

## ANÁLISE DO DESGASTE EM FERRAMENTAS DE CORTE A PARTIR DE PROCESSAMENTO DE SINAIS DE ÁUDIO PROVENIENTES DE DISPOSITIVOS MÓVEIS

Ana Carolina Porto, [acporto@estudante.ufscar.br](mailto:acporto@estudante.ufscar.br)<sup>1</sup>

Sidney Bruce Shiki, [bruce@ufscar.br](mailto:bruce@ufscar.br)<sup>1</sup>

<sup>1</sup>UFSCar - Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, SP, 13565-905, Brasil.

**Resumo.** *As técnicas de monitoramento de processos de usinagem visam evitar perdas econômicas, para tanto diversos autores estudam modos de melhorar e reduzir o custo dessas técnicas. Nesta pesquisa, realizou-se um estudo de cunho experimental por meio da captação de sinais sonoros e visuais de um processo de torneamento e os dados obtidos foram analisados computacionalmente para verificar a aplicabilidade de dispositivos móveis (smartphones) em monitorar o desgaste da ferramenta de corte. Analisando a variação de amplitude do sinal e seus valores de RMS, comparando tais dados com as imagens obtidas ao longo do torneamento, pode-se perceber que smartphones são capazes de acompanhar o processo, tendo potencial para serem utilizados, apesar de algumas restrições.*

**Palavras chave:** *Monitoramento de desgaste de ferramenta de corte. Processamento de sinais sonoros. Dispositivos móveis em aplicações de engenharia. Torneamento.*

**Abstract.** *Machining process monitoring techniques aim to avoid economic losses, therefore several authors study ways of improve and reduce costs of this techniques. In this research, an experimental study was performed through of sound and visual signals capturing and the obtained data were computationally analyzed for verification of mobile devices (smartphones) applicability to monitor cutting tool wear. Analyzing the signal amplitude variation and RMS values, comparing such data with pictures obtained during turning, it's possible to realize that smartphones are capable of follow the process, having potential to be used, although some restrictions.*

**Keywords:** *cutting tool wear monitoring, sound signal processing, mobile devices in engineering applications, turning.*

### 1. INTRODUÇÃO

Com as revoluções industriais e o avanço da tecnologia, surgiram métodos mais rápidos, baratos e eficientes de se fabricar produtos em grande escala. A fabricação de peças por meio de processos de usinagem também se aprimorou ao longo das décadas e, com ela, melhores métodos de verificação das condições de usinagem passaram a existir. No processo de remoção do material, um fenômeno inevitável é o desgaste da ferramenta de corte, este gera perda econômica, resultando no tempo de inatividade das máquinas e na perda de material (SIDDHPURA; PAUROBALLY, 2013).

As técnicas de monitoramento visam evitar essas perdas. De acordo com Dimla (2000), alguns parâmetros de processos de usinagem podem ser utilizados no monitoramento de ferramenta para prever seu desgaste, um desses parâmetros é a emissão acústica, que representa a energia liberada pela peça sendo torneada quando os átomos da mesma são perturbados.

Salgado e Alonso (2007) propuseram uma ferramenta computacional de extração de informações do sinal sonoro conhecida como *Singular Spectrum Analysis* (SSA), ou análise do espectro singular. Tal ferramenta é usada para monitorar a condição de desgaste da ferramenta por meio do som emitido por ela durante seu processo de usinagem, utilizando uma técnica de análise não paramétrica para séries temporais no processamento de sinais sonoros, o SSA detectou variações do espectro singular que determina o desgaste de flanco da ferramenta por estimativas. Em um trabalho similar, Deiab et al. (2009) realizaram um sistema de previsão de desgaste da ferramenta, coletando informações de força de corte e emissão acústica, com quatro elementos principais, sendo eles: aquisição de sinal, sinal de pré-processamento, extração de recursos e classificação. Na etapa final, os autores utilizaram redes neurais artificiais como base referencial e uma classificação polinomial, envolvendo o descobrimento de um sistema de parâmetros que melhor mapeasse a sequência de entradas multidimensionais.

Há vários estudos que utilizam o sinal sonoro do processo de usinagem para monitorar o estado da ferramenta. Porém, na maioria deles, os sensores utilizados para captar o som emitido têm custo elevado, o que inviabiliza sua aquisição por

empresas pequenas, além de ser impeditivo para uma adoção em larga-escala de tecnologias para monitoramento de desgaste.

