



UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

Faculdade de Engenharia

Curso de ENGENHARIA MECÂNICA – FAEN

RODRIGO FELIPE CARNEIRO CAPETTA

**APLICAÇÃO DE CERÂMICA PIEZOELÉTRICA DO TIPO NIOBATO DE
POTÁSSIO E SÓDIO (KNN) COMO SENSOR DE VIBRAÇÕES EM VIGA**

Dourados – MS

2022

RODRIGO FELIPE CARNEIRO CAPETTA

APLICAÇÃO DE CERÂMICA PIEZOELÉTRICA DO TIPO NIOBATO DE POTÁSSIO E SÓDIO (KNN) COMO SENSOR DE VIBRAÇÕES EM VIGA

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Banca Examinadora da Universidade Federa, da Grande Dourados, como pré-requisito para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica sob a orientação do Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos.

Área de concentração: 3.05.04.00-7
Mecânica dos Sólidos

**Dourados – MS
2022**



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS

ANEXO D - AVALIAÇÃO FINAL DO TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aluno: **RODRIGO FELIPE CARNEIRO CAPETTA**

Título do trabalho e subtítulo (se houver): **APLICAÇÃO DE CERÂMICA PIEZOELÉTRICA DO TIPO NIOBATO DE POTÁSSIO E SÓDIO (KNN) COMO SENSOR DE VIBRAÇÕES EM VIGA**

BANCA EXAMINADORA

1. Presidente (orientador):

Prof. Dr. RODRIGO BORGES SANTOS, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

2. Membro:

Prof. Dr. SANDERSON MANOEL DA CONCEIÇÃO, Universidade Federal da Grande Dourados – UFGD

3. Membro:

Prof. Dr. EVARISTO ALEXANDRE FALCÃO, Universidade Federal da Grande Dourados - UFGD

De acordo com o grau final obtido pelo aluno, nós da banca examinadora, declaramos **APROVADO** (Aprovado/Reprovado) o aluno acima identificado, na componente curricular Trabalho de Conclusão de Curso (TCC-II) de Graduação no Curso de Engenharia Mecânica Universidade Federal da Grande Dourados.

Dourados, 15 de junho de 2022.

Prof. Dr. Rodrigo Borges Santos

Prof. Dr. Sanderson Manoel da Conceição

Prof. Dr. Evaristo Alexandre Falcão

RESUMO

No presente trabalho a cerâmica de Niobato de Potássio e Sódio foi utilizada como sensor para o estudo de vibrações em vigas. Nesse sentido, o principal objetivo desse estudo foi desenvolver por meio do processo mecânico a cerâmica de KNN e, então, aplicar uma pastilha piezoelétrica desse material como sensor de vibração acoplado em uma viga engastada-livre. A viga é modelada via método do elemento espectral considerando elemento do tipo Euler Bernoulli. As frequências naturais da viga são obtidas a partir da Função de Resposta em Frequência (FRF). Testes de vibrações são realizados e, então, as frequências naturais obtidas experimentalmente. A sintetização da cerâmica é realizada por meio de mistura de óxidos e destaca-se por ser de baixo custo e altamente eficiente. Os resultados das caracterizações apresentam dados semelhantes ao da literatura, concluindo que houve a formação da fase de KNN. Com a realização do experimento, são notáveis as respostas apresentadas pelo material desenvolvido quando se comparado com acelerômetro comercial, concluindo então, a sua aplicabilidade como sensor de detecção de vibrações em estruturas.

Palavras-chaves: KNN, método de elemento espectral, vigas Euler-Bernoulli.

ABSTRACT

In the present work, the Potassium Sodium Niobate ceramic was used as a sensor for the study of vibrations in beams. In this sense, the main objective of this study was to develop the KNN ceramic through the mechanical process and, then, apply a piezoelectric wafer of this material as a vibration sensor coupled to a free-standing beam. The beam is modeled via the spectral element method considering an Euler Bernoulli element. The natural frequencies of the beam are obtained from the Frequency Response Function (FRF). Vibration tests are performed and then natural frequencies obtained experimentally. Ceramic synthesis is performed by mixing oxides and stands out for being low cost and highly efficient. The results of the characterizations present data similar to the literature, concluding that there was the formation of the KNN phase. With the accomplishment of the experiment, the responses presented by the material developed when compared with commercial accelerometer are remarkable, concluding then, its applicability as a sensor for detecting vibrations in structures.

Keywords: KNN, spectral element method, Euler-Bernoulli beams.

Aplicação de cerâmica piezoelétrica do tipo Niobato de Potássio e Sódio (KNN) como sensor de vibrações em viga

Rodrigo Felipe Carneiro Capetta¹, Evaristo Alexandre Falcão², Rodrigo Borges Santos³

¹ Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS, Brasil

² Faculdade de Ciências Exatas, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados - MS, Brasil

³ Faculdade de Engenharia, Universidade Federal da Grande Dourados, Dourados – MS, Brasil

E-mail: rfcapetta.goa@gmail.com¹, evaristofalcao@ufgd.edu.br², rodrigobsantos@ufgd.edu.br³.

Resumo

No presente trabalho a cerâmica de Niobato de Potássio e Sódio foi utilizada como sensor para o estudo de vibrações em vigas. Nesse sentido, o principal objetivo desse estudo foi desenvolver por meio do processo mecânico a cerâmica de KNN e, então, aplicar uma pastilha piezoelétrica desse material como sensor de vibração acoplado em uma viga engastada-livre. A viga é modelada via método do elemento espectral considerando elemento do tipo Euler Bernoulli. As frequências naturais da viga são obtidas a partir da Função de Resposta em Frequência (FRF). Testes de vibrações são realizados e, então, as frequências naturais obtidas experimentalmente. A síntese da cerâmica é realizada por meio de mistura de óxidos e destaca-se por ser de baixo custo e altamente eficiente. Os resultados das caracterizações apresentam dados semelhantes ao da literatura, concluindo que houve a formação da fase de KNN. Com a realização do experimento, são notáveis as respostas apresentadas pelo material desenvolvido quando se comparado com acelerômetro comercial, concluindo então, a sua aplicabilidade como sensor de detecção de vibrações em estruturas.

Palavras-chaves: KNN, método de elemento espectral, vigas Euler-Bernoulli.

