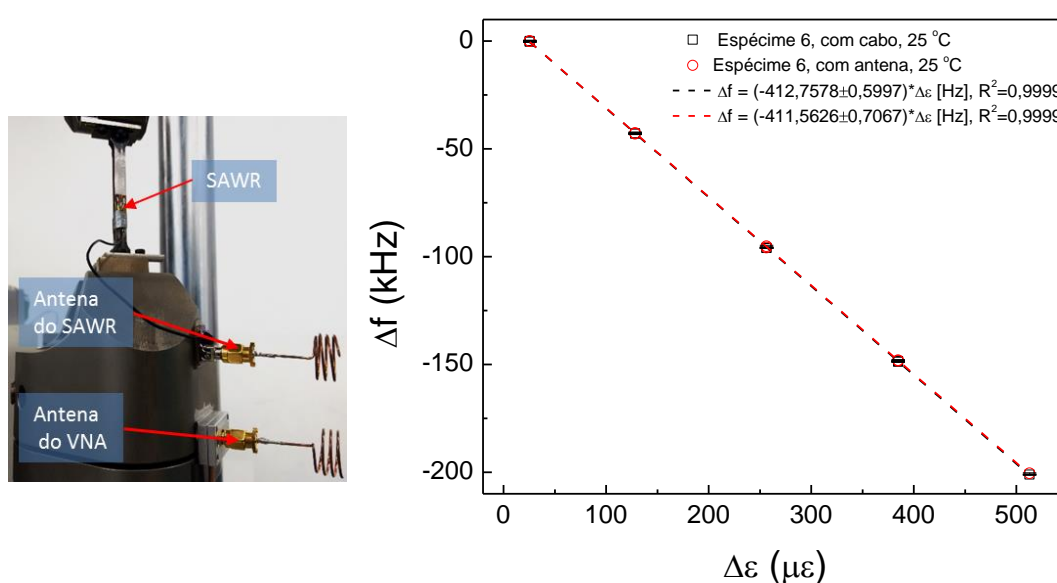


Figura 4.26 – Variação de frequência do ressonador do Espécime 6 interrogado via cabo e via antena

Apesar do método de colagem ter se mostrado eficaz com os espécimes anteriores, a pressão exercida sobre o ressonador depende da experiência de quem opera o aparato. O bom desempenho do adesivo depende do atendimento a uma faixa de pressão de colagem especificada pelo fabricante. Caso a pressão esteja fora dessa faixa, a capacidade transferência de deformação na junta colada pode ser prejudicada.

Os principais resultados dos experimentos de tração estão agrupados na figura 4.27, e são representados pelos seus ajustes lineares. As divisões por regiões destacadas no gráfico demonstram que a evolução geral dos experimentos levou ao aumento progressivo da faixa de deformação. Dos adesivos testados, o adesivo 4 foi o que proporcionou maior sensibilidade em uma faixa de deformação mais ampla, além de repetitividade dos resultados. Os outros adesivos (1, 2 e 3) conferiram sensibilidades muito próximas entre si, porém não foram satisfatórios quanto aos quesitos de histerese e desempenho nos testes com temperatura. A linha verde-escura, representante do SAWR transversal do Espécime 4, destaca como a resposta do ressonador é afetada pela sua orientação em relação ao campo de deformação. Finalmente, a linha verde-clara com marcador em forma de cruz mostra que o sensor montado com o adesivo 4 tem potencial para medir deformações acima da faixa adotada na maioria dos experimentos, chegando a 900  $\mu\epsilon$  sem sofrer prejuízos mecânicos.

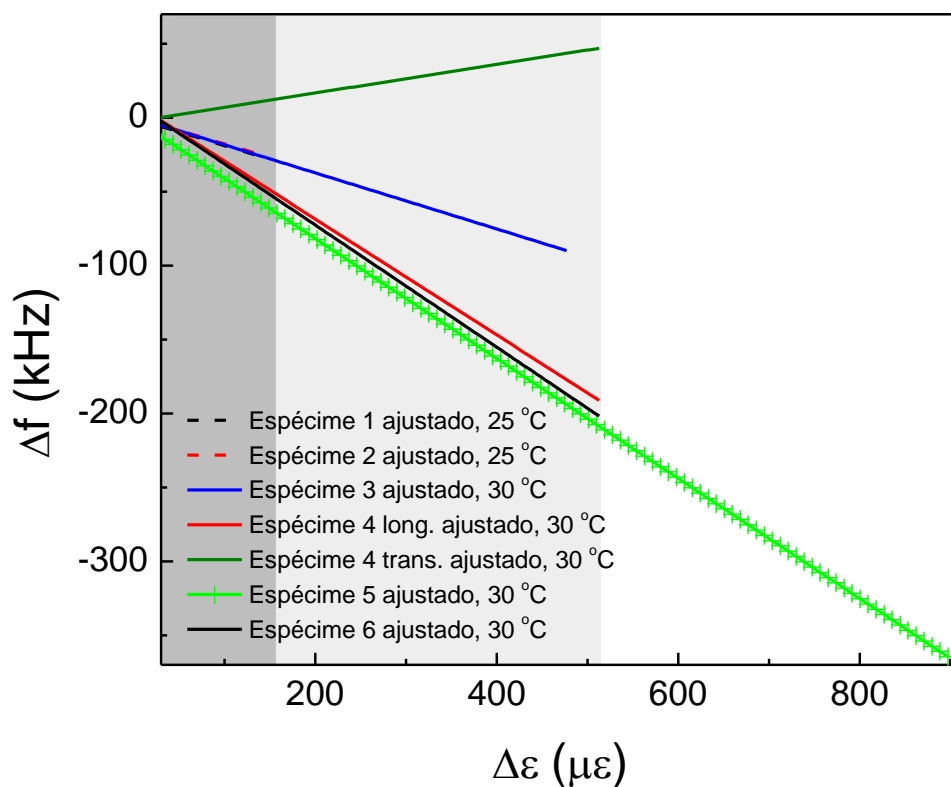


Figura 4.27 – Reunião as retas de ajuste linear de todos os espécimes em temperaturas entre 25 e 30 °C

A Tabela 4.5 condensa os resultados dos experimentos de tração.



Tabela 4.5 – Principais resultados dos experimentos de tração

Espécime	Adesivo	T [°C]	Sensibilidade [Hz/ με]		Δε <sub>máx</sub> [με]	Q
			Cabo	Antena		
1	1	25	-185,1482	-	160,0180	4628
2	2	25	-181,3412	-	152,8518	10519
3	3	30	-189,7283	-	477,0263	23192
		50	-176,3144		479,7625	
		70	-154,7436		482,2507	
4	4	30	ª[L] -391,8418, º[T] 96,7987		512,8205	[L] 57840 [T] 57818
		50	[L] -397,8324, [T] 97,2181			
		70	[L] -401,6070, [T] 97,0255			
5	4	25	-405,5851	-	897,4359	737
6	4	25	-412,7578	-411,5626	512,8205	12871

<sup>a</sup>[L]: SAWR com orientação longitudinal; <sup>b</sup>[T]: SAWR com orientação transversal.

