

MONITORAMENTO DA VIDA DA FERRAMENTA NO PROCESSO DE FURAÇÃO UTILIZANDO MEDIÇÕES DE PRESSÃO SONORA E VIBRAÇÕES

Marcus Antônio Viana Duarte

Faculdade Federal de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

mvduarte@mecanica.ufu.br

Tatiana Meola

Faculdade Federal de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

tatianameola@bol.com.br

Alisson Rocha Machado

Faculdade Federal de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

alissonm@mecanica.ufu.br

Éder Silva Costa

Faculdade Federal de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

escosta@mecanica.ufu.br

Resumo. A tendência da industria moderna tem sido a necessidade de realizar a manutenção ou troca de determinada ferramenta de usinagem no seu devido tempo, sem que seja executada de maneira precoce, principalmente com o advento da ISO 14000, a qual é contra o passivo ambiental resultante de troca de componentes antes do fim de sua vida útil. Dentre as técnicas de monitoramento em tempo real, destacam-se as medições e análises de vibração, emissão acústica e esforços de usinagem dentre outras. Neste trabalho, é estudada a utilização de níveis de pressão sonora juntamente com medições de vibrações para a estimativa do desgaste em brocas de aço rápido revestidas. Usinaram-se a seco, barras de aço microligado, onde foram realizados furos com 10 mm de diâmetro e estudaram-se quais os parâmetros vibro-acústicos e de corte mais sensíveis à vida da ferramenta, incluindo o tipo de material da broca. Os parâmetros de vibração e pressão sonora analisados foram os parâmetros tradicionais de análise de sinais nos domínios do tempo e da freqüência, os quais foram ajustados via Redes Neurais Artificiais do tipo backpropagation com objetivo de se determinar o melhor modelo para correlacionar os níveis acústicos e vibratórios com a vida da ferramenta. Para se minimizar o número de parâmetros utilizados no treinamento da rede, foi estudada uma metodologia baseada em superfície de resposta com ajustes via Método dos Mínimos Quadrados de modelos lineares com relação aos parâmetros. Apesar de os níveis de ruído de fundo serem elevados e significativos, observaram-se que os níveis de pressão sonora em algumas bandas de 1/3 de oitava e para dois parâmetros de usinagem e dois no domínio do tempo, estão correlacionados com o número de furos realizados pela ferramenta. O mesmo se deu para os níveis de vibração, destacando-se o avanço como parâmetro de usinagem e algumas bandas de 1/3 de oitava.

Palavras-chave: monitoramento, vibração, pressão sonora, vida da ferramenta, processo de furação.

1. INTRODUÇÃO

É alarmante, a crescente necessidade de se monitorar em tempo real os processos de fabricação, minimizando os tempos de parada da máquina-ferramenta, aumentando a confiabilidade da mesma nas atividades de usinagem, melhorando a qualidade do produto final e proporcionando redução de custos, os quais são demasiadamente significativos nos processos modernos em que os custos de uma ferramenta podem chegar na casa dos 20.000 dólares. Existem várias técnicas e procedimentos de manutenção preditiva de máquinas para realizar o controle da vida de ferramentas, como descreve Duarte (1998). Tais técnicas utilizam sensores os quais são dispostos em locais especiais das máquinas para detectarem em tempo real (Meola et all, 2003), sinais que possam ser correlacionados com os parâmetros necessários para controle da máquina-ferramenta.

Devido à complexidade e principalmente ao grande número de variáveis envolvidas no processo de furação, pode-se afirmar que ainda não existe um modelo matemático confiável que possa equacionar de forma completa a vida da ferramenta (Beloni, 2001). Com isso, a inteligência artificial vem gradualmente se destacando, com o objetivo de se determinar um melhor ajuste de parâmetros para uma satisfatória qualificação do modelo proposto.

2. METODOLOGIA

Foram realizados oito testes de furação a seco em barras de aço microligado, realizando-se furos com 10 mm de diâmetro e medindo-se sinais de vibração e pressão sonora por meio de um acelerômetro piezoelettrico, um pré-amplificador de carga, uma placa analógico/digital, um microfone com seu respectivo amplificador e um microcomputador.

Utilizaram-se brocas de aço rápido com revestimentos do tipo TIN para os quatro primeiros testes e do tipo Futura – B para os demais, variando-se os valores dos parâmetros de corte - velocidade (m/min) e avanço (mm/volta) - de acordo com a Tab. (1).

Tabela 1. Testes de usinagem com respectivos parâmetros de corte.

Teste	Velocidade (Vc)	Avanço (f)
1	50	0.28
2	80	0.20
3	80	0.28
4	70	0.28
5	50	0.28
6	80	0.20
7	80	0.28
8	70	0.28

Cada teste foi constituído de duas etapas, as quais foram executadas com um mesmo tipo de ferramenta nas mesmas condições de corte, exceto para os quinto e oitavo testes, os quais se deram em uma única fase. Realizaram-se os processos de furação até o fim da vida útil da broca para todos os testes, adquirindo-se os sinais de pressão sonora e vibração em furos escolhidos aleatoriamente. Tais furos foram medidos no início, meio e fim da vida da ferramenta, de acordo com o número realizado pela mesma, tendo o oitavo teste e a primeira etapa do terceiro a medição efetuada inclusive no furo da ruptura da broca.

Os valores dos 32 parâmetros vibro-acústicos - Tab.(2) - no domínio do tempo e da freqüência foram calculados para uma faixa aproximadamente constante da potência de corte, onde se tem confiança de que é a região da usinagem propriamente dita e não a rotação em vazio da ferramenta. Pode-se observar na Tab. (2) que os parâmetros de freqüência são em bandas de 1/3 de oitava centradas em algumas freqüências, dadas em Hz.

