

**Universidade Federal de São Carlos – UFSCar**  
**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET**  
**Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec**

**DETECÇÃO DE IMPACTOS EM ESTRUTURAS UNIDIMENSIONAIS  
UTILIZANDO O MÉTODO TDOA (TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL)**

**Autor: Gabriella Faina Garcia**

**Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki**



São Carlos - SP – 2018

**Universidade Federal de São Carlos – UFSCar**  
**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET**  
**Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec**

**Autor: Gabriella Faina Garcia**

**DETECÇÃO DE IMPACTOS EM ESTRUTURAS UNIDIMENSIONAIS  
UTILIZANDO O MÉTODO TDOA (TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL)**

**Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki**

---

Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki

**Assinatura do Orientador**

---

Gabriella Faina Garcia

**Assinatura do Aluno**

**SÃO CARLOS-SP, JULHO – 2018**

**Universidade Federal de São Carlos – UFSCar**  
**Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia – CCET**  
**Departamento de Engenharia Mecânica – DEMec**

**Autor: Gabriella Faina Garcia**

**TCC**

**Desenvolvimento de Projeto de Monografia**

**DETECÇÃO DE IMPACTOS EM ESTRUTURAS UNIDIMENSIONAIS  
UTILIZANDO O MÉTODO TDOA (TIME DIFFERENCE OF ARRIVAL)**

**Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki**

---

Prof. Dr.

**Membro da Banca Avaliadora**

---

Prof. Dr.

**Membro da Banca Avaliadora**

---

Prof. Dr.

**Membro da Banca Avaliadora**

*“A vida é uma peça de teatro que não  
permite ensaios. Por isso, cante, chore,  
dance, ria e viva intensamente, antes  
que a cortina se feche e a peça termine  
sem aplausos.”*

*Charlie Chaplin*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus e aos espíritos bons que me protegem e me cercam sempre.

Agradeço aos meus avós falecidos Ruth Pinto Faina, Algeu Faina e Euclides Garcia pelos princípios de força, honestidade e trabalho que deixaram na família.

Agradeço aos meus pais Tânia e Paulo Roberto e aos meus irmãos Luís Paulo e Laleska pelo apoio em todos os sentidos da minha vida. Contribuindo sempre para minha evolução profissional e pessoal.

Agradeço também ao meu professor e orientador Sidney Bruce Shiki pelo apoio e disposição durante a orientação do meu estágio e do presente trabalho.

Agradeço aos professores do Departamento de Engenharia Mecânica pelo aprendizado e pelos ensinamentos que serão fundamentais para a minha carreira profissional.

Enfim, agradeço aos meus amigos e todas as pessoas que contribuíram e fizeram parte desta etapa decisiva da minha vida.

## RESUMO

O impacto é um carregamento dinâmico em uma estrutura no qual se verifica a atuação de uma força de alto módulo em um curto intervalo de tempo. Assim, feito o impacto na viga de aço será possível analisar os sinais mecânicos produzidas pelos sensores piezelétricos. Sendo assim, nesse trabalho, será estudado o método *Time Difference of Arrival* (TDOA, em português, tempo de diferença da chegada) para detecção de impacto. Esse método consiste na utilização de dois sensores localizados a certa distância entre si, que tem a função de situar a localização do impacto, a partir das medições da onda transmitida na viga devido à ocorrência de carregamento dinâmico. A determinação do impacto foi feito com o método proposto e este foi comparado com a localização real do impacto. Assim, foi possível concluir a precisão da localização do método TDOA através dos resultados obtidos.

**Palavras-chave:** Detecção de impacto. TDOA. Sensores piezelétricos.

## **ABSTRACT**

Impact is a dynamic load on a structure in which a high module force is applied within a short period of time. Then, as the impact has affected a steel beam, it is possible to analyze the mechanical signals measured produced by the piezoelectric sensors. Therefore, in this thesis, the Time Difference of Arrival (TDOA) method is used to detect the impact. It consists of utilizing two sensors placed within a known distance from each other, which have the objective of localizing the impact through measures of the wave transmitted along the beam by the dynamic load. The localization of the impact was done using the method in question and then compared to its actual position.

Keywords: Impact detection. TDOA. Piezoelectric sensors

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Queda de uma massa em uma viga bi-engastada	16
Figura 2 - Método AoA, medidos de pelo menos dois ângulos distintos	19
Figura 3 - Cruzamento das hipérbolas localizam o ponto do impacto	21
Figura 4 - Sensores localizados na extremidade (caso geral)	21
Figura 5 - Esquema da barra utilizada na medição	22
Figura 6 - Sensor piezelétrico de 27 mm de diâmetro	25
Figura 7 - Placa de aquisição NI-9205	26
Figura 8 - Esquema do programa do <i>Labview</i> ( <i>Block Diagram</i> )	27
Figura 9 - Interface para visualização dos sinais medidos com o sensor piezelétrico ( <i>Front Panel</i> )	28
Figura 10 - Esquema da viga utilizada no experimento	28
Figura 11 - Esquema dos sinais localizados na viga	29
Figura 12 - Localização dos fios na placa da <i>National Instruments</i>	30
Figura 13 - Programa <i>Labview</i> sendo utilizado no experimento	30
Figura 14 - Sinal provocado pelo impacto no retângulo 2	32
Figura 15 - Sinal provocado pelo impacto no retângulo 10	33
Figura 16 - Sinal provocado pelo impacto no retângulo 15 na primeira medição	33
Figura 17 - Representação do <i>threshold</i> no gráfico	34
Figura 18 - Regressão linear dos pontos obtidos	36
Figura 19 - Impacto feito no retângulo 3 (114 mm de distância do sensor 1) experimentalmente Impacto feito no retângulo 7 ( 266 mm de distância do sensor 1) experimentalmente e teoricamente	38
Figura 20 e teoricamente	37
Figura 20 - - Impacto feito no retângulo 13 (494 cm de distância do sensor 1) experimentalmente e teoricamente	38
Figura 22 - Impacto feito no retângulo 15 (70 mm de distância do sensor 1) experimentalmente e teoricamente	39
Figura 23 - Erro relativo dos pontos de validação	40
Figura 24 - Erro relativo dos pontos de calibração	41

## **LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Relação entre o local do impacto e a quantidade de teste	29
Tabela 2 - Diferença de tempo de chegada para cada distância, na calibração	35
Tabela 3 - Diferença de tempo de chegada para cada distância, na validação	35

## LISTA DE SIGLAS

AoA	<i>Angle of Arrival</i>
C	Valor da intensidade medido no momento do cálculo
c	Velocidade da luz
cm	Centímetros
d	Distância estimada em decibéis
$d_e$	Distância obtida experimentalmente (mm)
$\Delta d$	Variação da distância em relação ao sensor (mm)
$\Delta t$	Diferença de tempo medida em cada sensor (s)
2L	Distância determinada pelo experimento
km/h	Quilômetro por hora
LEA	Laboratório de Engenharia Aplicada
LTM	<i>Location Template Matching</i>
M	Massa
m/s	Metros por segundo
mm	Milímetro
MMQ	Mínimos Múltiplos Quadrados
ms	Milésimo de segundo
n	Perda da intensidade do sinal proveniente do impacto
NI	<i>National Instruments</i>
NuLEEn	Laboratórios de Ensino em Engenharia
R	Intensidade do sinal medido a 1 metro do emissor ou ponto de acesso
RSSI	<i>Received Signal Strength Indicator</i>
$t_{chegada}$	Tempo de chegada do sinal no sensor e
TDO	<i>Time of Arrival</i>
TDOA	<i>Difference of Arrival</i>
TDOA	<i>Time Difference of Arrival</i>
$t_{enviado}$	Tempo de envio do sinal para o sensor
ToA	<i>Time Of Arrival</i>
Vo	Velocidade inicial da massa
$x_{ref}, y_{ref}$	Posição conhecida dos sensores

## SUMÁRIO

<b>LISTA DE SIGLAS</b>	10
<b>1 INTRODUÇÃO</b>	12
<b>2 MÉTODOS PARA A DETECÇÃO DE IMPACTOS</b>	15
2.1 CARREGAMENTO DINÂMICO	15
2.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE IMPACTO	16
2.2.1 <i>Angle of Arrival</i>	17
2.2.2 Técnicas de Mapeamento de RSSI	18
2.2.3 <i>Time of Arrival</i>	19
2.2.4 <i>Time Difference of Arrival</i>	20
<b>3 MATERIAIS E MÉTODOS</b>	24
3.1 FERRAMENTAS	24
3.1.1 Materiais Piezelétricos	24
3.1.2 Amostragem e <i>Labview</i>	25
3.2 METODOLOGIA	28
<b>4 RESULTADOS</b>	33
4.1 Metodologia Aplicada	33
4.2 REGRESSÃO LINEAR	37
4.3 ERROS RELATIVOS	41
<b>5 CONCLUSÃO</b>	44
<b>REFERÊNCIAS</b>	46
<b>ANEXOS</b>	48

## 1 INTRODUÇÃO

A localização e detecção de impactos tem sido um ponto importante para a indústria aeroespacial. Segundo Rajbhandari et al. (2017), os impactos podem gerar alterações locais nas propriedades dos materiais, gerando falhas. Caso essas alterações não sejam inspecionadas e detectadas, as mesmas podem levar á falhas catastróficas. A indústria aeroespacial está particularmente interessada neste visto que impactos de objetos arremessados de uma pista ou incorridos durante o voo podem causar danos significativos. Por exemplo, durante o lançamento do ônibus espacial Columbia, STS-107, um pedaço de espuma isolou-se do tanque externo do Ônibus Espacial e atingiu a asa esquerda do veículo orbital (Razzini, 2017). O dano resultou na falha dos painéis térmicos de proteção dos ônibus espaciais e o módulo se rompeu na reentrada. Neste caso, a utilização da detecção de impacto poderia evitar a falha e possivelmente, o incidente não ocorreria. Além disso, como afirma Silva (2015), o vazamento de gás em um duto, causado por alguma falha, pode ter sua posição estimada através de técnicas de detecção de impacto, assim como vazamentos em tubulações de água.

Em decorrência da existência dos vazamentos, é necessária a utilização de equipamentos e métodos para localizá-los. Além do método da inspeção visual, existem os métodos acústicos. Os métodos acústicos foram introduzidos no Brasil na década de 70 quando iniciou a utilização dos equipamentos denominados geofones mecânicos na detecção de vazamentos não visíveis (vazamentos que não podem ser localizados por uma simples observação). Com o tempo houve significativa evolução dos equipamentos com a incorporação das mais recentes inovações tecnológicas. Assim, introduziu-se além do geofone mecânico, o geofone eletrônico, o correlacionador de ruídos e o armazenador de ruídos. Alternativamente, existem métodos e equipamentos desenvolvidos para outras finalidades que podem ser adaptados aos sistemas de distribuição de água, são exemplos: métodos de injeção de gás, fotografia em infra-vermelho (ou termografia) e radar de subsolo. Esses métodos são denominados não acústicos (ABENDE, 2005).

Dada a importância e a necessidade de se conhecer, catalogar e identificar regiões que tenham sofrido impacto e possam apresentar danos, trabalhos recentes têm sido desenvolvidos com esta finalidade. Coverley & Staszewski (2003) utilizam algoritmos genéticos, que se refere a uma técnica da computação específica para busca do impacto e da determinação de resoluções adequadas para as situações analisadas.

Razzini (2017) propõe a utilização de sensores piezelétricos em formato de rosetas piezelétricas, para localização de impacto em estruturas de materiais compósitos. O método foi demonstrado experimentalmente em uma placa de fibra de carbono. Os impactos foram conduzidos utilizando um pequeno martelo com ponta metálica, simulando impactos realísticos sofridos por uma estrutura em serviço. A determinação do impacto foi feito com o método proposto e este foi comparado com a localização real do impacto.

