

ESTUDO DO DESGASTE DE DRESSADOR DE PONTA ÚNICA POR EMISSÃO ACÚSTICA E VIBRAÇÃO

RUBENS V. C. G. P. SOUZA¹, CAIO F. G. BATISTA¹, PAULO R. AGUIAR², CESAR H. R. MARTINS²,
EDUARDO C. BIANCHI¹, RODRIGO S. RUZZI¹

1. *Laboratório de Usinagem à Abrasão (LUA), Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, 17033-360, Bauru - SP.*

*E-mails: rvcgps@hotmail.com, caio.batista@outlook.com,
bianchi@feb.unesp.br, zener6v6@gmail.com*

2. *Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais (LADAPS), Faculdade de Engenharia de Bauru, UNESP – Univ. Estadual Paulista, Departamento de Engenharia Elétrica, Av. Eng. Luiz Edmundo Carrijo Coube, 14-01, 17033-360, Bauru - SP.*

E-mails: aguiarpr@feb.unesp.br, cesar.martins@outlook.com

Abstract — Grinding has been one of the most important machining processes aimed at obtaining high precision parts, so as to give a final finish by minimizing surface irregularities on the ground workpiece. Since the efforts resulting from the friction between the grinding wheel and the ground work piece reduce the efficiency of the process over time, the dressing operation is needed. This operation consist of removing or fracturing the worn grains, and serves to maintain the optimal sharpness conditions of the grinding wheel. In this context, due to the lack of reliable techniques indicative of a proper dressing as well as to prevent excessive wear of the dresser, this work was directed to the study of a dressing operation monitoring and the estimation of the wear condition of a single point dresser. Neural networks were used whose inputs were obtained based on digital signal processing, acoustic emission and vibration system. The multilayer perceptron neural networks were used, whose inputs was obtained by digital processing the acoustic emission and vibration signals. It was noted in the study that the harmonic content of the acoustic emission and vibration signals is related to wear conditions, and when selected frequency bands are used to feed the neural networks models good results were obtained.

Keywords — Grinding process; Dressing wear; Acoustic Emission; Vibration; Artificial Neural Network;

Resumo — A retificação tem sido um dos mais importantes processos de usinagem destinados à obtenção de peças de alta precisão, de forma a conferir um acabamento final, minimizando as irregularidades superficiais na peça retificada. Dado os esforços decorrentes do atrito entre o rebolo e a peça retificada que, com o tempo, reduzem a eficiência do processo, faz-se necessário a dressagem do rebolo. Esse processo, que consiste em “reavivar” (remover ou fraturar) grãos desgastados, serve para manter as condições ideais de agressividade do rebolo. Nesse contexto, em função da carência de técnicas confiáveis indicativas de uma dressagem adequada, e também para prevenir as consequências do desgaste excessivo do dressador, direcionou-se este trabalho ao estudo do monitoramento da dressagem e estimação da condição de desgaste de um dressador de ponta única. Redes neurais do tipo perceptron de múltiplas camadas foram usadas para classificar o desgaste do dressador, cujas entradas foram obtidas com base no processamento digital de sinais de emissão acústica e vibração. Observou-se no estudo que o conteúdo harmônico dos sinais de emissão acústica e vibração sofrem influência da condição de desgaste e, quando bandas de frequências selecionadas são usadas como entradas das redes neurais bons resultados foram obtidos.

Palavras-chave — Operação de retificação; Desgaste do dressador; Emissão Acústica; Vibração; Redes Neurais Artificiais

1 Introdução

O processo de retificação é uma das últimas etapas do processo de usinagem, e por necessitar de uma grande precisão que garanta alta exatidão e qualidade tem um grande valor agregado ao produto final. No entanto, de acordo com Linke (2008), o desempenho do processo depende principalmente da forma que o rebolo é preparado para assegurar que o processo de dressagem produzirá uma topografia adequada do rebolo bem como o perfil desejado. A topografia do rebolo afeta a rugosidade e camada superficial da peça por meio do número e forma de arestas de corte, volume dos poros, e comportamento do desgaste da camada abrasiva. O processo de

dressagem deve promover um processo de retificação tão consistente quanto possível, levando-se em conta o desgaste do rebolo.

