

INVESTIGAÇÃO DE MATERIAIS PIEZOELÉTRICOS PARA USO SIMULTÂNEO EM CONTROLE DE *CHATTER* E *ENERGY HARVESTING* EM PROCESSOS DE TORNEAMENTO

João Pedro Adriano Barbosa Cunha, joapabc@estudante.ufscar.br

Adailton Gomes Pereira, adailton.goh@gmail.com

Sidney Bruce Shiki, bruce@ufscar.br

Luis Antonio Oliveira Araujo, luis.araujo@ufscar.br

Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís km 235 - SP-310 - São Carlos CEP 13565-905

Resumo. O objetivo desse trabalho é analisar o uso de materiais inteligentes com acoplamento eletromecânico, denominados piezoelétricos, para mitigação do *chatter* regenerativo, vibração auto excitada que ocorre durante os processos de torneamento e que prejudica o resultado. Além disso, também foi avaliada a viabilidade do uso desses materiais para a geração de energia elétrica utilizável em dispositivos de baixa potência (*energy harvesting*) de maneira simultânea com a absorção de movimentos vibratórios no torneamento. Dessa forma, foi modelado um circuito shunt resistivo aliado a uma cerâmica piezoelétrica, que são acoplados ao porta-ferramentas do torno, e foram realizadas simulações para compreender o deslocamento e a tensão elétrica gerados no processo. Concluiu-se que, com os parâmetros adequados, os materiais piezoelétricos podem ser uma alternativa viável para gerar estabilidade para o processo em simultâneo com a geração de energia elétrica aplicável.

Palavras chave: *Chatter*. Materiais piezoelétricos. *Energy Harvesting*.

Abstract. The purpose of this work is to analyze the use of smart materials with electromechanical coupling, denominated piezoelectric, to mitigate the regenerative chatter, a self-excited vibration that occurs during the turning processes and that impairs the result. In addition, the feasibility of using these materials to generate usable electrical energy in low-power devices (*energy harvesting*) simultaneously with the absorption of vibratory energy in turning was also evaluated. Thus, a resistive shunt circuit combined with a piezoelectric ceramic was modeled, that are coupled to the lathe tool holder, and simulations were performed to understand the displacement and electrical voltage generated in the process. It was concluded that, with the appropriate parameters, piezoelectric materials could be a viable alternative to provide stability for the process simultaneously with the generation of applicable electrical energy.

Keywords: *Chatter*. Piezoelectric materials. *Energy Harvesting*.

1. INTRODUÇÃO

O torneamento é um processo de usinagem utilizado para a fabricação de peças cilíndricas, no qual ocorre remoção de material através da combinação de dois movimentos: a rotação da peça e movimento de avanço da ferramenta (MACHADO et al., 2009). Esse procedimento é prejudicado por uma vibração auto-excitada conhecida como *chatter* regenerativo, que se caracteriza pela regeneração das ondulações na superfície (QUINTANA; CIURANA, 2011). Esse fenômeno gera diversos malefícios para a qualidade final das peças, como mal acabamento da superfície, além de causar dano a ferramenta de corte e a máquina e prejuízos financeiros.

De modo a mitigar esse efeito, a aplicação de materiais inteligentes, que são definidos como aqueles que convertem energia entre múltiplos domínios físicos (LEO, 2007), para redução das vibrações durante o processo vem sendo amplamente estudada. Um dos tipos de materiais inteligentes são os piezoelétricos, que possuem acoplamento eletromecânico, ou seja, possuem a capacidade de gerar cargas elétricas ao sofrer uma deformação mecânica (efeito direto), ou uma deformação mecânica ao serem submetidos à uma polarização elétrica (efeito inverso). O tipo de piezoelétrico mais utilizado é o titanato zirconato de chumbo (PZT) que, apesar de ser frágil e sensível, se mostra bem eficiente em termos de acoplamento eletromecânico,

Devido às propriedades inerentes desses materiais piezoelétricos, Wang e Inman (2012) propuseram a utilização da energia gerada pelo efeito direto para a alimentação de sensores e outros dispositivos de baixa potência. Esse processo é

conhecido por colheita de energia, em que transdutores são implementados para que a energia derivada de fontes externas seja capturada e armazenada em aparelhos pequenos, autônomos e sem fio.