Em Pham et al. (2005) duas técnicas são apresentadas: a detecção de borda ascendente e a correlação cruzada. A detecção de borda ascendente utilizando a abordagem *Time Difference of Arrival* (TDOA, em português, Tempo na diferença de chegada) e a correlação cruzada para a abordagem de *Location Template Matching* (LTM, em português, Correspondência do Modelo de Localização). Esses métodos foram investigados experimentalmente usando objetos de diferentes materiais com diferentes tipos de sensores acústicos. Assim, resultados experimentais têm mostrado seu potencial para a localização em tempo real de impactos acústicos usando superfícies sólidas comuns. Conforme apresentado, esta é uma área de pesquisa em progresso, que se mostra como tendência para os próximos anos.

A utilização do método TDOA tem como objetivo determinar o local do impacto, através das diferenças de tempos de chegada das ondas elásticas propagadas no material e medidas através de sensores piezelétricos. Esses sensores foram dispostos em extremidades opostas e depois do impacto, os sensores recebem um sinal, cujos tempos de chegada são dependentes da localização do carregamento dinâmico.

A parte experimental do trabalho, feita no Laboratório de Engenharia Aplicada (LEA), localizado no Núcleo de Laboratórios de Ensino em Engenharia (NuLEEn), pretende avaliar essa técnica utilizando uma viga de com 760 mm de comprimento. Além disso, um impacto será simulado em vários pontos dessa viga com o objetivo de medir a eficiência da técnica. A análise experimental utilizará a placa de aquisição NI-9205 da *National Instruments*, que é um sistema de aquisição de dados. Os dados serão tratados nos softwares *Labview* e *MATLAB*.

Algumas hipóteses foram adotadas no trabalho, dentre elas, estão: a viga será fixada de maneira bi-engastada e a temperatura será considerada constante, sem implicações em mudanças de propriedades da viga.

O trabalho está estruturado da seguinte forma: no Capítulo 2 será abordada a terminologia inerente ao impacto. Também será apresentado o embasamento teórico do comportamento de uma estrutura submetida ao impacto, os principais conceitos básicos que regem os fenômenos envolvidos com tal carregamento, os métodos de detecção de localização

de impacto, dentre eles o método TDOA que consiste na medição da diferença do tempo de chegada dos sinais de propagação de ondas no material em cada sensor piezelétrico localizados em extremidades opostas. O Capítulo 3 abordará a metodologia empregada no trabalho em questão, as ferramentas utilizadas dentre elas os sensores piezelétricos, o software *Labview* e a placa de aquisição NI-9205 da *National Instruments*. O Capítulo 4, os resultados serão apresentados, incluindo uma análise detalhada de estimativas de erros do experimento. Por fim, o Capítulo 5 apresenta as principais conclusões, limitações e trabalhos futuros.

## 2 MÉTODOS PARA A DETECÇÃO DE IMPACTOS

Na área da engenharia, principalmente nos projetos que tangenciam a mecânica, é indispensável analisar o comportamento de carregamentos, estáticos ou dinâmicos, em uma viga e suas consequências. Essas consequências podem ser desde pequenas deformações até falhas catastróficas.

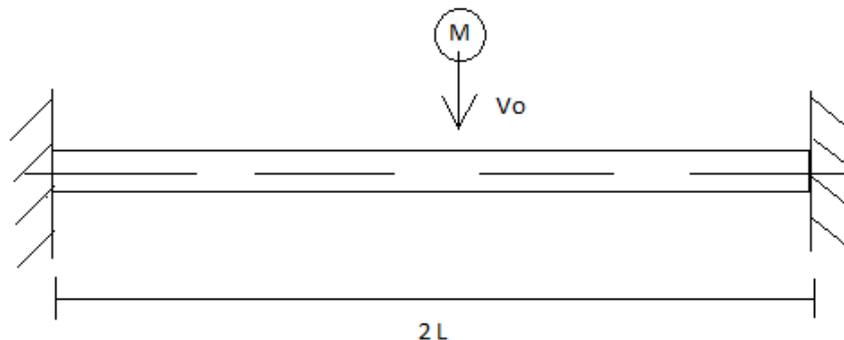
Os carregamentos possíveis de serem aplicados em uma estrutura são classificados em estático e dinâmico (GERE, 2003). Um carregamento é considerado estático quando permanece constante ao longo do tempo e um carregamento dinâmico é aquele cujo módulo varia em função do tempo. O carregamento dinâmico apresenta algumas subdivisões. Dentre elas estão o carregamento cíclico, a vibração e o impacto. Porém o foco deste trabalho será o impacto, que será analisado detalhadamente logo a baixo.

Neste capítulo, a Seção 2.1 aborda os carregamentos dinâmicos por impacto, descrevendo características próprias desse comportamento e analisando as suas classificações, tanto em relação à força do impacto como também a deformação sofrida pela colisão (impacto). Posteriormente, na Seção 2.2 será feita uma análise das características da barra e será abordado as técnicas de detecção de localização de impacto mais comuns.

### 2.1 CARREGAMENTO DINÂMICO

O impacto é um carregamento dinâmico em uma estrutura no qual se verifica a atuação de uma força de alto módulo em um curto intervalo de tempo e como exemplo de carga dinâmica pode-se observar a queda de uma massa em uma viga duplamente engastada, enfatizada na Figura 1, onde  $M$  é a massa,  $V_0$  é a velocidade inicial da massa e  $2L$  é a distância determinada pelo experimento (Alves, 2005).

Figura 1 - Queda de uma massa em uma viga bi-engastada.



Fonte: Adaptado de Alves (2009).

Os carregamentos mencionados causam na estrutura o deslocamento de seus pontos e podem provocar dois fenômenos distintos (DALLY & RILEY 1991): Translação e/ou rotação, quando a posição relativa de todos os pontos da estrutura se mantém inalterados durante o deslocamento, diz-se que a estrutura sofreu um movimento de corpo rígido. Porém quando a posição relativa de quaisquer dois pontos da estrutura se altera, provocando modificações na forma e no tamanho do corpo, denomina-se deformação.

A força do impacto, também conhecida como impulso, causa a mudança de uma variável física na estrutura chamada de quantidade de movimento. Segundo Silva (2004) e Jones (1997), o impacto também pode ser classificado em impacto de baixa e de alta velocidade. Ainda o impacto é classificado por Jones (1997) em impacto quase-estático de baixa velocidade até 10 m/s (36 km/h) e dinâmico de alta velocidade maior que 10 m/s (36 km/h).

Goldsmith (1960) e Stronge (2004) afirmam que a colisão entre dois corpos pode ser classificada como perfeitamente ou parcialmente elástica ou ainda perfeitamente plástico-inelástica. Nas colisões elásticas, com deformações reversíveis, há conservação da energia, ou seja, a energia se mantém igual no início como no final da colisão. Quando há deformações permanentes nos corpos envolvidos na colisão, a conservação de energia sempre se mantém, no entanto a energia de deformação “dissipa” parte da energia.

## 2.2 MÉTODOS DE DETECÇÃO DE IMPACTO

Historicamente, a medição das características dos sinais recebidos necessários para a entrada de algoritmos de estimativa de posição baseou-se em quatro métodos:

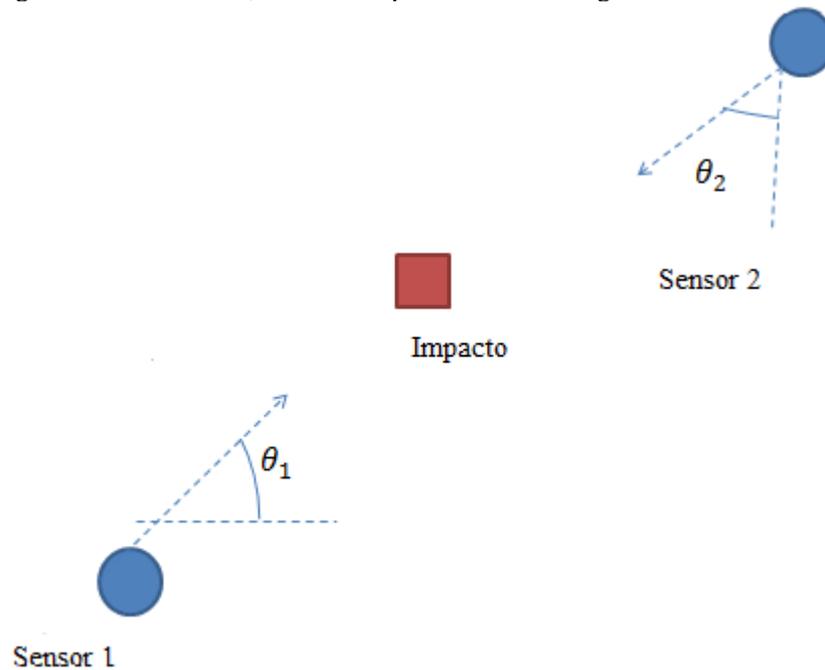
- *Time of Arrival* (TDO, em português, tempo de chegada);
- *Time Difference of Arrival* (TDOA, em português, diferença de tempo de chegada);
- *Angle of Arrival* (AoA, em português, ângulo de chegada) ;
- *Received Signal Strength Indicator* (RSSI, em português, Indicador de força do sinal recebido).

Nos últimos anos, medições híbridas entre os métodos foram investigadas para melhorar as qualidades das medições dos sinais recebidos. Essas medições híbridas referem-se à junção de duas ou mais técnicas de detecção de impacto com o objetivo de melhorar a eficiência da localização do dano. Várias técnicas e tecnologias estão disponíveis para o desenvolvimento de sistemas de localização prontos para uso. O requisito de seleção de sistemas de localização pode ser mais específico para atender diferentes necessidades e ambientes, como precisão, ambiente interno/externo, técnicas de posicionamento, métodos variados, segurança e privacidade, dispositivo disponível, restrição de implantação, escala de rede, custo de implementação, consideração saudável e outros mais.

### *2.2.1 Angle of Arrival*

A ideia básica do AoA é que o atraso do sinal varia ao chegar aos sensores com relação a direção da localização do impacto. Assim, medindo a diferença de fase entre sinais recebidos de dois sensores pode-se recuperar a direção do sinal que é transmitida, através de ângulos  $\theta_1$  e  $\theta_2$ . A distância entre o impacto e o sensor é estimada utilizando relações trigonométricas relativas a geometria analítica. Através das relações entre os ângulos, é possível determinar a localização do impacto (Hao He & Guo Zhang, 2017). Neste método pelo menos dois sensores fornecem a informação necessária para a localização do impacto, como mostrado na Figura 2.

Figura 2 - Método AoA, medidos de pelo menos dois ângulos distintos.



Fonte: Elaborado pela autora.

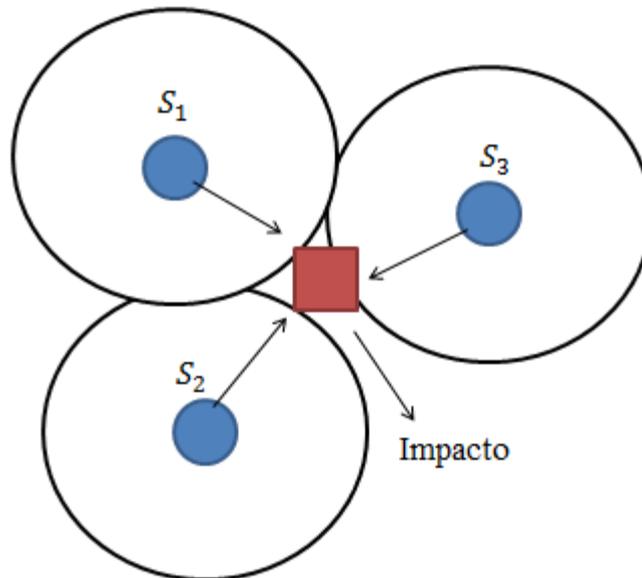
### 2.2.2 Técnicas de Mapeamento de RSSI

Essa técnica permite determinar o cálculo da distância entre o sensor e a localidade do impacto tendo como principal informação a intensidade do sinal recebido. A distância pode ser calculada através da relação entre a potência do sinal e sua taxa de perda em função da distância. Quanto mais próximo do ponto de impacto, maior será a intensidade do sinal e menos negativo será o valor em decibéis.

$$RSSI(dBm) = A - 10 \cdot n \cdot \log(d) \quad (1)$$

Onde  $d$  é representa a distância entre o impacto e o sensor,  $A$  é a referência de RSSI para um metro, ou seja, o valor em dBm medido em um metro. RSSI representa o valor de intensidade de sinal que chega em decibéis. A variável  $n$  corresponde ao *path loss*, que no caso do ambiente aberto é atribuído ao valor 2 (Bellecieri et al.,2018). O método de indicação do sinal recebido pode ser ilustrado na figura 3, em que  $S_1$ ,  $S_2$  e  $S_3$  são os sensores, respectivamente.