1. Introdução

O controle de vibrações em estruturas flexíveis é de grande interesse para a engenharia. Pois toda máquina quando em funcionamento gera vibração, e quando essa vibração excede seu limite é possível determinar através do método de elementos finitos (FEM) se essa vibração está relacionada a algum tipo de defeito. Todavia, o estudo da vibração é o processo que permite prever as falhas dos componentes de equipamentos rotativos, da fuselagem de aeronaves, pontes e edifícios; que são descobertas pelo processo da taxa de variação das forças dinâmicas geradas [1]. Para a substituição do método de elementos finitos, no cálculo estrutural periódico, foi desenvolvido os métodos de elementos espectrais (SEM – *Spectral Element Method*) [2]. O SEM descreve o comportamento dinâmico de um modelo de uma viga elementar em relação aos deslocamentos nodais, no domínio da frequência utilizando a Transformada Discreta de

Fourier [3]. O método do elemento espectral é basicamente o método de elementos finitos formulado no domínio da frequência. As principais vantagens do SEM são: precisão extremamente alta e são necessários menos graus de liberdades, custo de computação baixo, eficaz para lidar com problemas de domínio de frequência, ideal para lidar com as condições de contorno não-reflectindo dos problemas de domínio infinito ou semi-infinito, método livre de bloqueio e eficiente para lidar com dados digitalizados e as funções de transferência do sistema (a inversa da matriz de rigidez dinâmica global).

A utilização de materiais inteligentes tem sido de grande interesse para os pesquisadores, com possíveis aplicações na área automobilística, até em dispositivos ópticos-eletrônicos [4]. Estruturas com materiais inteligentes acoplados são denominadas de estruturas inteligentes. Os materiais inteligentes mais utilizados na atualidade são os materiais piezoelétricos, ou seja, são materiais que possibilitam a

polarização através da aplicação de uma tensão mecânica ou através da deformação causada por um campo elétrico externo. Destaca-se o PZT (*Lead Zirconate Titanate*), material à base de chumbo, que apresenta alta propriedade piezoelétrica, sendo a cerâmica mais utilizada para o desenvolvimento de sensores e atuadores. Portanto, com as devidas restrições de muitos países com relação da utilização de materiais à base de chumbo, surge então, a possível proposta para o desenvolvimento de um dispositivo com propriedades ferroelétricas e “sem” chumbo (Pb), que apresentam propriedades piezoelétricas, no qual é composto basicamente por potássio (K), sódio (Na) e nióbio (Nb), nomeado como KNN.

Visando a necessidade e seguindo as orientações ambientais de acordo com a *DIRECTIVE 2002/96/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE)* [6], o presente trabalho tem como objetivo principal desenvolver uma pastilha piezoelétrica de Nióbio de Potássio e Sódio (KNN) e, verificar sua potencial utilização como sensor de medições de vibração estrutural. E para isso, destaca-se como objetivos secundários:

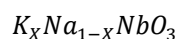
- Modelagem de uma viga engastada-livre via método do elemento espectral para elemento de viga do tipo Euler Bernoulli;
- Obter as frequências naturais para a viga via Função de Resposta em Frequência (FRF) calculadas numericamente;
- Realizar testes experimentais, obter as respostas temporais medidas pelo sensor KNN e, então, obter as frequências naturais para a viga; e
- Obter a resposta de vibração para viga usando um acelerômetro comercial e, assim, obter uma estimativa para o valor da sensibilidade da pastilha de KNN, em milivolts/ ms^{-1} .

2. Metodologia

2.1. Materiais

2.1.1 KNN

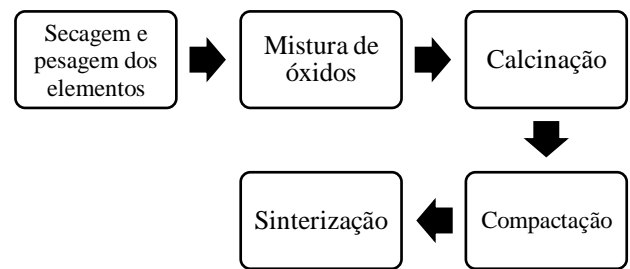
O autor utilizou a seguinte fórmula estequiométrica para obter o KNN utilizado neste trabalho:



sendo o valor de X é igual a 0.50.

Importante ressaltar que a escolha da composição $K_xNa_{1-x}NbO_3$ foi realizada com base nos estudos e resultados obtidos por Kumar et al [7]. A cerâmica foi sintetizada pelo método de reação de estado sólido e mistura de óxidos. Este processo pode ser observado no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 – Fluxograma do procedimento de preparação das cerâmicas de KNN.



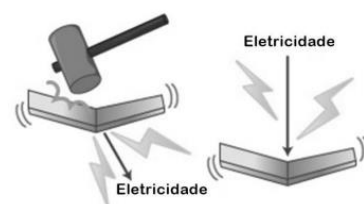
Fonte: O Autor.

Foi medida a massa dos elementos e posteriormente os mesmos foram secos a uma temperatura de 105°C por 8 horas. Processo necessário para a remoção excessiva de umidade e outros resíduos orgânicos. Já no processo seguinte, os componentes foram misturados durante três (03) horas (utilizando esferas de zircônia) e deixados em repouso, em temperatura de 60°C, para a secagem total do solvente utilizado na mistura. Após a remoção do solvente, a mistura foi triturada e peneirada para a obtenção padrão do tamanho de grão, levando o pó para o processo de tratamento térmico, calcinação, a uma temperatura de 750°C por seis (06) horas. Logo depois do processo de calcinação, o mesmo foi moído com 60% da massa final do pó em solvente, por um período de doze (12) horas. Por fim, repousando a solução moída até a formação do pó refinado.

2.1.2 Ferroeletricidade do KNN

Materiais ferroeletricos possuem propriedades piezoelétricas, ou seja, podem ser polarizados com a aplicação de uma tensão mecânica ou com a aplicação de um campo elétrico externo, comportamento que pode ser ilustrado na Figura 2.

Figura 2 – Representação esquemática do efeito piezoelétrico e efeito piezoelétrico inverso.



Fonte: Gustavo et al, 2013, adaptada [15].

O KNN é uma cerâmica composta por uma estrutura denominada como policristalino, ou seja, é constituída de pequenos cristais formados por domínios ferroelétricos, onde esses possuem dipolos elétricos orientados em diferentes direções. A cerâmica de KNN utilizada para o

desenvolvimento deste estudo, foi polarizada com uma tensão de aproximadamente 10kV, orientando seus dipolos em uma direção preferencial, conforme ilustrado na Figura 3.

Figura 3 – Esquema de uma cerâmica ferroelétrica, não polarizada, no processo de polarização e polarizada.