Segundo Marinescu *et al.* (2007), dressagem é o processo de condicionamento da superfície do rebolo visando sua remodelação quando o mesmo perdeu sua forma original pelo desgaste. É a operação conjunta de perfilamento e afiação dos rebolos convencionais, tendo como objetivo restaurar a eficiência de corte da ferramenta.

A agressividade dos rebolos também é um fator importante, sendo responsável pela quantificação da capacidade de remoção do material gerada pelo rebolo, estando diretamente ligada ao tamanho do grão, do tipo de ligante, da porosidade, entre outros. Assim, visando manter as características

e funcionalidades do rebolo, é necessário que ocorra uma dressagem periódica, garantindo uma topografia adequada da superfície de corte do rebolo. Essa topografia influencia na rugosidade e na camada superficial da peça por meio da quantidade e forma dos seus grãos abrasivos, do volume dos poros e do comportamento do desgaste da camada abrasiva (Malkin & Guo, 2008) e, por conseguinte, na vida do rebolo, no tempo de ciclo de retificação e a qualidade final da peça (Marinescu *et al.*, 2007).

Por ser um elemento transformador da topografia da ferramenta, o processo de dressagem deve ser muito bem conhecido para que se tenha um maior controle sobre o desempenho do rebolo. O uso de dressadores desgastados pode proporcionar uma menor agressividade para a ferramenta. Isso pode causar um aumento das forças de corte e a perda mais rápida de afiação dos grãos. Então, conhecer as condições do dressador durante todo o processo e saber determinar o momento correto da dressagem são de fundamental importância, de forma a reduzir o tempo de operação, evitar a remoção excessiva de material, do rebolo e, portanto, aumentar a eficiência do processo e de seu controle.

Erros de dressagem podem afetar diretamente a qualidade da dressagem devido a flutuações da profundidade de dressagem real, desgaste no dressador e outros distúrbios, associados à experiência e habilidade do operador (Kim & Ahn, 2001). O controle da operação do rebolo e a eliminação de condições indesejáveis podem ser detectados por meio de um sistema online de monitoramento. Por isso, o desenvolvimento de um sistema de monitoramento e controle do processo, em tempo real, é de fundamental importância.

Vários tipos de sinais tais como força, emissão acústica, potência, têm sido usados para o monitoramento do processo de dressagem. Dentre eles, o sinal de emissão acústica (EA) é geralmente considerado o que apresenta maior sensibilidade (Kim & Ahn, 2001).

O sinal de emissão acústica é o resultado de uma rápida liberação de energia que se propaga na forma de uma onda elástica longitudinal transiente em corpos sólidos e pode ser detectada por sensores de emissão acústica. Ela ocorre de modo semelhante em fluidos nos estados gasoso e/ou líquido. A fonte da emissão acústica em corpos sólidos pode ser um agente externo – impacto de um corpo externo sobre o corpo na qual está sendo verificada a emissão acústica – ou uma fonte interna – deformação plástica, fratura, formação de uma trinca, transformação de fase e outros (Liao *et al.*, 2006). Outra vantagem particular do sinal de emissão acústica é que ele tende a se propagar em frequências (tipicamente na faixa de kHz/MHz) bem acima das frequências características atribuídas aos processos de usinagem, como as da rotação de eixos, ou modos estruturais das malhas fechadas da máquina-ferramenta, minimizando a introdução de ruídos no sinal de EA referentes aos fenômenos mencionados.

Desta forma, o sinal de EA é muito adequado por causa da sua capacidade de detectar mecanismos de deformações em microescalas dentro de um ambiente de máquina relativamente ruidoso (Lee *et al.*, 2005).

No processo de retificação ocorrem tanto vibrações forçadas como as auto excitadas. Vibrações forçadas são causadas pela rotação de eixos desbalanceados, colisões entre elementos no final dos seus movimentos, etc. Vibrações auto excitadas são causadas por colisões entre grãos abrasivos e partículas duras da peça, espessura de cavaco variável, atrito e mecanismo da formação de cavaco (Hassui *et al.*, 1998). Acelerômetros são usados no diagnóstico de máquina e também em monitoramento de processos de usinagem. Entretanto, o uso de sinais de vibração no monitoramento do processo de retificação ainda é raro.