Utilizando um sensor de deformação mecânica de baixo custo, Ghani et al. (2011) desenvolveram um sistema de monitoramento online que analisa sinais de flambagem na força de corte e possui uma interface gráfica de usuário (GUI) produzida em Matlab para detectar a progressão da largura do desgaste no flanco de uma ferramenta, os autores concluíram que o método foi eficiente e capaz de gerar um aviso prévio sobre o desgaste do flanco da ferramenta, mantendo uma qualidade aceitável no processo de usinagem. Downey et al. (2014), utilizando um microfone conectado a um notebook, detectaram a energia sonora que um torno CNC produzia no processo de usinagem. Houve a conclusão de que o espectro acústico possibilitou identificar fases discretas do processo, sendo que as ferramentas de corte têm assinaturas acústicas bem distintas para quando a ferramenta estava em boas condições de uso e quando não estava. Além disso, foi possível identificar a mudança do sinal sonoro quando ocorreu mudança da condição de desgaste da ferramenta.

Com a pretensão de utilizar sensores de smartphones para realizar o monitoramento, diminuindo assim os custos envolvidos no monitoramento do processo, alguns trabalhos estudaram a utilização de tais dispositivos em aplicações de engenharia.

Murphy e King (2016) realizaram um mapeamento de dados de ruídos em cidades utilizando um smartphone, concluindo que, apesar de diferenças entre os mapas produzidos pelo dispositivo e os tradicionais, acreditam no potencial da tecnologia. Também com um smartphone, desta vez usando o acelerômetro e o GPS do aparelho, Kalim et al. (2016), mapearam a cidade em busca de buracos e segmentos de asfalto que precisavam de reparos, sendo um sistema simples, provou-se útil, detectando 90% dos buracos da cidade.

Smartphones são aparelhos que vem sendo popularizados há algumas décadas, grande parte da população mundial, no século XXI, tem condições de possuir um, portanto, é pertinente que suas funções sejam exploradas e utilizadas para viabilizar processos industriais que, no geral, têm alto custo embutido.

Sendo assim, neste trabalho, é proposta a verificação da aplicabilidade do monitoramento de desgaste de ferramenta em um torneamento através de sinais sonoros captados por um microfone de um smartphone comum, buscando gerar novos metodologias para diminuir o custo desse processo.

## 2. METODOLOGIA

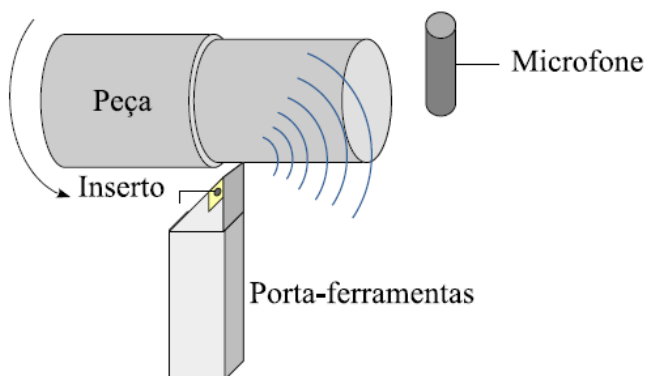
Neste trabalho, realizou-se uma pesquisa de cunho experimental e os dados obtidos experimentalmente foram analisados computacionalmente.

### 2.1. Descrição dos testes experimentais

As análises foram feitas a partir de resultados de ensaios experimentais, onde foram utilizados: um torno mecânico universal Imor prn-320 com potência de 1,8 kW e rotação máxima em 1500 RPM e um porta-ferramenta PDJNR 2020 K12 com um inserto DNMG 150404-PF, classe GC4325 (ISSO HC P25), especialmente aplicado para o processamento de aço à altas temperaturas. Os sinais sonoros emitidos durante o processo de torneamento e corte foram capturados por um microfone de um smartphone comum, utilizando um aplicativo de gravação de áudio. O arquivo gravado pelo celular possui uma frequência de amostragem de 44,1 kHz em modo mono.

A peça escolhida para ser torneada era cilíndrica com diâmetro de 60 mm e comprimento de 150 mm e foram feitos quatro passes na mesma com o inserto de corte. Os passes foram executados até a ocorrência de um desgaste mais proeminente no inserto, o qual impediria o inserto de ser aplicado de forma adequada. Ilustra-se o arranjo experimental utilizado neste trabalho na Figura 1 abaixo.