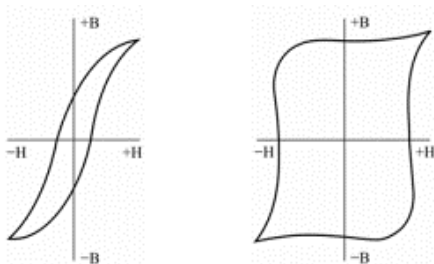
Fonte: Gustavo et al, 2013, adaptada [15].

2.2. Caracterizações elétricas

2.2.1 Histerese

Uma das principais características dos materiais ferroelétricos é a histerese da polarização do material em função da aplicação de um campo externo bipolar. Normalmente as curvas de histerese de materiais ferroelétricos se apresentam em uma forma “quadrada”, pois a arranjo ordenado de sua estrutura favorece uma inversão abrupta na polarização ao inverter o sentido do campo elétrico aplicado, conforme ilustrado na Figura 4b [10]. No entanto, em cerâmicas ferroelétricas policristalinos, como as cerâmicas BT, PLZT e KNN, o arranjo aleatório dos domínios justifica a inversão gradual da polarização com a inversão do campo, gerando assim curvas com formato “arredondado”, como ilustra a Figura 4a [10].

Figura 4: Curvas de histerese com formato mais “redondo” (4a) e “quadrado” (4b).



Fonte: Gustavo et al, 2013, adaptada [15].

2.2.2 Difração de raio-x (DRX)

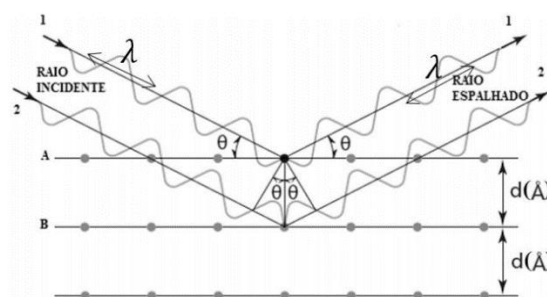
A caracterização de DRX é uma técnica não destrutiva que é utilizada para a análise da estrutura cristalina de um material, onde os raio-X empregados incidem sobre a rede cristalina do cristal e são espalhados, ocorrendo uma interferência, tanto construtiva como destrutiva. Entre os raios emitidos, existe o espelhamento do cristal que são da mesma ordem de grandeza

que o comprimento de onda da radiação. Este fenômeno é explicado mediante a lei de Bragg (equação 1), onde as ondas de raio-X interferem construtivamente sobre as regiões interplanares do material, como ilustrado na Figura 5 [11].

$$n\lambda = 2d\sin\theta \quad (1)$$

Na equação (1), n é um número inteiro, λ é o comprimento de onda da radiação, d é a distância entre os planos da amostra e θ é o ângulo de varredura do feixe do equipamento, assim a diferença de caminho óptico $2d\sin\theta$ deve ser igual a um inteiro de comprimento de onda $n\lambda$, para cumprir a condição de interferência construtiva [12], as medidas de DRX foram realizadas no Grupo de Desenvolvimento e Inovação em Dispositivos Multifuncionais (GDDM) da UEM.

Figura 5 - Esquema que representa a lei de Bragg para uma radiação de raios X incidindo sobre os planos A e B de certo material.



Fonte: Angélica M. Mazuera Zapata, adaptado [16].

2.3. Caracterização térmica

2.3.1 Termogravimetria

A termogravimetria é uma técnica da análise térmica na qual a variação da massa da amostra é determinada em função da temperatura ou tempo. A curva da termogravimetria (TGA) deve ser analisada com auxílio da derivada da curva de TGA chamada de Derivada da Termogravimetria (DTG). Através da curva de DTG é possível identificar em quantas etapas ocorre a decomposição térmica ou a degradação termo-oxidativa da amostra analisada. As medidas de TGA foram realizadas nas amostras de KNN 50% na forma de pó. As medidas de TGA foram realizadas nos laboratórios da FACET-UFGD.

2.4. Elemento Espectral para Viga de Euler-Bernoulli

Para aplicar o KNN como sensor no experimento é necessário realizar a modelagem de elemento espectral para a

viga, método necessário para definir os parâmetros naturais do sistema.

As forças e deslocamentos para um elemento de viga são mostradas na Figura 6, onde os subíndices 1 e 2 indicam o início e o fim do elemento, respectivamente.. Com isto, a força cortante Q e a rotação θ são obtidas pela derivação espacial do momento fletor M e do deslocamento w , respectivamente.

$$Q = -\frac{\partial M}{\partial x} \quad (2)$$

$$\theta = \frac{\partial w}{\partial x} \quad (3)$$

Assim, a equação de movimento para uma viga de Euler-Bernoulli é [5]

$$EI * \left(\frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} \right) = -\rho A * \left(\frac{\partial^2 \theta(x, t)}{\partial t^2} \right) + f(x, t) \quad (4)$$

Sendo ω é a variável frequencial, E o módulo de elasticidade do material, I momento de inércia, ρ a densidade do material e A a área da seção transversal.

A equação para o movimento livre é representada por

$$EI * \left(\frac{\partial^4 w(x, t)}{\partial x^4} \right) = -\omega^2 \rho A W(x, \omega) = 0 \quad (5)$$

A relação de dispersão é dada por

$$k^4 - k_F^4 = 0 \quad (6)$$

sendo k_F o número de onda definido por

$$k_F = \sqrt{\omega} * \left(\frac{\rho A}{EI} \right)^{1/4} \quad (7)$$

As quatro raízes obtidas através da equação (6) são

$$k_1 = -k_2 = k_F \quad k_3 = -k_4 = ik_F \quad (8)$$

Para uma viga finita de comprimento L , o deslocamento transversal em frequência (W) é dada pela seguinte expressão

$$W(x, \omega) = e(x, \omega) \mathbf{a} \quad (9)$$

com

$$e(x, \omega) = [\exp^{-ik_F x} \exp^{-k_F x} \exp^{ik_F x} \exp^{k_F x}] \quad (10)$$

$$\mathbf{a} = \{a_1 a_2 a_3 a_4\}^T. \quad (11)$$

sendo a_1, a_2, a_3 e a_4 a constante que melhor satisfaz as condições de contorno associadas a situação em estudo.