Na manufatura, os sistemas inteligentes podem ser comparados a um operador qualificado que emprega seu conhecimento para operar a máquina-ferramenta. Esses sistemas necessitam de sensores com boa precisão e exatidão, baixos custos de implementação e ferramentas computacionais eficientes que possam reproduzir o processo de tomada de decisões do operador. Para o monitoramento e controle da operação de usinagem é necessário conhecer o modelo matemático do processo, sendo este baseado na física das interações do sistema. Porém, devido à complexidade das interações presentes no processo, dificilmente consegue-se obter modelos muito precisos. Assim, métodos de computação leve, como as redes neurais artificiais (RNA) e algoritmos genéticos, podem ser utilizados para modelar o processo, baseando-se em dados coletados. A vantagem dessa abordagem está na sua capacidade de relacionar as saídas e as entradas, mesmo diante de dados imprecisos, faltantes ou incertos (Davim, 2008).

A RNA é definida por Haykin (1998) como uma rede interconectada paralelamente de simples elementos, e suas organizações hierárquicas tem como objetivo interagir com o mundo real assim como uma rede neural biológica. A capacidade de aprendizagem é uma característica fundamental da RNA, e é representada por um conjunto de pesos sinápticos que atuam em cada neurônio da rede.

No contexto da fusão de sensores, a integração de sensores similares pode contribuir integralmente para melhorar a confiabilidade e robustez do sistema de monitoração, tornando-o mais flexível. A utilização, pois, desse sistema de monitoramento reflete a otimização do processo e, por isso, a importância da realização desse trabalho em monitorar a operação de dressagem, utilizando a fusão de sinais de EA e vibração (aceleração) com base em estatísticas derivadas desses sinais. Isso permitirá uma melhor seleção dos dressadores em função de seu desgaste, mantendo assim, as condições ideais de processo.

2 Propósitos

As condições de dressagem podem provocar uma grande influência no desempenho da operação de retificação. Para se ter uma ideia dessa influência, basta dizer que as forças de retificação podem variar cerca de 500% apenas variando-se as condições de dressagem em um mesmo tipo de operação (Oliveira, 1988).

A eficiência da operação de retificação é altamente dependente da superfície do rebolo de tal modo que, segundo Badger & Torrance (2000), os danos térmicos durante o processo de retificação podem ser reduzidos significativamente se adotando parâmetros de operação e estratégias corretas de dressagem.

O processo de dressagem pode ser monitorado para produzir uma qualidade constante na superfície do rebolo. A vida do rebolo pode ser definida pelo monitoramento de mudanças da amplitude e frequência característica do sinal de emissão acústica (Inasaki & Okamura, 1985). Entretanto, ainda há a carência no mercado de dispositivos que são capazes de avaliar a superfície do rebolo durante a operação de retificação em um ambiente de produção.

A aplicação de emissão acústica em monitoramento do processo de retificação tem sido reportada em pesquisas desde 1984. Uma das primeiras conclusões dessas pesquisas foi a alta sensibilidade do nível RMS do sinal de EA na detecção de contato entre o rebolo e a peça (Oliveira & Dornfeld, 2001). Por outro lado, sinais de vibração (aceleração) são muito pouco usados no monitoramento do processo. Talvez pela ausência de pesquisadores interessados em explorar as características desse sinal voltadas para o processo de retificação ou dressagem.

Dada a importância do monitoramento da operação de dressagem e da necessidade crescente de automação do processo de retificação, o presente trabalho pretende monitorar a operação de dressagem com base em métodos de processamento digital de sinais de EA e aceleração, visando caracterizar as condições de desgaste do dressador bem como a classificação do tempo de vida dessa ferramenta. Isso permitirá uma melhor seleção dos dressadores em função de seu desgaste, evitando grandes esforços no contato dressador/rebolo, remoção excessiva de material (rebolo), mantendo assim, as condições ideais de processo.

3 Métodos

3.1 Montagem do banco de ensaios e Experimentação

O banco de ensaios foi desenvolvido de modo a permitir a análise das condições de desgaste da ferramenta de dressagem a partir dos sinais puros

(raw) de emissão acústica (EA) e aceleração, coletados em um osciloscópio da Yokogawa, modelo DL850, a uma taxa de 2 milhões de amostras por segundo.

