



VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA
VI NATIONAL CONGRESS OF MECHANICAL ENGINEERING
18 a 21 de agosto de 2010 – Campina Grande – Paraíba - Brasil
August 18 – 21, 2010 – Campina Grande – Paraíba – Brazil

LÓGICA ANFIS APLICADA NA PREDIÇÃO DE RUGOSIDADE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO PLANA DE CERÂMICAS AVANÇADAS

Marcelo Montepulciano Spadotto¹, spadottomm@gmail.com
Hildo Gillardi Junior¹, hildogjr@gmail.com
Paulo Roberto de Aguiar¹, aguiarpr@feb.unesp.br
Eduardo Carlos Bianchi², bianchi@feb.unesp.br
Carlos Alberto Fortulan³, cfortula@sc.usp.br

Universidade Estadual Paulista - Bauru Campus – Departamento de Engenharia Elétrica¹/Mecânica², Faculdade de Engenharia, Luiz Edmundo Carrijo Coube Ave., 14-01, Vargem Limpa, CEP: 17033-360.

Universidade de São Paulo³, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador são-carlense, 400 . CEP 13566-590, São Carlos – SP.

Resumo: *O presente trabalho aborda a aplicação da lógica ANFIS na predição de rugosidade de cerâmicas à base de óxido de alumínio no processo de retificação plana. Para isso, foi utilizada uma retificadora plana equipada com um sensor de emissão acústica devidamente alocado e um transdutor de potência ligado ao acionamento do motor que rotacionava um rebolo diamantado. Os corpos de provas, utilizados no trabalho, foram produzidos por prensagem e sinterização formando barras retangulares de alumina comercial. Os sinais coletados durante os ensaios de emissão acústica (RMS) e potência de corte passaram por um processamento digital de sinais, dando origem as estatísticas como a média, o desvio padrão, DPKS e o DPO. Essas estatísticas, assim como os sinais de RMS da emissão acústica e potência de corte, foram utilizados como valores de entradas para o modelo ANFIS. Os valores de saída, para treinamento e validação do modelo, foram as medidas de rugosidade realizadas durante os ensaios. Os resultados mostraram que a lógica ANFIS é uma ótima ferramenta quando aplicada na predição de rugosidade superficial no processo de retificação.*

Palavras-chave: *Retificação, Emissão Acústica, Processamento de Sinais, Anfis.*

1. INTRODUÇÃO

A retificação automática e inteligente é utilizada no mundo por indústrias para produzir peças com alta qualidade de acabamento e geometria. A rugosidade é o fator mais importante para avaliar a qualidade da peça usinada. No final do processo, o acabamento superficial afeta as características das peças, dentre elas, a resistência à fratura e fadiga, e ainda, a superfície de atrito (Samhour e Surgenor, 2005).

A predição e a identificação da rugosidade é o objeto de estudo de muitos pesquisadores. Samhour e Surgenor (2005), afirmam que o monitoramento da retificação tem o papel de detectar problemas, providenciar informações para aperfeiçoar e controlar o processo, e por fim, contribuir para estabelecer parâmetros, os quais são necessários para determinar as melhores condições de operação.

A necessidade de se aprimorar os componentes de equipamentos, melhorando sua aplicação em determinados ambientes, resultou na utilização de novos materiais. O avanço tecnológico, na produção de materiais cerâmicos, tornou possível a aplicação de técnicas, que anteriormente eram utilizadas em metais. Assim, transformações de fase, ligas, técnicas de têmpera e revenimento foram empregados em uma gama de cerâmicas.

Os processos normalmente utilizados na usinagem de cerâmica após a sinterização com o objetivo de obter superfícies de elevada qualidade e acurácia geométrica são: lapidação, brunimento e retificação. Destes, a retificação é o processo mais utilizado, devido às taxas de remoção maiores que o brunimento e as limitações geométricas do processo de lapidação (Jahanmir et. al., 1998).

Apesar de vários esforços em pesquisas sobre retificação de cerâmicas, nas últimas duas décadas, muito ainda precisa ser feito para se padronizar modelos teóricos com o objetivo de se prever a rugosidade, e assim melhorar a qualidade do produto e aumentar a produtividade a fim de reduzir o custo de fabricação (Agarwal e Rao, 2005). Ainda, a medição automática da rugosidade, durante o processo de retificação, é de difícil aplicação. Alguns sistemas utilizam laser, no entanto, têm um alto custo e não são adequados para o ambiente de retificação.

O uso de inteligência artificial, para estimação de variáveis de sistemas de controle, tem aumentado consideravelmente. A característica de adaptação, desses sistemas, é vista com bons olhos, em controles de malha fechada. A maioria dessas aplicações, em controle, tem por base a lógica fuzzy e redes neurais artificiais.

Os sistemas fuzzy sozinhos não são capazes de aprender novas regras, e a boa definição das funções de pertinência, nem sempre é uma tarefa fácil. As redes neurais, por outro lado, não conseguem interpretar o conhecimento impreciso como a lógica fuzzy. A união das duas lógicas proporciona um sistema fuzzy com habilidade de obter novas regras, remover as regras irrelevantes para o sistema, sem a presença de um especialista.

Assim, o presente trabalho tem por objetivo desenvolver uma metodologia para a determinação da rugosidade de cerâmicas, no processo de retificação plana, utilizando lógica ANFIS (Artificial Neuro-Fuzzy Inference System). Essa possibilitará o conhecimento das relações existentes entre as variáveis de entrada e de saída, prevendo o padrão do comportamento do processo.

2. MATERIAIS CERÂMICOS E RETIFICAÇÃO

As características dos corpos cerâmicos são decorrentes de sua composição química e de seu processo de fabricação (Schuller et. al., 2008). No processo de fabricação das cerâmicas, durante a queima da massa, ocorrem reações térmicas, em seu interior, formando as fases determinantes para as características mecânicas finais do produto (Dutra et. al., 2002). As boas propriedades desses materiais são decorrentes da presença de fases cristalinas, como o quartzo e mullita originados na queima da massa e no resfriamento da cerâmica.

Na queima da cerâmica, podem ocorrer muitos defeitos superficiais, como trincas, alta rugosidade e ranhuras, que tem influência direta na diminuição da qualidade estrutural mecânica. O processo de retificação permite retirar essa camada defeituosa do material, melhorando suas propriedades (Zheng et. al., 2000; Fischer et. al., 2008).