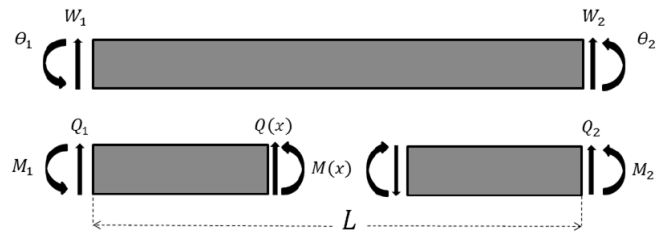
Os deslocamentos nodais espectrais e as rotações nodais espectrais de uma viga de Euler-Bernoulli de comprimento L podem ser alocados em um vetor de deslocamento \mathbf{d} mostrado na equação (12). As forças e deslocamentos neste elemento são mostradas na Figura 6, onde os subíndices 1 e 2 indicam o início e o fim do elemento, respectivamente.

$$\mathbf{d} = \begin{bmatrix} e(0, \omega) \\ e'(0, \omega) \\ e(L, \omega) \\ e'(L, \omega) \end{bmatrix} \quad \mathbf{a} = \mathbf{H}_{EB}(\omega) \mathbf{a} \quad (12)$$

Sendo \mathbf{H}_{EB} a matriz de deslocamentos espectrais para uma viga de Euler-Bernoulli.

$$\mathbf{H}_{EB}(\omega) = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ -ik_F & ik_F & ik_F & k_F \\ \exp^{-ik_F L} & \exp^{-k_F L} & \exp^{ik_F L} & \exp^{ik_F L} \\ -ik_F \exp^{-ik_F L} & -k_F \exp^{-k_F L} & ik_F \exp^{ik_F L} & k_F \exp^{k_F L} \end{bmatrix} \quad (13)$$

Figura 6 – Forças e deslocamentos em um elemento de viga de Euler-Bernoulli.



Fonte: Adaptado, LEE, 2009.

Através da equação (12) o vetor constante \mathbf{a} pode ser eliminado da equação (9) e a solução geral pode ser expressa como

$$W(x) = \mathbf{N}_B(x, \omega) \mathbf{d} \quad (14)$$

Sendo possível definir da seguinte maneira as funções de forma para uma viga $\mathbf{N}_B(x, \omega)$

$$\mathbf{N}_B(x, \omega) = \mathbf{e}(x, \omega) \mathbf{H}_{EB}^{-1}(\omega) \quad (15)$$

A força cortante e o momento fletor definidas para uma viga de Euler-Bernoulli, podem ser relacionadas com as forças e momentos correspondentes definidas por

$$\mathbf{f}_c(\omega) = \begin{Bmatrix} Q1 \\ M1 \\ Q2 \\ M2 \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} -Q(0) \\ -M(0) \\ Q(L) \\ M(L) \end{Bmatrix} \quad (16)$$

A relação da equação da matriz do elemento espectral com o vetor deslocamento é definida por

$$\mathbf{S}_{EB}(\omega)\mathbf{d}(\omega) = \mathbf{f}(\omega) \quad (17)$$

A matriz de elemento espectral para uma viga de Euler-Bernoulli \mathbf{S}_{EB} é dada por

$$\mathbf{S}_{EB}(\omega) = \mathbf{F}_{EB}(\omega)\mathbf{H}_{EB}^{-1}(\omega) \quad (18)$$

sendo

$$\mathbf{f}_c = \mathbf{F}_{EB}(\omega)\mathbf{a} \quad (19)$$

Com a matriz de forças espectrais para uma viga de Euler-Bernoulli \mathbf{F}_{EB} definida por

$$(20)$$

$$\mathbf{F}_{EB}(\omega) = -EI \begin{bmatrix} -ik_1^3 & -ik_2^3 & -ik_3^3 & -ik_4^3 \\ -ik_1^2 & -k_2^2 & -k_3^2 & -k_4^2 \\ -ik_1^3 \exp^{-ik_1 L} & ik_2^3 \exp^{-ik_2 L} & ik_3^3 \exp^{-ik_3 L} & -ik_4^3 \exp^{-ik_4 L} \\ k_1^2 \exp^{-ik_1 L} & k_2^2 \exp^{-ik_2 L} & k_3^2 \exp^{-ik_3 L} & k_4^2 \exp^{-ik_4 L} \end{bmatrix}$$

com k_j , $j = 1,2,3,4$ definidos na equação (8).

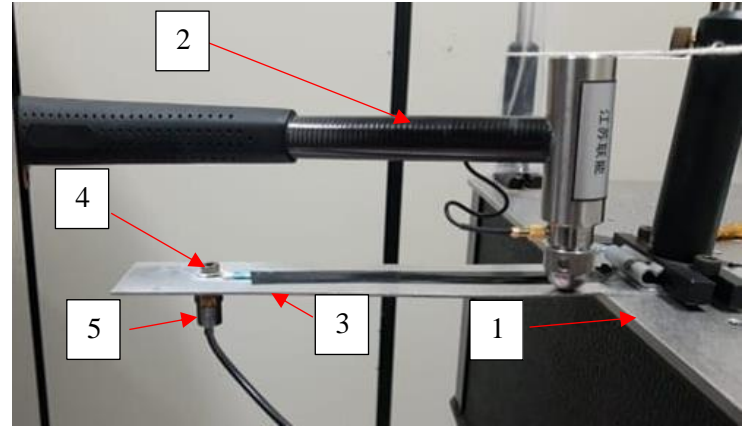
Com o estudo da função de resposta em frequência (FRF) é possível identificar falhas ou trincas na estrutura da viga. Com a modelagem numérica desenvolvida foi obtida as frequências naturais da viga, sendo possível compara-las com as frequências naturais captadas pelo KNN. A FRF nada mais que a aplicação da transformada de Fourier na função de resposta ao impulso (IRF) (em função do tempo) no domínio contínuo ou da aplicação da transformada discreta de Fourier na IRF discreta. Onde pode ser definida através da inversa da Equação 18 ($FRF = inversa(S_{EB}(\omega))$).

2.5. Montagem experimental

A Figura 7 mostra a montagem experimental utilizada para os ensaios vibratório em uma viga, sendo utilizados os seguintes materiais:

- ✚ Mesa pneumática - 1;
- ✚ Martelo de impacto - 2;
- ✚ Viga de alumínio - 3;
- ✚ Pastilha Piezo (KNN) - 4;
- ✚ Acelerômetro Axial Miniatura IEPE/ICP - 5; e
- ✚ Sistema de aquisição (*SINOCERA*, *Dynamic Measuring*) - 6.

Figura 7 – Ilustração da montagem experimental.



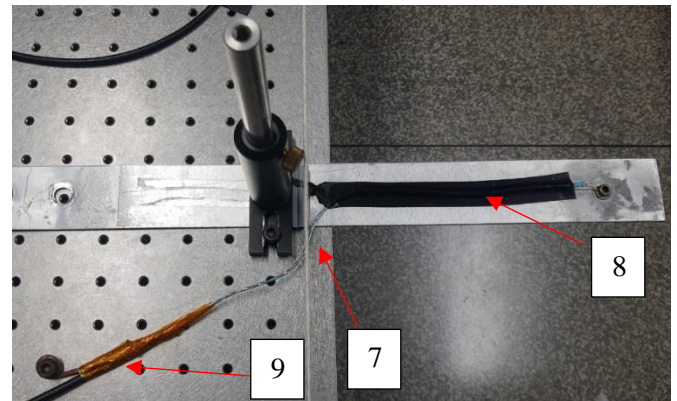
Fonte: O Autor.