### 4.3.2

#### Resultados do teste de sensibilidade à temperatura

A frequência de ressonância do SAWR é dependente da temperatura de trabalho. A sensibilidade do quartzo com corte ST-X é de  $-34 \times 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ , de acordo com Bigler *et al.* (1991) e Sinha *et al.* (1985). O fabricante do cristal utilizado no experimento reporta a sensibilidade igual a  $-32 \times 10^{-9} \text{ K}^{-2}$  (HIB, 2017). Esses valores são para o corpo de ressonador livre, sem estar colado a nenhum outro corpo. Os experimentos com temperatura buscaram detectar a mudança de sensibilidade que ocorre quando o ressonador está colado ao aço com o uso do adesivo 4.

A figura 4.28 mostra a variação da frequência tanto do SAWR livre quanto do colado (Espécime 3). Comportamento é não linear e pode ser ajustado com um polinômio de segundo grau. O coeficiente de segunda ordem calculado para o SAWR livre foi de  $-32,57 \times 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ , bastante próximo do relatado pelo fabricante. Já o do SAWR colado foi de  $-28,96 \times 10^{-9} \text{ K}^{-2}$ , menor do que o anterior. Segundo Hempel *et al.* (2012), o coeficiente de expansão térmica linear do quartzo varia entre  $7,1$  e  $20,91 \times 10^{-6} \text{ m/m.K}$ , enquanto o do aço comum  $12 \times 10^{-6} \text{ m/m.K}$ , e o do adesivo 3 é  $3,4 \times 10^{-5} \text{ m/m.K}$ . Essa interação entre os materiais pode explicar a redução no coeficiente de segunda ordem da sensibilidade à temperatura do ressonador colado. O aço e o adesivo agem interferindo na expansão térmica do quartzo, alterando o estado de tensão do ressonador e a velocidade das ondas de superfície.

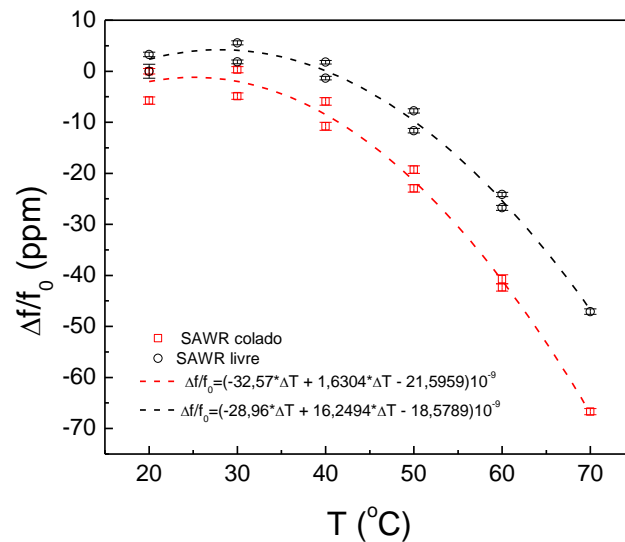


Figura 4.28 – Relação entre a temperatura e a frequência de ressonância do SAWR

O conhecimento do coeficiente de sensibilidade de segunda ordem à temperatura permite compensar as variações de frequência de devido a mudanças de temperatura no ambiente de medição. Uma maneira realizar essa compensação é instalar, próximo ao SAWR colado, outro SAWR igual e sem adesivo para que sofra apenas efeitos da temperatura local, e medir a frequência dos dois e isolar o efeito da deformação através da diferença entre os valores.

## 5 Análise numérica

Um modelo numérico reproduzindo o ressonador sobre o corpo de prova e a camada de adesivo entre os dois foi criado para fins de melhor entendimento a respeito da distribuição de tensão e deformação nos corpos. Por ser relativamente espesso e rígido, quando comparado a um sensor FBG ou a um *strain gage* resistivo, espera-se que o campo de deformação na superfície do SAW seja diferente daquele presente na superfície do corpo de prova. O material e a espessura do adesivo também são fatores que interferem na transmissão de deformação entre os corpos.

Utilizou-se o software de elementos finitos COMSOL Multiphysics® 5.2 para modelar e simular a física do problema em questão.

### 5.1 Geometria e discretização do modelo

A montagem do corpo de prova com o SAWR foi reproduzida com as mesmas dimensões no modelo numérico. A figura 5.1 mostra a geometria e as diferentes orientações do SAWR consideradas. A espessura utilizada para o adesivo foi de 30  $\mu\text{m}$ .

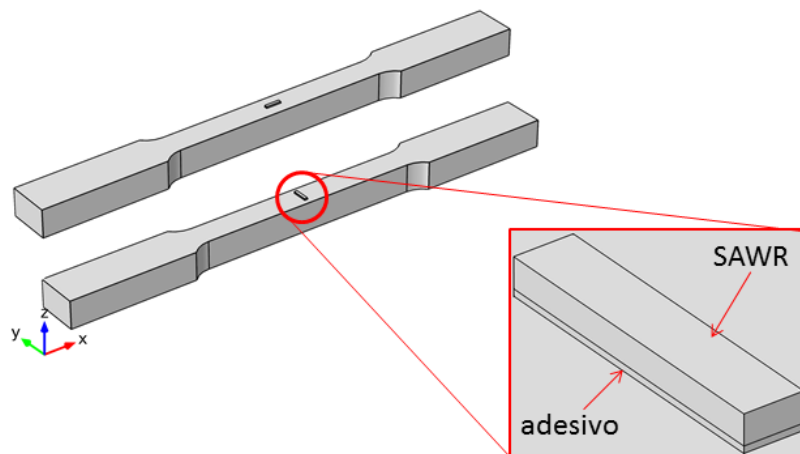


Figura 5.1 – Geometria do modelo numérico

Dois tipos de malha foram usados na simulação. Os domínios do SAWR e adesivo foram discretizados com malhas estruturadas, enquanto que o domínio do corpo de prova foi discretizado tanto com malhas estruturadas quanto com triangulares. As regiões do corpo de prova que não apresentavam curvatura e nem eram adjacentes ao domínio do adesivo receberam malhas parametrizadas. O restante recebeu as malhas tetraédricas.

A escolha por malhas parametrizadas reduz o tempo necessário para a solução do modelo, pois menos elementos são necessários para dividir o domínio. A figura 5.2 mostra as malhas aplicadas à geometria e os parâmetros  $W$ ,  $L$  e  $T$ , que representam o número de divisões das arestas tanto do corpo de prova quanto do SAW. Esses parâmetros são usados no estudo de convergência de malha variando-se os seus valores até a os resultados do modelo numérico sejam independentes do número de elementos de malha.

