

DETECÇÃO DO FENÔMENO DE CHATTER NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO POR MEIO DE ANÁLISE TEMPO-FREQUÊNCIA

Rogério Thomazella, thomazella@feb.unesp.br¹
Wenderson Nascimento Lopes, wenderson.lopes@feb.unesp.br¹
Felipe Aparecido Alexandre, felipe.alexandre@feb.unesp.br¹
Fábio Romano Lofrano Dotto, fabio@farolconsultoria.com.br¹
Rodrigo Sanches Rodrigues, rodrigo@unilins.edu.br²
Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br¹
Bento Rodrigues de Pontes Junior, brpontes@feb.unesp.br²
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²
Martin Antonio Aulestia Viera, aulestia.martin16@gmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP, Av. Eng. Luiz E. C. Coube, 14-01, CEP:17033-360, Bauru, SP

²Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Av. Eng. Luiz E. C. Coube, 14-01, CEP:17033-360, Bauru, SP

Resumo: A retificação é um processo de acabamento e precisão situado no final da cadeia de usinagem. As perdas por defeitos e anomalias nesta fase são inadmissíveis, devido ao valor agregado que a peça possui nessa etapa de acabamento. As vibrações auto-excitadas, também conhecidas como chatter, são consideradas um problema crítico no processo de retificação, devido aos inúmeros efeitos negativos que provoca, tais como, baixa qualidade superficial, dimensões imprecisas e desgaste desproporcional da ferramenta de corte, entre outros. O objetivo desse trabalho é propor um método de detecção da ocorrência do fenômeno de chatter na retificação de aços ABNT 1045 com rebolo de óxido de alumínio utilizando acelerômetro e técnicas de processamento digital de sinais. Ensaios experimentais foram realizados em uma máquina retificadora plana tangencial e um sistema de aquisição de sinais com frequência de amostragem de 2 MHz foi empregado para amostrar os sinais provenientes do processo de retificação. As superfícies das peças foram inspecionadas visualmente por meio de imagens de alta resolução. O conteúdo harmônico dos sinais foi investigado no intuito de relacioná-lo com a ocorrência do fenômeno de chatter durante o processo. Os resultados indicam que as magnitudes das frequências dos sinais de vibração se alteram em consonância com a ocorrência do fenômeno de chatter.

Palavras-chave: retificação, chatter, monitoramento, sinal de vibração.

1. INTRODUÇÃO

A retificação é um processo amplamente utilizado na fabricação de componentes mecânicos, sendo considerado pela indústria de manufatura um processo de suma importância. O processo de retificação é frequentemente utilizado no acabamento superficial de peças em virtude da capacidade de atingir características geométricas precisas e superfícies de alta qualidade com baixa rugosidade (Jiang et al. 2013). A complexidade do processo de retificação necessita de investigação contínua e inúmeras técnicas de monitoramento estão disponíveis para a detecção dos problemas que ocorrem nesse processo (Liu, Chen, and Gindy 2005).

Alguns dos problemas que ocorrem no processo de retificação são originados pelo fenômeno de chatter, que consiste em distúrbios causados por oscilações auto-excitadas (Ahrens et al. 2016). Na usinagem, pequenas ondas na superfície da peça são geradas pela passagem da ferramenta de corte, as quais podem causar a ocorrência dessas vibrações auto-excitadas (Yan, Xu, and Wiercigroch 2015). Alguns fatores podem agravar tais oscilações, sendo o desbalanceamento do rebolo, sua excentricidade e a taxa de remoção as principais razões para ocorrência de chatter (Inasaki, Karpuschewski, and Lee 2001). No processo de retificação, a ocorrência do fenômeno de chatter é relacionada ao aumento da amplitude das vibrações próximas as harmônicas do rebolo e da peça (Gradišek et al. 2003).

A detecção da ocorrência do fenômeno de chatter pode ser efetuada por meio de métodos diretos de monitoramento como a inspeção visual, a medição de rugosidade, entre outros. A desvantagem desses métodos é a necessidade de interrupção do processo para que as peças sejam analisadas; tais interrupções demandam tempo e adicionam custos a linha de produção, inviabilizando em alguns casos a sua aplicação. Assim, o monitoramento por métodos indiretos, faz-se necessário diante desse contexto, pois estima o valor da variável desejada por meio das características e do

processamento do sinal extraído do processo monitorado (Abellan-Nebot and Romero Subiron 2010). A principal maneira utilizada para detecção de chatter no processo de retificação é a utilização de sensores, tais como, dinamômetro (força), emissão acústica e acelerômetro (vibração) (Gradišek et al. 2003; Inasaki et al. 2001).