Entretanto, o processo de retificação, sendo a fase mais importante do processo de usinagem de cerâmicas avançadas, é muito complexo e envolve o contato entre um grande número de partículas abrasivas com a superfície da peça. A retificação permite um controle preciso de dimensão, e um bom acabamento superficial, mas requer habilidade do operador da máquina (Bianchi et. al., 2003).

Tonshoff et. al. (1996), Jakobuss e Fiecoat (2000), Chand e Guo (2000), afirmam que o custo envolvido, na retificação de cerâmicas, é o principal componente do custo final de peças cerâmicas de precisão. Assim, a viabilidade econômica, de cerâmicas de alto desempenho, depende intrinsecamente da eficiência do processo de retificação. No entanto, a redução do custo de retificação, através do aumento da taxa de remoção, é limitada pelos danos superficiais e sub-superficiais que podem comprometer o desempenho da peça durante a aplicação.

Para se aperfeiçoar o processo de retificação é necessário conhecer a relação “G”, que é relacionada com o tempo de vida útil e desempenho da ferramenta de corte. Essa relação é entre o volume de material removido “Zw” e o correspondente volume de rebolo gasto na operação “Zs”, ambos em mm³ (König, 1980).

A temperatura na região retificada tem influência direta nessa relação, pois quando a temperatura é elevada (alta fricção entre rebolo e peça e baixa refrigeração), o desgaste superficial da ferramenta é acentuado e pode influenciar na rugosidade final da peça (Xu et. al., 2006; Alves et. al., 2006). A utilização de fluidos, com grande quantidade de óleo lubrificante, pode reduzir o desgaste e aumentar a relação (Alves et. al., 2006).

Os melhores lubrificantes são os óleos integrais, porém são extremamente nocivos à saúde do trabalhador. Assim, os lubrificantes mais usados são emulsões sintéticas que podem ser recicladas e garantem boa qualidade de refrigeração e lubrificação (Alves et. al., 2006; Pereira et. al., 2006; Yin et. al., 2005; Shen et. al., 2002; Bernejee et. al., 2008; Dhar et. al., 2006; Souza et. al., 2004).

Outro parâmetro, não menos importante, a ser controlado na retificação é a dressagem. Bianchi (1990), em seu trabalho, aborda dois efeitos resultantes da operação de dressagem: o macroefeito e o microefeito. O macroefeito é formado em função do formato do dressador, da profundidade de penetração e do passo de dressagem da operação. Esse efeito determina a posição na qual as arestas dos grãos abrasivos estão localizadas, em outras palavras, é a rosca (ondulação teórica Wt) que o dressador produz na face de corte do rebolo. O microefeito é formado pelo desprendimento dos grãos desgastados (com baixa ancoragem na liga) e fratura dos grãos que não se desgastaram por completo, dando origem a novas arestas de corte.

A agressividade das arestas depende das condições de dressagem e da friabilidade, que é a capacidade de formar novas arestas de corte quando o grão abrasivo é fraturado. Portanto, o microefeito está relacionado com o tipo de aresta que é formada nos grãos abrasivos, podendo tornar o rebolo mais, ou menos, agressivo. Dessa forma é possível listar como objetivos da dressagem (Bianchi et. al., 1994): Obtenção da concentricidade da face de trabalho do rebolo com o eixo de rotação; Perfilamento da face de trabalho do rebolo para a operação de forma; e Remoção dos grãos abrasivos gastos para melhorar a agressividade da face de trabalho do rebolo.

3. PROCESSAMENTO DE SINAIS

A aquisição da emissão acústica tem sido utilizada por muitos pesquisadores. Kwak e Song (2001) usaram a emissão acústica para detectar problemas causados no processo de retificação. O valor eficaz (RMS) do sinal de emissão acústica tem sido o parâmetro essencial de estudos anteriores de retificação sobre uma banda de frequências previamente selecionada. A Equação (1) mostra o valor do sinal RMS, onde **T** é o tempo de integração, **t** é o ponto de

início de análise no tempo para o cálculo do RMS, N é o número discreto de dados do sinal no intervalo de T e S é o sinal (Nilson, 2003).

$$S_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^{+T} S^2(t).dt} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N S^2(i)} \quad (1)$$

Outros parâmetros são utilizados para monitoramento da retificação. Um deles é a estatística DPO, proposta por Aguiar (1997), que consiste na relação entre o desvio padrão do sinal RMS de emissão acústica e o valor máximo da potência de corte na passada do rebolo. Na Equação (2), EAs e POTmax são, respectivamente, o desvio padrão do sinal RMS da emissão acústica e o valor máximo da potência de corte na passada.

$$DPO = EAs.POT \max \quad (2)$$

A fim de se aumentar a sensibilidade do parâmetro DPO, Dotto (2006) desenvolveu a estatística DPKS, a qual não se atenta para a amplitude do sinal e sim para a variação entre as passadas. Este parâmetro possibilitou encontrar o momento exato em que a queima tem o início, e no caso da dressagem, é obtido o momento exato do ponto ideal de parada do processo. A Equação (3) representa a estatística DPKS calculada, onde i é o índice da potência que varia de 1 até m pontos de cada passada.

$$DPKS = \left(\sum_{i=1}^m (POT(i) - S(POT))^4 \right).S(EA) \quad (3)$$

4. ANFIS

O sistema ANFIS se baseia na equivalência funcional, sob certas restrições, entre as redes RBF (redes neurais de função de base radial) e os sistemas fuzzy do tipo TSK (Takagi e Sugeno, 1985; Sugeno e Kang, 1988). Uma única saída existente é calculada diretamente como uma ponderação das entradas, segundo as regras fuzzy, sendo essas regras, base de conhecimento, determinadas por um algoritmo computacional baseado em redes neurais. A Figura (1) exemplifica o modelo ANFIS com duas variáveis de entrada (x e y) e duas regras (Evsukoff e Almeida, 2003).

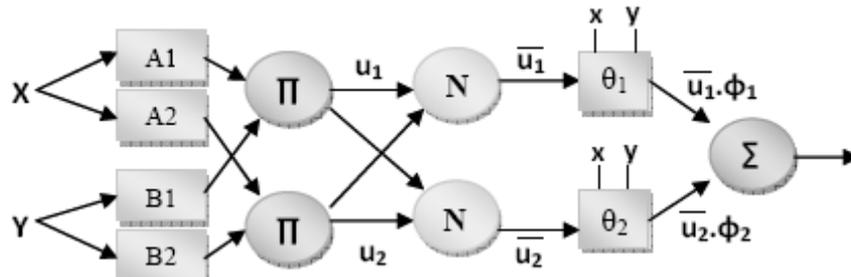


Figura 1. Estrutura de um sistema ANFIS equivalente ao modelo TSK (adaptado de Evsukoff e Almeida, 2003).