A fixação da viga na mesa foi realizada por meio de um sistema de prensa, Figura 8 (item 7), onde foi utilizado um suporte com pedestal e parafusos.

Para se obter melhor dados de aquisição, foi realizado o isolamento com fita isolante, Figura 8 (item 8), do fio responsável por conectar o KNN com o sistema de aquisição.

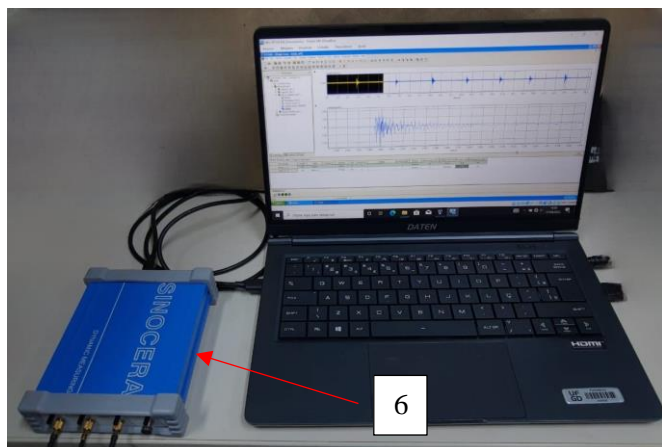
Com o mesmo intuito, foi feito o aterramento, Figura 8 (item 9), da viga na mesa pneumática. O aterramento foi realizado na mesa, pois, a massa da mesma comparada com a massa da viga é extremamente maior, fazendo com que toda interferência elétrica e eletromagnética na viga fosse absorvida pela mesa. Obtendo então, resultados numéricos mais “limpos” e sem ruídos.

Figura 8 – Detalhes da montagem da viga na mesa pneumática.



Fonte: O Autor.

Figura 9 – Sistema de aquisição *SINOCERA, Dynamic Measuring*.



Fonte: O Autor.

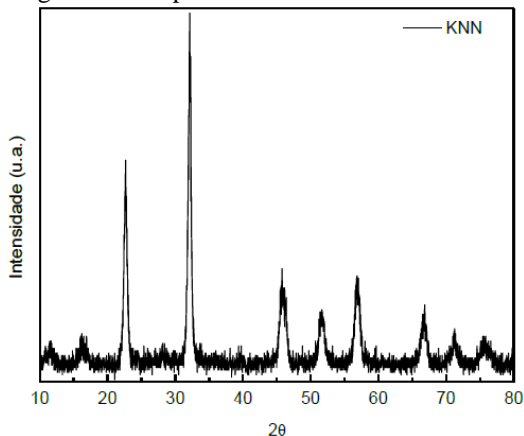
Desta forma, ao conhecer o sinal de entrada (excitação gerada pelo materlo de impacto) no domínio do tempo $F(t)$ e levando em consideração o mapeamento da função de transferência $H(s)$ em $s=j\omega$, onde ω é a frequência que varia em um intervalo de análise, obtém-se a função de resposta em frequência (FRF).

3. Resultados e Discussão

3.1. Resultados das caracterizações do KNN

Na Figura 10 é mostrado o espectro de difração de raios-X para a amostra de KNN. Como pode ser observado, os picos de Raio-X confirmaram a formação de uma única fase perovskita em todo do CFM, sem traços de fases secundárias. Além disso, os picos estreitos e distintos do CFM das cerâmicas indicam boa homogeneidade e cristalinidade das cerâmicas estudadas [13].

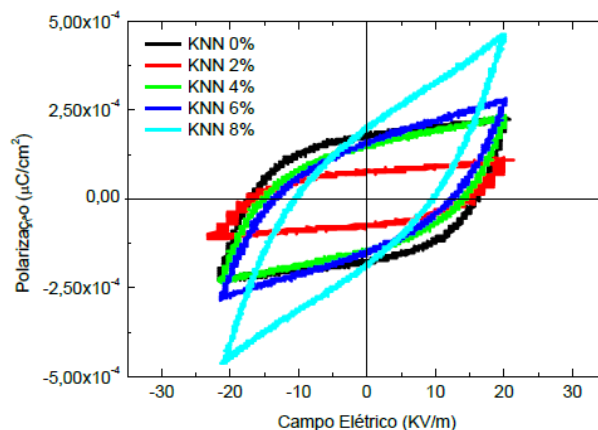
Figura 10 – Espectro X-RD da cerâmica KNN.



Fonte: O Autor.

Na Figura 11 podem ser observados os resultados da curva de histerese para as amostras de KNN como uma função da concentração. Embora, aparentemente não se tenha atingido a polarização de saturação para esse material, não foi possível aplicar campos elétricos mais intensos devido ao rompimento da constante dielétrica dos compósitos por causa da percolação do KNN. Como pode ser observado, os resultados obtidos das curvas de histerese mostram uma diminuição na polarização remanescente e polarização de saturação para a amostra com 2% de KNN em relação KNN 0%. Tal comportamento pode estar relacionado a um possível efeito de ancoramento dos dipolos ferroelétricos, causado pelas partículas de nióbio. O efeito de ancoramento dos dipolos dificulta alinhamento dos mesmos na direção do campo elétrico externo aplicado, provocando assim a diminuição na polarização do material. Para concentrações de KNN maiores que 2% ocorre um aumento na polarização remanescente e polarização de saturação e uma diminuição no valor do campo coercitivo com o aumento da adição de nióbio. Assim, levando isso em consideração, o efeito de ancoramento dos dipolos, e comparando com as medidas da Figura 11, era de se esperar que altas concentrações de niobio causassem uma diminuição nos valores da polarização, porém isso não acontece. Portanto, os resultados das medidas de histerese indicam que o comportamento observado para as concentrações acima de 4% é devido ao aumento de niobio na estrutura do material piezoeletrico.

Figura 11 – Curvas de histerese das pastilhas de KNN.