O objetivo desse trabalho é monitorar a ocorrência do fenômeno de chatter no processo de retificação com rebolo de óxido de alumínio e aço ABNT 1045 por meio de sinais de vibração e técnicas de processamento digital de sinais. Esse trabalho se diferencia de alguns constantes na literatura (Ahrens et al. 2013; Alexandre et al. 2017; Yan, Xu, and Wiercigroch 2014), devido a aplicação da Transformada de Fourier de Tempo-Curto (STFT) na detecção de tal fenômeno sendo, portanto, uma nova abordagem para o monitoramento de vibrações auto excitadas.

2. MONITORAMENTO DA OCORRÊNCIA DE VIBRAÇÃO AUTO-EXCITADA NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

A detecção da ocorrência do fenômeno de chatter de forma automática é uma tarefa difícil quando comparada a detecção por meio de métodos de análise diretos, como a rugosidade ou inspeção visual (Gradišek et al. 2003). Alguns trabalhos podem ser encontrados na literatura abordando esse problema.

A detecção automática da ocorrência de chatter no processo de retificação cilíndrica por meio de um conjunto de sensores é apresentada por (Ahrens et al. 2013). Um método de compensação ativo de chatter capaz de estabilizar e prevenir tal fenômeno no processo de retificação é proposto por (Ahrens et al. 2016). A utilização da entropia, calculada por meio do espectro de potência, e a *coarse-grained information rate* (CIR), calculada por meio de flutuações dos sinais de emissão acústica (EA) é demonstrada por (Gradišek et al. 2003). Esses trabalhos possuem em comum o fato de analisarem os sinais advindos dos sensores empregados por meio de seus espectros de frequência. Apesar disso, tais trabalhos não utilizaram a análise tempo-frequência que a Transformada de Fourier de tempo-curto (STFT) proporciona.

A abordagem alternativa à análise efetuada por meio da Transformada Rápida de Fourier (FFT) empregada em diversos trabalhos é a STFT. Essa transformada consiste em segmentar uma sequência em um conjunto de subsequências de janelas curtas, com cada subsequência centralizada em um intervalo uniforme de tempo e sua Transformada Discreta de Fourier (DFT) calculada separadamente (Zhang, Yu, and Sheng 2006). Assim, a STFT é definida por (Kim et al. 2007) na Equação 1:

$$STFT(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(u)F(t + u)e^{-j\omega u} du \quad (1)$$

onde t é o tempo, ω é a frequência angular e $h(u)$ é uma função janela no tempo como retangular, Gaussiana, Blackman, Hanning, Hamming, Kaiser, entre outras.

O resultado obtido pela STFT é uma representação bi-dimensional do sinal no tempo e frequência. Todavia, a limitação imposta pelo princípio de incerteza de Heisenberg requer, neste tipo de representação, uma relação entre as resoluções em cada domínio (Lima et al. 2016).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Os ensaios foram efetuados inicialmente de forma preliminar com o objetivo de definir os melhores parâmetros do processo de retificação que permitiriam observar a ocorrência do fenômeno de chatter. Assim, um banco de ensaios experimental foi configurado de modo a assegurar a qualidade na coleta das variáveis de saída do processo. O processamento digital dos sinais foi efetuado por meio do software Matlab.

Os ensaios foram realizados em uma máquina retificadora plana tangencial, modelo RAPH 1055 da empresa Sulmecânica equipada com um rebolo de óxido de alumínio, fabricado pela empresa NORTON, modelo 38A150LVH, com dimensões de 355 mm x 25,4 mm x 127 mm. Peças de aço AISI 1045, com dimensões de 150 mm x 7 mm x 48 mm, foram utilizadas nos ensaios de retificação para análise da ocorrência de chatter. A velocidade de corte (V_s) empregada foi de 29,0 m/s, a velocidade de avanço da peça (V_w) de 0,124 m/s e a profundidade de corte (a) de 35 μ m. Na detecção dos sinais de vibração, um acelerômetro modelo 353B03, da empresa PCB Piezotronics, foi fixado ao suporte da peça, perpendicular à superfície usinada, e conectado a um módulo amplificador com ganho de 20 dB. O módulo amplificador foi conectado à um osciloscópio, da marca Yokogawa, modelo DL850, e os sinais foram coletados a uma taxa amostragem de dois milhões de amostras por segundo.