Para se obter uma modelagem ANFIS de bom desempenho, é necessário levar em consideração o número inicial de parâmetros e a quantidade de entradas e regras do sistema (Lezanski, 2001). Esses parâmetros são determinados de forma empírica, e usualmente é criado um modelo inicial com funções de pertinência igualmente espaçadas. Entretanto, esse método nem sempre é eficiente por não mostrar quantos grupos relevantes de entrada existem. Para isso, há algoritmos que ajudam a determinar a quantidade de funções de pertinência, e assim, é calculado o número máximo de regras fuzzy.

O algoritmo de clusterização (agrupamento) subtrativa (Chiu 1994; Chiu 1996) é usado para identificar centros da distribuição de dados. Neles, são centradas as curvas de pertinência com valores de pertinência igual a 1. É utilizado, pelo algoritmo, o número de cluster ou o tamanho do raio de vizinhança e o número de épocas de iteração. Em cada passada pelo algoritmo, esse procura um ponto que minimize o somatório do potencial com os pontos da vizinhança. O potencial é calculado pela Eq. (4).

$$\rho_i = \sum_{j=i}^n \exp\left(-\frac{4}{r_a^2} \cdot \|x_i - x_j\|^2\right) \quad (4)$$

Onde ρ_i é o potencial do possível cluster, x_i é o possível centro do cluster, x_j é cada ponto da vizinhança do cluster que estará agrupado nele, e n é o número de pontos da vizinhança.

Segundo Lee et. al. (2005), ANFIS é um sistema de inferência fuzzy introduzida na estrutura de trabalho de uma rede neural fuzzy adaptativa. Usando um procedimento de aprendizado híbrido, o sistema ANFIS é capaz de construir um mapeamento de entrada-saída baseado no conhecimento humano e em pares de dados de entrada e saída. O método ANFIS é superior a outros métodos de modelagem, tais como auto-regressivo, redes neurais com correlação em cascata, redes neurais com algoritmo *back-propagation*, polinômios de sexta ordem, e métodos de predição linear (Jang, 1993).

5. METODOLOGIA

Para avaliar o comportamento e coletar os sinais do processo de retificação plana de cerâmicas avançadas, foi criado um banco de ensaios no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA). Foi utilizada uma máquina retificadora modelo RAPH – 1055, da marca Sulmécânica, com um rebolo de Diamante Sintético de especificações SD 126 MN 50 B2. A dressagem foi realizada com um dressador de aglomerado de diamante.

Os corpos de prova, formados por barras retangulares de alumina comercial, composta por 96% de óxido de alumínio e 4% de óxidos fundentes como SiO_2 , CaO e MgO , foram produzidos por prensagem e sinterização. Esses tinham as dimensões de 117 x 60 x 8 mm (C x A x L).

A Tabela (1) mostra os parâmetros ajustados para o sistema.

Tabela 1. Parâmetros de Usinagem dos Ensaios.

Velocidade do Processo		Especificações da refrigeração	
Velocidade Periférica do Rebolo (Vs)	35m/s	Tipo de Fluido	Convencional, Emulsão de Água e óleo
		Fluido Refrigerante	Rocol Ultracut 370
		Concentração	5%
Velocidade da Peça, mesa (Vw)	2,3m/min	Velocidade do Fluido	3m/s
		Vazão do Fluido no Bocal Retangular	27,5l/min
		Pressão do Fluido no Sistema	Menor que 0,2kgf/cm ²

Durante o processo de retificação, o sensoriamento da emissão acústica foi feito por um sensor do tipo piezoelétrico preso ao suporte que fixa a peça à mesa retificadora, conectado a um módulo modelo DM42 da empresa Sensis no qual, é possível configurar filtros e ganhos de sinal de entrada e ainda permite escolher o tipo de sinal coletado: puro ou RMS. A potência de corte do sistema foi coletada através de um módulo de potência elétrica que é conectado na entrada de alimentação do conversor de frequência. A medição da rugosidade foi realizada através do rugosímetro digital Surtronic 3+ do fabricante Taylor Hobson.

Os ensaios, para aquisição dos sinais e coleta da rugosidade, foram realizados para três diferentes tipos de profundidade de corte: 20 μm , 70 μm e 120 μm . Antes de iniciar cada ensaio, foi realizada a dressagem do rebolo e, para cada um deles, removeu-se a mesma quantidade de material fazendo com que o total de passadas, por ensaio, variasse para cada profundidade. Foi coletado, para cada uma das passadas, o sinal de potência de corte e emissão acústica RMS. Mediu-se a rugosidade, nos ensaios, através de dez paradas programadas. A estrutura do banco de ensaios é mostrada na Fig. (2).

Os sinais advindos da usinagem, potência de corte e emissão acústica, passaram por um processamento de sinais para o cálculo das estatísticas: média da EA, desvio padrão da EA, média da potência de corte, desvio padrão da potência de corte, DPO e o DPKS. Esses valores foram utilizados como entradas da lógica ANFIS. Com os valores obtidos das rugosidades, foram realizadas regressões para se obter mais dados para treinamento das redes.

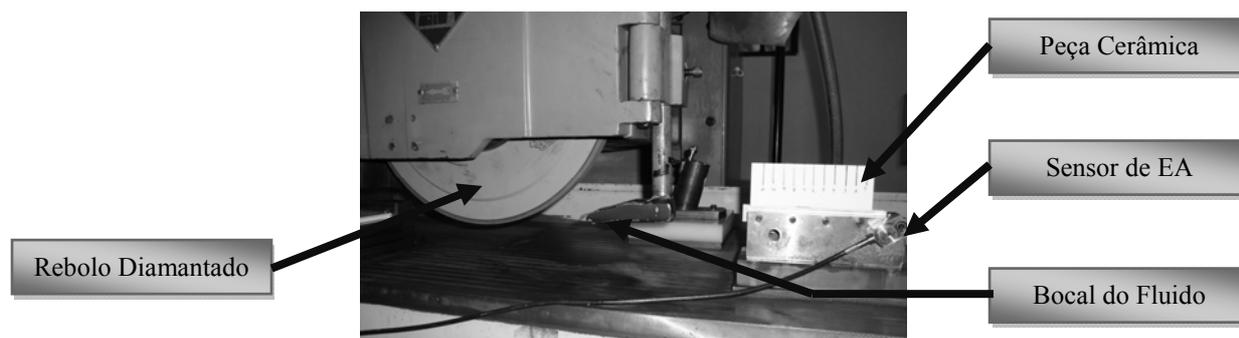


Figura 2. Estrutura do Banco de Ensaios

O esquema do procedimento para a realização deste trabalho é indicado na Fig. (3).