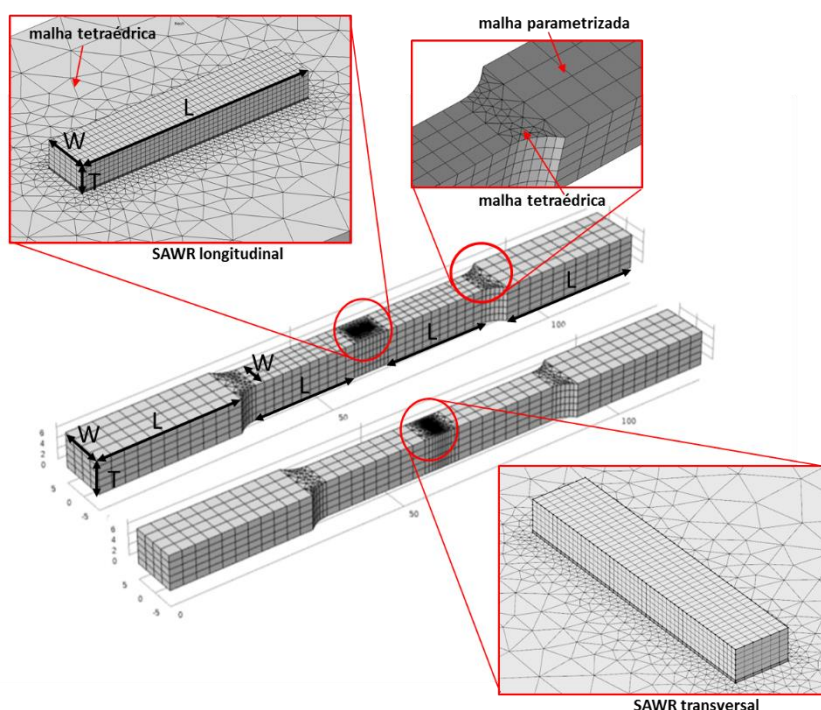


Figura 5.2 – Diferentes malhas e utilizadas na discretização do modelo

## 5.2

### Condições de contorno e materiais

As condições de contorno, ilustradas na figura 5.3 foram atribuídas às duas faces do corpo de prova. Em uma, foi aplicada a condição de contorno de restrição

de movimento em todas as direções ( $\vec{u}=0$ ). Na outra, foi aplicada a condição de força total  $F_x = (200, 1000, 2000, 3000, 4000)$  N.

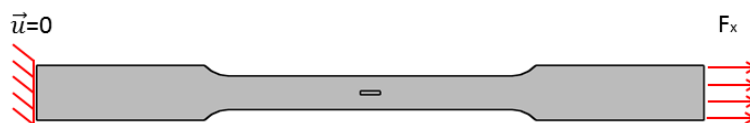


Figura 5.3 – Condições de contorno consideradas no modelo

Para o domínio representando o corpo de prova, foi atribuído o material aço com módulo e de Young de 200 GPa e coeficiente de Poisson igual a 0,33. Ao domínio do SAW foi atribuído o material quartzo LH, cuja matriz de rigidez é representada segundo a convenção IRE 1949. Ao domínio do adesivo foi atribuído um módulo de Young no valor de 3 GPa. A figura 5.4 mostra a matriz.

	1	2	3	4	5	6
1	$8,67362 \times 10^{10}$	$6,98527 \times 10^9$	$1,19104 \times 10^{10}$	$-1,79081 \times 10^{10}$	0	0
2	$6,98527 \times 10^9$	$8,67362 \times 10^{10}$	$1,19104 \times 10^{10}$	$1,79081 \times 10^{10}$	0	0
3	$1,19104 \times 10^{10}$	$1,19104 \times 10^{10}$	$1,07194 \times 10^{11}$	0	0	0
4	$-1,79081 \times 10^{10}$	$1,79081 \times 10^{10}$	0	$5,79428 \times 10^{10}$	0	0
5	0	0	0	0	$5,79428 \times 10^{10}$	$-1,79224 \times 10^{10}$
6	0	0	0	0	$-1,79224 \times 10^{10}$	$3,99073 \times 10^{10}$

Figura 5.4 – Matriz de constantes elásticas do quartzo. Unidades: Pa

### 5.3 Resultados do modelo numérico

O estudo de convergência de malha, cujo resultado é mostrado na Tabela 5.1, foi feito em duas etapas. Em ambas, tanto a tolerância quanto à qualidade dos elementos (razão de aspecto) foi monitorada. Na primeira, verificou-se que o critério de convergência da malha do corpo de prova foi obedecido no passo 10 de refino do domínio. Na segunda etapa, a convergência do domínio do SAWR ocorreu no passo 6. Na Tabela 5.1 estão os parâmetros de malha para os quais foram obtidas as convergências.

Tabela 5.1 – Parâmetros de malha resultantes do estudo de convergência

Domínio	Parâmetro			Erro relativo
	L	W	T	
Corpo de prova	11	4	4	$-4,3247 \times 10^{-5}$
SAWR	50	6	6	$2,3210 \times 10^{-4}$

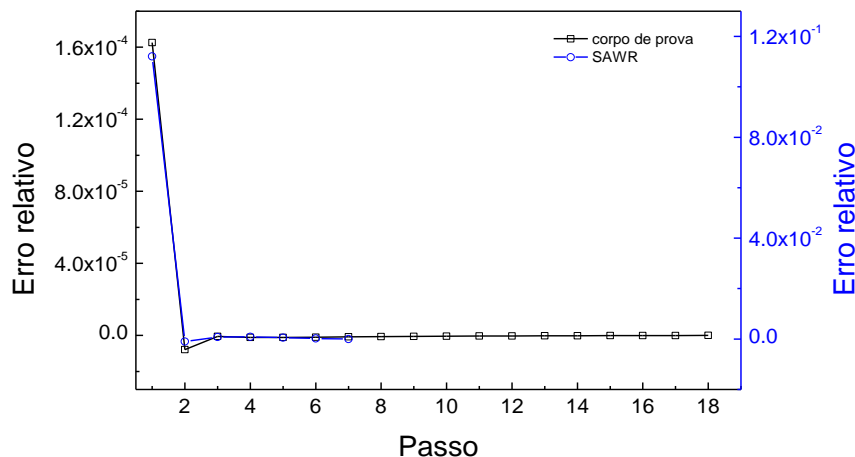


Figura 5.5 – Estudo de convergência de malha

O campo de deformação  $\varepsilon_{xx}$  dos dois modelos, para  $F = 4000$  N, é mostrado nas figuras 5.6 e 5.7. Em ambos, o campo de deformação na região útil do corpo de prova é uniforme com média de  $499 \mu\epsilon$ , próxima do valor de  $512,82 \mu\epsilon$  calculado para corpo de prova experimental. O campo na superfície superior dos ressonadores muda de acordo com a orientação em relação à direção de maior deformação (direção  $x$ ), indicando que a transmissão de deformação até o topo é influenciada pela sua geometria do ressonador. Maiores níveis de deformação são transmitidos ao topo do SAWR longitudinal do que do transversal, atingindo o valor de  $378,52 \mu\epsilon$  no primeiro e  $-32,88 \mu\epsilon$  no segundo. No caso do SAWR transversal, a deformação positiva na direção  $x$  do corpo de prova levou ao aparecimento de um campo negativo de deformação no seu topo, dada a sua espessura.