Em relação a fase de inspeção visual após os ensaios serem concluídos, um scanner da fabricante HP, modelo Scanjet G4050, foi utilizado para obter uma imagem das superfícies das peças. A partir dessa imagem, um processamento digital de imagem foi efetuado de modo a permitir a identificação da frequência em que ocorre o fenômeno de chatter.

Na fase de processamento digital do sinal de vibração selecionado para estudo, o mesmo foi reamostrado digitalmente a uma taxa de vinte mil amostras por segundo, visto que o fabricante do acelerômetro empregado nos ensaios garante sua calibração para frequências iguais ou abaixo de 7 kHz. De acordo com o Teorema de Shanon-Nyquist, a taxa de amostragem deve ser o dobro da frequência máxima, o que de fato foi respeitado. Assim, foi usado no sinal original um filtro digital passa-baixa Butterworth, ordem 30, com frequência de corte de 10 kHz. Após essa

etapa, a STFT do sinal reamostrado foi calculada utilizando uma janela retangular de 600 pontos com uma sobreposição de 90%, o que fornece resolução de aproximadamente 67 Hz e 3ms na frequência e no tempo, respectivamente.

4. AGRADECIMENTOS

Os resultados obtidos a partir da inspeção visual da peça são apresentados na Figura 2. A imagem obtida da digitalização da superfície de uma das peças é apresentada na Figura 2 (a) e o resultado obtido após o processamento digital de imagens é apresentado na Figura 2 (b). Os retângulos assinalados apontam duas regiões distintas: (1) no retângulo pontilhado de cor azul é mostrada uma região da peça com baixa incidência do fenômeno de chatter e (2) no retângulo pontilhado de cor laranja é mostrada a região da peça com maior incidência de chatter e o período de ocorrência desse fenômeno.

Observa-se na Figura 1, que a região da superfície da peça com pouca incidência de chatter possui coloração uniforme, enquanto que a região com maior incidência de chatter apresenta variação da coloração e escurecimento da superfície. Essa variação na superfície da peça ocorre devido a trepidação do rebolo sobre sua superfície, gerando um atrito maior e aumentando a temperatura na zona de corte, acarretando em danos. Além disso, é possível identificar o período em que o fenômeno de chatter ocorre, cerca de 35ms, o que equivale a uma frequência de 28,57 Hz, muito próxima da frequência de rotação do rebolo, como descrito por (Gradišek et al. 2003).

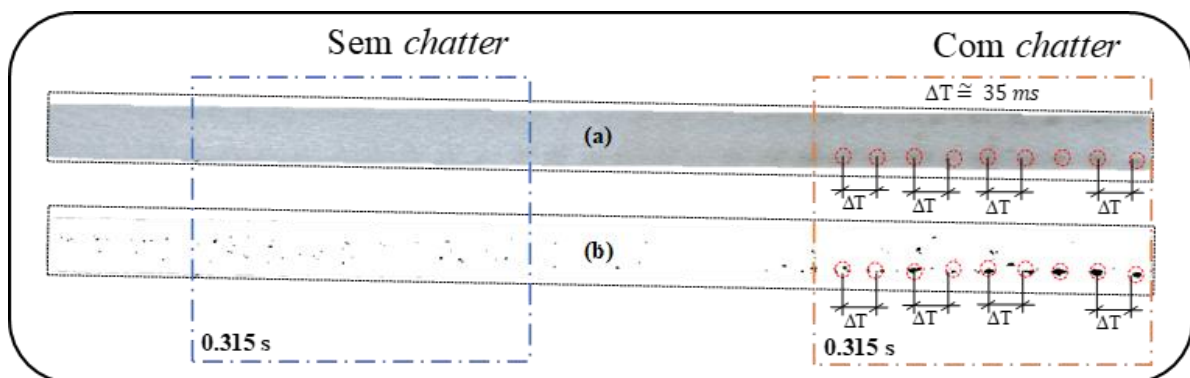


Figura 1: Imagem da superfície da peça aço AISI 1045 após retificação: (a) sem processamento e (b) após processamento