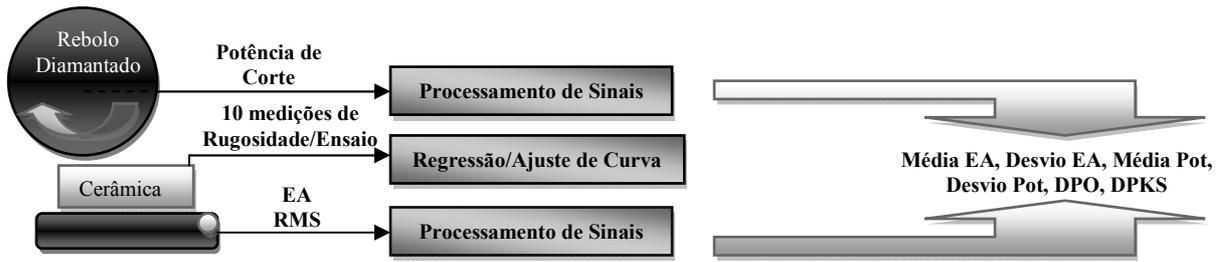


Figura 3. Esquema de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais.

6. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os valores de rugosidade de uma peça, no processo de retificação, tendem a diminuir ou estabilizar. Para se ajustar uma curva que representa dados extraídos, é necessário, apenas, um eixo temporal, que para este trabalho foi considerado o número de passadas. Assim, as medidas, obtidas nos ensaios, foram utilizadas para realizar a regressão que deu origem a uma curva ajustada aos valores reais de rugosidade.

A Equação (5), Equação (6) e Equação (7) representam, respectivamente, a expressão matemática para a rugosidade do ensaio de 20 μ m, 70 μ m, 120 μ m. Nelas, r é a rugosidade em função do número da passada no ensaio, p é o número da passada e m é a quantidade de material removido no ensaio em mm³.

$$\begin{aligned} r(m) &= -1,453 \cdot 10^{-14} \cdot p^5 + 3,221 \cdot 10^{-11} \cdot p^4 - 2,575 \cdot 10^{-8} \cdot p^3 + 9,819 \cdot 10^{-6} \cdot p^2 - 2,349 \cdot 10^{-3} \cdot p + 8,914 \cdot 10^{-1} \\ p(m) &= (860/16000) \cdot m \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} r(m) &= +2,934 \cdot 10^{-10} \cdot p^4 - 2,171 \cdot 10^{-7} \cdot p^3 + 5,597 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 - 5,871 \cdot 10^{-3} \cdot p + 7,339 \cdot 10^{-1} \\ p(m) &= (250/16000) \cdot m \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} r(m) &= -1,865 \cdot 10^{-7} \cdot p^3 + 6,523 \cdot 10^{-5} \cdot p^2 - 28,178 \cdot 10^{-3} \cdot p + 1,036 \\ p(m) &= (150/16000) \cdot m \end{aligned} \quad (7)$$

A partir da Equação (5), da Equação (6) e da Equação (7), descritas acima, gerou-se os gráficos de rugosidade média (Ra) pelo volume de material removido em mm³, que são mostrados na Fig.(4). Os círculos presentes dos gráficos são as medidas da rugosidade, as barras horizontais são os desvios padrões em relação ao valor real. As curvas foram utilizadas para gerar mais dados de saída para as redes ANFIS.

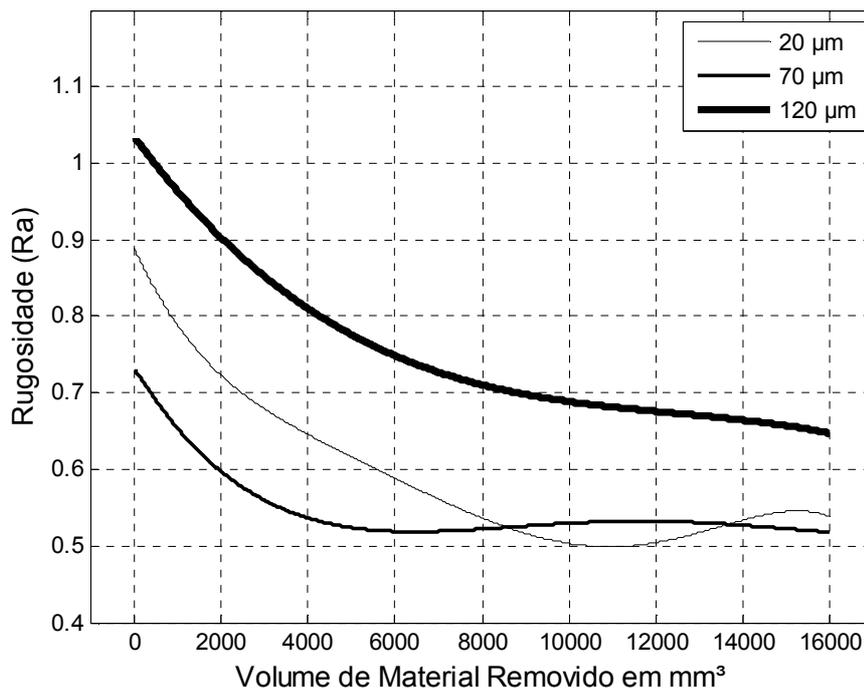


Figura 4. Curvas ajustadas para os Ensaios de profundidades de corte 20 μ m, 70 μ m, 120 μ m.

Os sinais captados no processo de retificação, emissão acústica e potência de corte, foram devidamente processados digitalmente, usando o software Matlab 6.5, dando origem as estatísticas mostradas na Fig. (3). Cada dado, gerado pela curva de ajuste da rugosidade, foi atribuído ao valor correspondente de cada estatística. Assim, formaram-se os pares de entradas e saídas, que serviram para treinamento e modelagem das redes ANFIS, tipo sugeno.