Dessa forma, o objetivo do presente trabalho é utilizar os piezoelétricos para minimizar o efeito do *chatter* regenerativo durante o processo de torneamento e simultaneamente coletar energia para a utilização em dispositivos de baixa potência. Para isso, o modelo simplificado descrito por Hagood e Flotow (1991) será implementado, de modo que um circuito shunt resistivo e outro ressonante serão acoplados ao porta-ferramentas do modelo. Além disso, a viabilidade do aproveitamento da energia elétrica que seria simplesmente dissipada na forma de calor em simultâneo com a mitigação do *chatter* regenerativo será avaliada, por meio das condições de usinagem que favorecem a dinâmica do processo de corte e dos parâmetros que maximizam a colheita de energia elétrica no processo.

Os processos de remoção de metal podem experimentar três tipos de vibrações que surgem devido à falta de rigidez dinâmica de um ou mais elementos do sistema, composto pelo torno, porta-ferramenta, ferramenta de corte e peça de trabalho. Esses três tipos de vibrações são as vibrações livres, vibrações forçadas e vibrações auto-excitadas (ALTINTAS; WECK, 2004).

As vibrações livres ocorrem quando o sistema mecânico é deslocado de sua posição de equilíbrio e pode vibrar livremente. No caso do torneamento, esse tipo de vibração acontece, por exemplo, como um resultado de uma definição incorreta do caminho em que a ferramenta irá percorrer, o que gera uma colisão entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho. As vibrações forçadas aparecem como resultado de excitações externas, que podem ocorrer devido ao desbalanceamento de algum componente do sistema ou por outras máquinas presentes no ambiente de trabalho. Esses dois tipos de vibração podem ser evitados, mitigados ou eliminados se a causa da vibração for conhecida.

Por outro lado, as vibrações auto excitadas se originam e crescem como resultado da interação entre a ferramenta de corte e a peça de trabalho durante o processo de torneamento, e são as mais indesejadas e de difícil mitigação. O *chatter* regenerativo é uma vibração auto-excitada em que a ferramenta de corte deixa uma superfície ondulada e ataca essa na próxima revolução, gerando uma nova superfície ondulada (QUINTANA; CIURANA, 2011). A espessura do cavaco, e portanto, a força na ferramenta de corte variam devido a diferença de fase entre a superfície deixada pela revolução anterior e a deixada pela revolução atual. Esse fenômeno amplifica as vibrações e prejudica o resultado final do processo.

Uma das formas de analisar esse efeito é a partir do diagrama de lóbulos de estabilidade (DLE) (ALTINTAS, 2012), em que a fronteira entre um corte estável e um corte instável pode ser visualizada em termos da profundidade de corte em função da velocidade de giro durante o processo. Esses diagramas podem ser usados para achar uma combinação específica de parâmetros de corte que resultem na maior taxa de remoção de material com o mínimo de *chatter* regenerativo. Segundo Quintana e Ciurana (2011), à altas velocidades, o efeito estabilizador provocado pelo processo de amortecimento diminui e torna o processo mais favorável ao *chatter*, fazendo-se necessária a utilização dos DLEs. A construção desses diagramas requer informações prévias da função de resposta em frequência (FRF) dos diversos elementos do sistema, o que dificulta a modelagem do processo para identificar o DLE devido as estruturas com vários graus de liberdade, as forças de cortes variáveis, entre outros fatores.

De modo a mitigar esse efeito, a aplicação dos materiais piezoelétricos vem sendo bastante explorada na literatura, sendo abordadas duas abordagens de controle (GRIPP; RADE, 2018): as técnicas de controle passivo de vibrações e as técnicas ativas. As técnicas passivas consistem na aplicação dos transdutores piezoelétricos para a conversão da energia mecânica gerada pelas vibrações em energia elétrica (LEO, 2007). Já nas técnicas ativas, o piezoelétrico atua como um atuador eletromecânico, sendo necessário o envio de um sinal elétrico ao material piezoelétrico para que esse tenha deformação mecânica e busque anular os movimentos vibratórios (PU et al., 2019).

Nesse contexto, circuitos elétricos especializados na conversão de energia mecânica vibratória em energia elétrica compostos por um resistor e indutor (circuitos *shunt*), podem ser projetados e conectados à materiais piezoelétricos para aprimorar a dissipação da energia mecânica (YIGIT et al., 2017).