Figura 1 – Setup experimental dos ensaios para monitoramento do desgaste.



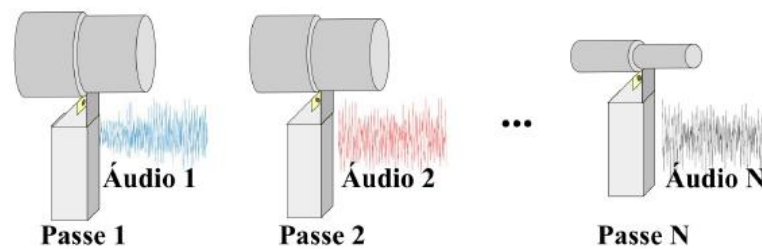
Fonte: Elaborada pelo autor.

Garantindo a não interferência de fontes sonoras externas, o sinal sonoro do processo foi gravado durante cada passe da ferramenta.

Antes da realização do processo de torneamento, foram capturadas imagens de microscopia com a utilização de um microscópio estéreo Nova XTD 30 com ampliação de 40 vezes equipado com uma câmera CCD e, a cada passe, novas imagens foram, também, capturadas. As imagens obtidas da superfície de flanco e de saída da ferramenta de corte foram analisadas de modo que servissem como referência da ferramenta em seu estado original, sem desgaste, e ao longo do processo. Foram tiradas fotografias da ferramenta entre os passes da mesma para servir de comparação visual, verificando se o desgaste era visível quando o sinal sonoro se alterava.

A Figura 2, abaixo, sintetiza a metodologia aplicada nessa pesquisa, que coleta informações de sinais sonoros e visuais a cada passe da ferramenta na peça torneada.

Figura 2 – Resumo da metodologia experimental para monitoramento do desgaste.



Fonte: Elaborada pelo autor.

## 2.2. Metodologia empregada para a análise e processamento dos sinais

Realizados os ensaios de desgaste da ferramenta, os sinais de áudio foram processados a partir do cálculo do nível médio quadrático (RMS, do inglês *root mean square*) e, também, no domínio da frequência utilizando a transformada discreta de Fourier para verificar seu conteúdo espectral (SHIN; HAMMOND, 2008).

O RMS é uma medida de energia do sinal, equivalente à série temporal original, que pode ser definida pela seguinte equação 1:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \cdot \sum_{j=0}^{N-1} x_j^2} \quad (1)$$

Em que  $N$  é a quantidade de pontos em um sinal que pode ser obtida em função do tempo e  $x$ , o sinal capturado. Os níveis de RMS foram calculados a partir dos arquivos de áudio analisados, cada arquivo representa um passe de torneamento na peça como ilustrado na Figura 2.

Com o propósito de auxiliar nos cálculos, utilizou-se o software Matlab que possui funções para o cálculo do RMS. Os procedimentos de análise dessa pesquisa permitiram uma conclusão mais completa a respeito da aplicabilidade dos sinais de áudio de smartphones para o monitoramento do desgaste de ferramentas.