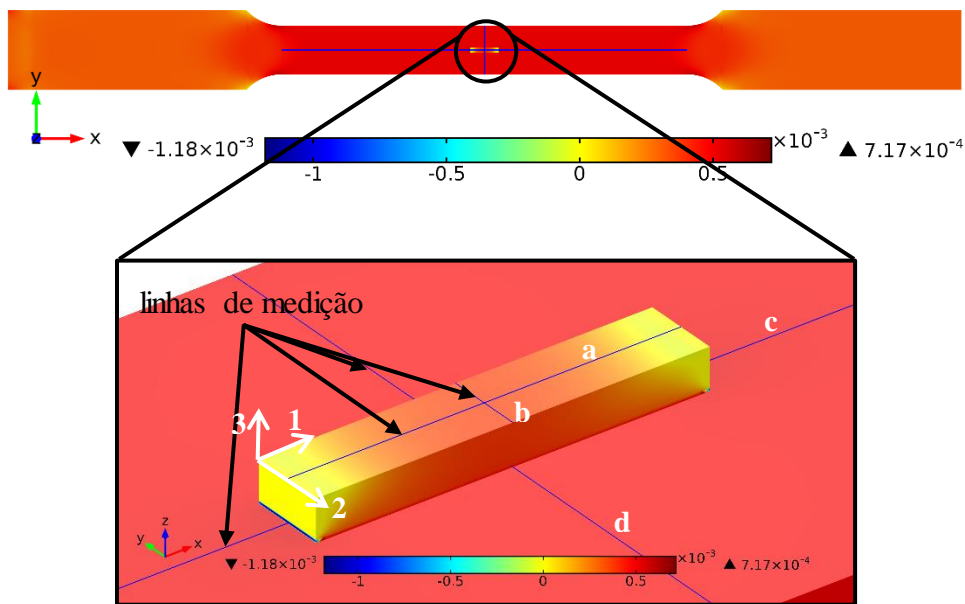


Figura 5.6 – Campo de deformação  $\epsilon_{xx}$  do modelo com o SAWR longitudinal. Máxima deformação sobre o SAWR foi  $\epsilon_{11} = 378,51 \mu\epsilon$

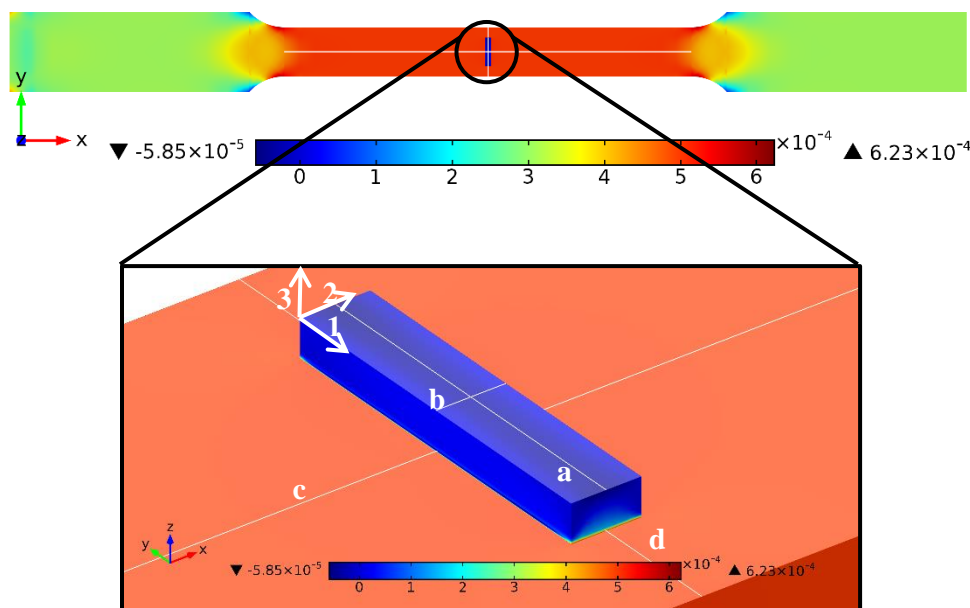


Figura 5.7 - Campo de deformação  $\epsilon_{xx}$  do modelo com o SAWR transversal. A mínima deformação sobre o SAWR foi  $\epsilon_{11} = -32,88 \mu\epsilon$

As linhas de medição indicadas nas figuras 5.6 e 5.7 foram usadas para mensurar o perfil das tensões/deformações mecânicas locais. Para facilitar a comparação entre os modelos, um sistema de coordenadas local será adotado a partir de agora nas análises. Ao longo do comprimento, largura e espessura do SAWR serão orientados os eixos 1, 2 e 3, respectivamente. Os perfis de tensão  $T_{11}$  e  $T_{22}$ , ao longo das linhas “a” e “b” no topo dos SAWR longitudinal e transversal, respectivamente, são reproduzidos nas figuras 5.8 e 5.9.

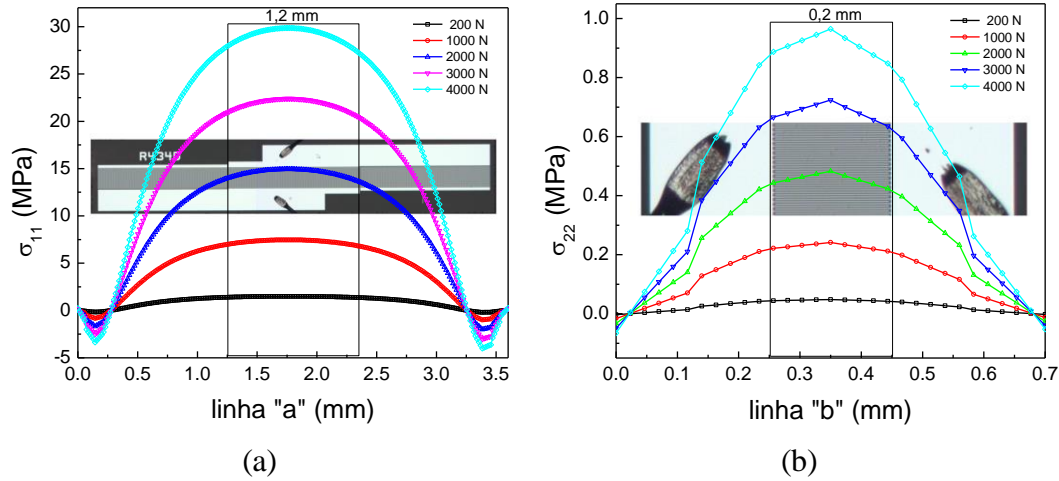


Figura 5.8 – Distribuições de tensão sobre o SAWR longitudinal. (a) tensão  $T_{11}$  ao longo da linha "a"; (b) tensão  $T_{22}$  ao longo da linha "b"

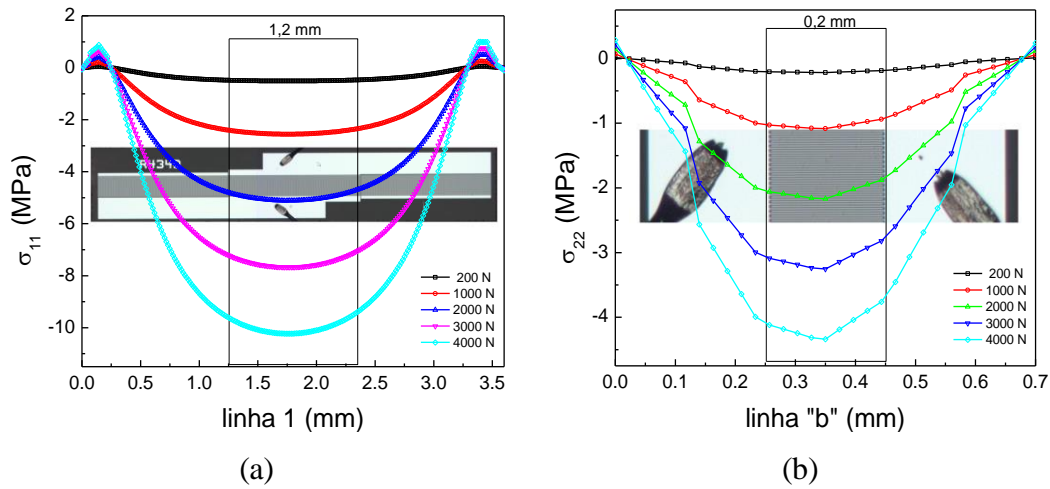


Figura 5.9 - Distribuições de tensão sobre o SAWR transversal. (a) tensão  $T_{11}$  ao longo da linha "a"; (b) tensão  $T_{22}$  ao longo da linha "b"