Figura 3: Mapeamento de RSSI



Fonte: Elaborado pela autora

### 2.2.3 Time of Arrival

A técnica baseada no Tempo de Chegada (*Time Of Arrival* - ToA) estima a distância através do tempo que o sinal leva para sair da localização do impacto e chegar aos sensores. A equação abaixo mostra como a distância é calculada.

$$d = c (t_{chegada} - t_{enviado}) \quad (2)$$

Onde  $c$  é a velocidade da propagação do sinal no material,  $t_{chegada}$  é o tempo de chegada do sinal no sensor e  $t_{enviado}$  é o tempo de envio do sinal para o sensor. Usando esta distância  $d$ , o conjunto de possíveis localizações do impacto pode ser determinado. (O'Keef, 2017). Em duas dimensões, essa análise resulta em uma equação de circunferência com a equação abaixo:

$$d = (x_{ref} - x)^2 + (y_{ref} - y)^2 \quad (3)$$

Onde  $(x_{ref}, y_{ref})$  é a posição conhecida dos sensores. Uma vez que este conjunto é calculado para pontos de referência, a posição exata do impacto pode ser determinada. Na figura 4, é possível perceber o atraso de propagação de sinal do sensor em relação a localidade do impacto.

Figura 4: Método ToA



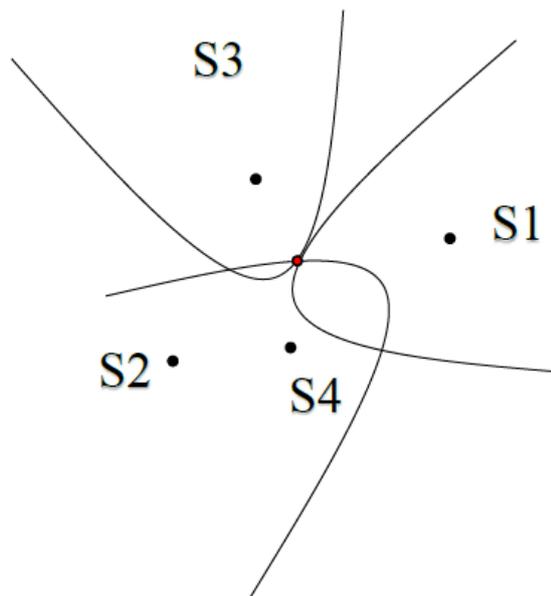
Fonte: Elaborada pela autora

#### 2.2.4 Time Difference of Arrival

Na técnica TDOA, vários receptores (sensores) são aplicados para medir o sinal proveniente da propagação de ondas causadas por um impacto. As diferenças nos tempos de chegada dos sinais em cada receptor são estimadas. Vale ressaltar que o método TDOA se diferencia do método ToA. Neste último método, é necessário saber quando o sinal do impacto foi enviado. No caso do método TDOA, não se sabe quando o impacto ocorreu, apenas sabem-se as diferenças de sinais de chegada em cada sensor. A equação baseada na diferença do tempo de chegada de um par de sensores cria uma hipérbole de possíveis localizações no plano bidimensional. Com um receptor adicional, outra equação é gerada e, portanto, outra hipérbole. A interseção de duas hipérbolas resultará em duas possíveis localizações. Adicionando sensores, há adição de hipérbolas de possíveis localizações e suas interseções fornecem solução para o sistema, a qual fornece a localização do impacto do plano. Este método é também chamado de posicionamento hiperbólico. O posicionamento hiperbólico é feito em duas fases. Durante a primeira fase, os TDOAs dos sinais são estimados pela técnica de atraso de tempo entre os sensores. Durante a segunda fase, os TDOAs em comparação com outros sensores, são geradas as equações hiperbólicas. As soluções das equações geraram uma posição exata do impacto (Rajbhandari, 2017). A

Figura 5 mostra um exemplo de interseção de três hipérbolas resultando na localização do impacto em um plano (Rajbhandari et al., 2017).

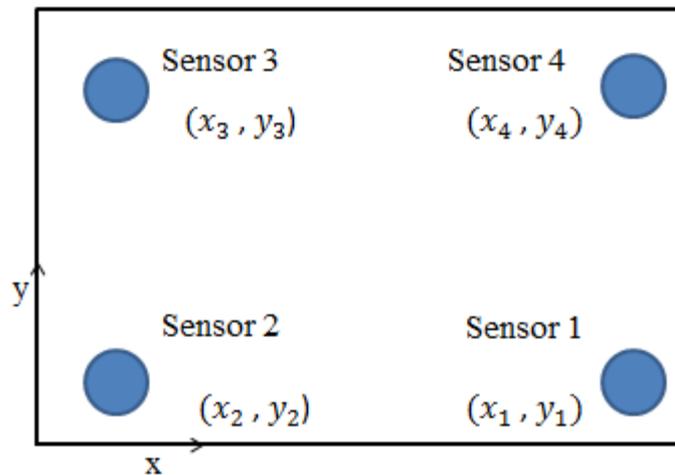
Figura 5 - Cruzamento das hipérbolas localizam o ponto do impacto.



Fonte: Rajbhandari et al. (2017).

Na Figura 6 observa-se a disposição dos sensores. Pham et al. (2005) assume que existem quatros sensores localizados nas extremidades de uma placa, com suas respectivas coordenadas.

Figura 6 - Sensores localizados na extremidade (caso geral).



Fonte: Adaptado de Pham et al. (2005).

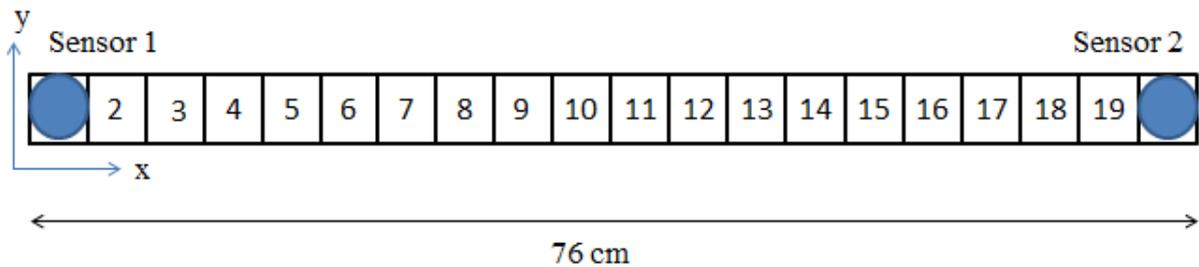
Dado um caso geral, por exemplo, de quatro sensores utilizados para a localização de impacto acústico, conforme a Figura 6, a localização do impacto  $(x,y)$  pode ser determinado pelas seguintes equações.

$$(x - x_1)^2 + (y - y_1)^2 - (x - x_3)^2 + (y - y_3)^2 = v \Delta t_{13} \quad (4)$$

$$(x - x_2)^2 + (y - y_2)^2 - (x - x_4)^2 + (y - y_4)^2 = v \Delta t_{24} \quad (5)$$

Onde  $(x_1, y_1)$ ,  $(x_2, y_2)$ ,  $(x_3, y_3)$  e  $(x_4, y_4)$  são as coordenadas das localizações dos quatro sensores,  $v$  é a velocidade da onda no material,  $\Delta t_{13}$  é a diferença de tempo medida entre os sensores locais  $(x_1, y_1)$  e  $(x_3, y_3)$  e  $\Delta t_{24}$  é a diferença de tempo medida entre o sensor com localizações  $(x_2, y_2)$  e  $(x_4, y_4)$ . No caso deste trabalho, foi utilizada uma viga simples para detecção de impacto. Nessa situação, o problema de localização é unidimensional, visto que se deseja a posição ao longo do comprimento da viga. Desse modo, apenas dois sensores são necessários para a localização do impacto como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Esquema da barra utilizada na medição.



Fonte: Elaborado pela autora.

e que há apenas coordenadas na direção  $x$ , então podemos reduzir as equações para:

$$(x - x_1)^2 - (x - x_2)^2 = v \Delta t_{12} \quad (6)$$

Sobre a equação 6, pode-se perceber que quando  $\Delta t_{12} = 0$ ,  $x_1 = x_2$ . Isso significa que quando a diferença do tempo de chegada é zero, a posição dos sensores é igual. Experimentalmente, isso pode ser comprovado. Quando o impacto é feito no meio da placa, a diferença de chegada de tempo em cada sensor é igual a zero, já que a distância para chegar em cada sensor é igual.

Podem-se perceber as inúmeras aplicações desse método TDOA. Esse método é bastante usado na área de detecção de áreas acústicas. Silva (2015) afirma que a localização de fontes acústicas utilizando arranjo de microfones possui muitas aplicações na indústria, bem como na área militar. O vazamento de gás em um duto pode ter sua posição estimada através dessa técnica, assim como disparos de armas de fogo dentro de um quartel militar. No contexto deste artigo, as diferenças de tempos de chegada (TDOA) são estimadas a partir das correlações cruzadas entre os sinais dos pares de microfones.

Assim, esse método é utilizado em diversas aplicações como foi analisado acima e, além disso, sua eficiência é satisfatória e pode ser adotada com segurança, tornando a determinação do impacto favorável e precisa. Esse método será o escopo do presente trabalho. No capítulo a seguir, será descrito com mais detalhes como foi feito o experimento e as hipóteses adotadas para a determinação do mesmo.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo, serão discutidos os materiais utilizados e a metodologia empregada. Nos materiais, serão utilizados os sensores piezelétricos, que consistem dispositivos que medem a pressão ou tensão utilizando a piezeletricidade, que é um fenômeno onde certos materiais podem gerar uma corrente elétrica, quando deformado, ou seja, a piezeletricidade é a capacidade que alguns cristais possuem de gerarem corrente elétrica em resposta a uma pressão mecânica exercida sobre o mesmo. Além disso, o software utilizado será o *Labview*. A escolha se baseou nos princípios de amostragem, que serão abordados posteriormente. Será utilizada também a placa da *National Instruments*, que consiste em uma placa de aquisição de dados denominada NI-9205. Na metodologia, será usado o método TDOA, onde foram utilizados dois sensores localizados na extremidade de uma viga de aço. E a partir da medição do tempo de chegada de cada onda, correspondente a cada sensor, pode-se inferir a localidade do impacto.

#### 3.1 FERRAMENTAS

As ferramentas remetem aos materiais utilizados neste experimento. Dentre eles estão os sensores piezelétricos que apresentam um acoplamento eletromecânico responsável por traduzir a pressão do sensor em voltagem. Além do sensor, será utilizado o software *Labview* em conjunto com a placa de aquisição NI-9205. E através da integração dessas ferramentas, foi possível captar os sinais referentes a cada sensor piezelétrico e conseqüentemente, encontrar a diferença dos tempos de chegada.

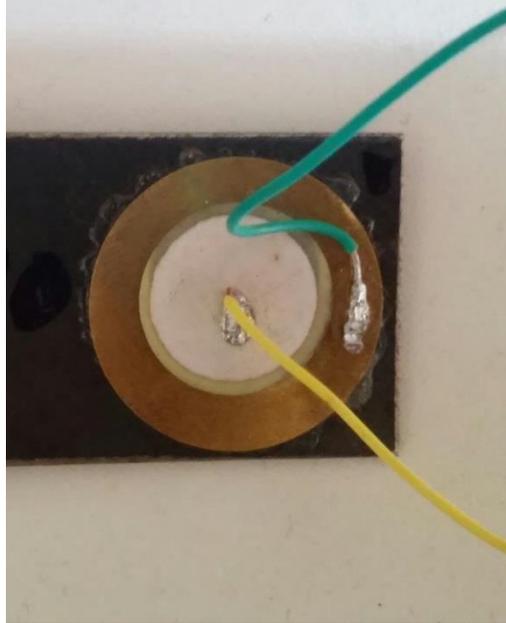
##### 3.1.1 Materiais Piezelétricos

O termo deriva da palavra grega “piezein”, que quer dizer espremer ou pressionar. Materiais piezelétricos ou também denominados de materiais inteligentes exibem acoplamento eletromecânico. Esse acoplamento refere-se ao fato de que materiais piezelétricos produzem um deslocamento elétrico quando um estresse mecânico é aplicado e pode produzir tensão mecânica sob a aplicação de um campo elétrico (Leo, 2007).

