

AVALIAÇÃO DO USO DE SENSORES PZT PARA MONITORAMENTO DE DESGASTE DE FERRAMENTAS NO TORNEAMENTO

Reginaldo Gleyton Correia e Silva
Carlos Eiji Hirata Ventura

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de São Carlos, Rod. Washington Luís km 235, 13565-905 São Carlos/SP
ventura@ufscar.br
reginaldocorreia05@gmail.com

Resumo. O presente trabalho tem por objetivo validar o uso de pastilhas PZT como sensores montados diretamente no porta-ferramenta por meio da correlação de padrões nos sinais de vibração adquiridos com aspectos do mecanismo de desgaste da ferramenta. Para isso, foram usinadas amostras de aço inoxidável AISI 304 com parâmetros de corte constantes e, para cada passe, foi medido o desgaste de flanco associado. O sinal bruto de vibração medido em cada ensaio foi analisado no domínio do tempo e frequência. Os resultados apontaram que as pastilhas PZT se mostram promissoras para o monitoramento do desgaste durante o processo, sendo que diferenças no sinal com e sem corte foram observadas. O parâmetro RMS do sinal como um todo se mostrou pouco sensível, mas maior intensidade de sinal foi encontrada em frequências entre 400 Hz e 700 Hz. O comportamento da energia do sinal dentro desta faixa pode então ser correlacionado com os mecanismos de desgaste observados.

Palavras chave: Torneamento. Vibração. Transdutor piezoelétrico. Desgaste de flanco.

1. INTRODUÇÃO

A pesquisa sobre o monitoramento, de forma geral, é baseada na avaliação de métodos e técnicas de reconhecimento de padrões a fim de se identificar condições específicas de um processo. Em processos de usinagem, o monitoramento da ferramenta tem sido aplicado no acompanhamento do desgaste da ferramenta e de sua quebra (Milfelner et al., 2005). O monitoramento do desgaste da ferramenta pode prover informações que auxiliem nas decisões relativas aos valores dos parâmetros de corte considerados ótimos, baseados nos custos e taxa de produção. Desta forma, o acompanhamento em tempo real das condições da ferramenta de corte pode prevenir possíveis tempos de paradas, quebras e acabamento insatisfatório da peça usinada.

Para avaliação da estabilidade/vibração do processo, levando-se em conta a dinâmica da máquina e irregularidades da peça durante o corte, comumente são utilizados sinais de aceleração, que permitem uma análise do comportamento do processo no domínio do tempo e da frequência (Ventura, 2008). Em estudos realizados por Bhuiyan e Choudhury (2015), mostrou-se que o sinal de vibração no domínio do tempo é sensível à quebra da ferramenta. Com acelerômetros triaxiais montados no porta-ferramenta durante o torneamento do aço ASSAB-705, foram adquiridos sinais de vibração, nos quais foi possível distinguir um súbito aumento de intensidade do sinal seguido de uma queda brusca de amplitude quando a fratura da ferramenta foi notada. Alguns métodos de análise no domínio do tempo tornam-se vantajosos quando se pretende analisar o sinal do processo global. Entre eles, o mais conhecido corresponde ao cálculo do valor RMS (*root mean square*), o qual avalia a energia contida no sinal e pode ser calculado através da raiz da média quadrática da amplitude do sinal de vibração.

Rmili et al. (2014) realizaram um trabalho com o objetivo de desenvolver um método simples de detecção e monitoramento do desgaste da ferramenta por meio da análise da densidade espectral de potência média de sinais de vibração produzidos durante o processo de torneamento usando acelerômetros triaxiais. Foi mostrada a evolução da densidade média normalizada de acordo com o tempo de corte para três condições de usinagem. O resultado confirma que a análise de vibração por meio da avaliação da densidade média é um método efetivo de monitorar o estado da ferramenta durante o processo de torneamento, independentemente dos parâmetros utilizados.

A análise no domínio da frequência facilita a distinção de possíveis causas da vibração, entretanto, um dos desafios para pesquisadores que investigam o processo de deterioração de ferramentas por meio de sinais de vibração é identificar a faixa de frequência com maior intensidade, realmente sensível à variação dos parâmetros de corte e ao mecanismo de desgaste, pois vários são os fatores causadores de vibração e muitas vezes provenientes de fontes aleatórias, o que impossibilitaria a identificação de cada um deles no processo global de usinagem.