A princípio foi realizada uma análise combinatória de entradas no modelo ANFIS. Foram testados modelos com uma entrada, duas entradas e três entradas. Os parâmetros usados nos modelos não foram modificados durante a fase de escolha e estão contemplados na Tab. (2).

Tabela 2. Parâmetros usados no modelo de busca.

Número de Funções de Pertinência por Entrada	3
Tipo da Função de Pertinência	Gbellmf, função gaussiana (padrão)
Erro Alvo	0,1 (padrão)
Número Máximo de Iterações	10 (padrão)
Coefficiente de Aprendizado	1,5 (padrão)
Coefficiente de Relaxação	0,5 (padrão)
Método de Treino	Híbrido (padrão)

Os resultados dos testes são apresentados na Fig. (5) e analisando os gráficos, é notório que o modelo ANFIS com três entradas apresenta um menor erro, sendo que o melhor é o composto pelas entradas de emissão acústica, desvio da potência e a estatística DPO. O erro RMS para esse modelo é 0,02. Ainda, foi constatado, nessa fase, que a estatística DPKS não é um bom parâmetro para ser utilizado como entrada do modelo final, pois apresentou erros muito grandes excedendo o limite das variáveis do Matlab. Não foram testados, também, mais do que três entradas por tornar o processamento inviável e lento.

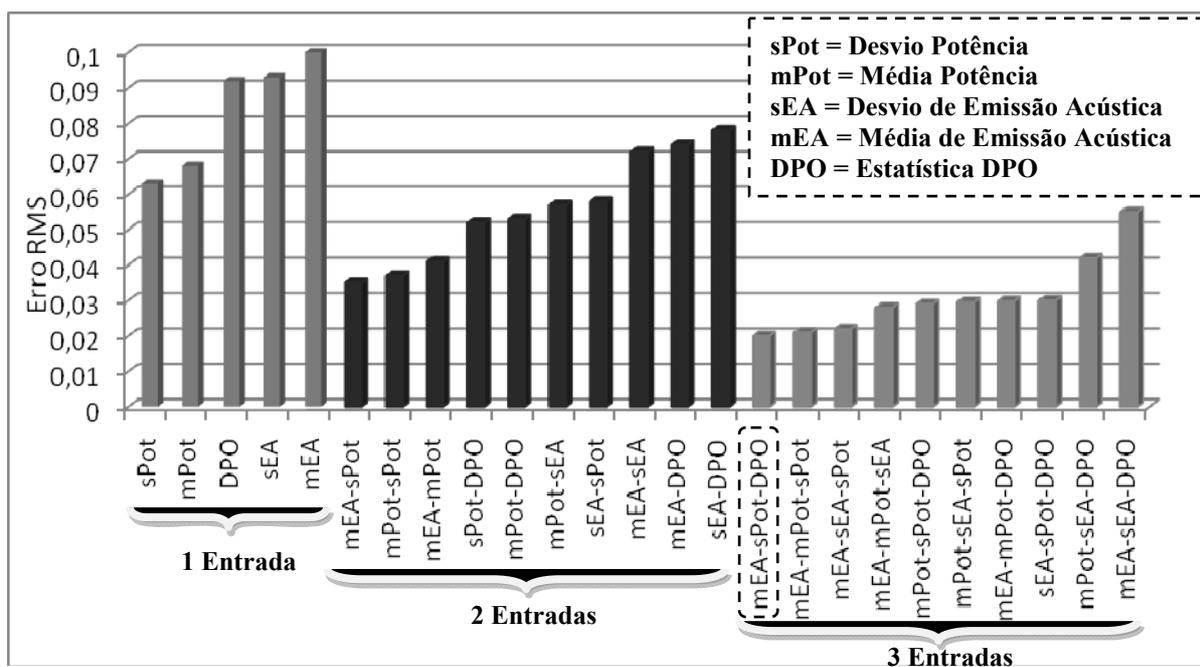


Figura 5. Erros RMS para os modelos de Redes ANFIS: 1 entrada, 2 entradas e 3 entradas. (melhor rede: média-EA, Desvio-Pot e DPO).

Após a definição do modelo que melhor representa o comportamento do sistema, foi iniciada a fase de treinamento. Existem dois métodos de treinamento, o híbrido que modifica toda a rede (os parâmetros antecedentes e sucedentes) e o backpropagation que tem desempenho igual a uma rede neural da propagação rápida. O método híbrido apresentou-se de forma mais estável que o backpropagation, durante o processo, chegando a um erro muito menor, e por isso, foi adotado para o trabalho. O método de clusterização subtrativa teve sua aplicação bem sucedida para a criação do modelo inicial antes do treinamento, pois os erros e o tempo de processamento foram minimizados.

Com o modelo treinado e verificando a tendência de convergência do erro para o erro desejado, realizou-se a busca por parâmetros ideais de treinamento. Foram variadas as quantidades de funções de pertinência por entrada, e assim, analisou-se o erro geral do conjunto de teste (%) e o erro geral relacionado às medidas reais (%). Na Tabela (3), o erro menor observado, foi para o modelo de 5 funções de pertinência, pois para 6 funções de pertinência por entrada, o modelo começou a viciar, prevendo alguns valores e errando consideravelmente em outros.

A Tabela (4) mostra os parâmetros finais do modelo ANFIS definitivo e na Fig. (6) é apresentada a estrutura definitiva para predição de rugosidade do corpo cerâmico.

Tabela 3. Resultados obtidos para variações de pertinência.

Número de Funções de Pertinência	Erro Geral do Conjunto de Teste (%)	Erro Geral Relacionado à Medidas Reais
2	8,01	7,41
3	6,75	6,73
4	6,00	6,43
5	3,96	6,28
6	3,69	5,93

Tabela 4. Parâmetros definitivos do modelo ANFIS (sugeno).