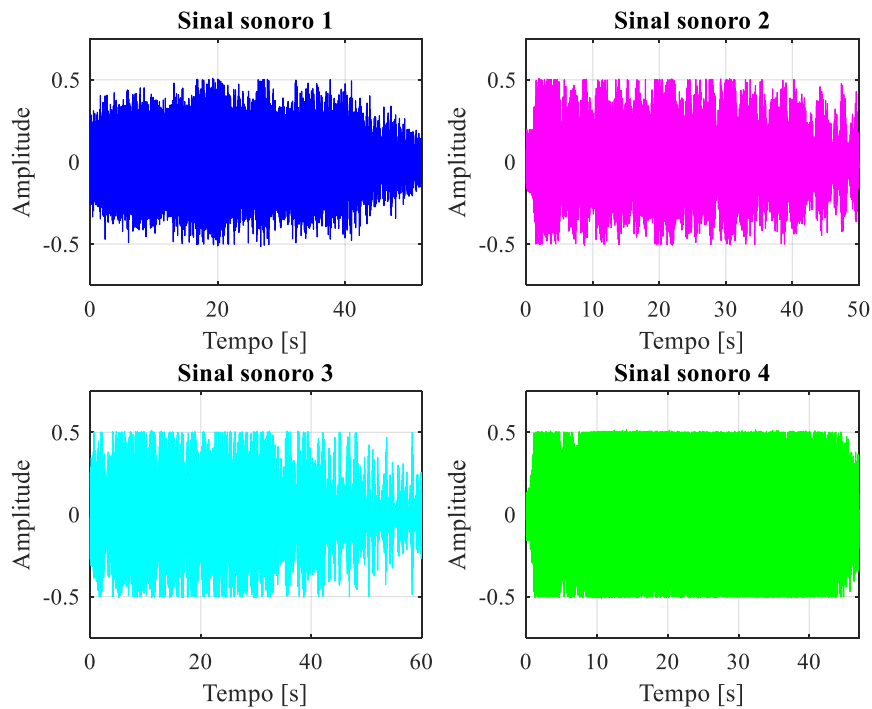
## 3. RESULTADOS

A análise dos resultados obtidos, a partir do experimento, foram divididos em duas categorias, a análise do sinal sonoro e a medição do desgaste da ferramenta. Realizou-se quatro passes da ferramenta no torneamento, quantidade suficiente para notar a modificação do sinal sonoro e do aspecto visual da ferramenta.

### 3.1. Análise dos sinais de áudio

Os quatro sinais sonoros capturados através do microfone do smartphone foram analisados pelo software Matlab como é possível observar na Figura 3 abaixo.

Figura 3 – Sinais sonoros captados no domínio do tempo.

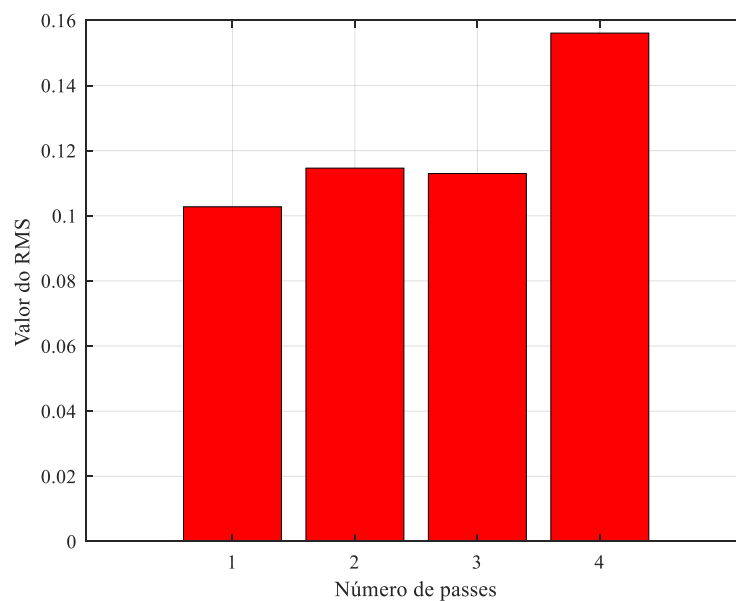


Fonte: Elaborada pelo autor.

Cada sinal sonoro obtido e apresentado na figura acima é referente a um passe da ferramenta na peça sendo usinada. Pela análise gráfica, pode-se perceber que a amplitude sonora é alterada ao longo do processo, sendo o sinal sonoro 1, som do primeiro passe, o com menor amplitude registrada e o sinal sonoro 4, o último passe gravado, o de maior amplitude.

Para evidenciar essa característica, foi realizado o cálculo do RMS para comparar a variação deste ao longo do processo de torneamento. Abaixo, na Figura 4, é possível observar a variação do RMS em cada passe da ferramenta.

Figura 4 – Variação do RMS a cada passe de torneamento.