Segundo a análise de Józwik e Mika (2015), da distribuição de energia durante o torneamento do aço C45 e de um aço inoxidável, foram demonstrados picos característicos de frequência iguais a 3,7 kHz para o aço C45 e entre 10,6 e

10,7 kHz para o aço inoxidável, sendo em ambos os casos resultantes de vibrações auto-excitadas. Bonifácio (1992) conclui que a faixa de frequência para o estudo do monitoramento da vibração está entre 0 e 20 kHz, porém, a maioria dos pesquisadores limita essa faixa de interesse até no máximo 8 kHz.

Para aquisição dos sinais, é possível o uso de pastilhas piezoelétricas, as quais geram sinais elétricos a partir de deformações sofridas durante o processo. Em relação a acelerômetros convencionais, essas pastilhas possuem a vantagem de ter baixo custo e maior facilidade na montagem. Entretanto, devido ao seu não encapsulamento, não costumam ser utilizadas no monitoramento de processos de usinagem, já que ficam sujeitas ao impacto dos cavacos gerados durante o corte. Tendo em vista as vantagens dessas pastilhas e a ausência de estudos que validem sua utilização em operações de usinagem, o trabalho propõe analisar sinais adquiridos por pastilhas piezoelétricas montadas no porta-ferramenta, de maneira que parâmetros nos domínios do tempo e da frequência sejam extraídos do sinal e correlacionados à evolução do desgaste da ferramenta utilizada na usinagem de um aço inoxidável AISI 304.

2. METODOLOGIA

Corpos de prova do aço inoxidável AISI 304 foram torneados a seco em um torno CNC Nardini Fast Trace, com potência máxima de 12 kW e rotação máxima de 3.000 rpm. Para isso, foi utilizado um inserto de metal duro com geometria DNMG150408, classe ISO S20, montado em um porta-ferramenta PDJNR 2020K 15. Foram aplicados valores constantes de avanço $f = 0,2$ mm/volta, profundidade de usinagem $a_p = 1$ mm e velocidade de corte $v_c = 200$ m/min. A fim de se aumentar a confiabilidade dos resultados, foram realizados ensaio e réplica. O acompanhamento do desgaste da ferramenta foi feito com o auxílio de um microscópio com câmera digital DNT DigiMicro Profi (aumento máximo de 300x) ligado a um computador pessoal com software de tratamento de imagens da mesma empresa. A cada passe (torneamento de um comprimento da peça de 20 mm com aquisição do sinal de vibração), o processo era interrompido e a ferramenta analisada. Estabeleceu-se como critério de fim de vida um desgaste de flanco máximo de 0,2 mm ou quebra do inserto.

O sinal de vibração é proveniente do contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta, de modo que, quanto mais próximo estiver montado o sensor PZT da região de corte, mais sensível será o sinal captado. Desta forma, a pastilha PZT foi fixada em região próxima ao inserto, na superfície lateral do porta-ferramenta (Fig. 1).

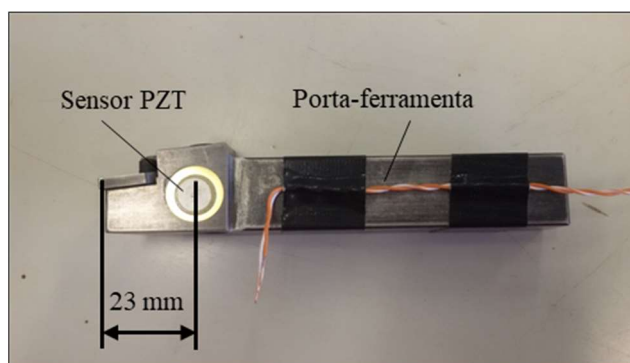


Figura 1. Montagem do sensor no porta-ferramenta

O sinal captado pela pastilha PZT (diâmetro = 15 mm) fixada no porta-ferramenta foi transmitido através de fios rígidos até uma placa de aquisição do tipo conversão A/D Módulo NI 9234 série C de taxa máxima de amostragem de 51,2 kHz/canal e entrada de ± 5 V. Limitando a faixa de interesse arbitrariamente entre 0 a 4 kHz, de acordo com o teorema de Nyquist, para se evitar efeito de *aliasing*, a taxa de aquisição utilizada foi de 9,2 kHz. O sinal convertido é conduzido via USB para um computador pessoal com o software de aquisição NI Labview 8.1 e processado por meio do software matemático Scilab 5.2.2. Para o tratamento do sinal no domínio da frequência, aplicou-se um filtro passa-alta com frequência de corte de 5 Hz para remoção de frequências muito baixas, não associadas ao processo de corte, e utilizou-se o método de Welch para cálculo da densidade espectral de potência.