Além disso, o efeito direto dos piezoelétricos pode ser aproveitado geração de energia elétrica em baixa potência (KIM et al., 2011). Esse processo é conhecido como *energy harvesting*, e consiste em aproveitar de forma útil a energia elétrica gerada que seria dissipada em forma de calor em diversas áreas da tecnologia, como para carregar baterias, alimentar marca passos ou alimentar pequenos sistemas de aquisição de dados.

2. METODOLOGIA

2.1. Modelo Dinâmico do Sistema

Neste trabalho, será avaliada a possibilidade de se empregar materiais piezoelétricos aliados à circuitos *shunt* passivos para uso simultâneo em absorção das vibrações auto-excitadas e geração de energia elétrica. Para isso, será feito o uso do titanato zirconato de chumbo (PZT), cerâmica piezoelétrica comumente usada para trabalhos na área de controle de vibrações (GRIPP; RADE, 2018).

Nesse sentido, serão testados dois tipos de circuito *shunt*: resistivo (R) e resistivo-indutivo (RL) (VIANA; JR, 2006). Para o circuito resistivo, a equação do movimento, e equação de Kirchoff do circuito elétrico podem ser dadas por Leo (2007):

$$\begin{cases} m\ddot{y}(t) + c\dot{y}(t) + ky(t) + k_a y(t) - g_{33}q(t) = f_c(t) \\ R\dot{q}(t) + \frac{1}{C_p}q(t) - g_{33}y(t) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

Sendo k_a a rigidez adicional fornecida pelo PZT ao sistema, g_{33} é um coeficiente relacionado ao acoplamento eletromecânico fornecido pelo PZT na direção 33, C_p é a capacitância equivalente do PZT, e $q(t)$ é a carga elétrica gerada durante a deformação do piezoelétrico.

Por meio da transformada de Laplace da equação Eq. (1) foi possível obter a função de transferência (FT) relacionando o deslocamento do porta-ferramentas com a força de corte $\frac{Y}{F_c}(s)$:

$$\frac{Y}{F_c}(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + (k + k_a) - \frac{g_{33}^2}{Rs + 1/C_p}} \quad (2)$$

Assim como, foi possível obter a carga elétrica gerada no PZT com o deslocamento do porta-ferramentas $\frac{Q}{F_c}(s)$:

$$\frac{Q}{F_c}(s) = \frac{1}{\frac{Rs + \frac{1}{C_p}}{g_{33}} * (ms^2 + cs + (k + k_a)) - g_{33}} \quad (3)$$

Sendo $Y(s)$, $F_c(s)$ e $Q(s)$ o deslocamento, força de corte e carga elétrica gerada representados no domínio s . A Equação (2) pode ser utilizada para se calcular a FRF do porta-ferramentas para se calcular o DLE do processo de corte. Isso permitirá avaliar a estabilidade do processo sob diferentes condições de usinagem.

Além disso, a Equação (3) permite estimar a carga elétrica gerada pelo PZT, ou ainda é possível calcular a tensão elétrica $v(t)$ dissipada na resistência elétrica do circuito *shunt* resistivo e a corrente $i(t) = dq/dt$ gerada no processo, por meio lei de Ohm:

$$v(t) = R \frac{dq}{dt} \quad (4)$$

Dessa forma, foi possível obter a relação entre a tensão e a força de corte $\frac{V}{F_c}(s)$:

$$\frac{V}{F_c}(s) = \frac{Rs}{\frac{Rs + \frac{1}{C_p}}{g_{33}} * (ms^2 + cs + (k + k_a)) - g_{33}} \quad (5)$$

Isso permitirá avaliar a tensão elétrica gerada durante o processo para que seja possível verificar possíveis aplicações para a energia elétrica gerada durante o processo de usinagem pelo PZT.

Um resumo gráfico da metodologia deste projeto é mostrado na Figura 1.