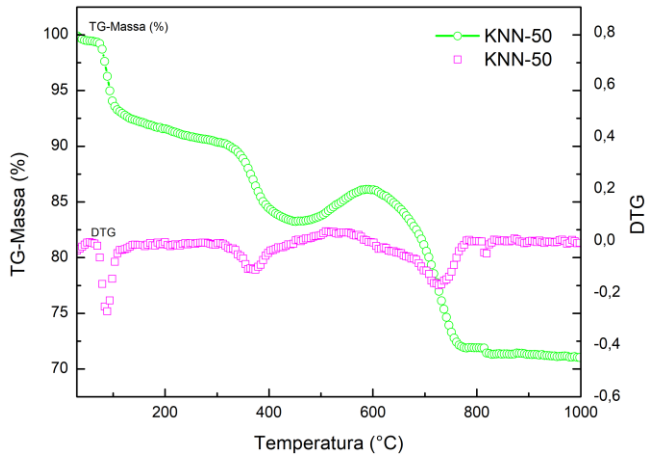


Fonte: O Autor.

A temperatura utilizada no tratamento térmico da cerâmica de KNN 50%, foi obtida da literatura e coincide com a temperatura indicada pela análise termogravimétrica, como mostra o gráfico da Figura 12. A análise de TG-Massa indica uma perda de aproximadamente 7.5% do material submetido ao tratamento térmico, onde se trata da remoção da água. A perda considerável de 7% demonstrado na Figura 12, próximo a temperatura de 400°C é referente a degradação do nitrato de sódio, que compõe a cerâmica. A DTG deixa explícito três

pontos de inflexão na curva, ou seja, três perdas significativas de massa nos pontos próximos de 100, 400 e 750°C.

Figura 12 – Medidas de Termogravimetria e Derivada da Termogravimetria do KNN.

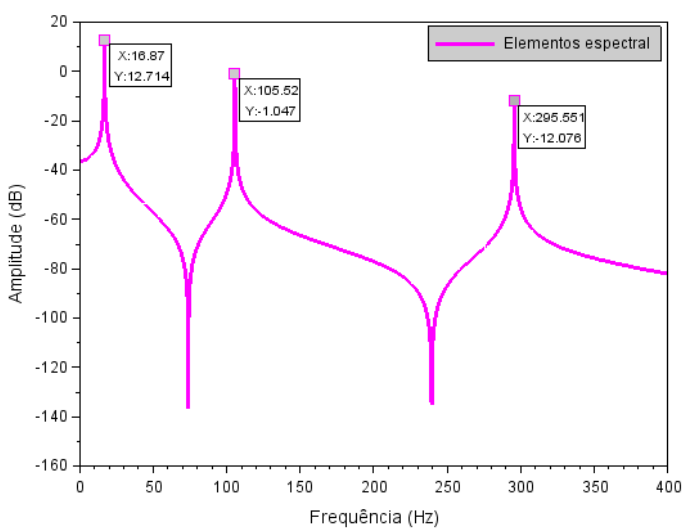


Fonte: O Autor.

3.2. Resultados numéricos para análise vibratória

Os resultados da análise dinâmica são apresentados por meio da FRF da Figura 13, onde são apresentadas as frequências naturais f_1 , f_2 e f_3 , obtidas via programação em *software Scilab*, levando em consideração os dados da Tabela 1. Para que seja possível uma comparação entre as análises numéricas em elementos espectrais e a análise experimental obtida através do martelo de impacto, é verificado a Figura 13 com análise comparativa nos gráficos das Figuras 17 e 18.

Figura 13 – Resposta em Função da Frequência (FRF) da viga engastada-livre.



Fonte: O Autor.

Na Tabela 1 é representada as propriedades da viga de alumínio 6063 T5 [14], os parâmetros físicos e geométricos do sensor piezoelétrico (KNN) e do acelerômetro.

Tabela 1 – Propriedades físicas e geométricas da viga de alumínio 6063 T5, KNN e acelerômetro.

Propriedades	Viga	KNN	Acelero.
Modelo	6063 T5	50Pc	CA-YD-181
Sensibilidade ($mV/m \cdot s^{-2}$)	-	0.316	1.004
Frequência de alcance (Hz)	-	-	1-10000
Módulo de Young (N/m^2)	69×10^9	-	-
Densidade (kg/m^3)	2710	-	-
Diâmetro (m)	-	0.01	-
Comprimento (m)	0.220	-	-
Largura (m)	0.040	-	-
Espessura (m)	0.001	0.001	-

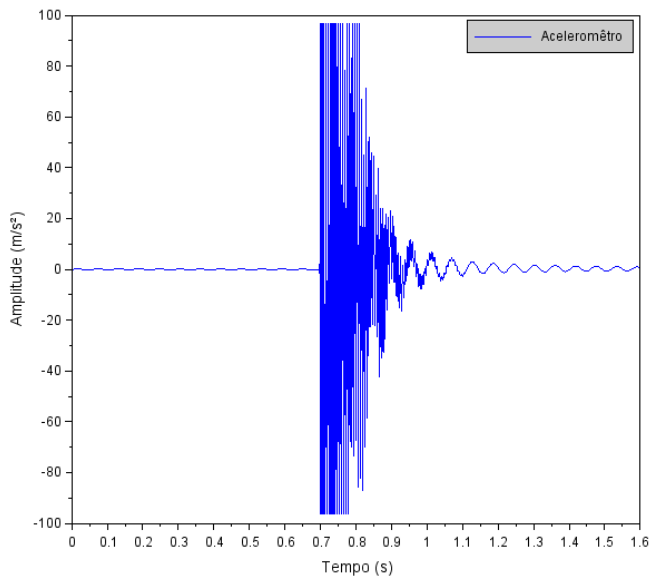
Fonte: O Autor.

3.3. Resultados experimentais para análise vibratória

Os dados experimentais foram obtidos utilizando o sistema de aquisição mostrado na Figura 9 com quatro canais de entrada, sendo usado três delas: acelerômetro, martelo de impacto e sensor KNN. A taxa de amostragem (Fs) foi escolhida para ser igual à 6000 Hz e, assim, o incremento de tempo (dt) pode ser obtido por $dt=1/Fs$.