O efeito piezelétrico é reversível, pois os cristais do sensor tem a capacidade de voltarem ao estado inicial da deformação. Suas aplicações mais comuns são em microfones,

telas sensíveis ao toque em celulares e tablets ou até em aplicações em monitoramento de animais e insetos para a determinação da atividade e comportamento deles. Neste trabalho, dois sensores piezelétricos foram posicionados nas extremidades de uma viga de aço para mensurar a propagação de ondas mecânicas ao longo de uma viga de aço. Na Figura 8, é mostrado um sensor piezelétrico de 27 mm de diâmetro.

Figura 8 - Sensor piezelétrico de 27 mm de diâmetro.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.1.2 Amostragem e *Labview*

A amostragem para os sinais ou ondas analógicas é o processo pelo qual o sinal é representado por um conjunto discreto de amostras. Esse conjunto discreto refere-se a um número finito de diferentes valores dentro de um intervalo finito. O intervalo de tempo entre amostras chama-se de intervalo de amostragem (Balbinot, 2010). O seu inverso é a frequência de amostragem. A amostragem é uma das maneiras de caracterizar fenômenos físicos. Assim, o procedimento de amostragem foi utilizado neste trabalho para determinar o tipo de ferramenta que melhor atende as exigências necessárias para executar o experimento. Nas seções subsequentes, será discutida a taxa de amostragem do *Arduino* e a necessidade de utilizar outro modelo de obtenção de dados como o *Labview*.

### 3.1.2.1 *Arduino* e a taxa de amostragem

Inicialmente, o *Arduino* seria a ferramenta utilizada para a aquisição dos dados da vibração do impacto, porém, através do software *Arduino IDE* foi encontrado a frequência máxima da amostragem, que representa o inverso do intervalo máximo de tempo entre uma amostra e outra.

A frequência de amostragem máxima obtida do *Arduino* foi de 8,9 kHz e de 53 Hz do acelerômetro, respectivamente. Essa frequência de amostragem máxima está relacionada com a quantidade máxima de amostras que o *Arduino* consegue produzir em um intervalo mínimo de tempo. O intervalo de tempo entre amostras do *Arduino* é de 0,00011235 s. Conseqüentemente, não seria possível a utilização da placa de *Arduino* em conjunto com os acelerômetros, já que estes não permitiriam alcançar amostragens muito altas sem perder informações de aquisição. Por isso, optou-se por utilizar a placa de aquisição NI-9205 da *National Instruments* disponibilizada pelo Departamento de Engenharia Mecânica da UFSCar em conjunto com o software *Labview*.

### 3.1.2.2 *Labview*

Em seguida foi estudado o programa *Labview* com o objetivo de substituir o software de programação do *Arduino*. Para controlar o sistema utilizando este programa, foi utilizada a placa de aquisição de dados da NI (*National Instruments*), que têm uma função similar ao dos micro-controladores normalmente usados. Neste sistema, será utilizada a placa NI-9205. Segundo dados do fabricante, o NI-9205 oferece entradas analógicas ou diferenciais, com quatro faixas de entrada programáveis para cada uma delas (nota de rodapé: DISPONÍVEL EM <http://www.ni.com/pt-br/support/model.ni-9205.html>). O módulo oferece uma ótima combinação de velocidade e quantidade de canais para o desenvolvimento de sistemas multifuncionais econômicos. A mesma apresenta uma capacidade de amostragem de 250 kHz tendo seu manuseio facilitado pelo uso da plataforma *Labview*. Na Figura 9 consta a placa de aquisição NI-9205.

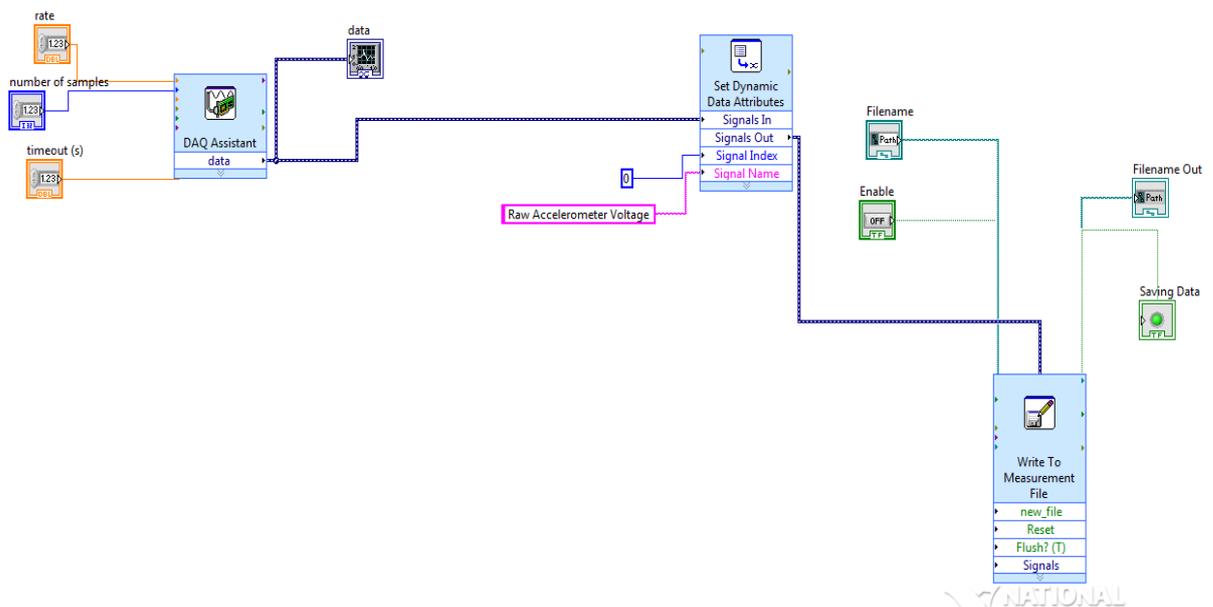
Figura 9 - Placa de aquisição NI-9205.



Fonte: <http://www.ni.com/pt-br/support/model.ni-9205.html>

Para a aquisição de dados, foi necessário criar um programa no *Labview* que fosse possível captar de maneira eficiente os sinais do impacto. Para isso, através de pesquisas e estudos na área, construiu-se um *Block Diagram* e *Front Panel*. No *Block Diagram*, são interligadas as funções desejadas e no *Front Panel*, é a saída da resposta representada no *Block Diagram*. A Figura 10 representa o *Block Diagram*.

Figura 10 - Esquema do programa do *Labview* (*Block Diagram*).

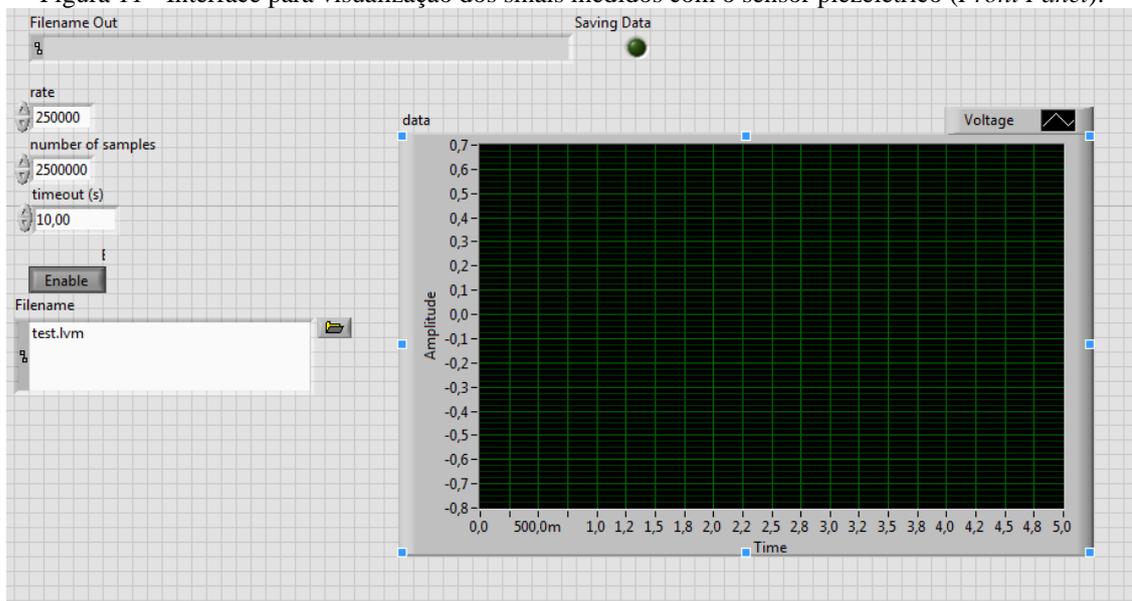


Fonte: Elaborado pela autora.

A função básica desse programa do *Labview* é fazer a conexão da placa de aquisição com o computador, através da função *DAQ Assistant*. Além disso, será utilizada a função *Set Dynamic*, que especifica o registro de data e hora inicial dos sinais. Utilizou-se também a função *Write To Measurement*, que armazena os resultados no arquivo e no formato especificado.

Na Figura 11, mostra o *Front Panel* onde será mostrada a interface para a visualização dos sinais medidos por cada sensor.

Figura 11 - Interface para visualização dos sinais medidos com o sensor piezométrico (*Front Panel*).

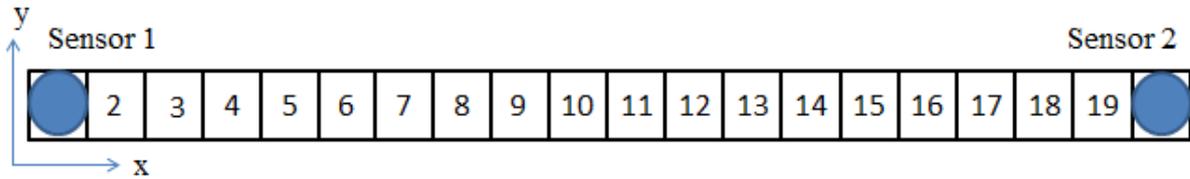


Fonte: Elaborado pela autora.

### 3.2 METODOLOGIA

A metodologia empregada para localização de impactos será o método TDOA, que é baseado na diferença de tempos de chegada dos sinais de propagação de onda nos dois sensores posicionados na viga. A estrutura possui dimensões de 760 x 30 x 2 [mm]. E é feita de aço, sendo que o mesmo não foi caracterizado para se saber sua especificação. A mesma foi dividida em 20 retângulos iguais e cada retângulo representa os locais onde foram inseridos os impactos. A viga foi engastada em ambos os lados. Em cada extremidade foi posicionado um sensor piezométrico. Na Figura 12, há o esquema representativo dos retângulos.

Figura 12 - Esquema da viga utilizada no experimento.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na linha à direita do retângulo, a viga foi impactada com uma chave de fenda. O experimento foi dividido em duas partes onde foram capturados dados para a calibração e para a validação. Os dados de calibração são as respostas medidas nos dois sensores para impactos em locais conhecidos. Estes sinais foram processados para se extrair a diferença do tempo de chegada das ondas mecânicas nos dois sensores. Com base nos valores desses tempos e considerando-se os impactos em localizações conhecidas ao longo da viga, foi feito um modelo matemático linear para calcular a distância em relação à cada um dos sensores em relação às diferenças à cada um dos sensores em relação às diferenças de tempos de chegada dos mesmos. Os experimentos de calibração foram repetidos cada um cinco vezes e feitos em seis posições distintas ao longo da primeira metade da viga nas regiões: 1, 2, 4, 6, 8 e 10, respectivamente à 0, 76, 152, 228, 304 e 308 mm de distância do engaste esquerdo da viga

Os experimentos para a validação da técnica foram feitas com impactos nas posições 3, 7, 13 e 15, respectivamente à 114, 266, 494 e 570 mm da extremidade da esquerda da estrutura. Cada teste de validação foi repetido duas vezes. Na Tabela 1 é representada a organização dos testes realizados bem como os locais de impacto em cada teste. Por exemplo, no retângulo 2, que tem 7,6 cm de distância entre o sensor da esquerda e o final do retângulo 2, foram feitas cinco repetições. O mesmo ocorre com os outros pontos.