Número de Funções de Pertinência Por Entrada	5
Tipo de Função de Pertinência	Gbellmf, função Gaussiana
Erro Alvo	0,001
Número Máximo de Iterações	100
Coefficiente de aprendizado máximo	1,1
Coefficiente de Relaxação	0,6
Coefficiente de Aprendizado do Primeiro Passo	0,01
Método de Treino	Híbrido

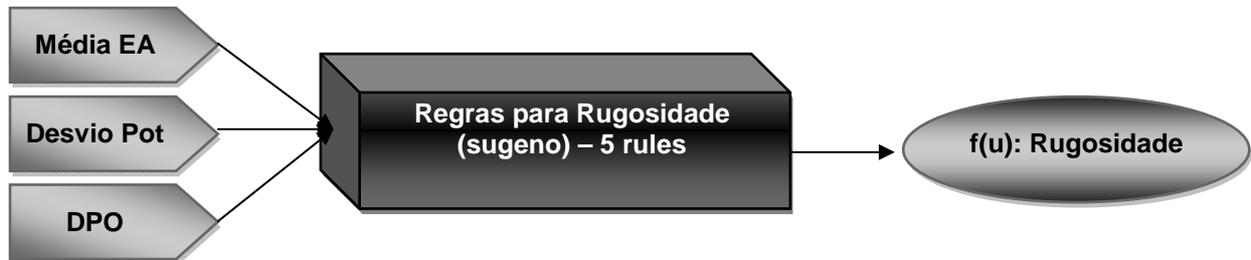


Figura 6. Modelo Final da Rede ANFIS para predição de rugosidade.

A partir do modelo criado, foi validado através da utilização de valores gerados pela curva de rugosidade. O resultado é mostrado na Fig. (7). Observa-se uma boa predição com erro total de aproximadamente 4%.

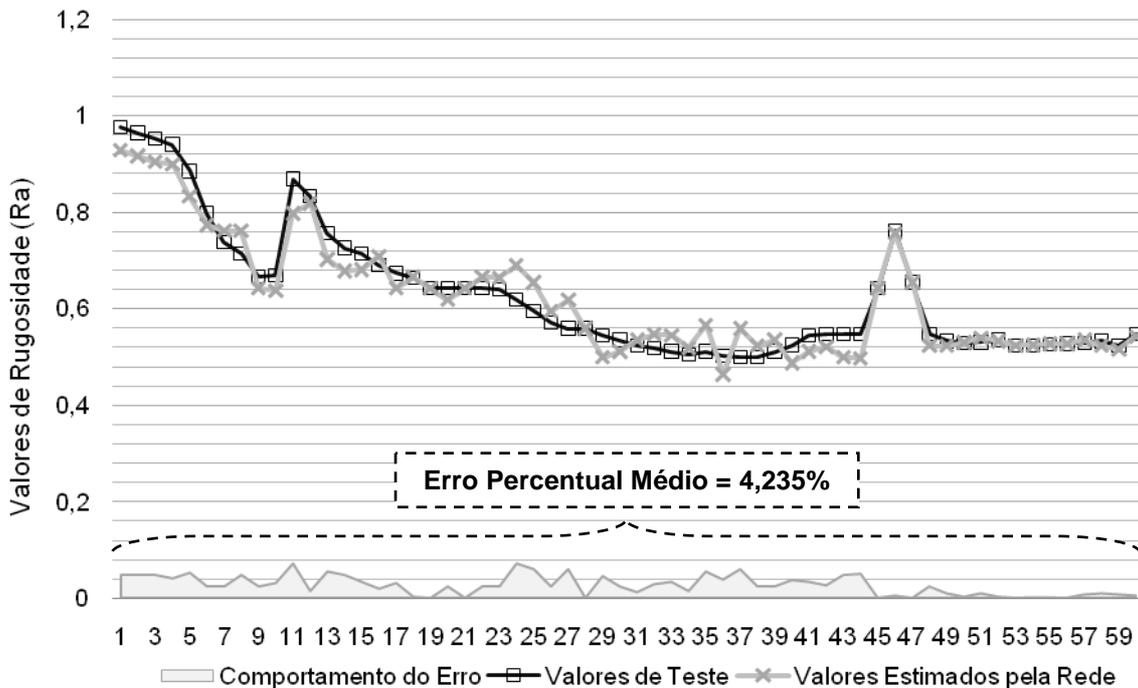


Figura 7. Inferência da Rugosidade pela Rede ANFIS, para o conjunto de teste gerado pela curva ajustada de rugosidade.

Para se garantir que a rede adquiriu a característica de prever a rugosidade para o sistema, foram utilizados os valores reais medidos, para cada profundidade de corte, os quais não participaram da fase de treinamento. A predição da rugosidade mostrou-se eficaz, Fig. (8), 7,23% para as medidas do ensaio de 20 μm , 4,83% para o ensaio de 70 μm e 6,55% de erro para o ensaio de 120 μm .

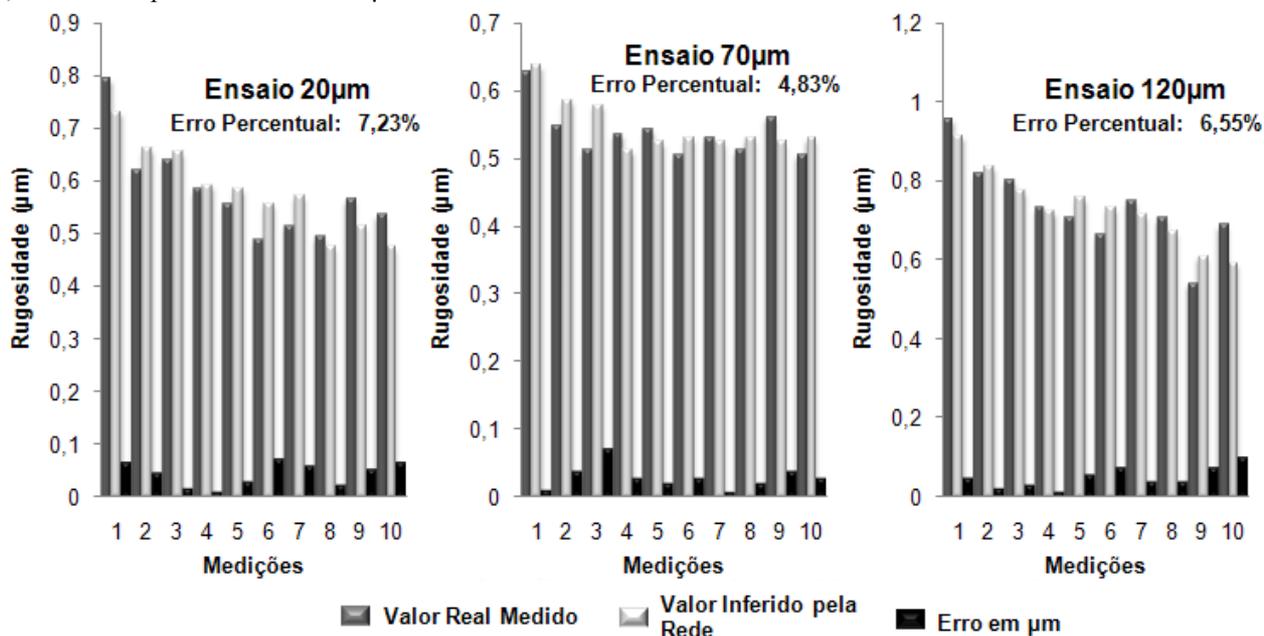


Figura 8. Predição de rugosidade realizada, pela Rede ANFIS, para os valores medidos durante os ensaios.