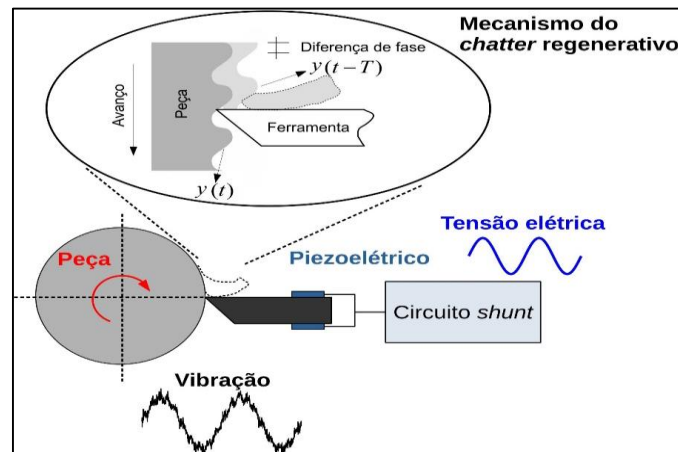


Figura 1. Ilustração esquemática do dispositivo proposto.

3. RESULTADOS

Nesse trabalho, foram realizadas simulações do circuito *shunt* resistivo (R) utilizando o software MATLAB, de modo a analisar as funções de transferência apresentadas nas Eq. (3) e Eq. (4). Foi calculada a função de resposta em frequência (FRF) do sistema em estudo para diferentes valores de resistência elétrica.

Os parâmetros do porta-ferramenta usados para simular as FTs foram a massa equivalente $m=10$ [kg], a razão de amortecimento $\zeta=0,002$, a rigidez equivalente $k=5,98.10^6$ [N/m], a frequência natural não-amortecida $\omega_n=937,51$ [Hz] e o coeficiente de amortecimento $c=4,06$ [N.s/m] (CHIARADIA, 2021).

Para simular o porta-ferramenta, foi utilizado um prisma quadrangular de comprimento $L=0,15$ [m], espessura $h=0,025$ [m], e largura $b=0,025$ [m], módulo de elasticidade $E=206,7.10^9$ [Pa] e densidade $\rho=7800$ [kg/m³].

Além disso, o material piezoelétrico utilizado possui rigidez $k_a=0,005$ [N/m], capacitância equivalente $C_p=10^{-7}$ [F] e o coeficiente relacionado ao acoplamento piezoelétrico $g_{33}=3,1*10^5$. Também foi aplicada a constante de corte relacionada ao processo de usinagem $K_f=10^9$ [N/m²].

As simulações foram realizadas utilizando um valor de resistência elétrica baixo $R_1=10^{-4}$ [Ω], que permite a passagem livre da corrente elétrica e simula a condição de curto-circuito, um valor próximo do valor “ótimo” $R_2=2000$ [Ω], que fornece a maior atenuação do pico de ressonância, e um valor bastante elevado $R_3=10^6$ [Ω], que simula a condição de circuito aberto.

Para a função de transferência descrita pela Eq. (2), que relaciona o deslocamento do porta ferramentas com a força de corte, foi obtida a FRF demonstrada na Fig. 2.

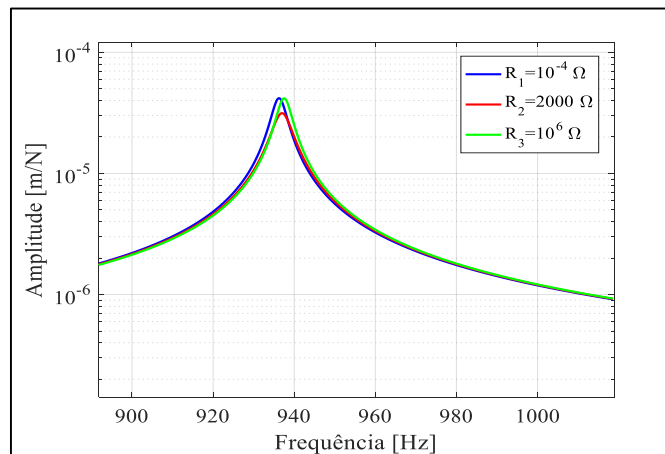


Figura 2. Razão de amplitudes da FRF do deslocamento do porta-ferramentas com a força de corte (autoria própria)

É possível observar que existe uma pequena variação do deslocamento conforme o valor da resistência varia. Também é notável que a função de resposta em frequência apresenta um pico localizado quando a frequência coincide com a frequência natural do sistema. A Figura 3 ilustra de forma ampliada a faixa de frequência próxima a ressonância do sistema.