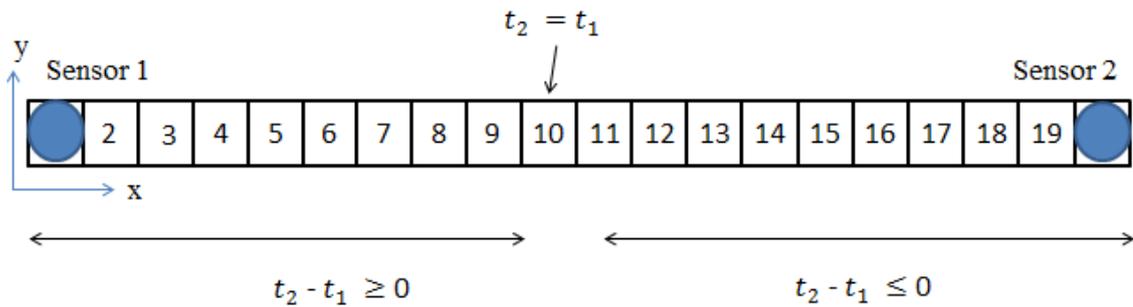
Tabela 1 – Organização dos testes de calibração e validação

Tipos de dados	Impacto (local)	Número de repetições
<b>Calibração</b>	1 (0 mm)	5
	2 (76 mm)	5
	4 (152 mm)	5
	6 (228 mm)	5
	8 (304 mm)	5
	10 (380 mm)	5
<b>Validação</b>	3 (114 mm)	2
	7 (266 mm)	2
	13 (494 mm)	2
	15 (570 mm)	2

Fonte: Elaborado pela autora.

Se o impacto for inserido mais próximo do sensor 1 ( $t_1$ ) (na extremidade da esquerda), então o tempo de chegada do sensor 1 será menor que no sensor 2 ( $t_2$ ). Como a diferença de tempo de chegada foi calculada como  $\Delta t = t_2 - t_1$ , temos que  $\Delta t \geq 0$ , porém, se ocorrer ao contrário, em que o impacto ocorre perto do sensor dois (na extremidade da direita),  $\Delta t \leq 0$ . Ou seja, do sensor um até o meio da viga (onde a diferença do tempo é zero), o sinal da diferença do tempo é positiva e do meio ao sensor dois, o sinal da diferença de tempo é negativa. Na Figura 13, é mostrado esquematicamente como ocorre à mudança de sinal em decorrência da posição do impacto.

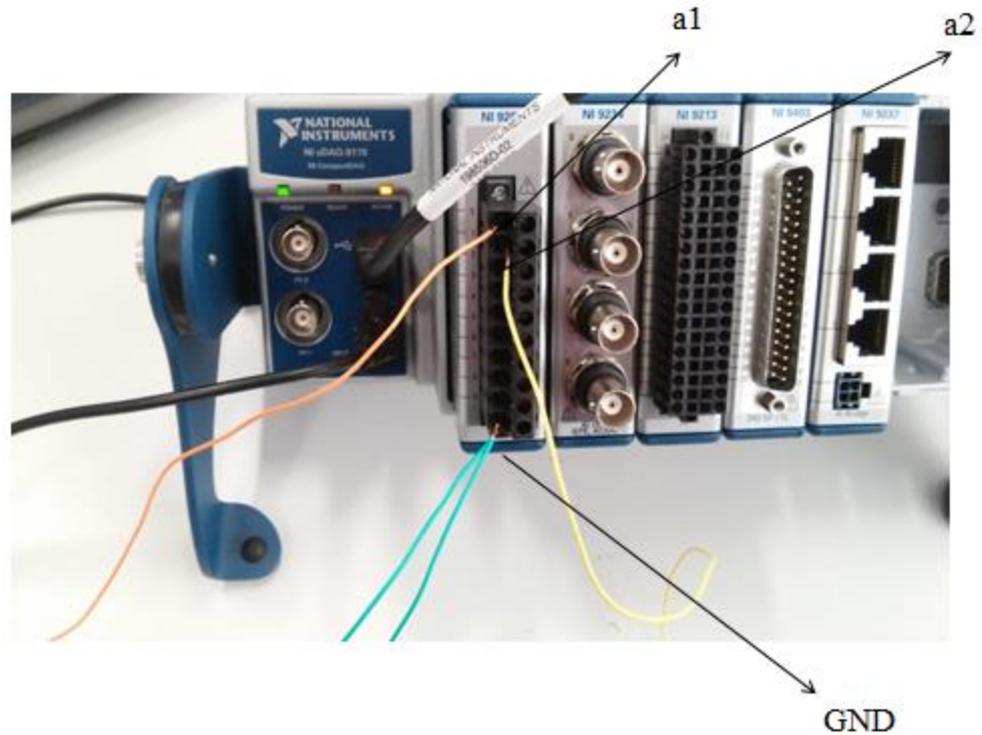
Figura 13 - Esquema dos sinais localizados na viga.



Fonte: Elaborado pela autora.

Para a aquisição dos dados de oscilação provocados pelo impacto, foi utilizado o *Labview* em conjunto com a placa de aquisição NI-9205, como visto anteriormente. Para cada sensor, havia dois fios. Na placa da *National Instruments*, os fios laranja e amarelo foram conectados respectivamente nos canais analógicos a1 e a2. O fio verde, por sua vez, foi conectado ao aterramento da placa (GND). Essas conexões são ilustradas na Figura 14.

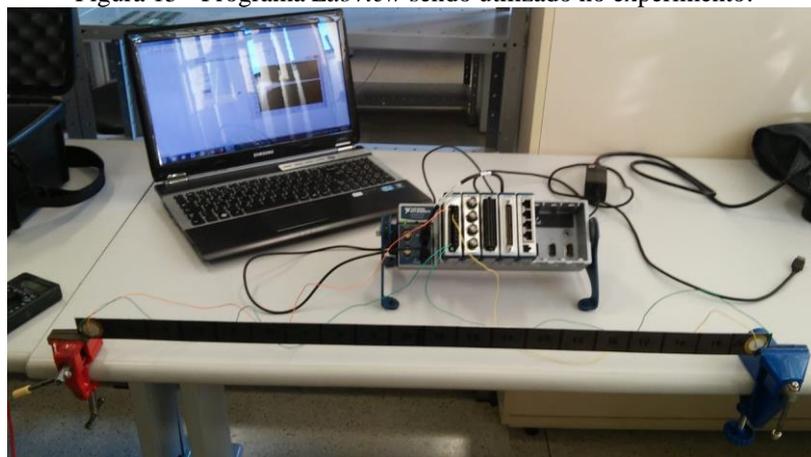
Figura 14 - Localização dos fios na placa da *National Instruments*.



Fonte: Elaborado pela autora.

O programa do *Labview* considera a capacidade máxima de 500 kHz, mas quando medimos dois canais isso é dividido pela metade. A Figura 15 representa a integração da viga e o software *Labview*.

Figura 15 - Programa *Labview* sendo utilizado no experimento.

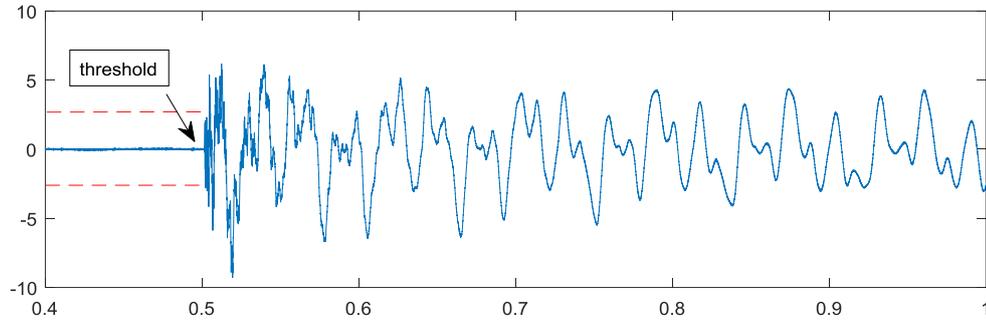


Fonte: Elaborado pela autora.

Feito a aquisição dos dados neste software, analisou de forma criteriosa os gráficos. Para encontrar a diferença de tempo de chegada dos sensores foi utilizado um programa do MATLAB (encontrado em anexo) que tem a função de encontrar o início do sinal medido no

sensor piezelétrico resultante do impacto na viga. Como o sinal medido continha ruído significativo, foi necessário delimitar um *threshold* (em português, limiar) de 0,25 V a partir da qual considerava-se que o sensor havia recebido o sinal do impacto. Na figura 16, o *threshold* é apresentado.

Figura 16 - Representação do *threshold* no gráfico.



Fonte: Elaborado pela autora.

Feito isso, utilizando os dados de calibração, foi construído um gráfico de variação desse tempo pela variação da distância entre o sensor da esquerda e a região impactada. A partir disso, foi construído um gráfico de distância do impacto em relação à diferença de tempo para se ajustar uma reta representativa desses dados de calibração. O modelo de reta foi então utilizado nos dados de validação para verificar se a técnica aplicada conseguiria generalizar a detecção de impactos em qualquer das regiões de comprimento da viga.

## 4 RESULTADOS

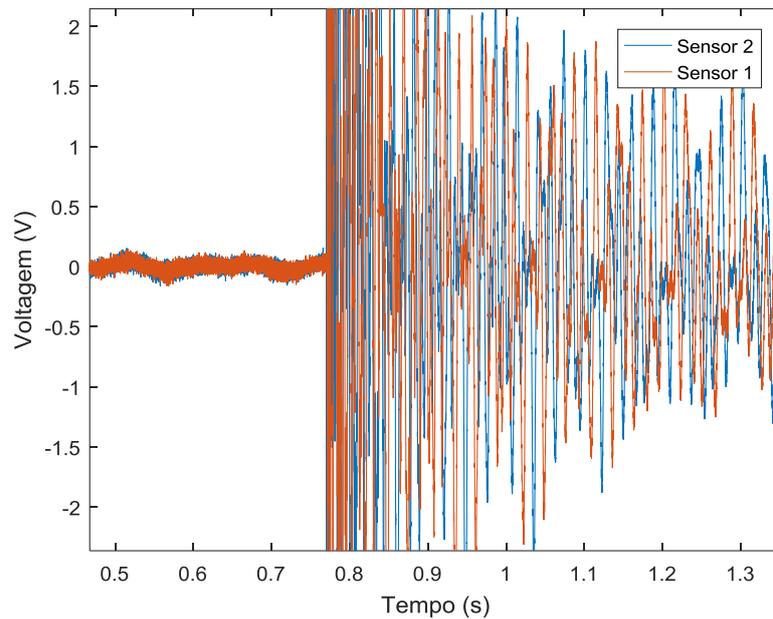
Nesse capítulo, serão discutidos os resultados obtidos pela aplicação da metodologia. Nesses resultados, serão inseridos alguns gráficos que mostram o sinal causado pelo impacto, de modo a analisar o comportamento desses sinais quando chegam a cada sensor da viga. Além disso, as distâncias, que se refere à localização do impacto, serão obtidas teoricamente e através de uma estimativa de erro relativo, será possível inferir se houve precisão ou não nos resultados.

### 4.1 Metodologia Aplicada

Os retângulos 1, 2, 4, 6, 8 e 10 foram impactados cinco vezes cada um. Para fins ilustrativos, serão apresentados apenas alguns gráficos, dentre eles são do retângulo 1, 10 e 15.