Como pode-se notar, os perfis não são uniformes e, em alguns locais, atingem valores negativos. As distâncias delimitadas pelas linhas verticais pretas representam as extensões da região que parte do canal acústico, onde se localizam os transdutores interdigitais no SAWR e de onde se emitem e recebem as ondas de superfície responsáveis pela ressonância dentro do canal acústico. Escolheu-se a área que compreende os transdutores interdigitais porque o estado de tensão/deformação nesta região dita a frequência de operação do ressonador, pois altera distância entre os *interdigitals* e induz mudança na velocidade de propagação das ondas de superfície que configuram a ressonância.

Nos perfis de tensão do modelo com SAWR na longitudinal (figura 5.8 (a) e (b)), com  $F = 4000$  N, as máximas tensões foram  $T_{11} = 29,86$  MPa e  $T_{22} = 0,965$



MPa. Enquanto isso, no outro modelo (figura 5.9(a) e (b)), os perfis são majoritariamente negativos, alcançando  $T_{11} = -10,23$  MPa e  $T_{22} = -4,34$  MPa. O perfil de tensão  $T_{22}$  no topo do SAWR tem o sinal inverso da tensão/deformação presente na superfície do corpo de prova, nessa mesma direção.

Calculando as médias das distribuições das tensões  $T_{11}$  e  $T_{22}$  dentro das regiões delimitadas mostradas nos gráficos acima e inserindo-as na eq. (3.1) - para predição da variação da frequência - tem-se uma aproximação da sensibilidade teórica à deformação dos ressonadores modelados. O gráfico da figura 5.10 mostra as variações calculadas para os dois modelos numéricos e compara aos resultados do experimento com o Espécime 4, equipado com dois SAWR orientados perpendicularmente entre si. A deformação indicada na abscissa é a média do campo  $\varepsilon_{xx}$  calculada em uma região de campo de deformação uniforme no corpo de prova.

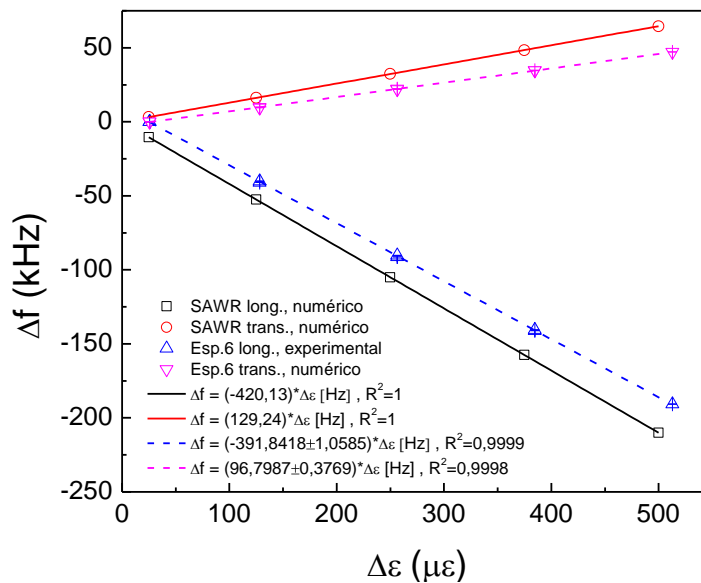


Figura 5.10 – Comparação entre os modelos numéricos e o experimento com o Espécime 4

Os valores numéricos concordam com os experimentais. As sensibilidades dos SAWR longitudinais, tanto do modelo numérico quanto do experimental divergem em 6,73 %. Já as sensibilidades dos SAWRs transversais divergem 25,10 %. Uma explicação para essa diferença pode estar na maior intensidade de tensão  $T_{22}$  no topo do SAWR quando ele está alinhado na transversal do corpo de prova. Com essa orientação a componente de tensão  $T_{22}$  é maior porque está na direção de aplicação da força no corpo de prova. Como o substrato quartzo ST-X

apresenta sensibilidade transversal de aproximadamente 26,2 % da longitudinal, essa influência é mais importante. Para ilustrar essa explicação, pode-se aplicar a eq. (3.1) aos SAWRs longitudinal e transversal:

- SAWR longitudinal:

$$\frac{\Delta f}{f} = (-16,8 \times 29,86 + 4,4 \times (0,965)) \times 10^6 = \underbrace{(-484,848 + 4,246)}_{\text{proporção } 114,2:1} \times 10^6;$$

- SAWR transversal:

$$\frac{\Delta f}{f} = (-16,8 \times (-10,23) + 4,4 \times (-4,34)) \times 10^6 = \underbrace{(171,864 - 19,096)}_{\text{proporção } 9:1} \times 10^6.$$

Como mostrado acima, a proporção das parcelas muda de 114,2:1 para 9:1 quando o SAWR é orientado na transversal do corpo de prova. Isso demonstra que a geometria do ressonador tem um papel importante na orientação do sensor em relação à componente de maior intensidade de deformação da superfície onde está colado. Isso significa um fator geométrico deve ser incorporado à eq. (3.1).

Outras fontes também podem contribuir para as divergências encontradas entre os experimentos e as simulações. São elas:

- A espessura e o módulo de elasticidade do adesivo adotados na simulação podem não ser os mesmos presentes nos SAWRs do experimento;
- Os SAWR do experimento podem não estar totalmente perpendiculares entre si, pois a manipulação do cristal é difícil dada a sua dimensão reduzida e delicadeza;
- As espessuras de adesivo sob os SAWRs do experimento podem diferir, visto que a pressão de colagem não foi controlada e dependia da experiência do operador;
- Bolhas de ar podem ter ficado presas na camada de adesivo do SAWR transversal experimental, reduzindo a transmissibilidade de deformação.

Com o intuito de saber sobre a influência mecânica do ressonador sobre a superfície alvo da medição, a distribuição de deformação na direção  $x$  ( $\epsilon_{xx}$ ) foi medida ao longo da linha “c”, paralela ao eixo longitudinal do corpo de prova. Ela foi aplicada tanto ao modelo com o SAWR longitudinal quanto com o transversal. A figura 5.11 mostra essas distribuições. Por se tratar de um corpo com rigidez não desprezível quando comparado a um *strain gage* resistivo ou óptico, por exemplo, o ressonador e a camada de adesivo geram distorções no campo de

deformação na região onde está instalado. Em ambas as distribuições observam-se, independente da orientação dos ressonadores (longitudinal ou transversal), regiões de concentração de deformação nas adjacências da região de colagem. Nas posições correspondentes à região de colagem, a deformação é menor do que nas regiões mais afastadas, apontando que juntamente, ressonador e adesivo, limitam o livre deslocamento do material da superfície onde estão localizados.