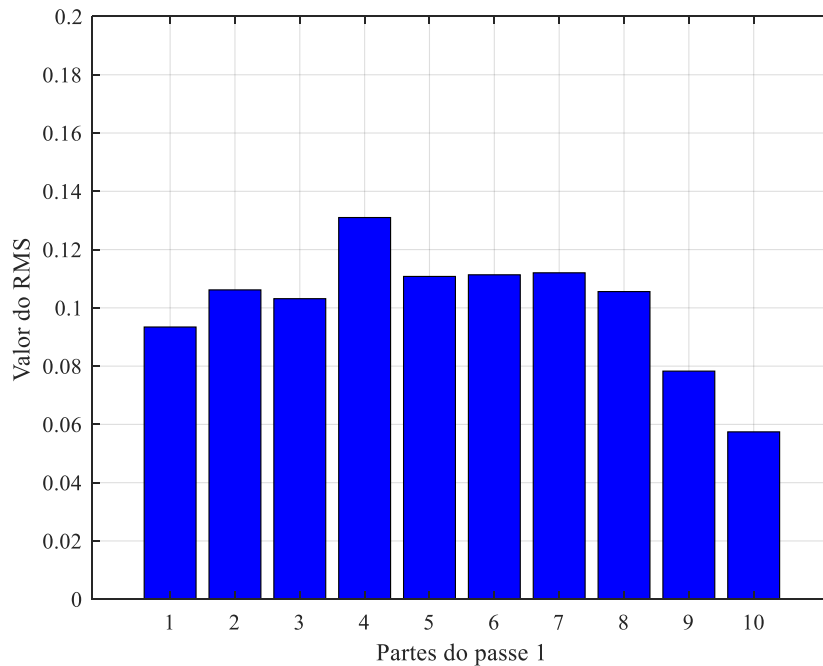


Fonte: Elaborada pelo autor.

Analisando a Figura 4 anterior, percebe-se que, nos três primeiros passes, o nível de emissão sonora manteve-se em valores próximos uns dos outros, o que pode ser visto pela consistência do RMS. Porém, no quarto passe da ferramenta, o RMS apresentou um aumento significativo, identificando um aumento do nível de energia do sinal sonoro.

Para analisar mais efetivamente cada passe e descobrir se os resultados obtidos equivalem aos obtidos na análise dos arquivos de áudio como um todo, o cálculo do RMS foi realizado em partes menores de cada um desses áudios. A divisão foi realizada de modo que cada arquivo, correspondente a um passe da ferramenta, possuísse dez partes de mesmo tamanho para serem analisadas. Deste modo, no arquivo de áudio 1, cujo RMS era de aproximadamente 0.102, temos a seguinte variação de RMS mostrada na Figura 5 abaixo.

Figura 5 – Variação do RMS nos intervalos de tempo do primeiro passe.

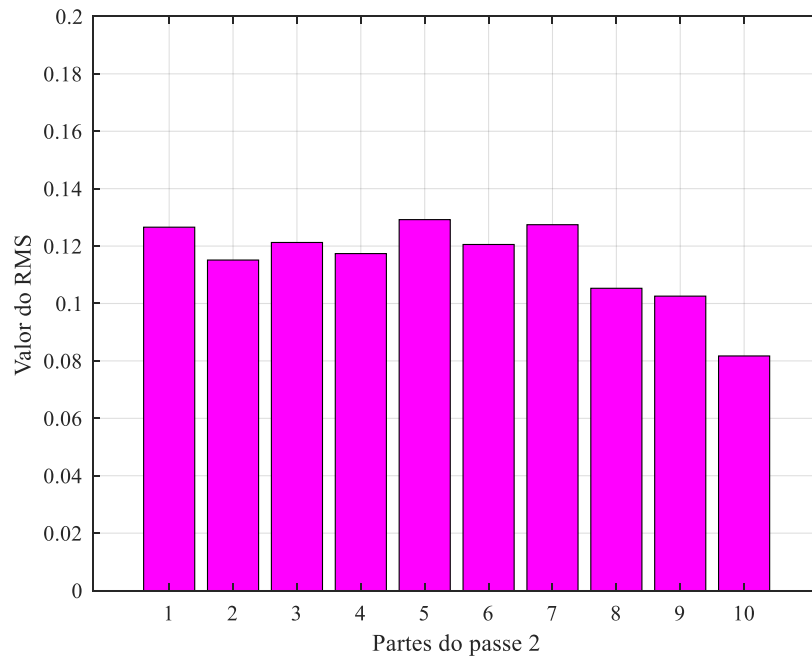


Fonte: Elaborada pelo autor.

É possível perceber a queda do RMS no início e no final do sinal sonoro, quando o passe ainda não tinha sido iniciado ou já tinha sido realizado, porém, no geral, o RMS manteve-se na faixa entre 0.1 e 0.12, o que indica que o RMS aproximado do áudio completo estava correto, apresentando pouca divergência de resultados ao analisar cada trecho deste passe.