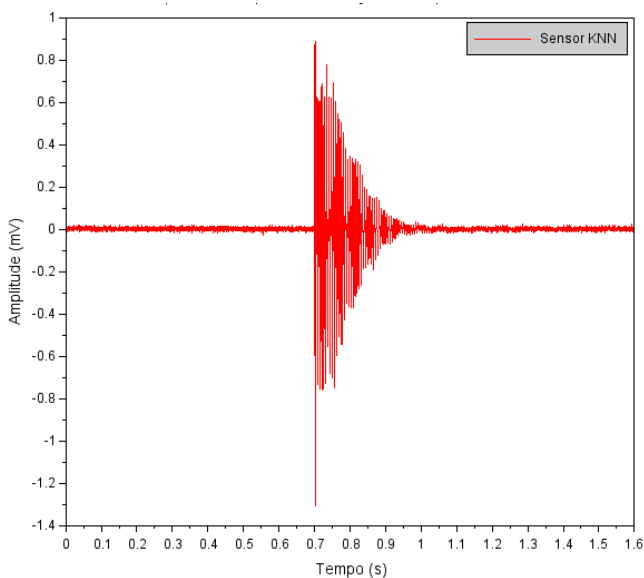
O acelerômetro e o KNN foram posicionados na mesma distância, porém em lados opostos na viga, conforme mostra a Figura 7. O impacto gerado pelo martelo foi "dado" ao lado oposto do acelerômetro e do KNN. Pode-se verificar na Figura 14 a resposta temporal obtida pelo acelerômetro quando a viga é submetida por uma força de impacto, medida em (m/s^2). Já na Figura 15, mostra a resposta obtida pelo sensor piezoelétrico KNN com amplitude medida em milivolts (mV). Note que os sinais possuem característica de resposta amortecida.

Figura 14 – Resposta do acelerômetro.



Fonte: O Autor.

Figura 15 – Resposta do sensor piezoelétrico KNN.



Fonte: O Autor

Com os valores da amplitude do acelerômetro e com os valores de saída do sensor piezo KNN, é possível se determinar o fator de conversão (sensibilidade em mV/ms²) para determinar a resposta do sensor KNN em unidades de aceleração (m/s²). Para isso, são calculados os valores RMS (*Root Mean Square*) dos sinais de aceleração obtido pelo acelerômetro (m/s²) e do sinal obtido pelo sensor KNN (mV). Então, o valor da sensibilidade (em mV/ms²) estimada para o sensor KNN é dada pela razão entre o valor RMS (sinal KNN)

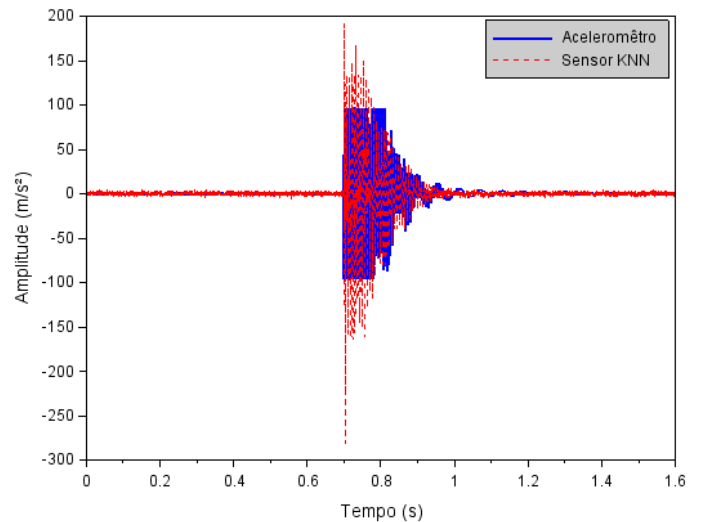
e do RMS (sinal acelerômetro). O valor RMS dos sinais pode ser calculado pela seguinte equação.

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \tag{21}$$

sendo N a quantidade de pontos do sinal x os valores destes pontos.

Calculando os valores RMS dos sinais, obtêm-se o valor de 16.171 m/s² para o sinal do acelerômetro e 0.0752 mV para o sinal do sensor KNN. Portanto é estimado para o sensor KNN uma sensibilidade de 214.905 ms⁻²/mV. A Figura 16 mostra o sinal do sensor KNN em m/s² utilizando a sensibilidade estimada.

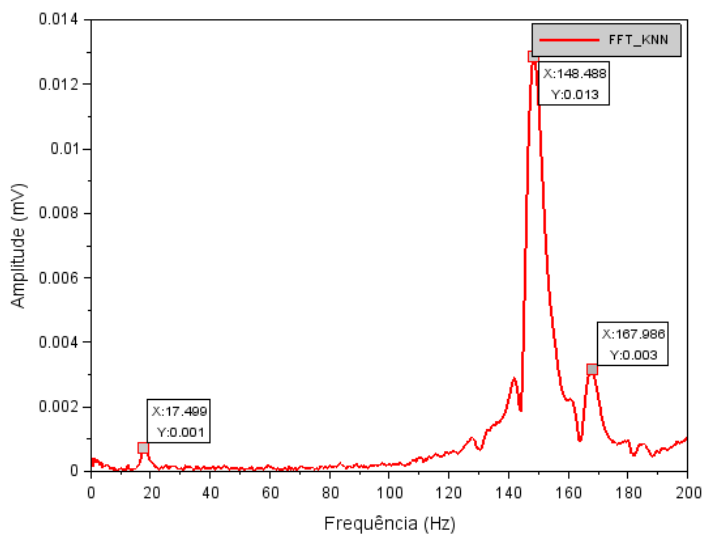
Figura 16 – Sensibilidade do KNN em comparação com a do acelerômetro após aplicação do RMS.



Fonte: O Autor.

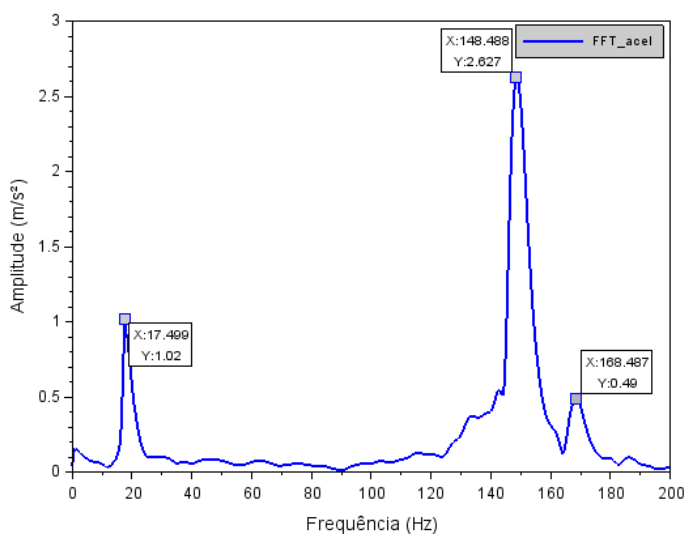
As Figuras 17 e 18 mostram o espectro em frequências para as respostas obtidas via sensor KNN e acelerômetro, respectivamente. Pode-se observar que em ambos os espectros, os picos das respostas estão nas mesmas frequências, e esses picos representam algumas das frequências naturais da estrutura.