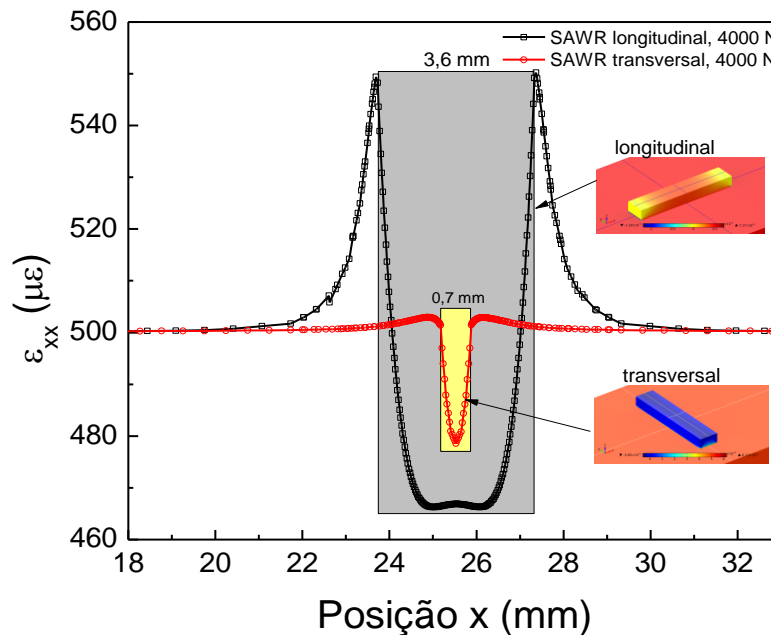


Figura 5.11 – Distribuições da deformação  $\varepsilon_{xx}$  ao longo da longitudinal da área útil do corpo de prova

A concentração de deformação nas adjacências da região sob os SAWR elevou a deformação em até 10,22 % (550,23  $\mu\epsilon$ ), no caso do longitudinal, e até 0,74 % (502,91  $\mu\epsilon$ ), no caso do transversal frente ao valor médio de 499,2  $\mu\epsilon$  na região de campo uniforme. Na região sob os SAWR – região de colagem - o comportamento foi o inverso, havendo redução de até 6,6 % (466,26  $\mu\epsilon$ ) e 4,13 % (478,55  $\mu\epsilon$ ) para os SAWRs longitudinal e transversal, respectivamente. Tanto o fenômeno da concentração quanto o da diminuição da deformação dependem do quão rígida é a junta colada. Isso significa que parâmetros como as dimensões e propriedades mecânicas do adesivo e do SAWR, assim como a orientação de ambos em relação ao campo de deformação, determinam a intensidade e a forma dessa perturbação.

A distribuição de deformação na direção y,  $\varepsilon_{yy}$ , ao longo da linha “d” e presente nos dois modelos, é mostrada na figura 5.12. Na região do corpo de

prova onde o campo é uniforme, foi calculada a média de  $\varepsilon_{yy} = -162,8 \mu\epsilon$ . De maneira similar ao ocorrido na direção x, a distribuição em y também sofreu distorção devido à presença do SAWR e do adesivo. Nas adjacências da região de colagem também surgiu concentração de deformação, intensificando-a em até 2 % (166,07  $\mu\epsilon$ ) no caso do SAWR longitudinal, e 11,25 % (-181,13  $\mu\epsilon$ ) no do transversal. Na região de colagem, no caso longitudinal e transversal, houve redução de 7,54 % (-150,52  $\mu\epsilon$ ) e 5,91 % (-153,17  $\mu\epsilon$ ), nessa ordem.

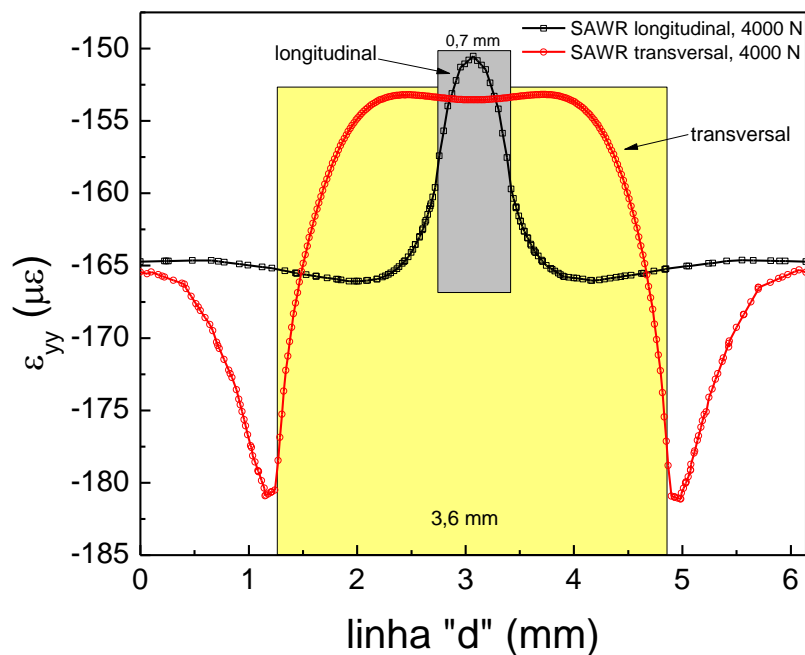


Figura 5.12 - Distribuições da deformação  $\varepsilon_{yy}$  ao longo da transversal da área útil do corpo de prova

## 6 Conclusões

Os experimentos também mostraram que o bom desempenho do SAWR como um sensor de deformação depende fundamentalmente do adesivo usado. Por ser um corpo mais rígido do que os sensores *strain gage* resistivo ou óptico, demanda mais da junta colada, que pode falhar mecanicamente se não for apropriada. Essa resistência mecânica deve estar presente também temperaturas mais elevadas. Os testes mostraram que o adesivo 4 é apropriado à colagem desse tipo de sensor por apresentar baixa histerese na faixa de temperatura entre 30 e 70 °C e por propiciar o maior nível de desempenho, medido através da sensibilidade.

Foram aplicadas deformações de até 900  $\mu\epsilon$  nos experimentos sem que houvesse algum dano sensível à medição durante o tempo de medição. Dentro dessa faixa, os resultados foram satisfatórios, levando a valores de sensibilidade superiores aos reportados na literatura. Para saber mais sobre os limites operacionais da junta colada e do sensor SAWR, deve-se, em trabalhos futuros, incluir investigações sobre as máximas deformações estáticas e dinâmicas suportadas. Informações do comportamento do sensor sujeito a carregamento cíclico são essenciais para avaliar sua aplicação em estruturas sujeitas a tal tipo de solicitação.

A instrumentação do SAWR na superfície de medição é um processo bastante delicado, podendo influenciar na qualidade da ressonância e na sensibilidade à deformação. Durante a execução da etapa de colagem, a pressão exercida sobre o ressonador não pôde ser controlada, podendo levar a diferentes espessuras da camada de adesivo e ao surgimento de tensões residuais no material do ressonador. Fez-se a pós-cura dos adesivos sem aplicar pressão com vistas a reduzir esse efeito, que pode gerar medidas errôneas e afetar a linearidade do sensor. A fim de eliminar essa incerteza no processo, um aparato com aplicação

pressão de colagem monitorável deve ser empregado na instrumentação dos próximos sensores.