O mesmo procedimento foi realizado no segundo passe, que gerou o arquivo de áudio 2, também dividido em dez partes, pode-se ver seus resultados na Figura 6 abaixo.

Figura 6 – Variação do RMS nos intervalos de tempo do segundo passe.

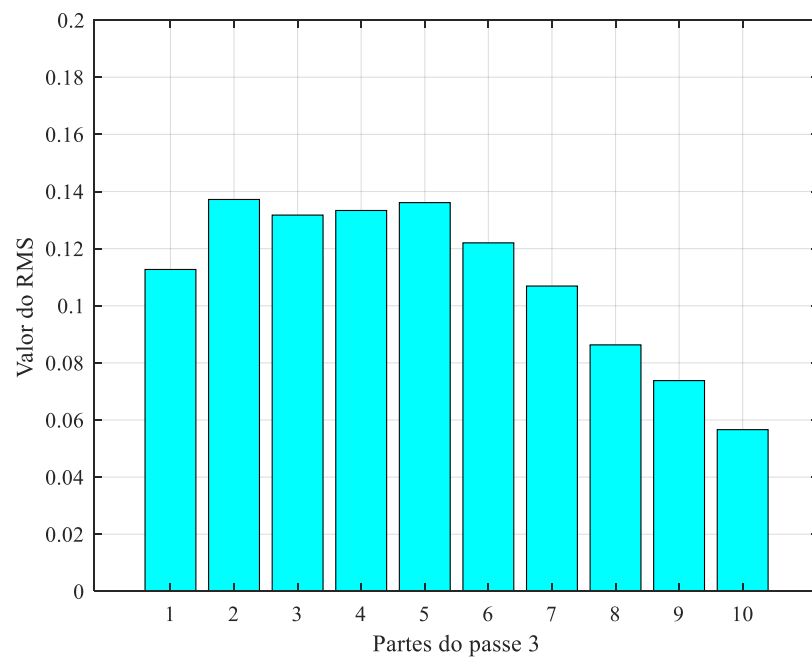


Fonte: Elaborada pelo autor.

Pode-se perceber o mesmo declínio na fase final de coleta do RMS na figura, mantendo uma média do valor em 0.114, conclui-se que também há pouca divergência entre o resultado do passe completo comparado às diversas partes do áudio repartido do segundo passe.

Na Figura 7, abaixo, é possível observar o RMS do áudio do passe 3 em intervalos pequenos.

Figura 7 – Variação do RMS nos intervalos de tempo do terceiro passe.

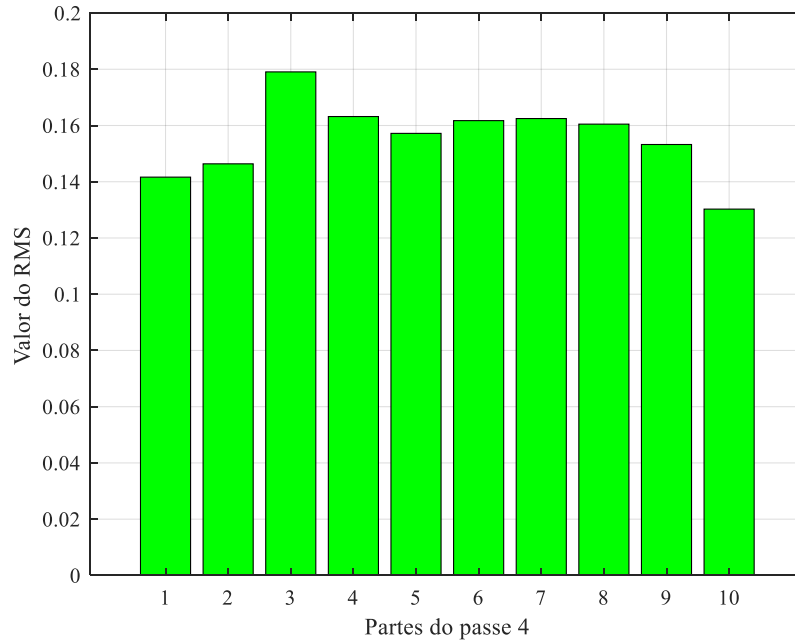


Fonte: Elaborada pelo autor.

Neste caso, a média do RMS das partes manteve-se próxima à 0.112, apresentando queda a partir da parte 7 do áudio, o que pode representar, assim como no passe 1, que o torno estava parando o processo de usinagem no momento da captura desses trechos de áudio.