3. RESULTADOS

Observa-se na Fig. 2 a evolução do desgaste da ferramenta com o tempo de corte nos dois testes realizados. Com o aumento do tempo de usinagem, há um crescimento no desgaste, que faz com que a temperatura da aresta cortante ultrapasse a temperatura na qual a ferramenta perde o fio de corte (a aresta de corte se decompõe) (Chavez, 2015). A energia (calor) que é imputada ao processo cresce sem um aumento da área da ferramenta que recebe este calor.

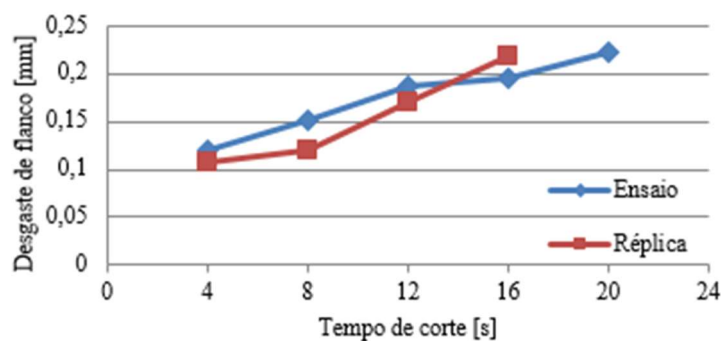


Figura 2. Evolução do desgaste de flanco com o tempo de usinagem

Para cada passe, foi obtido um respectivo sinal de vibração, mas sua análise direta no domínio do tempo não se mostrou promissora, devido à grande aleatoriedade do sinal e, possivelmente, à grande quantidade de fontes de vibração, que ocasionaram um sinal com muito ruído. Apesar das dificuldades, foi observada uma variação de amplitude (Fig. 3), mesmo que pequena, entre o sinal sem corte e o sinal com corte. Essa diferença de amplitude está relacionada à vibração do porta-ferramenta durante a usinagem, causada pelo contato ferramenta-peça.

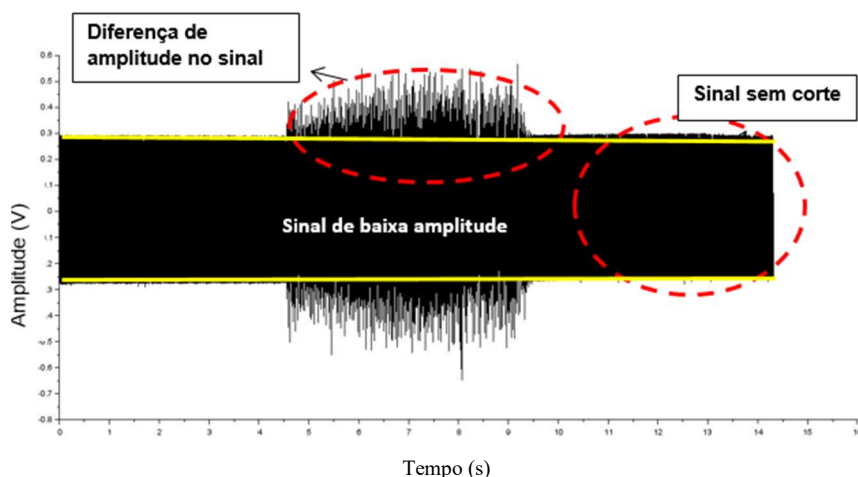


Figura 3. Sinais de vibração no domínio do tempo obtidos a partir dos experimentos realizados

O resultado obtido equivale ao encontrado no trabalho de Bhuiyan e Choudhury (2015), que mostra dois tipos de padrão: do tipo contínuo de baixa amplitude, comportamento presente durante todo o processo de corte; e do tipo transiente de alta amplitude. De acordo com os autores, as componentes do sinal transiente de alta amplitude são produzidas por diferentes fontes, enquanto as componentes de baixa amplitude estão associadas à vibração da máquina como um todo e, devido à ausência de corte, são provenientes da vibração de seus próprios componentes.

De outra forma, procurou-se correlacionar o valor RMS de cada passe com o desgaste de flanco medido. A Tab. 1 mostra os resultados para o ensaio principal e a réplica.

Tabela 1. Valores RMS e desgaste de flanco no ensaio principal e réplica

Passe	Ensaio Principal		Réplica	
	RMS [V]	V _{Bmax} [mm]	RMS [V]	V _{Bmax} [mm]
01	0,2004	0,121	0,1990	0,107
02	0,2025	0,152	0,2021	0,120
03	0,2005	0,186	0,2007	0,171
04	0,1948	0,196	0,1948	0,219
05	0,2038	0,222	0,2029	QUEBRA

Nos passes iniciais, os valores RMS se mostraram sensíveis ao crescimento do desgaste de flanco. Segundo Bonifácio (1992), uma ferramenta com maior área de contato com a peça tende a apresentar valores RMS maiores. Logo, esse parâmetro se mostrou promissor para o monitoramento de ferramentas com desgastes comportados. Entretanto, foi observado que o valor RMS sofreu uma queda nos passes intermediários, podendo esse comportamento ser justificado com base no mecanismo de desgaste da ferramenta e formação de aresta postiça, conforme mostrado na Fig. 4a.