Os resultados obtidos por meio da aplicação da STFT são apresentados nas Figuras 2, 3 e 4, de tal forma que na Figura 2 é apresentado o espectro do passe de retificação, que contempla as regiões da peça com baixa e com alta incidência de chatter na faixa de frequência de 0 – 10 kHz; na figura 3 é apresentado uma ampliação da STFT referente a região de baixa incidência de chatter; por fim, na figura 4 é apresentado uma ampliação da STFT para a região com alta incidência de chatter.

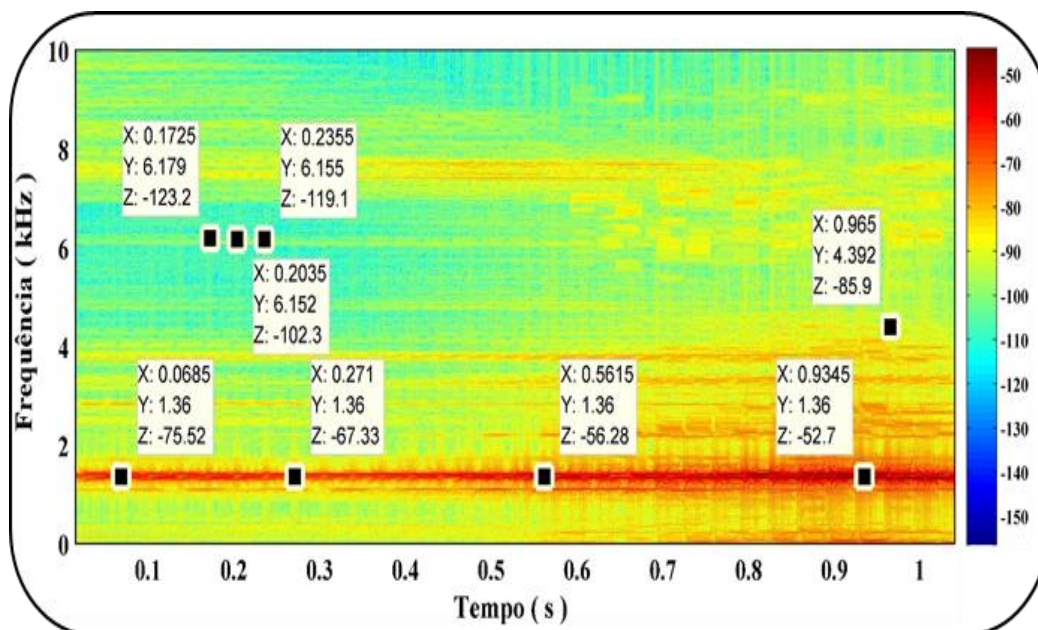


Figura 2: Espectro STFT do sinal de vibração correspondente ao passe de retificação

Nota-se na Figura 2, para os períodos entre 0 a 0.5 s, região onde houve baixa incidência de chatter, a magnitude da frequência de 1,36 kHz é, em média, de aproximadamente -70 dB, enquanto que para os períodos entre 0.6 a 1.1 s, região com alta incidência de chatter, a magnitude dessa frequência é de aproximadamente -55 dB, o que equivale a um aumento de aproximadamente 80% de energia dessa frequência ao longo do passe de retificação. Observa-se ainda, na Figura 2, que linhas verticais surgem periodicamente ao longo do passe de retificação, sendo que essas linhas são mais evidentes para a faixa de Frequência de 1,2 a 2 kHz.

O período de ocorrência desse fenômeno é de aproximadamente 30ms, o que corresponde a uma frequência de aproximadamente 33 Hz, próxima a frequência de rotação do rebolo. A ocorrência periódica do fenômeno pode ser melhor observada nas Figuras 3 e 4, que mostra uma ampliação para as regiões com baixa e alta incidência de chatter, respectivamente, na faixa de frequência de 0 – 2.2 kHz.