Os ensaios foram realizados para a operação de dressagem de um rebolo convencional de óxido de alumínio tipo 38220KVS e dimensões 355,6 x 12,7 x 127 mm, da fabricante NORTON. Os parâmetros de operação foram adequadamente controlados para assegurar as mesmas condições para todos os dressadores.

Um dressador de ponta única de diamante sintético (Chemical Vapour Deposition – CVD) foi utilizado nos ensaios de dressagem para o estudo do seu desgaste. As medições da ponta de diamante foram realizadas em intervalos de 20 passadas para cada ensaio, utilizando-se de um sistema ótico e software CAD para cálculo da área desgastada. O ensaio de dressagem consistia de um número de passadas do diamante pela superfície do rebolo até o fim da vida do dressador, ou seja, até que se observava contato de material metálico com o material do rebolo. Um número de 3 repetições foi adotado para os ensaios de dressagem. A velocidade do dressador foi mantida constante em 3,45 mm/s, com profundidade de dressagem de 40 micra, e sem a utilização de fluido de corte para proporcionar um desgaste mais rápido.

Para a obtenção dos sinais de EA puro, em tempo real, foi utilizado um sistema de emissão acústica, composto por um sensor fixo de espectro até aproximadamente 400 kHz e um módulo processador de sinais do fabricante Sensis, modelo DM42. Para os sinais de aceleração foi utilizado um sensor fixo modelo 353B03 e um módulo condicionador de sinal modelo 482B11, ambos do fabricante PCB Piezotronic. Ambos os sensores foram posicionados no suporte do dressador.

3.2 Processamento digital dos sinais e análise quanto ao desgaste do dressador

Com o objetivo de determinar uma correlação entre os sinais de EA, aceleração e a condição de desgaste do dressador, considerou-se inicialmente o conteúdo harmônico dos sinais de EA e aceleração, em diferentes estágios de desgaste. Para a determinação do espectro de frequência foi empregada a transformada rápida de Fourier (FFT) com janela de Hanning, considerando-se para efeito de cálculo 8192 amostras do sinal pertencentes a um trecho, no meio da passada de dressagem. Assim, obteve-se as curvas de amplitude em função da frequência dos sinais de EA puro e aceleração para três condições de desgaste do dressador (novo, meia vida e desgastado).

Observa-se nos espectros dos sinais de EA e aceleração mostrados nas figuras 1 e 2, respectivamente, que ambos os sinais apresentam características diferentes no domínio da frequência

de acordo com sua condição de desgaste. Com base nessa análise, buscou-se realizar um estudo da energia destes sinais em determinadas bandas de frequência selecionadas nessas observações, com o objetivo de obter informações relacionadas com o desgaste do dressador.

Foram consideradas oito bandas de frequências para o sinal de EA, e seis bandas para o

sinal de aceleração, de modo que após os sinais puros serem filtrados em suas respectivas bandas, foi calculado o valor RMS (root mean square) para todas as passadas do ensaio. O filtro digital implementado no MATLAB foi o passa-banda do tipo *Butterworth*, ordem 6, por apresentar a melhor resposta em frequência (menor distorção) para as faixas de frequências do presente estudo.

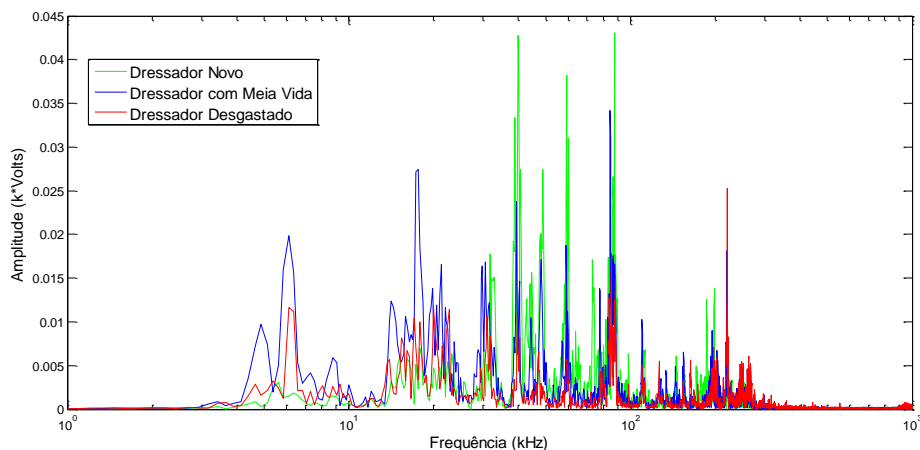


Figura 1. Espectro de frequência do sinal de EA para três condições de desgaste do dressador.