7. CONCLUSÕES

A exatidão da rede ANFIS de predição da rugosidade vem demonstrar que esse tipo de rede é um bom sistema de predição de dados, pois devido à característica híbrida (neural e fuzzy) consegue prever corretamente os valores do sistema, os quais não são relacionados facilmente.

O que difere este trabalho de outros já realizados, para prever valores de rugosidade usando lógica ANFIS, é o tipo de sensoriamento aplicado. Os sensores piezoelétricos para coleta dos sinais de emissão acústica e os transdutores de potência foram muito utilizados na detecção de queima no processo de retificação de aço. Os sinais provenientes desses sensores, processados digitalmente deram origem a estatísticas que retrataram com fidelidade as condições superficiais das peças. A aplicação desse tipo de sensoriamento com a rede ANFIS resultou em uma ótima ferramenta de baixo custo para predição de rugosidade em cerâmicas avançadas.

O resultado obtido na fase de treinamento da rede ANFIS dependeu das seleções dos melhores dados de entrada e saída da rede. O ajuste das curvas, para as medidas realizadas de rugosidade, permitiu que fossem gerados mais dados para o treinamento, criando um modelo que generalizasse as regras do sistema.

Os testes realizados, para encontrar o melhor conjunto de entradas da rede e ainda, o uso do método de clusterização subtrativa para estimar os clusters iniciais das funções de pertinência contribuíram para se obter um treinamento mais rápido com um baixo custo computacional de processamento.

A rede ANFIS testada com três entradas teve um menor erro RMS do que as com uma e duas entradas, e o melhor conjunto encontrado foi o que tinha como parâmetros a média da Emissão Acústica (mEA), o desvio padrão da Potência de Corte (sPot) e o DPO.

Os valores de predição da rugosidade tiveram um erro percentual de 7,23% para as medições realizadas nos ensaios de 20 μm , 6,55% para as medidas do ensaio de 120 μm e o menor erro de 4,83% para o ensaio de 70 μm . Após a construção do modelo ANFIS e depois do treinamento, foi possível obter as funções de pertinência, com seus centros alocados, os conjuntos de regras para predição da rugosidade e o conjunto de equações de saída do modelo, tornando possível a aplicação do sistema em um ambiente de controle.

Para trabalhos futuros fica proposta a utilização de outros materiais cerâmicos, rebolos de outros modelos, e a utilização de novas redes a fim de se aprimorar os resultados obtidos. Um aperfeiçoamento do sistema seria utilizar uma rede CANFIS que é o modelo ANFIS com múltiplas camadas de saída, prevendo mais de um parâmetro do sistema de retificação, como, por exemplo, o desgaste da ferramenta de corte.

8. AGRADECIMENTOS

Os autores querem expressar sua gratidão à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, IFM – Instituto Fábrica do Milênio, e CNPq – Conselho Nacional pelo Desenvolvimento Científico e Tecnológico pelo suporte financeiro concedido a essa pesquisa.