Na Figura 3 é observado que para os períodos de aproximadamente 104, 138 e 171ms existe uma diminuição na amplitude do sinal na frequência de 1,36 kHz. Esse comportamento se repete em todo o espectro. Essa variação está diretamente relacionada a ocorrência do fenômeno de chatter, mantendo o período de aproximadamente 30 ms. Além disso, a frequência observada é próxima da quadragésima quinta harmônica da frequência de rotação do rebolo. No entanto, conforme análise realizada a partir da inspeção visual, observa-se que a ocorrência do fenômeno de chatter nessa região não foi suficiente para acarretar danos na superfície da peça.

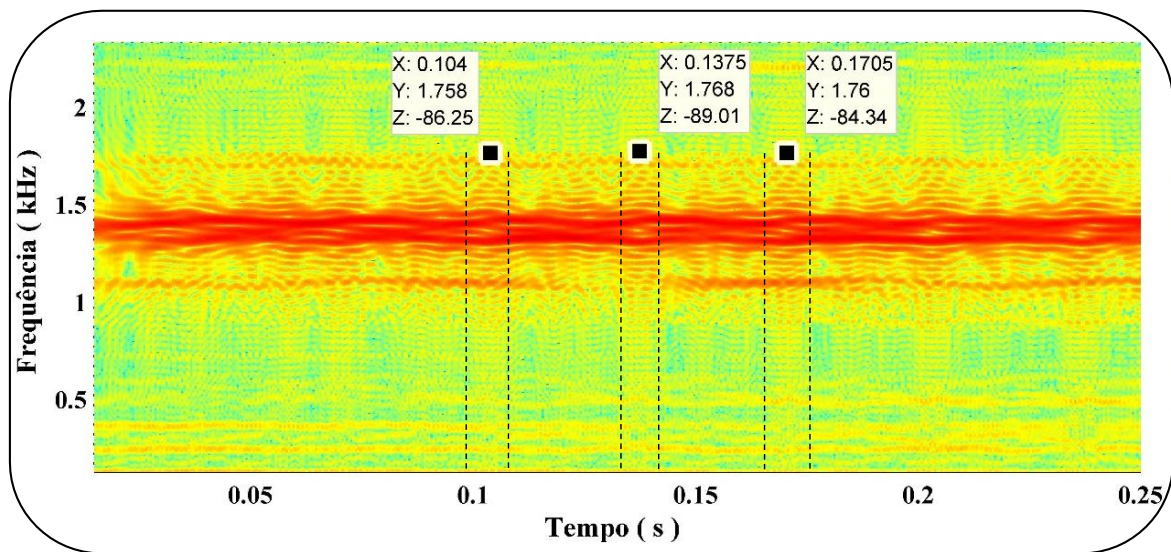


Figura 3: Ampliação da STFT da região com baixa incidência de chatter

Observa-se na Figura 4 uma variação mais significativa na amplitude do sinal na faixa de frequência de 1 – 1.5 kHz, onde se encontra a frequência de 1,36 kHz. Nota-se que a magnitude das frequências para a região onde ocorre a maior incidência de chatter é mais alta do que a magnitude dessas frequências para a região em que a ocorrência do chatter é mais branda.