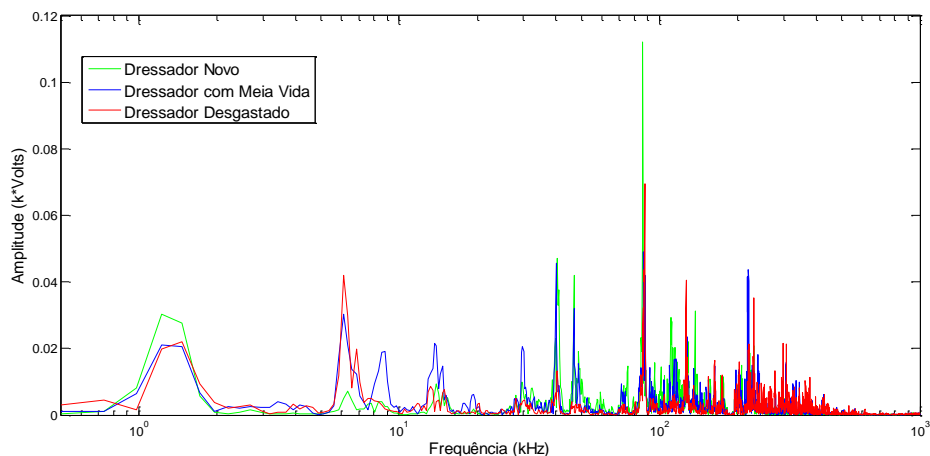


Figura 2. Espectro de frequência do sinal de aceleração para três condições de desgaste do dressador.

Na figura 3 é possível visualizar a evolução dos valores de RMS para o sinal de EA do ensaio do dressador em função das bandas de frequências selecionadas. Observa-se que a oscilação para a condição novo foi grande, enquanto para as outras condições não foi muito expressiva. Observa-se também que para bandas de menores frequências, até a banda 23 – 26 kHz, a ferramenta nova (linha verde) tem os menores valores de RMS, enquanto para frequências mais altas ela tem as maiores médias. É possível observar também que a banda 37 – 44 kHz

apresenta uma grande diferença entre as três condições, juntamente com a banda 54 – 65 kHz.

A figura 4 mostra a amplitude do sinal de aceleração em função das faixas de frequências. Nota-se que para as condições nova e meia vida, não há variações expressivas dos valores RMS ao longo das bandas de frequência, ao contrário da condição desgastada que sofre com muita alteração. Isso mostra uma forte influência da aceleração na caracterização do início do desgaste do dressador.

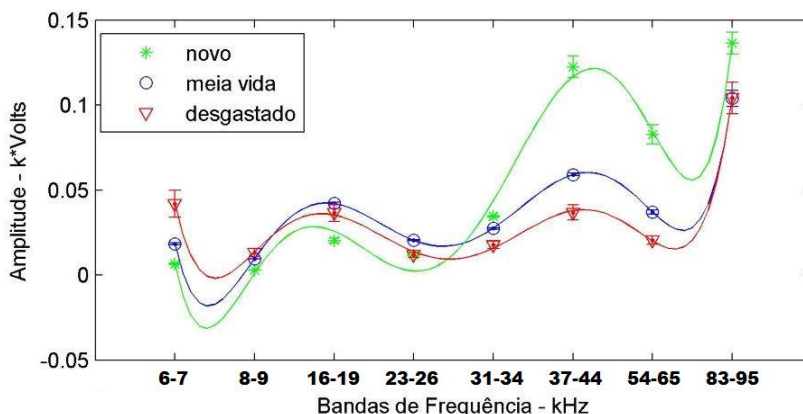


Figura 3. Valores RMS em função das bandas de frequência para o sinal de EA.