O objetivo de interrogar o SAWR sem fio foi cumprido e verificou-se que a sensibilidade à deformação não foi alterada significativamente. Esse modo de operação – passivo - representa a grande vantagem desse dispositivo MEMS frente a outros, por exemplo, *strain gage* resistivo, que não é passivo e consome mais energia. Os próximos passos no estudo da interrogação sem fio devem ser: (a) montar um sistema com dois SAWR para fazer a compensação tanto de variações em fatores ambientais que alteram a frequência de operação por antena, quanto de variações de temperatura; (b) utilizar um sistema de interrogação dedicado para que se tenham maiores potências emitidas e maior capacidade de amplificação do sinal de resposta dos SAWR, pois o VNA não possui esta última função.

A Tabela 6.1 mostra as principais informações de alguns dos sensores SAW de deformação apresentados em artigos. A maioria fez as medições usando antenas e usou liobato de lítio ( $\text{LiNbO}_3$ ) como substrato justificando que este tem melhor fator de acoplamento piezoelétrico do quartzo ST-X. As sensibilidades obtidas são variadas, indicando que esse valor depende não só da sensibilidade à deformação do substrato, mas também da geometria do sensor e das características da junta colada. Na última linha da tabela foram inseridos os resultados do experimento com o Espécime 6. Os resultados de sensibilidade são acima da maioria dos valores observados na tabela. Apesar do menor fator de acoplamento piezoelétrico, o ressonador de quartzo ST-X foi capaz de apresentar bons números de sensibilidade, justificando sua escolha como substrato.

Tabela 6.1 – Comparação com outros autores

Autoria	Frequência de operação	Material	Tipo de SAW	Deformação	Sensibilidade	Sem fio? Passivo?	
Varadan <i>et al.</i> (1997)	915 MHz	YZ $\text{LiNbO}_3$	<i>delay line</i>	0 a 6000 $\mu\epsilon$	$1,1 \times 10^{-3} \text{ }^\circ/\mu\epsilon$	Sim	Sim
Donohoe <i>et al.</i> (2011)	433 MHz	quartzo AT-X	ressonador de uma porta	$\pm 400 \mu\epsilon$	471.97 Hz/ $\mu\epsilon$	Sim	Sim
Stoney <i>et al.</i> (2014)	433 MHz	quartzo AT-X	ressonador de uma porta	$\pm 400 \mu\epsilon$	844,35 Hz/ $\mu\epsilon$	Sim	Sim
Konno <i>et al.</i> (2013)	389 MHz	$128^\circ$ YX $\text{LiNbO}_3$	ressonador de uma porta	0 a $\approx 130 \mu\epsilon$	70.02 Hz/ $\mu\epsilon$	Sim	Não
Nomura <i>et al.</i> (2006)	30 MHz	$36^\circ$ YX $\text{LiTaO}_3$	<i>delay line</i>	0 a $\approx 170 \mu\epsilon$	25 Hz/ $\mu\epsilon$	Sim	Sim
Oh <i>et al.</i> (2012)	210 MHz	$41^\circ$ YX $\text{LiTaO}_3$	<i>delay line</i>	0 a 25000 $\mu\epsilon$	4,61 Hz/ $\mu\epsilon$	Não	Não
Fu <i>et al.</i> (2014)	151 MHz	$128^\circ$ YX $\text{LiNbO}_3$	<i>delay line</i>	0 a 400 $\mu\epsilon$	126 Hz/ $\mu\epsilon$	Não	Não
Humphries e Malocha (2015)	915 MHz	YZ- $\text{LiNbO}_3$	<i>delay line - OFC</i>	0 a 130 $\mu\epsilon$	-1647 Hz/ $\mu\epsilon$	Sim	Sim
Presente trabalho	433,92 MHz	quartzo ST-X	ressonador de uma porta	0 a 512,82 $\mu\epsilon$	-411,56 Hz/ $\mu\epsilon$	Sim	Sim

Quanto às simulações, seus resultados foram validados junto aos experimentais e mostraram que a distribuição de tensões no ressonador é uniforme. Na superfície superior do ressonador, a distribuição parabólica de tensões indica que a sua geometria não é otimizada para a função de transmissão de deformação até o topo. Possivelmente, uma geometria com espessura reduzida e maior largura tornaria a distribuição mais uniforme, aumentando a sensibilidade à deformação. As simulações também mostraram que o ressonador perturba o campo de deformação da superfície onde está colado, levando à conclusão de que ele age como um reforço estrutural.

## Referências bibliográficas

- BIGLER, E.; HAUDEN, D.; BALLANDRAS, S. **Stress and Thermal Stress Compensation in**. Nova York, Estados Unidos: [s.n.].
- CADY, W. G.; DYKE, K. S. VAN. **Proposed Standard Conventions for Expressing the Elastic and Piezoelectric Properties of Right and Left Quartz** \*. Proceedings of I.R.E. **Anais...**1942
- CAMPBELL, C. **Surface Acoustic Wave Devices and Their Signal Processing Applications**. San Diego, CA, Estados Unidos: Academic Press Inc., 1989.
- CHEEKE, J. D. N. **Fundamentals and applications of ultrasonic waves**. [s.l: s.n.].
- CULLEN, E.; REEDER, M. **Measurement of SAW velocity versus strain for YX and ST quartz**. Ultrasonics Symposium Proceedings. **Anais...**1975
- CURIE, J.; CURIE, P. **Développement, par pression, de l'électricité polaire dans les cristaux hémiedres à faces inclinées**. [s.l: s.n.].
- DALLY, J. W. .; RILEY, W. F. **Experimental Stress Analysis**. 3. ed. [s.l.] McGraw-Hill, 1965.
- DONOHUE, B.; GERAGHTY, D.; O'DONNELL, G. E. Wireless calibration of a surface acoustic wave resonator as a strain sensor. **IEEE Sensors Journal**, v. 11, n. 4, p. 1226–1232, 2011.
- ESCOBAR, S. G. **Humidity sensor based on MEMS SAW Technology Sergio Humidity sensor based on MEMS SAW Technology**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 2016.
- FRONTER ELECTRONICS. **Used in Communication & Consumer Electronics**. Disponível em: <<http://www.chinafronter.com/?p=647>>. Acesso em: 10 fev. 2017.
- FU, C. et al. A stable and highly sensitive strain sensor based on a surface acoustic wave oscillator. **Sensors and Actuators, A: Physical**, v. 218, p. 80–87, 2014.
- GAUSTSCHI, G. **Piezoelectric Sensorics: force, strain, pressure, acceleration and acoustic emission sensors, materials and amplifiers**. Nova York, Estados Unidos: Springer, 2002.
- HASHIMOTO, K. **Surface Acoustic Wave Devices in Telecommunications**. [s.l: s.n.].
- HBM. **Sensores**. Disponível em: <<https://www.hbm.com/pt/4600/fs62-sensor-otico-de-deformacao-fibesensing/>>. Acesso em: 10 fev. 2017.
- HEMPEL, J. et al. Assembly of  $\alpha$ -quartz for surface acoustic wave (SAW) strain gauges application. **2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference**, p. 1–6, 2012.
- HIB. **SAW Resonator D02**Pato Branco, PR, Brasil, 2017.
- HUMPHRIES, J. R.; MALOCHA, D. C. Wireless SAW Strain Sensor Using Orthogonal Frequency Coding. **Sensors Journal, IEEE**, v. 15, n. 10, p. 5527–5534, 2015.
- INSTRON. **Acessórios de ensaios**. Disponível em: <<http://www.instron.com.br/pt-br/products/testing-accessories/extensometers>>. Acesso em: 10 fev. 2017.