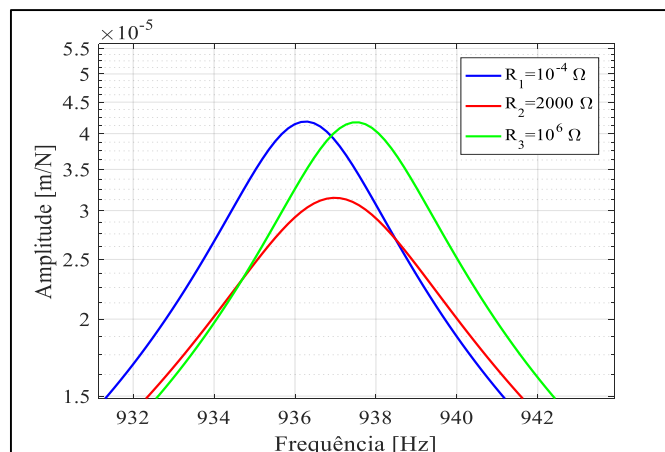


Figura 3. Visualização da ressonância da FRF do sistema

De modo análogo ao que foi feito anteriormente e utilizando-se dos mesmos parâmetros, a FRF da Eq. (5) também foi calculada e apresentada na Fig. 4.

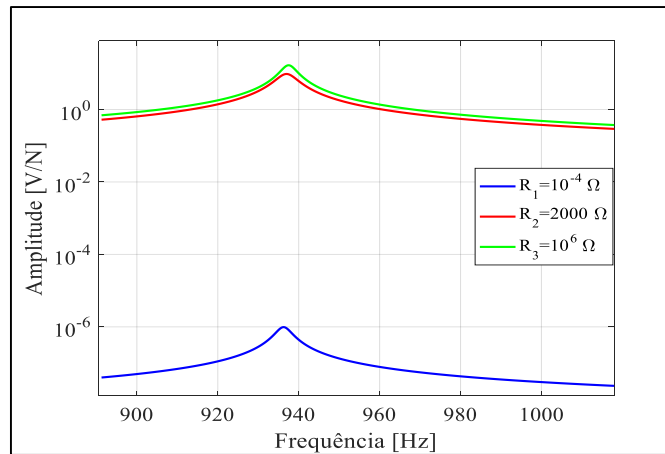


Figura 4. Razão de amplitudes da FRF da tensão gerada no processo com a força de corte (autoria própria)

É possível evidenciar que a tensão é diretamente proporcional a resistência, conforme previsto pela lei de Ohm. Desse modo, conforme a resistência elétrica aumenta, maior a tensão elétrica gerada em todas as frequências. Já na FRF da corrente elétrica relacionada a força de corte, apresentada na Fig. 4, é possível evidenciar que ocorre o inverso do que foi observado para tensão.

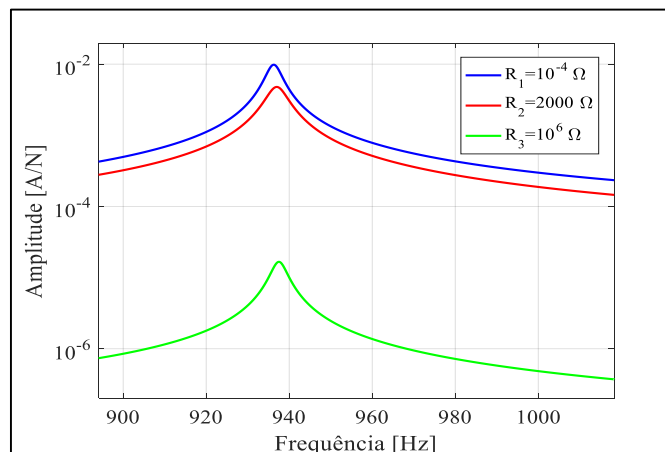


Figura 5. Razão de amplitudes da FRF da corrente gerada no processo com a força de corte (autoria própria)

Observa-se que a condição “ótima” de resistência elétrica é um equilíbrio entre tensão e corrente elétricas razoáveis, visto que, de modo a exemplificar, se a resistência elétrica for bastante alta, a tensão também será elevada porém a corrente não terá um valor significativo para fornecer energia aos dispositivos de baixa potência.