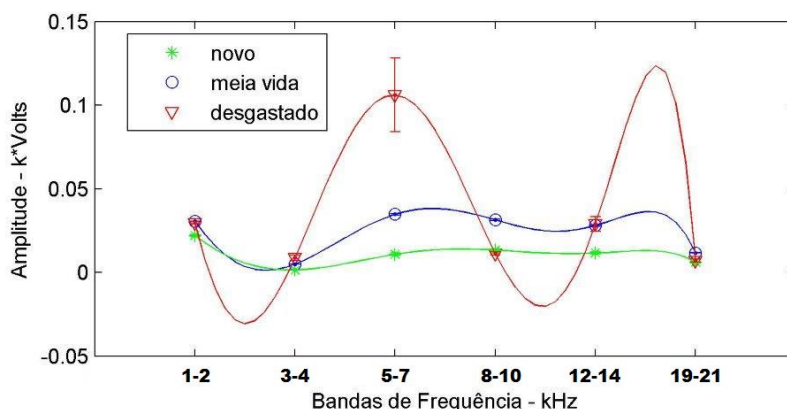


Figura 4. Valores RMS em função das bandas de frequência para o sinal de aceleração

3.3 Modelos Neurais

Foi realizado um estudo para se obter a melhor configuração da rede neural para a classificação das condições de desgaste do dressador.

A entrada dos modelos neurais foi formada por valores RMS das bandas destacadas anteriormente. Os modelos neurais foram então alimentados, sendo usadas configurações com uma e duas entradas, testando todas as combinações possíveis entre as quatorze bandas. A camada de saída possui três variáveis que representam cada condição da ferramenta.

Para o treinamento das redes neurais foram utilizados 500 padrões para cada situação de desgaste. Para a avaliação das redes neurais foram utilizadas as médias das passadas em cada uma das bandas de frequência. O conjunto de dados disponíveis foi dividido aleatoriamente em outros dois conjuntos, um de 80% usado no treinamento e outro de 20% usado na verificação da rede. O conjunto de treinamento foi dividido em 60% para treinamento, 20% para validação, e 20% para teste. Para o treinamento, foram definidas faixas representando os valores 0 a 1 para as três saídas da rede. Assim, valores entre -0,5 e 0,5 representaram a saída 0, enquanto valores dentro do intervalo de 0,51 a 1,5 representaram a saída 1.

O estudo consistiu em testar diferentes números de camadas ocultas, assim como diferentes números de neurônios por camada, variando-se assim, entre uma e três camadas ocultas e entre os múltiplos de 5, até 30 neurônios por camada. Cada estrutura de RN foi treinada cinco vezes para testar a estabilidade da rede, e o erro médio e desvio padrão de cada estrutura foram calculados.

4 Resultados e Discussão

A tabela 1 mostra a configuração de rede que apresentou menor erro médio e desvio padrão de classificação do desgaste do dressador.

Tabela 1. Parâmetros de configuração da rede MLP

Parâmetro	Especificação
Estrutura	5 – 30 – 20
Função de treinamento	Levenberg-Marquardt Backpropagation
No. máx. épocas	2000
Banda freq. EA	37 - 44 kHz
Banda freq. Acel.	3 - 4 kHz
Erro médio	2,59%
Desvio padrão	0,0067

Na figura 5 é apresentada a matriz de confusão da rede neural. Nela, está relacionada a classificação desejada com a classificação realizada.

Matriz de Confusão

Classificação Realizada	N	18 10,6%	0 0,0%	0 0,0%	100% 0,0%
	MV	2 1,2%	115 67,6%	2 1,2%	96,6% 3,4%
	D	0 0,0%	0 0,0%	33 19,4%	100% 0,0%
		90,0% 10,0%	100% 0,0%	94,3% 5,7%	97,6% 2,4%
	N	MV	D		
	Classificação Objetivo				

Figura 5 – Matriz de Confusão da rede MLP

Bons resultados foram obtidos. O sistema mostrou-se estável, com desvio padrão muito baixo. Os erros, de apenas 2,4%, aconteceram em valores de fronteira, como mostrado na figura 6, ou seja, em valores muito próximos aos valores que seriam de outra condição de ferramenta.