Figura 4. (a) Desgaste de flanco e adesão de material na aresta, observado no 3º passe do ensaio principal (12 s); (b) fratura na aresta, observada no 4º passe da réplica (16 s)

De acordo com Diniz et al. (2008), quando a velocidade de corte trabalha na faixa de formação de aresta postiça de corte, a vibração tende a diminuir. Portanto, a queda do valor RMS pode ser embasada por esse mecanismo. Por último, nota-se que o RMS volta a crescer no torneamento com a ferramenta já bastante deteriorada. Uma suposição levantada se baseia no fato de que a vibração da ferramenta aumenta devido à irregularidade da área de contato entre ferramenta e peça, gerando um incremento na intensidade do sinal.

Com o objetivo de se analisar o comportamento do processo no domínio da frequência, aplicou-se ao sinal de vibração a transformada rápida de Fourier, representada na Fig. 5 para o 5º passe.

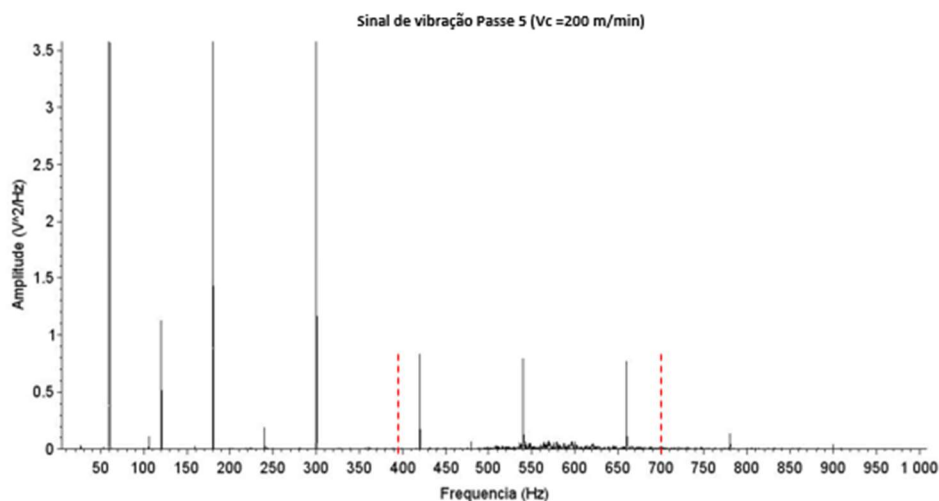


Figura 5. Sinal de vibração no domínio da frequência obtido durante o torneamento

Devido à ausência do uso de amplificadores, o sinal no domínio da frequência apresenta baixa amplitude e os picos observados podem estar associados à frequência da rede elétrica, de 60 Hz. Isso porque a frequência principal do sinal, relacionada à rotação da peça (para $v_c = 200$ m/min, rotação $\cong 22$ Hz), ou seus múltiplos, possuem valor próximo a esse. Não foram verificados padrões em baixas frequências, mas foram observadas variações de energia do sinal com o aumento do desgaste entre 400 Hz e 700 Hz. Devido à quantidade de fatores que induzem vibrações durante o processo de usinagem, não foi possível determinar com precisão o fenômeno associado a essa faixa de frequência, tendo sido notada apenas uma variação da energia com o aumento do tempo de corte e, conseqüentemente, da evolução do desgaste da ferramenta. Deste modo, foi realizada uma integração numérica nessa área do gráfico, de maneira a correlacionar esse aumento de intensidade com o aumento do desgaste de flanco. Os resultados são ilustrados na Fig. 6, onde se nota que os valores da integral, de modo geral, aumentam com o desgaste.