Além disso, esse valor de resistência “ótimo” também deve satisfazer a condição em que o deslocamento do porta-ferramenta não seja elevado, visto que isso significaria um baixo amortecimento do sistema e em consequência, uma grande quantidade de vibração. O valor que mais se aproxima da condição “ótima” de resistência, dentre os três valores utilizados nas simulações, é o R_2 . É possível constatar isso pois na Fig. 3, o menor pico ocorre quando se usa esse valor de resistência elétrica, além de que de acordo com as Fig. 4 e Fig. 5, a tensão e a corrente elétricas geradas possuem valores razoáveis.

4. CONCLUSÕES

O fenômeno do *chatter* regenerativo traz diversos malefícios para o resultado do processo de torneamento e traz prejuízos financeiros para as empresas que atuam nesse ramo, sendo crescente a quantidade de pesquisas relacionadas a esse tema.

Dessa forma, a utilização de materiais piezoelétricos se demonstra potencialmente uma alternativa viável para a redução desse efeito, devido às suas propriedades de conversão entre diferentes tipos de energia. Foi possível comprovar isso com base nos resultados apresentados, uma vez que de acordo com a Fig. 2, se o valor de resistência elétrica for

adequado, o porta-ferramenta apresenta uma baixa amplitude de vibração e conseqüentemente o sistema é mais amortecido.

Além disso, com o desenvolvimento das tecnologias de *energy harvesting*, esses materiais se apresentam como bons candidatos para a geração de energia elétrica durante o processo de torneamento, que pode ser usada para alimentação de sensores sem fio de baixa e outros dispositivos de baixa potência. Isso se deve ao fato de que esses materiais possuem a capacidade de gerar quantidades de corrente elétrica utilizáveis, como é visto na Fig. 5.

Portanto, a viabilidade da utilização dos piezoelétricos de maneira simultânea para amenizar os movimentos vibratórios e coletar energia elétrica utilizável apresentou ser bastante promissora nas simulações realizadas podendo trazer diversos benefícios para o desenvolvimento tecnológico dos processos de usinagem.

5. REFERÊNCIAS

- ALTINTAS, Y. Manufacturing Automation: Metal Cutting Mechanics, Machine Tool Vibrations, and CNC Design. [S.l.]: Cambridge University Press, 2012.
- ALTINTAS, Y.; WECK, M. Chatter stability of metal cutting and grinding. *CIRP annals*, Elsevier, v. 53, n. 2, p. 619--642, 2004.
- CHIARADIA, José Vitor Scanavini. Estudo numérico do controle passivo de vibrações em torneamento mecânico a partir de materiais piezoelétricos. Orientador: Prof. Dr. Sidney Bruce Shiki. 2021. 127. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.
- GRIPP, J.; RADE, D. Vibration and noise control using shunted piezoelectric transducers: A review. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 112, p. 359--383, 2018.
- HAGOOD, N. W.; FLOTOW, A. von. Damping of structural vibrations with piezoelectric materials and passive electrical networks. *Journal of sound and vibration*, Elsevier, v. 146, n. 2, p. 243--268, 1991.
- KIM, H. S.; KIM, J.-H.; KIM, J. A review of piezoelectric energy harvesting based on vibration. *International journal of precision engineering and manufacturing*, Springer, v. 12, n. 6, p. 1129--1141, 2011.
- LEO, D. J. Engineering analysis of smart material systems. [S.l.]: Wiley Online Library, 2007.
- MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; SILVA, M. B. Teoria da usinagem dos materiais. 2. ed. São Paulo: Ed. Blucher, 2011.
- PU, Y.; ZHOU, H.; MENG, Z. Multi-channel adaptive active vibration control of piezoelectric smart plate with online secondary path modelling using pzt patches. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 120, p. 166--179, 2019.
- QUINTANA, G.; CIURANA, J. Chatter in machining processes: A review. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 51, n. 5, p. 363--376, 2011.
- VIANA, F. A. C.; JR, V. S. Multimodal vibration damping through piezoelectric patches and optimal resonant shunt circuits. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, SciELO Brasil, v. 28, n. 3, p. 293-310, 2006.
- WANG, Y.; INMAN, D. J. A survey of control strategies for simultaneous vibration suppression and energy harvesting via piezoceramics. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, Sage Publications Sage UK: London, England.
- YIGIT, U.; CIGEROGLU, E.; BUDAK, E. Chatter reduction in boring process by using piezoelectric shunt damping with experimental verification. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 94, p. 312--321, 2017.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

Os autores são os únicos responsáveis pelas informações incluídas neste trabalho.