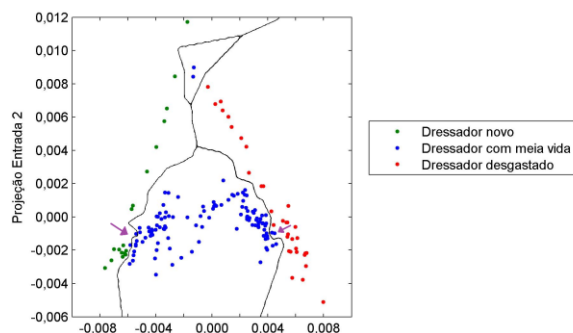


Figura 6 – Resultados obtidos para as diferentes entradas

5 Conclusões

Com base no estudo do espectro de frequência, a partir da análise das energias acústica e vibracional dos sinais de EA e aceleração, respectivamente, foi possível obter curvas características para cada condição de desgaste do dressador. Observou-se, então, que elas sofrem alterações para diferentes faixas de frequência.

Essas curvas foram utilizadas para alimentar um modelo de RNA com o objetivo de classificar a condição em que se encontra o dressador durante a operação de dressagem. Dentre as combinações de configurações de redes neurais testadas, observou-se que a fusão dos sensores de EA e vibração em faixas de frequências pré-determinadas produziu resultados satisfatórios para a classificação dos padrões de desgaste do dressador.

Agradecimentos

Agradecimentos a CAPES, Fapesp e CNPq, pelo apoio concedido, e a empresa Royall Diamond

Ferramentas Diamantadas Ltda., pela doação dos diamantes sintéticos.

Referências Bibliográficas

- Badger, J. A., Torrance, A. (2000). Understanding the causes of grinding burn helps alleviate the problem, *Cutting Tool Engineering Magazine*, U.S., Vol. 52, No. 12.
- Davim, J. P. (2008). *Machining: Fundamentals and Recent Advances*, 2nd ed., London, Springer Verlag.
- Hassui, A., Diniz, A. E., Oliveira, J. F. G., Felipe, J., Gomes, J. F. G. (1998). Experimental evaluation on grinding wheel wear through vibration and acoustic emission. *Wear*, Vol. 217, pp. 7-14.
- Haykin, S. (1998). *Neural Networks: A comprehensive Foundation*, 2nd ed., Prentice Hall.
- Inasaki, I., Okamura, K. (1985). Monitoring of dressing and grinding processes with acoustic emission signals. *Annals of CIRP*, Vol. 34, No. 1, pp.277-280.
- Kim, H. Y., Ahn, J. H. (2001). Process monitoring of centerless grinding using acoustic emission. *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 111, pp. 273-278.
- Lee, D. E., Hwang, I., Valente, C. M. O., Oliveira, J. F. G., Dornfeld, D. A. (2006). Precision manufacturing process monitoring with acoustic emission. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 46, pp. 176-188.
- Liao, T. W., Hua, G., Qu, J., Blau, P. J. (2006). Grinding Wheel Conditions Monitoring with Hidden Markov Model-Based Clustering Methods. *Machining Science and Technology*, Vol. 10, pp. 511-538.
- Linke, B. (2008). Dressing process model for vitrified bonded grinding wheels, *CIRP Annals – Manufacturing Technology*, Vol. 57, No. 1, pp. 345-348.
- Malkin, S., Guo, C. (2008). *Grinding technology: theory and applications of machining with abrasives*. New York: 2^a ed. Industrial Press, 372p.
- Marinescu, I. D., Hitchiner, M., Uhlmann, E., Rowe, W. B. & Inasaki, I. (2007). *Handbook of machining with grinding wheels*, 1a Ed., Boca Raton, FL: CRC Press, Taylor & Francis Group.
- Oliveira, J. F. G., Dornfeld, D. A. (2001). Application of AE Contact Sensing in Reliable Grinding Monitoring, *CIRP Annals*, Vol. 50, No. 1, pp. 217-220.
- Oliveira, J. F. G. (1988). *Análise do Macroefeito de Dressagem de Rebolos em Operações de Retificação*, Tese de Doutorado em Engenharia Mecânica na Escola de Engenharia de São Carlos, USP.