Figura 17 – Espectro em frequência para a resposta do sensor piezoelétrico (KNN).



Fonte: O Autor.

Figura 18 – Espectro em frequência para a resposta da viga captada pelo acelerômetro.



Fonte: O Autor.

Pode-se observar que em ambas as figuras, 17 e 18, são mostrados picos nas frequências $f_1 = 17.499$ Hz, $f_2 = 148.488$ Hz e $f_3 = 167.986$ Hz. E isso mostra que o sensor KNN desenvolvido foi capaz de identificar características da resposta vibratória da estrutura. A frequência f_1 é identificada como sendo a primeira frequência natural da viga, com um desvio de 3,59 % em relação a frequência de 16,87 Hz obtida numericamente. Após realizado testes experimentais e já concluído o processamento de sinais, foi observado que na montagem experimental a viga foi fixada por meio de um suporte com pedestal (haste vertical, ver Figura 08) e,

portanto, as frequências f_2 e f_3 podem ser frequências naturais do pedestal e não da viga. Para confirmação dessa hipótese, é necessário realizar novos testes experimentais (sem pedestal) e, isso, ficará como sugestão para trabalho futuro. E, ainda, a não identificação de outras frequências naturais da viga (como a segunda e a terceira) pode ser explicada pelo mau posicionamento dos sensores, que foram colocados equivocadamente em locais próximos aos nós dos modos de vibrar, como pode ser visto na Figura 7.

4. Conclusões

A sintetização por rota mecânica para a obtenção da cerâmica de Niobato de Potássio e Sódio (KNN) tem seu custo de processo reduzido e altamente eficiente. A partir das medidas de DR-X foi possível observar a formação das fases na região de fase morfotrópico do KNN. Conforme pode ser analisado na Figura 10, o material final KNN 50% obteve ferroeletricidade após a sua polarização intensa de 10kV. Os resultados das medidas de histerese ferroelétrica mostram que, para concentrações acima de 4% de nióbio, as mudanças observadas no achatamento das curvas se dá ao efeito relacionado a energia livre de Gibbs do sistema para cada valor de campo magnético externo. Com a caracterização da Termogravimetria, conforme a Figura 12, a cerâmica de KNN pode ser exposta à aplicações de sistemas com temperaturas elevadas, já que sua degradação estrutural inicial se dá por volta dos 400°C. A Resposta em Função da Frequência (FRF) presente para a viga de alumínio 6063 T5, apresenta os três (03) picos de frequências naturais para o sistema com condições de contorno engastada-livre, porém, o resultado numérico não leva em consideração as interferências geradas durante o experimento. Todavia, no sistema experimental a viga foi engastada e aterrada para minimizar ao máximo os efeitos externos. Conforme a Figura 15, ao aplicar o RMS foi possível obter a sensibilidade da cerâmica piezoelétrica e analisar de forma comparativa com o acelerômetro. Os resultados experimentais em comparado com os dados obtidos analiticamente, afirma que, a cerâmica de KNN pode ser aplicada como sensor piezoelétrica para análise e detecção de vibrações.

5. Referências

- [1] BALACHANDRAN, BALAKUMAR; Vibrações Mecânicas / Balakumar Balachandran, Edward B. Magrab; [Tradução All Tasks]. [Revisão técnica Mario F. Mucheroni] -- São Paulo : Cengage Learning, 2016.
- [2] LEE, U. Spectral Element Method in Structural Dynamics. 1. ed. Singapore: Wiley, 2009.
- [3] DOYLE, J. F. Wave Propagation in Structures: a spectral analysis approach. 2. ed. New York: Springer-Verlag, 1997.
- [4] LEO, D. J. Engineering Analysis of Smart Material Systems. 1. ed. New York: John Wiley and Sons, 2007.

- [5] CONCEIÇÃO, Sanderson da. Estudo de modelos espectrais de vigas para controle ativo de vibrações e monitoramento da integridade estrutural. 2016. 132f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira – UNESP, 2016, acessado em 22 de fevereiro de 2022.
- [6] DIRECTIVE 2002/96/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL of 27 January 2003 on waste electrical and electronic equipment (WEEE).
- [7] P. KUMAR, M. Pattanaik, Sonia; Synthesis and characterizations of KNN ferroelectric ceramics near 50/50 MPB, *Ceram. International* [39], 65-69 (2013).
- [8] THOMSON W. T.; DAHLEH, M. D. *Theory of Vibration with Applications*. 5. ed. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 1998.
- [9] LALANNE M. ; BERTHIER, P. . H. J. *Mechanical Vibrations for Engineers*. 1. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1983.
- [10] GREGÓRIO FILHO, R., Influência das condições de cristalização na morfologia de filmes de polifluoreto de vinilideno (PVDF). *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, v. 3, n. 2, p. 20-27, 2013.
- [11] PETROV, M. P.; BRYKSIN, V. V. Space-charge waves in sillenites: Rectification and second-harmonic generation. In: *Photorefractive materials and their applications 2*. Springer, New York, NY, 2007. p. 285-325.
- [12] D. U. FIGUEIREDO, Influência da matriz cerâmica nas propriedades de compósitos ferroelétricos à base de poli (fluoreto e vinilideno)/ Danilo Umbelino Figueiredo. Dissertação apresentada ao programa de Pós-Graduação em Química da FACET-UFMG para obtenção do título de mestre, Dourados, f. 80 (2016).
- [13] SALMI, A.; YOUSEFI, A.A. Analysis Method: FTIR studies of β -phase Crystal formation in stretched PVDF films. *Polymer Testing*, v.22, p. 699-704, 2003.
- [14] IMPÉRIO DOS METAIS (2022, JUN 06). Alumínio 6063 T5. Retrieved from https://www.imperiodosmetais.com.br/pdf/download_ficha_tecnica/aluminio/6063.pdf.
- [15] SALMAZZO, G. R.; Falcão, E. A; Caires, A. R. L.; Garcia, D.; Eiras, J.A.; Botero, E R.; Synthesis and structural characterization of composites based on poly(vinylidene fluoride)/(Pb_{0,91}La_{0,09})Zr_{0,65}Ti_{0,35})_{0,98}O₃. *Cerâmica* [60], 83-87 (2014)].
- [16] ZAPATA, Angélica Maria Mazuera. Processamento e propriedades do sistema ferroelétrico (Li,K,Na)(Nb,Ta)O₃ dopado com CuO. 2015. 75f. Dissertação (Pós-Graduação em Física da Universidade Federal de São Carlos). Faculdade de São Carlos, UFSCar, 2015, acessado em 22 de fevereiro de 2022.