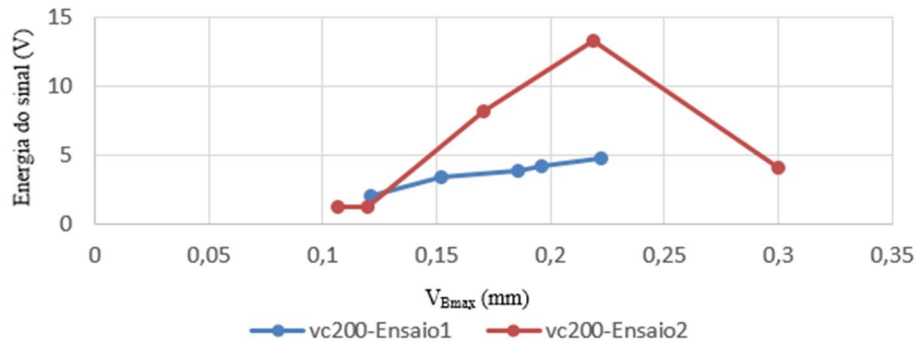


Figura 6. Energia do sinal entre 400 Hz e 700 Hz com a evolução do desgaste de flanco

A queda no valor da integral no último passe da réplica pode estar associada à quebra da ferramenta (Fig. 4b), que causa diminuição do contato entre ferramenta e peça. O fato do contato da ferramenta com a peça não ser constante, seja pela formação de aresta postiça, seja pela sua ruptura, ocasiona intermitência no sinal, o que justifica um padrão irregular quando os gráficos no domínio da frequência em diferentes tempos de corte são comparados. Isso impossibilita uma correlação precisa entre valores característicos do espectro de frequência e o desgaste.

4. CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo avaliar a aplicação de um sistema de monitoramento de baixo custo com o uso de um sensor PZT. Sua aplicação foi avaliada no torneamento do aço inoxidável austenítico AISI 304 e teve como foco adquirir os sinais de vibração durante o corte e prover padrões que pudessem ser correlacionados ao desgaste. A partir dos resultados obtidos, pôde-se concluir que:

- devido à instabilidade da aresta postiça de corte, o valor RMS oscilou com o tempo de usinagem e não foi possível se obter uma correlação direta entre esse valor e o desgaste de flanco;
- em frequências entre 400 Hz e 700 Hz o sinal capturado foi influenciado pelo aumento do desgaste e pôde ser correlacionado a ele.

Por fim, comprovou-se que o sensor PZT pode ser usado em sistemas de monitoramento da ferramenta no processo de torneamento, mas, para que os resultados sejam corretamente analisados e as fontes de vibração compreendidas, é importante que os mecanismos de desgaste sejam identificados.

5. REFERÊNCIAS

- Bhuiyan, M.S.H. e Choudhury, I.A., 2015. "Investigation of tool wear and surface finish by analyzing vibration signals in turning ASSAB-705 steel". *Machining Science and Technology*, Vol. 19, p. 236–261.
- Bonifácio, R., 1992. *Monitoramento do processo de torneamento de acabamento via sinais de vibração*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- Chaves, B.T., 2015. "Sistema de monitoramento do desgaste de ferramentas de corte em operações de usinagem". In: *Anais do Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais*. Cuiabá, Brasil.
- Diniz, A.E.; Marcondes, F.C. e Coppini, N.L., 2008. *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. Artliber, São Paulo.
- Józwik, J. e Mika, D., 2015. "Diagnostics of workpiece surface condition based on cutting tool vibrations during machining". *Advances in Science and Technology Research Journal*, Vol. 9, p. 57–65.
- Milfelner, M.; Cus, F. e Balic, J., 2005. "An overview of data acquisition system for cutting force measuring and optimization in milling". *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164-165, p. 1281-1288.
- Ventura, C.E.H., 2008. *Análise da relação entre a formação do cavaco, vibração da ferramenta e desvio de forma no processo de torneamento*. Trabalho de conclusão de curso, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo.

6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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

Evaluation of the use of PZT sensors for tool wear monitoring during turning

Reginaldo Gleyton Correia e Silva

Carlos Eiji Hirata Ventura

Department of Mechanical Engineering, Federal University of São Carlos, km 235 Washington Luís Road, 13565-905 São Carlos/SP

reginaldocorreia05@gmail.com, ventura@ufscar.br

Abstract. *The present work aims to validate the application of PZT piezoelectric transducers as sensors directly mounted on a turning tool holder by means of the correlation of patterns in the vibration signals with aspects of the tool wear mechanism. For this, samples of 304 stainless steel were machined with constant cutting parameters and the flank wear was measured after each cutting pass. The raw vibration signal obtained after each pass was analyzed in time and frequency domain. The results showed that the application of PZT is promising for wear monitoring during turning, as differences between cut and non-cut signal were observed. The RMS of the whole signal was not sensitive enough, but higher signal intensity was found between 400 Hz and 700 Hz. The behavior of the energy of the signal within this range could be correlated with the observed wear mechanisms.*

Keywords: *turning, vibration, piezoelectric transducer, flank wear*

RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.