Por fim, a Figura 8 abaixo, demonstra as partes do passe 4, o último do processo de estudo.

Figura 8 – Variação do RMS nos intervalos de tempo do quarto passe.



Fonte: Elaborada pelo autor.

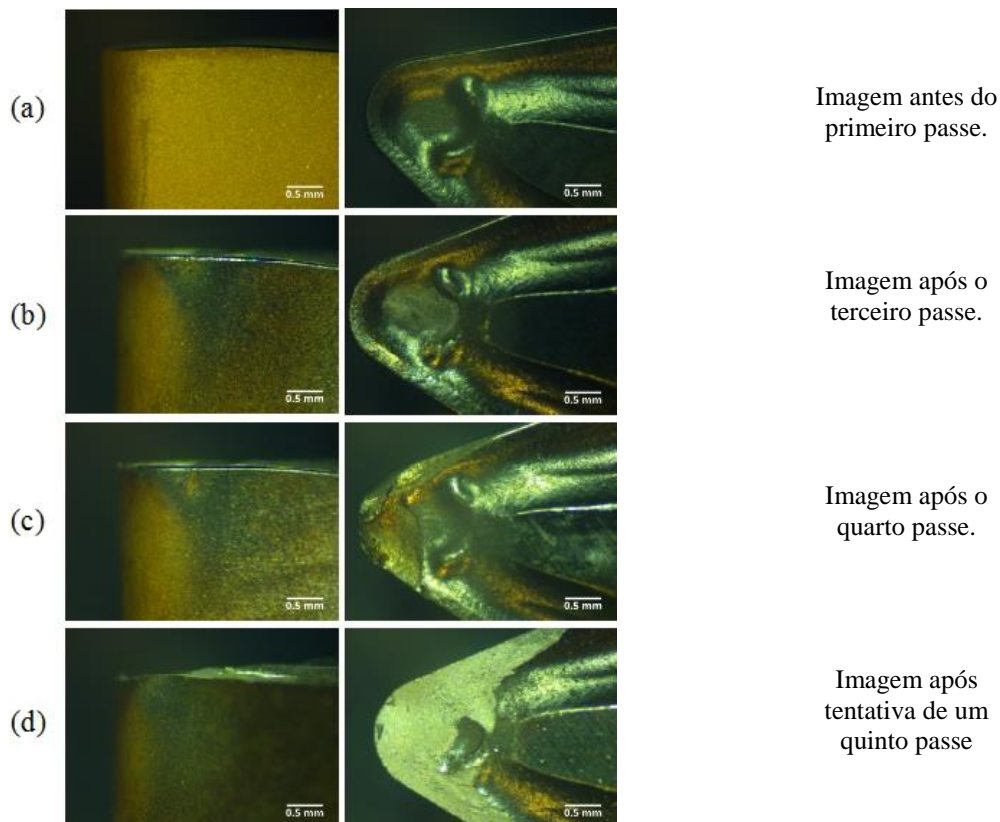
No último passe, o valor do RMS aparece mais elevado do que nos três passes anteriores. Dividido em partes, os valores mantêm sua correspondência ao RMS geral do último passe, tendo uma média de 0.156, o que revela consistência entre os valores.

A diferença entre os valores do RMS dos primeiros passes e do último, pode revelar que no passe 4 a ferramenta estava desgastada e esse fato provocou alterações sonoras no processo de usinagem.

### 3.2. Visualização da evolução do desgaste da ferramenta

Juntamente com os sinais sonoros, a análise das imagens obtidas ao longo do processo de torneamento confirma a tendência do que foi percebido no item anterior deste trabalho. Após o quarto passe há um desgaste visível na ferramenta, alterando assim o som do processo. Na figura 5 abaixo, vemos a evolução visual do desgaste obtido através de imagens de microscopia.

Figura 5 – Desgaste da ferramenta de torneamento ao longo dos passes.



Fonte: Elaborada pelo autor.