A onda representada pela cor vermelha remete ao sensor da 1 e a onda representada pela cor azul remete ao sensor 2. Quando o impacto ocorre no retângulo 2 (7,6 cm de distância em relação ao sensor 1), percebe-se que as ondas acústicas de vibração chegam mais rápido no sensor 1 (extremidade da esquerda) do que no sensor 2 (extremidade da direita). Teoricamente, a diferença de tempo de chegada neste ponto de impacto será positiva, já que  $t_2 \geq t_1$ . Na Figura 17 é demonstrada a medição da resposta ao impacto feito na posição 2.

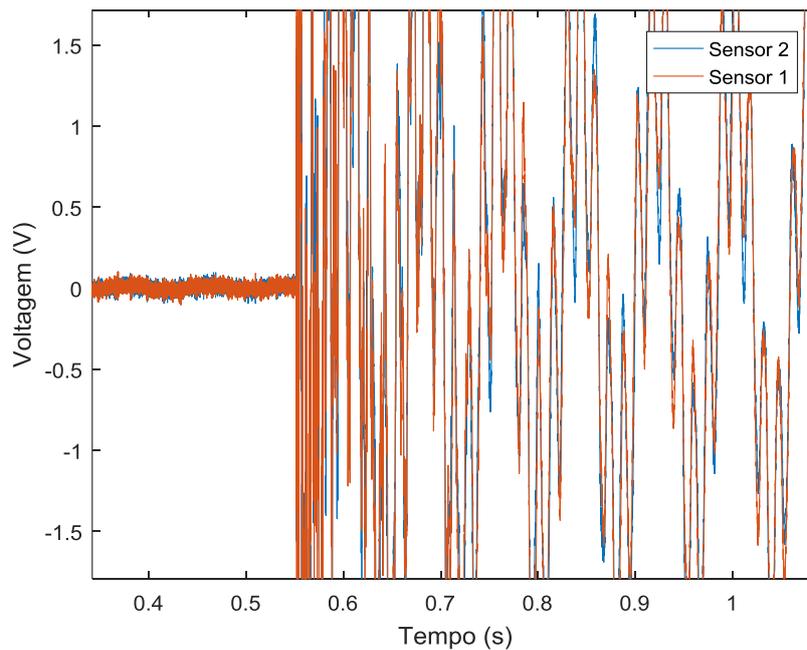
Figura 17 - Sinal provocado pelo impacto no retângulo 2.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quando o impacto ocorre no retângulo 10 (38 cm de distância em relação ao sensor 1), ou seja, no meio da viga, o tempo de chegada de onda em cada sensor é igual, assim a diferença de tempo de chegada é zero, já que  $t_1 = t_2$ . Na Figura 18 é representado o sinal medido nos sensores piezelétricos quando inseridos um impacto na posição 10.

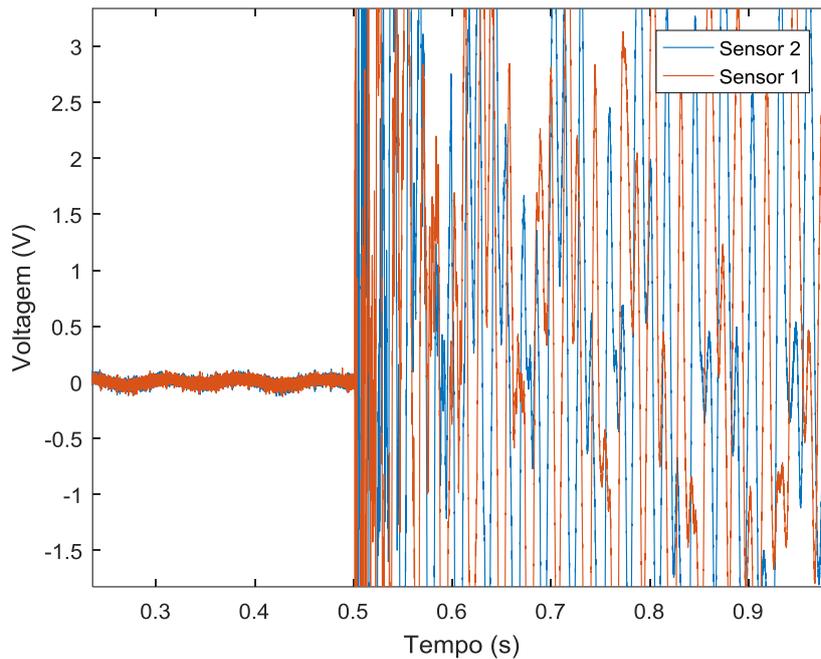
Figura 18 - Sinal provocado pelo impacto no retângulo 10.



Fonte: Elaborado pela autora.

Quando o impacto ocorre no retângulo 15 (57 cm de distância em relação ao sensor 1, percebe-se que as ondas de vibração chegam no sensor 2 mais rápido que no sensor 1, ou seja, a diferença de tempo de chegada neste ponto de impacto será negativo, já que  $t_1 \geq t_2$ . A Figura 19 mostra a representação da onda do impacto no retângulo 15, na primeira medição.

Figura 19 - Sinal provocado pelo impacto no retângulo 15 na primeira medição.



Fonte: Elaborado pela autora.

Como já foi citado na metodologia, foi produzido um programa no MATLAB capaz de capturar o impacto, que em termos computacionais, significa encontrar o ponto do gráfico de cada sensor maior que o máximo sinal do ruído. Esse máximo sinal de ruído é denominado *threshold* e o valor adotado foi de 0,25 V.

Assim, determinado o ponto referente ao início do impacto de cada sensor, foi possível encontrar as diferenças de tempo tanto dos dados de calibração como os de validação. Nas Tabelas 2 e 3, são apresentadas essas diferenças de tempo tanto para a calibração como para a validação, respectivamente.

Tabela 2 - Diferença de tempo de chegada para cada distância, na calibração.

<b>Calibração</b>	
<b>Variação da distância (mm)</b>	<b><math>\Delta t</math> (ms)</b>
0	0,72
0	0,712
0	0,724
0	0,716
0	1,2
76	0,524
76	0,516
76	0,804
76	0,66
76	0,668
152	0,512
152	0,54
152	0,44
152	0,62
152	0,412
228	0,248
228	0,308
228	0,292
228	0,276
228	0,248
304	0,14
304	0,128
304	0,156
304	0,136
304	0,156
380	0,24
380	-0,004
380	0,004
380	-0,024
380	0

Fonte: Elaborado pela autora.

Tabela 3 - Diferença de tempo de chegada para cada distância, na validação.

<b>Validação</b>	
<b>Variação da distância (mm)</b>	<b><math>\Delta t</math> (ms)</b>
114	0,5
114	0,568
266	0,248
266	0,196
494	-0,296
494	-0,24
570	-0,352
570	-0,364

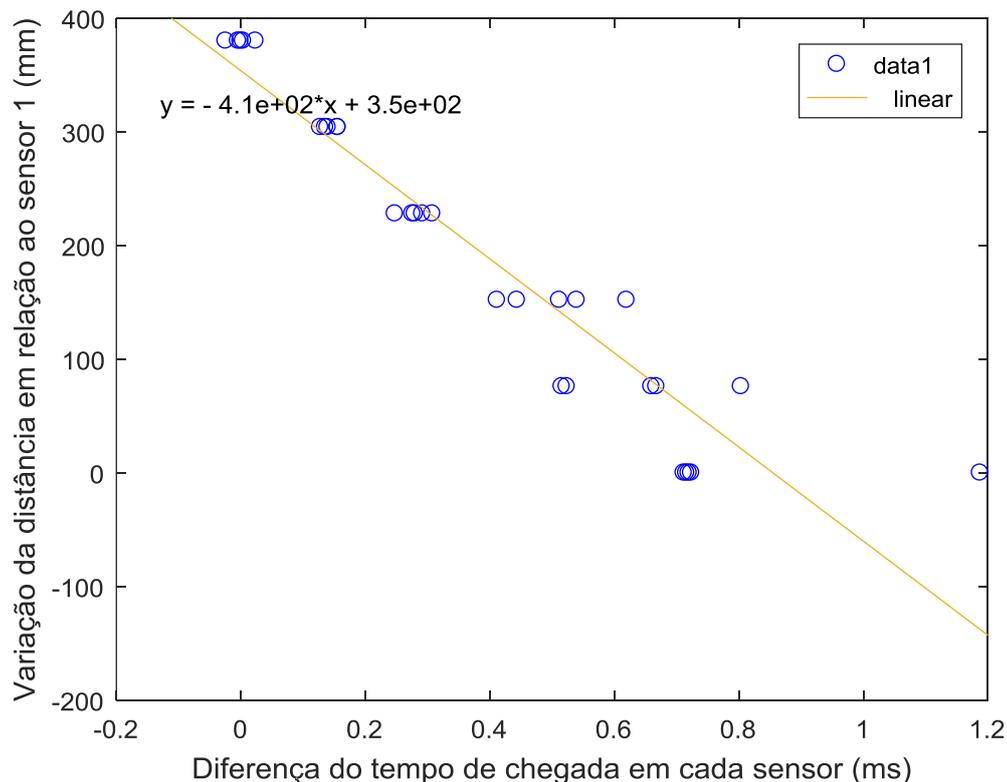
Fonte: Elaborado pela autora

## 4.2 REGRESSÃO LINEAR

A regressão linear, como o nome próprio diz, refere-se a um conjunto de repostas que segue uma função linear. Para responder a relação de diferença dos tempos de chegada e a distância em relação ao sensor 1 foi utilizada uma regressão linear dos dados extraídos na fase de calibração. O modelo de regressão foi ajustado com o método dos mínimos quadrados (MMQ) (Franco, 2006).

Através da diferença do tempo de chegada dos pontos de calibração, foi obtido o gráfico com os pontos distribuídos. Para determinar o comportamento desses dados na viga, foi traçada uma reta linear, utilizando o MMQ. Essa reta caracteriza o comportamento da diferença dos tempos de chegada aos sensores ao longo das distâncias delimitadas da viga. Segue a reta construída sobre os pontos do gráfico na Figura 20.

Figura 20 - Regressão linear dos pontos obtidos.



Fonte: Elaborado pela autora.

A reta obtida foi:

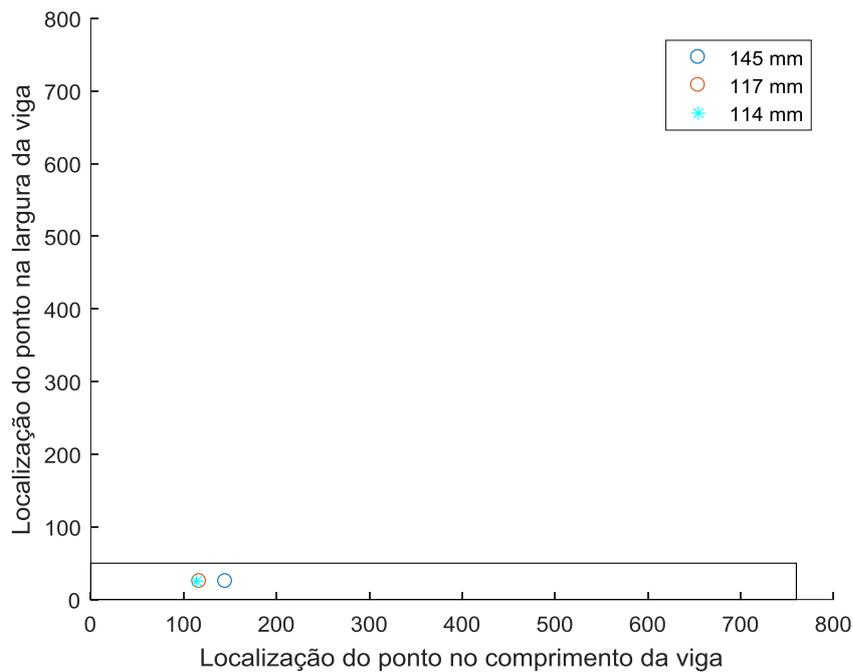
$$\Delta d = -410 \Delta t + 350 \quad (7)$$

Onde  $\Delta d$  é a variação da distância em relação ao sensor 1 em (mm) e  $\Delta t$ , a diferença de tempo de chegada em cada sensor em (ms).