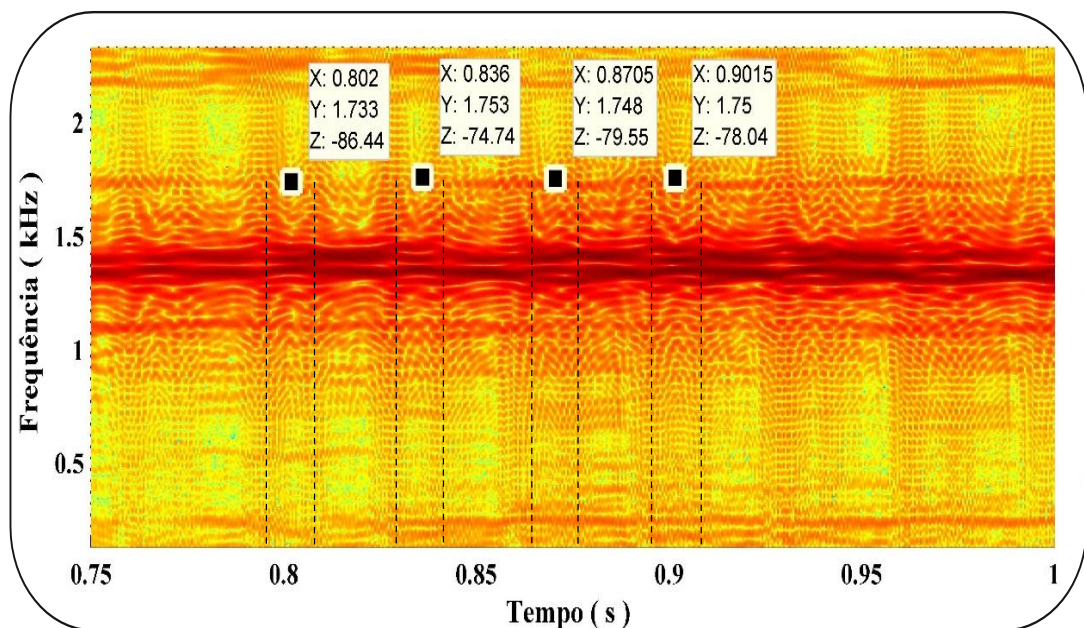


Figura 4: Ampliação da STFT da região com alta incidência de chatter

O aumento significativo da amplitude das frequências analisadas está relacionado com a força de corte na região de contato entre a superfície da peça e do rebolo. Na região em que a ocorrência de chatter é mais branda, a força de contato entre o rebolo e a peça é menor e as amplitudes das frequências relacionadas ao chatter são mais baixas. Em contrapartida, na região em que a incidência do chatter é mais acentuada, a força de contato entre o rebolo e a peça é mais alta, por isso as amplitudes das frequências relacionadas ao chatter aumentam significativamente, como demonstrado por (Alexandre et al. 2017).

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou uma técnica para a detecção da ocorrência do fenômeno de chatter no processo de retificação por meio de um estudo espectral em tempo-frequência do sinal de vibração. Os resultados indicam que a variação periódica nas amplitudes das frequências observadas na STFT está relacionada com a frequência de rotação do rebolo e suas harmônicas. Essa frequência é próxima da frequência de chatter observada na inspeção visual. A frequência de chatter é observada em todo o espectro da STFT; no entanto, a partir da inspeção visual, nota-se que existe regiões da peça em que se observa dano e outras regiões em que esse diagnóstico não é possível. As amplitudes das frequências relacionadas ao chatter se alteram de acordo com a intensidade em que o fenômeno ocorre durante processo. Assim, a STFT surge como alternativa para o monitoramento do fenômeno de chatter no processo de retificação. A afirmação da ocorrência de dano na superfície da peça só pode ser fundamentada a partir de análises destrutivas, como a metalografia e a microdureza. Assim, ressalta-se que a abordagem relatada nesse artigo é inicial e, para a validação do método em outras condições, estudos adicionais se fazem necessários.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq e a CAPES pelo apoio financeiro; à Norton Abrasivos Ltda., pertencente ao grupo Saint-Gobain, pela doação dos rebolos; e a Quimatic Tapmatic do Brasil pela doação do fluido de corte.