9. REFERÊNCIAS

- Agarwal, S., Rao, P.V., 2005, "A Probabilistic Approach to Predict Surface Roughness in Ceramic Grinding", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol. 45, pp. 609-616.
- Aguiar, P.R., 1997, "Monitoramento da Queima Superficial em Processo de Usinagem por Retificação Usando a Potência Elétrica do Motor de Acionamento e Emissão Acústica", Tese de Doutorado apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, USP.
- Alves, S.M., Oliveira, J.F.G., 2006, "Development of New Cutting Fluid for Grinding Process Adjusting Mechanical Performance and Environmental Impact", *Material Processing Technology*, Vol. 179, pp.185-189.
- Benerjee, S., Ghosal, S., Dutta, T., 2008, "Development of a Simple Technique for Improving the Efficacy of Fluid Through the Grinding Zone", Vol. 197, pp. 306-313.
- Bianchi, E.C., Aguiar, P.R., Silva, E.J., Junior, C.E.S., Fortulan, C.A., 2003, "Advanced Ceramics: Evaluation of Ground Surface, *Cerâmica*, Vol. 49, pp. 174-177.
- Bianchi, E.C., 1990, "O Comportamento da Vida de Rebolos na Retificação Para a Produção de Componentes de Precisão", XI Seminário Anual ADUNESP – Engenharia e Suas Aplicações, Guaratingueta, pp. 147-154.
- Bianchi, E.C., Oliveira, J.F.G., 1994, "Comportamento das forças de corte em rebolos de CBN com Ligante Resinóide e Sua Influência no Desempenho do Processo de Retificação", *Revista Engenharia e Ciências Aplicadas*, Vol. 2, São Paulo, Brasil, pp. 79-90.
- Chand, R.H., Guo, C., 2000, *Ceramic Industry*, Vol. 150, 31p.
- Chiu, S.L., 1994, "Fuzzy Model Identification Based on Cluster Estimation", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Vol. 2, pp.267-278.
- Chiu, S.L., 1996, "Selecting Input Variables for Fuzzy Models", *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, Vol. 2, pp.267-278.
- Dhar, N.R., Islan, M.W., Islam, S., Mithu, M.A.H., 2006, "The Influence of Minimum Quantity of Lubrification (MQL) on Cutting Temperature, Chip and Dimensional Accuracy in Turning AISI-1040 steel", *Material Processing Technology*, Vol. 171, pp.93-99.
- Dotto, F.R.L., Aguiar, P.R., Bianchi, E.C., Serni, P.J.A., Thomazella, R., 2006, "Automatic System for Thermal Damage Detection in Manufacturing Process with Internet Monitoring", *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Vol. XXVIII, No. 2, São Paulo, Brasi, pp.153-160.
- Dutra, R.P.S., Araujo P.L.R., 2002, "Obtenção da Análise de Cerâmicas Porosas com a Incorporação de Produtos Orgânicos ao Corpo Cerâmico", *Cerâmica*, Vol. 48, No. 308, pp. 223-230.
- Evsukoff, A.G., Almeida, P.E.M., 2003, "Sistemas Neuro-Fuzzy", *Sistemas Inteligentes Fundamentos e Aplicações*, S.O. Rezende, Barueri, São Paulo.
- Fischer, H., Weib, R., Telle, R., 2008, "Crack Healing in Alumina Bioceramics", *Dental Materials*, Vol. 24, pp. 328-332.
- Jahanmir, S., Ramulu, M., Koshy, P., 1998, "Machining of Ceramics and Composites", *Journal of Materials Processing Technology*, Cap. 2, 3 e 4, New York, United States, pp. 11-138.
- Jakobuss, M., Fiecoat, J., 2000, *Ceramic Industry*, Vol. 150, 42p.
- Jang, J.S.R., 1993, "ANFIS: Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics* 23, No. 3, pp. 665-685.
- Kwak, J.S., Song, J.-B., 2001, "Trouble diagnosis of the grinding process by using acoustic emission signals", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 41, 899-913.
- König, W., 1980, "Fertigungsverfahren: Drehen, Fräsen", 2ª Ed. VDI-Verlag GmbH, Düsseldorf.
- Lee, K.C., Ho, S.J., Ho, S.Y., 2005, "Accurate Estimation of Surface Roughness from Texture Features of The Surface Image Using an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System", *Precision Engineering*, Vol. 29, pp. 95-100.
- Lezanski, P., 2001, "An Intelligent System for Grinding Wheel Condition Monitoring", *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 109, pp. 258-263.
- Nilson, J.W., Riedel, S.A., 2003, "Circuitos Elétricos", 6ª Edição, Editora LTC, Rio de Janeiro.
- Pereira, W., Diniz, A.E., 2006, "Análise da Deformação por Sinal de Vibração", *Máquinas e Metais*, pp.200-215.
- Schuller, D., Bianchi, E.C., Aguiar, P.R., 2008, "Influência de Defeitos e Diferentes Processos de Fabricação nas Propriedades Mecânicas de Cerâmicas", *Cerâmica*, Vol. 54, No. 332, pp. 435-442.
- Samhouri, M.S., Surgenor, B.W., 2005, "Surface roughness in grinding: on-line prediction with adaptive neuro fuzzy inference system", *Automatic Controls Laboratory, Department of Mechanical and Materials Engineering, Queen's University*.
- Shen, J.Y., Zeng, W.M., Huang, H., Xu, L.M., 2002, "Thermal Aspects in the Face Grinding of Ceramics", *Material Processing Technology*, Vol. 129, pp. 212-216
- Souza, C.N., Catai, R.E., Aguiar, P.R., Salgado, M.H., Bianchi, E.C., 2004, "Analysis of Diametrical Wear of Grinding Wheel and Roundness Errors in the Machining of Steel VC 131", *Journal of The Brazilian Society of Mechanical Science*, Vol. 24, No. 2, pp. 209-212.
- Sugeno, M., Kang, G.T., 1988, "Structure Identification of Fuzzy Model", *Fuzzy Sets and Systemns*, Vol. 28, pp. 15-33.
- Takagi, T., Sugeno, M., 1985, "Fuzzy Identification of Systems and Its Applications to Modeling and Control", *IEEE Trans. Syst Man Cyber* 15, pp. 116-131.
- Tonshoff, H.K., Meyer, T., Wobker, H.G., 1996, *Ceramic Industry*, 17p.

- Xu, L.M., Shen, B., Shih, A.J., 2006, "Vitreous Bond Silicon Carbide Wheel for Grinding of Silicon Nitride", Machine Tools & Manufacture, Vol. 46, pp.631-639.
- Yin, L., Huang, H., Ramesh, K., Huang, T., 2005, "High Speed Versus Conventional Grinding in High Removal Rate Machining of Alumina-Titania", Machine Tools & Manufacture, Vol. 45, pp. 8970907.
- Zheng, Y., Vieira, J.M., Oliveira, F.J., Davim, J.P., Brogueira, P., 2000, "Relationship Between Flexural Strength and Surface Roughness for Hot-Pressed Si₃N₄ Self-Reinforced Ceramics", Journal of the European Ceramic Society, Vol. 20, pp. 1345-1353

10. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANFIS APPLIED TO PREDICT THE SURFACE ROUGHNESS IN GRINDING PROCESS OF ADVANCED CERAMICS

Marcelo Montepulciano Spadotto¹, spadottomm@gmail.com

Hildo Gillardi Junior¹, hildogjr@gmail.com

Paulo Roberto Aguiar¹, aguiarpr@feb.unesp.br

Eduardo Carlos Bianchi², bianchi@feb.unesp.br

Carlos Alberto Fortulan³, cfortula@sc.usp.br

Universidade Estadual Paulista - Bauru Campus – Departamento de Engenharia Elétrica¹/Mecânica², Faculdade de Engenharia, Luiz Edmundo Carrijo Coube Ave., 14-01, Vargem Limpa, CEP: 17033-360.

Universidade de São Paulo³, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Engenharia Mecânica, Av. Trabalhador são-carlense, 400 . CEP 13566-590, São Carlos – SP.

Resumo: *This work deals with application of ANFIS model to predict the surface roughness of advanced ceramics in grinding process. A grinding machine equipped with an acoustic emission sensor and a power transducer connected to the electric motor that drives the grinding wheel was employed. The workpieces of alumina used in this work were made by pressing and sintering, forming rectangular bars. A digital processing of acoustic emission and cutting power was carried out to calculate the average, the standard deviation, DPKS and DPO parameters. These statistics as well the RMS of acoustic emission signal and cutting power were introduced as inputs to the ANFIS model. The output values of surface roughness (measured during the tests) were implemented for the training and validation. The results shown that the ANFIS model is a great tool when applied to predict the surface roughness of ceramic workpiece in grinding process.*

Palavras-chave: *Grinding, Acoustic Emission, Signal Processing, Anfis.*

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