Para validar essa teoria, as diferenças do tempo de chegada de cada ponto de validação foram substituídas nessa equação acima. Para fins didáticos, a circunferência representa as distâncias obtidas teoricamente pelos pontos de validação e a ‘cruz’, representa a localização do impacto determinada experimentalmente.

A Figura 21 representa os pontos teóricos, que são aqueles obtidos pela equação acima, representada por uma circunferência. São eles 145 mm e 117 mm. Já a localidade do impacto real foi representada por uma cruz (114 mm).

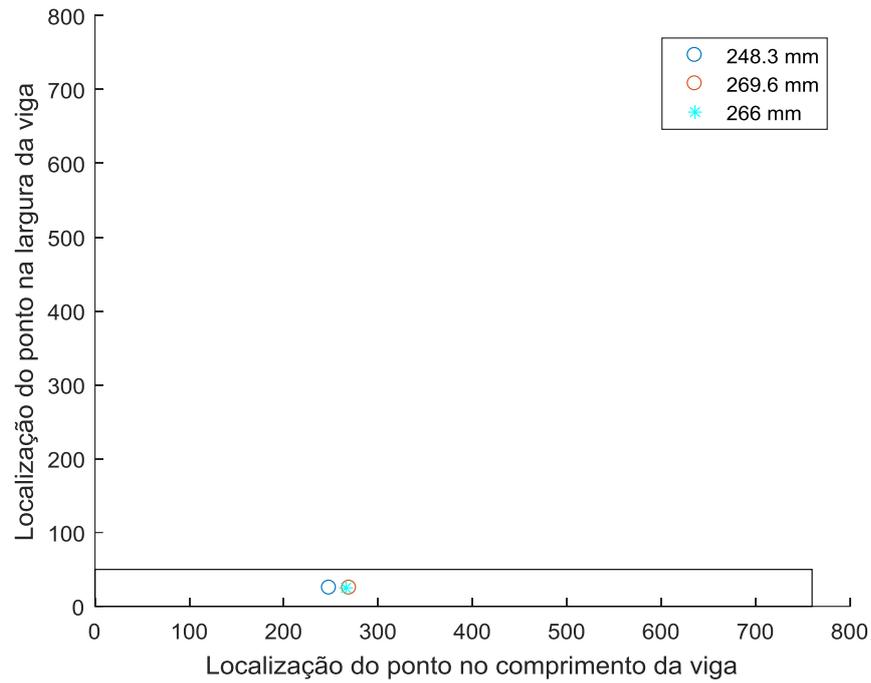
Figura 21 - Impacto feito no retângulo 3 (114 mm de distância do sensor 1) experimentalmente e teoricamente.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 22 representa os pontos teóricos, que são aqueles obtidos pela equação acima, representada por uma circunferência. São eles 269,6 mm e 248,3 mm. Já a localidade do impacto real foi representada por uma cruz (266 mm).

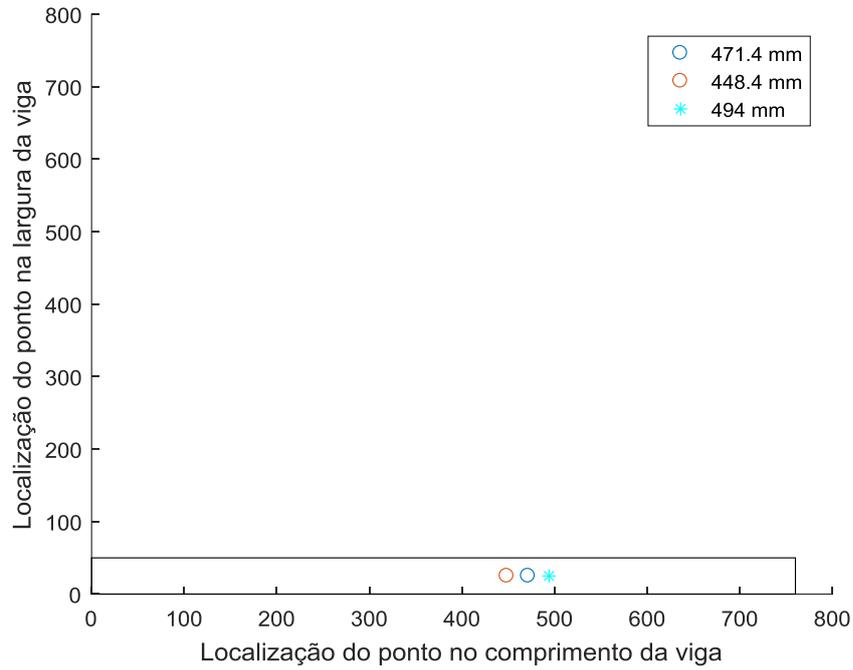
Figura 22 - Impacto feito no retângulo 7 (266 mm de distância do sensor 1) experimentalmente e teoricamente.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 23 representa os pontos teóricos, que são aqueles obtidos pela equação acima, representada por uma circunferência. São eles 471,36 mm e 448,4 mm Já a localidade do impacto real foi representada por uma cruz (494 mm).

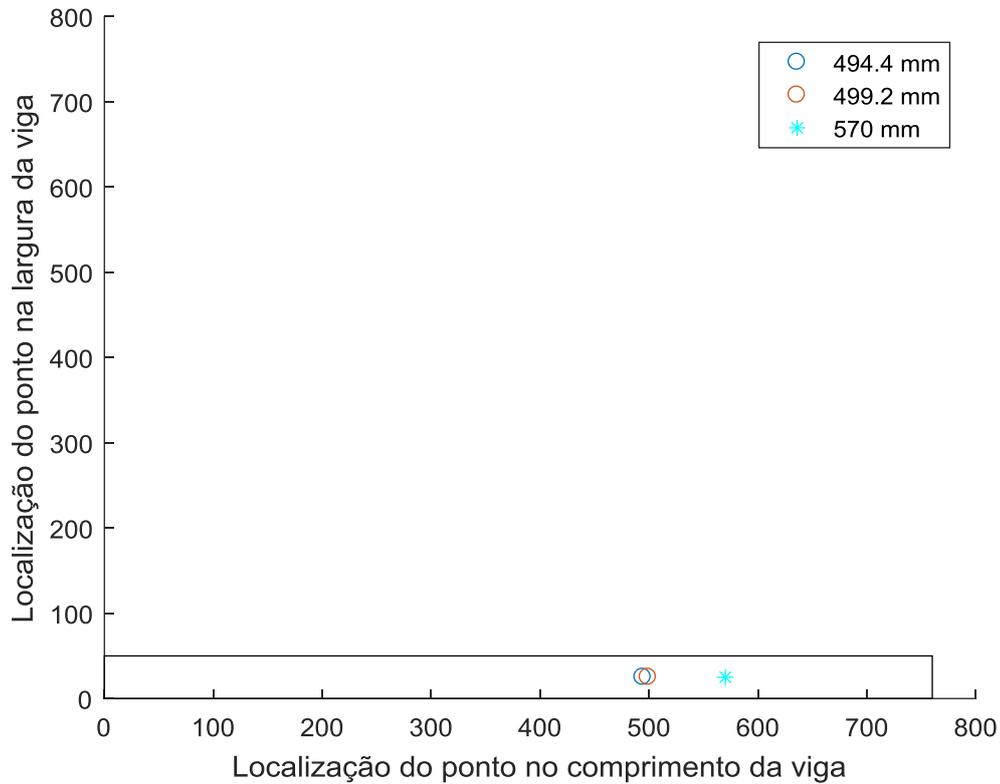
Figura 23 - Impacto feito no retângulo 13 (494 cm de distância do sensor 1) experimentalmente e teoricamente.



Fonte: Elaborado pela autora.

A Figura 24 representa os pontos teóricos, que são aqueles obtidos pela equação acima, representada por uma circunferência. São eles 494,32 mm e 459,24 mm. Já a localidade do impacto real foi representada por uma cruz (570 mm).

Figura 24 - Impacto feito no retângulo 15 (70 mm de distância do sensor 1) experimentalmente e teoricamente.



Fonte: Elaborado pela autora.

### 4.3 ERROS RELATIVOS

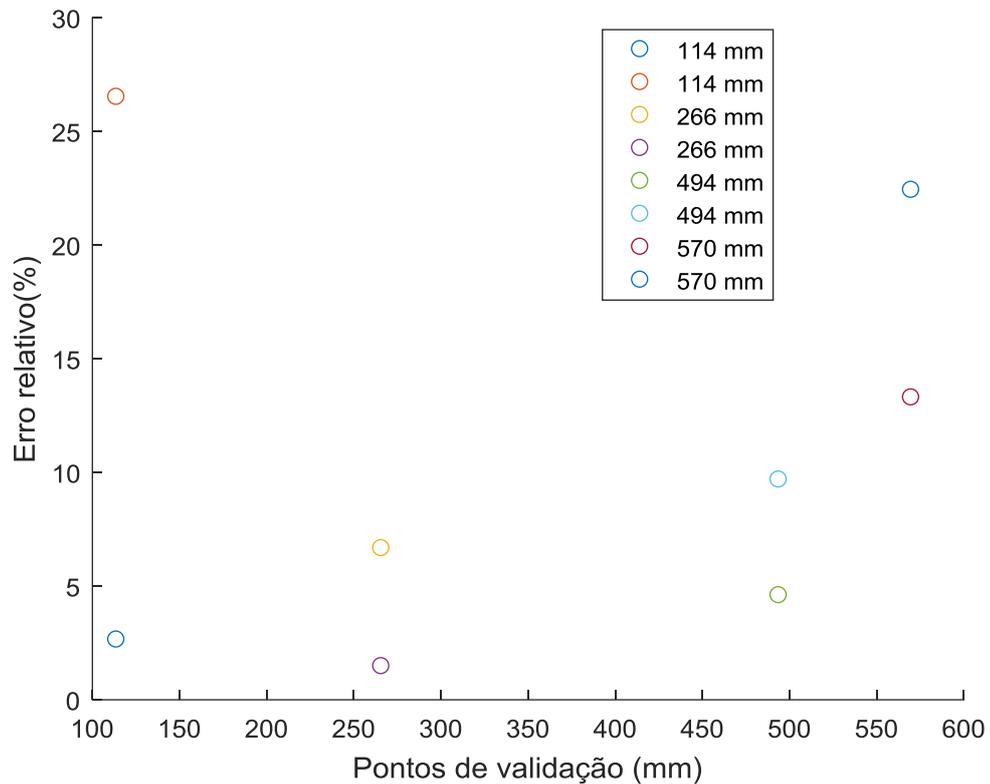
Erro relativo é caracterizado como a divisão entre um erro absoluto e o módulo do valor exato. Em geral, a localização do impacto feita de maneira teórica se aproximou da experimental, porém a exatidão não foi alcançada. Assim, optou-se por fazer uma estimativa do erro relativo envolvido nesse estudo. Segue a equação abaixo:

$$\text{erro relativo (\%)} = \frac{\text{erro}}{d_e} \times 100 \quad (8)$$

Onde o erro representa a diferença entre a distância obtida pela equação da regressão linear e a distância obtida experimentalmente. E  $d_e$  representa a distância obtida experimentalmente em mm.

Na Figura 25, para cada ponto de validação, foram plotados dois pontos. Esses pontos representam o erro relativo que foi calculado como mostrado na equação acima.

Figura 25 - Erro relativo dos pontos de validação.