7. REFERÊNCIAS

- Abellan-Nebot, Jose Vicente and Fernando Romero Subiron. 2010. "A Review of Machining Monitoring Systems Based on Artificial Intelligence Process Models." *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 47(1–4):237–57.
- Ahrens, M., M. Dagen, B. Denkena, and T. Ortmaier. 2016. "An Active Damping Method for Chatter Vibration in Plunge Grinding Using Electromagnetic Actuators." *Procedia CIRP* 46:197–200.
- Ahrens, M., R. Fischer, M. Dagen, B. Denkena, and T. Ortmaier. 2013. "Abrasion Monitoring and Automatic Chatter Detection in Cylindrical Plunge Grinding." *Procedia CIRP* 8:374–78.
- Alexandre, Felipe et al. 2017. "Chatter Vibration Monitoring in the Surface Grinding Process through Digital Signal Processing of Acceleration Signal." P. 4927 in *Proceedings of 4th International Electronic Conference on Sensors and Applications*. Basel, Switzerland: MDPI. Retrieved (<http://sciforum.net/conference/ecsa-4/paper/4927>).
- Gradišek, Janez, Andreas Baus, Edvard Govekar, Fritz Klocke, and Igor Grabec. 2003. "Automatic Chatter Detection in Grinding." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 43(14):1397–1403.
- Inasaki, I., B. Karpuschewski, and H. S. Lee. 2001. "Grinding Chatter – Origin and Suppression." *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 50(2):515–34.
- Jiang, J. L. et al. 2013. "2D/3D Ground Surface Topography Modeling Considering Dressing and Wear Effects in Grinding Process." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 74:29–40.
- Kim, B. S. et al. 2007. "A Comparative Study on Damage Detection in Speed-up and Coast-down Process of Grinding Spindle-Typed Rotor-Bearing System." *Journal of Materials Processing Technology* 187–188:30–36.
- Lima, Érica Manguiera, Núbia Silva, Dantas Brito, and Benemar Alencar De Souza. 2016. "Analysis of the Influence of the Window Used in the Short-Time Fourier Transform for High Impedance Fault Detection." 350–55.
- Liu, Qiang, Xun Chen, and Nabil Gindy. 2005. "Fuzzy Pattern Recognition of AE Signals for Grinding Burn." *International Journal of Machine Tools and Manufacture* 45(7–8):811–18.
- Yan, Yao, Jian Xu, and Marian Wiercigroch. 2014. "Chatter in a Transverse Grinding Process." *Journal of Sound and Vibration* 333(3):937–53.
- Yan, Yao, Jian Xu, and Marian Wiercigroch. 2015. "Non-Linear Analysis and Quench Control of Chatter in Plunge Grinding." *International Journal of Non-Linear Mechanics* 70:134–44.
- Zhang, Shiqun, Dunshan Yu, and Shimin Sheng. 2006. "A Discrete STFT Processor for Real-Time Spectrum Analysis." *IEEE Asia-Pacific Conference on Circuits and Systems, Proceedings, APCCAS* (3):1943–46.

8. RESPONSABILIDADE AUTORAL

"O(s) autor(es) é(são) o(s) único(s) responsável(is) pelo conteúdo deste trabalho".

DETECTION OF CHATTER PHENOMENON IN GRINDING PROCESS BY TIME-FREQUENCY ANALYSIS

Rogério Thomazella, thomazella@feb.unesp.br¹
Wenderson Nascimento Lopes, wenderson.lopes@feb.unesp.br¹
Felipe Aparecido Alexandre, felipe.alexandre@feb.unesp.br¹
Fábio Romano Lofrano Dotto, fabio@farolconsultoria.com.br¹
Rodrigo Sanches Rodrigues, rodrigo@unilins.edu.br²
Paulo Roberto Aguiar, aguiarpr@feb.unesp.br¹
Bento Rodrigues de Pontes Junior, brpontes@feb.unesp.br²
Eduardo Carlos Bianchi, bianchi@feb.unesp.br²
Martin Antonio Aulestia Viera, aulestia.martin16@gmail.com¹

¹Departamento de Engenharia Elétrica, UNESP, Av. Eng. Luiz E. C. Coube, 14-01, CEP:17033-360, Bauru, SP

²Departamento de Engenharia Mecânica, UNESP, Av. Eng. Luiz E. C. Coube, 14-01, CEP:17033-360, Bauru, SP

Resumo:

The grinding is a high-precision manufacturing process and fitting, located at the end of the machining chain. The losses caused by defects and anomalies in this stage are inadmissible, due to the large added value cumulatively in previous process until flat grinding. The self-excited vibrations, also known as chatter, are considered a critical problem in the grinding process, due to the numerous negative effects that causes, such as low surface quality, inaccurate dimensions and disproportional wear of the cutting tool, among others. This work proposes a method of detecting the occurrence of the chatter phenomenon in the grinding of ABNT 1045 workpieces steels with aluminum oxide grinding wheel using accelerometer sensors and digital signal processing techniques. Experimental tests were performed on a flat tangential grinding machine and the acquisition signal system with a sampling frequency of 2 MHz was used to sample the signals from the grinding process. The workpiece surfaces were inspected visually through high resolution images. The harmonic content of the signals was analyzed to find a relationship with the occurrence of the chatter phenomenon during grinding process. The results indicate that the magnitudes of the frequencies of the vibration signals change in consonance with the occurrence of the chatter phenomenon.

Keywords: grinding, chatter, monitoring, vibration signals.