JOHNSON, R. C. **MEMS Market to Top \$22 billion by 2018**. Disponível em: <[http://www.eetimes.com/document.asp?doc\\_id=1320035](http://www.eetimes.com/document.asp?doc_id=1320035)>. Acesso em: 10 fev. 2017.

JR, D. S. B. et al. **Acoustic wave sensors. Theory, design and physicochemical applications**. [s.l: s.n.]. v. 63

KALININ, V. et al. Pulsed interrogation of the SAW torque sensor for electrical power assisted steering. **Ultrasonics Symposium, 2004 IEEE**, v. 3, n. c, p. 1577–1580 Vol.3, 2004.

KONNO, T.; HARA, M.; KUWANO, H. Oscillator-based strain gauges employing surface acoustic wave resonators for wireless sensor network. **2013 IEEE International Ultrasonics Symposium (IUS)**, p. 1930–1933, 2013.

KREUZER, M. **Strain measurement with fiber bragg grating sensors** HBM, Darmstadt, S2338-1.0 e. [s.l: s.n.]. Disponível em: <[https://micronoptics.com/uploads/library/documents/FBGS\\_StrainMeasurement\\_mo.pdf](https://micronoptics.com/uploads/library/documents/FBGS_StrainMeasurement_mo.pdf)>.

LEO, D. J. L. **Engineering Analysis of Smart Material Systems**. Hoboken, New Jersey, United States: John Wiley & Sons, Inc., 2007.

LYNCÉE TEC. **SAW – surface acoustic waves**. Disponível em: <<https://www.lynceetec.com/saw-surface-acoustic-waves/>>.

MORGAN, D. **Surface Acoustic Wave Filters: with applications to electronic communications and signal processing**. 2. ed. Oxford, Reino Unido: Elsevier Ltd, 2007.

NALAMWAR, A. L.; EPSTEIN, M. Surface acoustic waves in strained media. **Journal of Applied Physics**, v. 47, n. 1, p. 43–48, 1976.

NOMURA, T. et al. Passive Strain Sensor using SH-SAW Reflective Delay Line. **Ferroelectrics**, v. 333, n. 1, p. 121–129, 2006.

NPL. **Measuring strain in automotive engines**. Disponível em: <<http://www.npl.co.uk/commercial-services/sector-case-studies/measuring-strain-in-automotive-engines>>. Acesso em: 10 fev. 2017.

OH, H. et al. Development of a high-sensitivity strain measurement system based on a SH SAW sensor. **Journal of Micromechanics and Microengineering**, v. 22, n. 2, p. 25002, 2012.

OMEGA. **Strain gage**.

PAGE, T. Q. **Crystals - Introduction**. Disponível em: <[http://www.quartzpage.de/crs\\_intro.html](http://www.quartzpage.de/crs_intro.html)>. Acesso em: 15 abr. 2017.

PASTERNAK, M. Applicability of different SAW oscillators' topologies for high frequency gas sensors construction. **Acta Physica Polonica A**, v. 118, n. 6, p. 1232–1234, 2010.

PI US. **The Piezoelectric Effect: Fundamentals of Piezoelectricity and Piezoelectric Motion**. Disponível em: <[http://www.pi-usa.us/tutorial/4\\_15.html](http://www.pi-usa.us/tutorial/4_15.html)>. Acesso em: 10 abr. 2017.

QIAJ. **Quartz crystal device**. Disponível em: <<http://www.qiaj.jp/pages/frame20/page01-e.html>>. Acesso em: 20 abr. 2017.

RANSLEY, J. **Piezoelectric Materials: Understanding the Standards**. Disponível em: <<https://br.comsol.com/blogs/piezoelectric-materials-understanding-standards/>>. Acesso em: 20 mar. 2017.

RAYLEIGH, LORD. On waves propagated along the plane surface of an elastic solid. **Proceedings of the London Mathematical Society**, v. s1-17, n. 1, p. 4–11, 1885.

REEVES SOUND LABORATORIES. **Crystals Go to War** Estados Unidos,

1943. Disponível em: <<https://www.youtube.com/watch?v=b--FKHCFjOM>>
- ROBERT, J.; LABRUNIE, G.; BOREL, J. **New Applications of Integrated Electronics**. IEEE International Solid-State Circuits Conference. **Anais...**1973
- ROSE, J. L. **Ultrasonic guided waves in solid media**. [s.l: s.n.].
- SINHA, B. K. et al. Influence of biasing stresses on the propagation of surface waves. **Journal of Applied Physics**, v. 57, n. 3, p. 767–776, 1985.
- SINHA, B. K.; LOCKE, S. Acceleration and Vibration Sensitivity of SAW Devices. **IEEE transactions on ultrasonics, ferroelectrics, and frequency control**, v. 34, n. 1, p. 29–38, 1987.
- STONE, R. et al. Observations of surface acoustic wave strain and resistive strain measurements on broaching tools for process monitoring. **Procedia CIRP**, v. 14, p. 66–71, 2014.
- STONE, R.; GERAGHTY, D.; O'DONNELL, G. E. Characterization of Differentially Measured Strain Using Passive Wireless Surface Acoustic Wave (SAW) Strain Sensors. **IEEE Sensors Journal**, v. 14, n. 3, p. 722–728, mar. 2014.
- TIMOSHENKO, S. P.; GOODIER, J. N. Theory of elasticity. 1934.
- VARADAN, V. V et al. Wireless passive IDT strain microsensor. **Smart Materials and Structures**, v. 6, n. 6, p. 745–751, 1997.
- VENKATESHAN, S. P. **Mechanical Measurements**. [s.l.] John Wiley & Sons, Inc., 2015.
- VIVES, A. A.; SOARES, D. **Piezoelectric Transducers and Applications**. 2. ed. Valência, Espanha: [s.n.].
- VÖTSCH. **Temperature and climate**. Disponível em: <[http://www.v-it.com/en/products/temperature\\_and\\_climate\\_test\\_chambers/schunk01.c.59549.en?\\_pid=51895](http://www.v-it.com/en/products/temperature_and_climate_test_chambers/schunk01.c.59549.en?_pid=51895)>. Acesso em: 15 jan. 2017.
- WHITE, R. M.; VOLTMER, F. W. Direct piezoelectric coupling to surface elastic waves. **Applied Physics Letters**, v. 7, n. 12, p. 314–316, 1965.
- YANG, J. An introduction to the theory of piezoelectricity. In: GAO, D. Y. .; OGDEN, R. W. (Eds.). . **Advances in Mechanics and Mathematics**. United States: Springer Science + Business Media, Inc., 2005. p. 299.