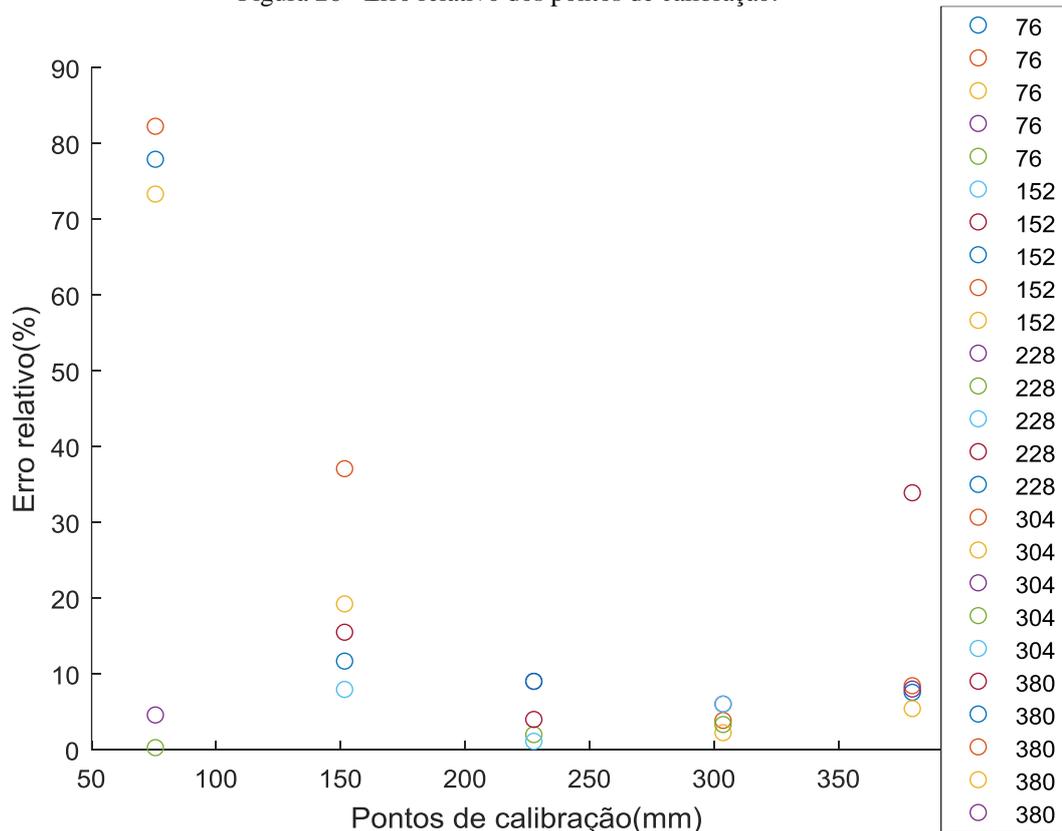


Fonte: Elaborado pela autora.

Analisando esse gráfico, na distância 114 mm, a estimativa do erro ficou entre 2,63% e 26,5%. Nesse caso, o erro relativo variou bastante. Na distância 266 mm, a estimativa de erro variou pouco, ficando em torno de 6,65% e 1,46%. O mesmo ocorreu com a distância 495 mm, em que a estimativa de erro variou entre 4,58 % e 9,67%. Porém na distância 570, como ocorreu com a distância 114 mm, a variação da estimativa de erro foi grande, ficando em torno de 13,28% e 22,41%.

Mesmo o fato dos pontos de calibração serem os responsáveis pela formulação da teoria, decidiu-se aplicar o caminho inverso. Os tempos de chegada desses pontos foram substituídos na equação da regressão linear e através da fórmula de erro relativo, foi possível construir a Figura 26.

Figura 26 - Erro relativo dos pontos de calibração.



Fonte: Elaborado pela autora.

Na Figura 26, é possível perceber que as distâncias próximas dos sensores piezelétricos são as mais afetadas pela grande variação do erro relativo entre os pontos.

Através desses resultados obtidos, é possível fazer uma análise do comportamento do impacto na viga. Posteriormente, na conclusão, serão feitas considerações e possíveis melhorias para futuros trabalhos serão propostas.

## 5 CONCLUSÃO

O trabalho explorou o método TDOA, que refere a uma técnica bastante utilizada em varias aplicações, principalmente na indústria aeroespacial e de telecomunicações. Neste trabalho, esse método foi utilizado com sensores piezelétricos capazes de captar os sinais obtidos pelo impacto provocado por uma chave de fenda sobre uma viga de aço em condição bi-engastada. Além disso, com a captação desses sinais é possível determinar as diferenças de tempo de chegada de um sensor em relação ao outro. Para a aquisição de dados, foi utilizada a placa de aquisição da *National Instruments* NI-9205 em conjunto com o software *Labview*. A partir dessas diferenças de tempo dos pontos de calibração, foi possível construir uma equação da reta, através da regressão linear, em que foi caracterizado o comportamento das diferenças de tempo em relação ao local onde ocorre o impacto experimental. Para verificar o modelo linear foram utilizados dados de validação tentando generalizar a metodologia para impactos em qualquer região da estrutura.

Como foi visto no capítulo de resultados, a estimativa do erro relativo representou um indicativo de precisão do método. Em alguns pontos, a precisão não foi alcançada. Podem-se destacar dois motivos que podem ser os responsáveis por isso. Os pontos de validação foram repetidos apenas duas vezes cada um e ocasionalmente, pode ter ocorrido algum erro de medição e gerado um *outlier*, ou seja, algum ponto fora do contexto apresentado e que não satisfaz as condições adotadas. Ou então, essa elevação do erro relativo em alguns pontos refere-se ao fato que essas distâncias estão localizadas na extremidade da viga, onde os sensores estão. E pelo fato dos sensores estarem localizados no mesmo local do impacto, pode ter influenciado na deformação do material piezelétrico e conseqüentemente, alterado os sinais capturados pelos sensores.

O método TDOA evidenciou algumas limitações. A exatidão não foi alcançada em alguns pontos, principalmente por causa da interferência dos sensores localizados na extremidade. Os impactos feitos próximos dos sensores sofreram uma interferência, já que os sinais capturados pelos sensores foram influenciados. Já as posições distantes das extremidades em que foram feitos os impactos, a exatidão foi mantida.

### 5.1 Trabalhos futuros

Para trabalhos futuros, propõem-se a utilização de maneiras para melhorar a precisão do método. Segue a seguir as maneiras propostas:

- Utilizar um equipamento específico para provocar o impacto, evitando a utilização manual de uma chave de fenda, como foi feito;
- Mudar a disposição dos sensores para analisar a influência da sua posição nos resultados de impacto;
- Estudar qual a influência do comprimento da viga nos resultados. E se os sinais capturados pelos sensores em uma viga maior ou menor podem ser alterados;
- Analisar também a influência do tipo de material utilizado, já que dependendo do material, a velocidade de propagação alteraria e conseqüentemente, mudaria a captação dos sinais pelos sensores;
- Utilização de um amplificador para medir os sinais dos sensores piezelétricos, com o objetivo de reduzir os ruídos dos sinais.

## REFERÊNCIAS

- ABENDE – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENSAIOS NÃO-DESTRUTIVOS. **Deteção de Vazamentos Não-Vísiveis – Métodos Acústicos**. Apostila do Curso Ministrado no CETRE – Centro de Treinamento da ABENDE. São Paulo, 2005.
- ALVES, G. T. **Avaliação de absorção de energia de impacto**: Uma abordagem baseada em testes com estruturas similares. 2009. 153 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.
- AZEVEDO, D. **Tipos de carregamentos**. Curso de Engenharia Auxiliada por Computadores. 2016. Notas de aula. Universidade de Mogi das Cruzes.
- BALBINOT, A et al., 2010, **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**, Vol. I e II, 2ª Ed., Ed. LTC;
- BELLECIERI, Y et al., 2018, **Localização Indoor Baseada na Leitura Bidirecional do RSSI**. 2018. Instituto Federal do Sudeste de Minas Gerais, Juiz de Fora, 2018.
- COVERLEY, P. T.; STASZEWSKI, W. J. Impact damage location in composite structures using optimized sensor triangulation procedure. **Smart Materials and Structures**, v. 12, n. 5, p. 795-803. 2003.
- DALLY, J. W; RILEY, W. F. **Experimental stress analysis**. 4. ed. New York: McGrawHill Inc, 1991. 672p.
- GERE, J. M. **Mecânica dos materiais**. 5. ed. São Paulo: Thompson, 2003.698p.
- GOLDSMITH, W. **The theory and physical behaviour of colliding solids**. London: Courier Dover Publication, 1960. 396p.
- HE, H et al., 2017, **Localization: Angle of Arrival**, 2017.
- JONES, N. **Structural impact**. New York: Cambridge University Press, 1997. 575p.
- LEO, D. L. **Engineering analysis of smart material systems**. Canada: Jonh Wiley & Sons, 2007. 576p.
- FRANCO, N. B. **Cálculo Numérico**. São Paulo: Pearson, 2006
- PHAM, D. T. et al. Tangible acoustic interface approaches. **Proceedings of IPROMS 2005 Virtual Conference**, p. 497–502. 2005.

PU, C. et al. **Indoor location tracking using received signal strength indicator**. Croatia: Emerging Communications for Wireless Sensor Networks, 2011. 29p.

SILVA, F. A. **Tenacidade de materiais compósitos não convencionais**. 2004. 259 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

SILVA, F. B. **Localização de fontes acústicas por arranjo de microfones**. 2015. 87 f. Projeto de Graduação (Curso de Engenharia Eletrônica e de Computação) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2015.

STRONGE, W. J. **Impact mechanics**. New York: Cambridge University Press, 2004.304 p.

RAJBHANDARI, P. Impact location in an isotropic plate without training. **Procedia Engineering**, v. 188, s. n., p. 170 – 177. 2017.

RAZZINI, A. H. **Localização de impacto em materiais compósitos**. 2017. 102 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, 2017.

**ANEXOS**

**ANEXO A - Código do MATLAB usado para a obtenção das diferenças de tempo de chegada de cada ponto de impacto e obtenção da reta da regressão linear**

```
files = cell(38,1);
files{1} = 'preso_1_001.txt';
files{2} = 'preso_1_002.txt';
files{3} = 'preso_1_003.txt';
files{4} = 'preso_1_004.txt';
files{5} = 'preso_1_005.txt';
files{6} = 'preso_2_001.txt';
files{7} = 'preso_2_002.txt';
files{8} = 'preso_2_003.txt';
files{9} = 'preso_2_004.txt';
files{10} = 'preso_2_005.txt';
files{11} = 'preso_3_001.txt';
files{12} = 'preso_3_002.txt';
files{13} = 'preso_4_001.txt';
files{14} = 'preso_4_002.txt';
files{15} = 'preso_4_003.txt';
files{16} = 'preso_4_004.txt';
files{17} = 'preso_4_005.txt';
files{18} = 'preso_6_001.txt';
files{19} = 'preso_6_002.txt';
files{20} = 'preso_6_003.txt';
files{21} = 'preso_6_004.txt';
files{22} = 'preso_6_005.txt';
files{23} = 'preso_7_001.txt';
files{24} = 'preso_7_002.txt';
files{25} = 'preso_8_001.txt';
files{26} = 'preso_8_002.txt';
files{27} = 'preso_8_003.txt';
files{28} = 'preso_8_004.txt';
files{29} = 'preso_8_005.txt';
files{30} = 'preso_10_001.txt';
files{31} = 'preso_10_002.txt';
files{32} = 'preso_10_003.txt';
files{33} = 'preso_10_004.txt';
files{34} = 'preso_10_005.txt';
files{35} = 'preso_13_001.txt';
files{36} = 'preso_13_002.txt';
```

```

files{37} = 'preso_15_001.txt';
files{38} = 'preso_15_002.txt';

threshold = 0.25;
time = zeros(30, 1);
distancia =
[0,0,0,0,0,76,76,76,76,76,114,114,152,152,152,152,152,228,228,228,228,228,2
66,266,304,304,304,304,304,380,380,380,380,380,494,494,570,570]

for n = 1:length(files)

    data = dlmread(files{n});
    x1 = data(:,1);
    x2 = data(:,2);

    for k = 2:length(x1)
        if abs(x1(k)) > threshold;
            idx1 = k;
            break
        end
    end

    for k = 2:length(x2)
        if abs(x2(k)) > threshold;
            idx2 = k;
            break
        end
    end

    time(n) = (idx2-idx1)/250000;

    disp({files{n}, idx1, idx2, time(n)});

end

figure;
plot(time, distancia, 'bo');

```

```
ylabel('Variação da distância em relação ao sensor 1 (mm)');  
xlabel('Diferença do tempo de chegada em cada sensor (s)');
```