Na letra a) da figura, é mostrado o estado da ferramenta antes do primeiro passe, ela não possui nenhum desgaste, logo a imagem pode ser utilizada como referência do quanto a ferramenta desgastou-se a partir desta etapa. Na letra b), é vista a imagem obtida após o terceiro passe da ferramenta de corte na peça usinada, entre o primeiro e o terceiro passe não houveram grandes alterações estruturais e, mesmo após esse passe, pode-se ver pouca variação. Na letra c), tem-se o estado da ferramenta após o quarto passe, nesse caso, é possível perceber uma mudança na ferramenta, já mais desgastada e deformada. E, por fim, na letra d), é possível ver o desgaste completo da ferramenta, tal imagem foi obtida após a tentativa de um quinto passe que foi interrompido devido a tal desgaste.

Ao analisar em conjunto, o som emitido pelos passes e as imagens entre os passes, é possível observar que no passe em que a média dos RMS aumenta, o desgaste da ferramenta torna-se visível e, a tentativa de um quinto passe faz com que o desgaste se torne proeminente, podendo gerar fratura na ferramenta.

#### 4. CONCLUSÕES

Testando a aplicabilidade de um sensor de baixo custo, um microfone de smartphone, em um processo de monitoramento de desgaste de uma ferramenta de corte no processo de torneamento foi possível perceber que, apesar de o novo sensor não ser tão sensível quanto um utilizado em outras pesquisas dessa linha de trabalho, ele é capaz de detectar em qual momento do processo o desgaste da ferramenta é proeminente.

Outros autores que estudaram sobre uma aplicabilidade parecida do smartphone, como Murphy e King (2016), também concluíram que é possível substituir o sensor convencional pelo novo, porém há ainda o que otimizar no processo. Como expressado anteriormente, a popularização de celulares smartphones vem crescendo no mercado de vendas e, dessa maneira, juntamente com os resultados deste artigo faz-se pertinente explorar as funções deste aparelho.

As maiores vantagens encontradas foram o baixo custo do processo, viabilizando o monitoramento para empresas com menor poder aquisitivo e resultando em menos perdas econômicas. Quanto as limitações dessa aplicação, a maior dá-se pela qualidade do sensor do aparelho, que não capta os sinais sonoros com tanta precisão quanto sensores convencionais e, ainda carece de melhoramentos para um monitoramento mais preciso.

Conclui-se, portanto, que o novo modo de monitoramento possui potencial, apesar de algumas restrições de uso, mas que este pode trazer melhorias para o processo de usinagem como um todo.



## 5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) através dos processos nº 2015/25146-3 e 2018/25135-0 pelo fomento que permitiu a compra das ferramentas computacionais utilizadas neste trabalho. Os autores agradecem ainda ao Projeto CNPq Universal (processo 432002/2018-9) por parcialmente fomentar essa pesquisa.

## 6. REFERÊNCIAS

- DIMLA, D. E. Sensor signals for tool-wear monitoring in metal cutting operations-a review of methods. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 40, n. 8, p. 1073--1098, 2000.
- DOWNEY, J.; RAGHAVENDRA, R. et al. Comparison and analysis of audible sound energy emissions during single point machining of HSTS with PVD TiCN cutter insert across full tool life. *Wear*, Elsevier, v. 313, n. 1-2, p. 53--62, 2014.
- DEIAB, I.; ASSALEH, K.; HAMMAD, F. On modeling of tool wear using sensor fusion and polynomial classifiers. *Mechanical Systems and Signal Processing*, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 1719--1729, 2009.
- GHANI, J. A.; RIZAL, M.; NUAWI, M. Z.; GHAZALI, M. J.; HARON, C. H. C. Monitoring online cutting tool wear using low-cost technique and user-friendly GUI. *Wear*, Elsevier, v. 271, n. 9-10, p. 2619--2624, 2011.
- KALIM, F.; JEONG, J. P.; ILYAS, M. U. CRATER: A crowd sensing application to estimate road conditions. *IEEE Access*, IEEE, v. 4, p. 8317--8326, 2016.
- MURPHY, E.; KING, E. A. Smartphone-based noise mapping: Integrating sound level meter app data into the strategic noise mapping process. *Science of The Total Environment*, Elsevier, v. 562, p. 852--859, 2016.
- SALGADO, D. R.; ALONSO, F. J. An approach based on current and sound signals for in-process tool wear monitoring. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Elsevier, v. 47, n. 14, p. 2140--2152, 2007.
- SIDDHPURA, A.; PAUROBALLY, R. A review of flank wear prediction methods for tool condition monitoring in a turning process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Springer, v. 65, n. 1-4, p. 371--393, 2013.

## 6. RESPONSABILIDADE PELAS INFORMAÇÕES

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