Tabela 2. Parâmetros vibro-acústicos no domínio do tempo e da freqüência.

Tempo	Pico	RMS	Fator de Crista	Kustosis
1/3 oitava	Freq. 10	Freq. 12,5	Freq. 16	Freq. 18
1/3 oitava	Freq. 20	Freq. 25	Freq. 31,5	Freq. 40
1/3 oitava	Freq. 50	Freq. 63	Freq. 80	Freq. 100
1/3 oitava	Freq. 125	Freq. 160	Freq. 180	Freq. 200
1/3 oitava	Freq. 250	Freq. 315	Freq. 400	Freq. 500
1/3 oitava	Freq. 630	Freq. 800	Freq. 1000	Freq. 1250
1/3 oitava	Freq. 1600	Freq. 1800	Freq. 2000	Freq. 2500

Devido ao fato de os furos medidos serem eleitos aleatoriamente, normalizaram-se seus valores dividindo-se o número do furo medido pelo número máximo de furos realizados pela ferramenta, obtendo-se assim uma relação linear da vida da broca com os parâmetros vibro-acústicos. Outra maneira escolhida para normalização foi elevar essa razão ao expoente 0,5. Essa última forma pode ser explicada por meio da Equação Expandida de Taylor dada pela Eq. (1), onde T é a vida da ferramenta e K é uma constante relacionada com a vida da mesma para uma dada velocidade de corte Vc, f é o avanço, ap a profundidade de corte e VB o desgaste da ferramenta. Usualmente K é da ordem de 10^{10} e os expoentes a, b, c e d são das ordens de -4, -2, -3 e 2, respectivamente.

$$T = KV_c^a f^b ap^c VB^d \quad (1)$$

No caso estudado, como o comprimento da peça perfurada foi mantido constante, T pode ser definido como o número de furos medidos e VB, devido ao fato de estar relacionado com a vibração do sistema (Meola, 2003), pode ser substituído pelos parâmetros vibro-acústicos da medição. Os demais elementos da Equação Expandida de Taylor foram assumidos como constantes. Com isso, tem-se a Eq. (2). Onde N é o número de furos, C são as constantes e P os parâmetros de vibração e pressão sonora.

$$N = CP^2 \quad (2)$$

Portanto obtém-se que $P \propto N^{0,5}$.

O treinamento de uma rede neural foi realizado com intuito de ajustar os melhores parâmetros relacionados com a vida da ferramenta, via minimização do erro médio quadrático entre o número de

furos medidos (real) e o número de furos previstos pela rede. Para evita a ocorrência de overfitting (Haykin, 1999), procurou-se utilizar um pequeno número de neurônios e um número mínimo de parâmetros de entrada.

Primeiramente, fez-se uma Análise de Variância, ANOVA, (Neto et all, 2001) para selecionar um número mínimo de parâmetros dentre os 36 analisados, utilizando-se para o ajuste o Método dos Mínimos Quadrados, representado pela Eq. (3). A ANOVA foi realizada para os parâmetros de vibração e pressão sonora separadamente.

$$y = (X^T X)^{-1} X^T b \quad (3)$$

Na Equação (3), X é a matriz com os valores dos parâmetros de entrada para o modelo, y é o vetor dos parâmetros ajustados e b é o vetor com os valores de saída do mesmo, representado pelo número de furos medidos.

A matriz X , com 89 linhas e 36 colunas foi construída de acordo com a Eq. (4), dada a seguir, onde C é o vetor das constantes do modelo, M é o vetor representativo do material da ferramenta, V é vetor com os valores das velocidades de corte, F é o vetor com os valores dos avanços e P é o vetor das medidas de vibração ou de pressão sonora.

$$X = \begin{bmatrix} C_1 & M_1 & V_1 & F_1 & P_1 \\ C_2 & M_2 & V_2 & F_2 & P_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Os índices 1 e 2 representam as 1a e 2a etapas, respectivamente. Os vetores M foram normalizados nos valores de 1 e -1, sendo o primeiro para a broca com revestimento TIN e o segundo para a ferramenta com revestimento Futura-B. A montagem dos vetores segue a ordem da Tab. (1). Vale ressaltar que cada teste é composto por um determinado número de furos com seus respectivos valores vibro-acústicos.

De acordo com a Eq. (5) determinou-se o vetor b_t contendo os valores teóricos de saída do modelo, podendo-se obter por meio da Eq. (6) o valor do erro médio quadrático E entre os valores reais e os teóricos.

$$b_t = Xy \quad (5)$$

$$E = (b - b_t)^T (b - b_t) \quad (6)$$

De posse, obteve-se a variância do erro σ^2 , utilizando-se a Eq. (7), onde n é o número de testes realizados e p o número de parâmetros.

$$\sigma^2 = \frac{E}{n - p} \quad (7)$$

Com isso, por meio da Eq. (8) determinou-se o valor da variância V_y do parâmetro estimado.

$$V_y = \sqrt{\text{diag}(X^T X)^{-1} \sigma^2} \quad (8)$$

Por fim, sabendo-se que quanto menor a variância do valor estimado melhor o ajuste, determinou-se a razão absoluta entre os valores de y e V_y . O critério de seleção utilizado baseou-se nos valores desta

razão e no Teste de Hipótese Nula (Neto et all, 2001) para uma distribuição F, com intervalo de confiança de 95 %.

Os valores de razões menores do que 1 foram um primeiro critério para se determinar quais parâmetros deveriam ser excluídos da análise. Obtendo-se um novo valor de erro com um número menor de graus de liberdade, fez-se a comparação entre as variâncias dos dois modelos utilizando-se as Eq. (9) e Eq. (10), onde o índice i é referente ao erro quadrático do modelo de menor grau com o valor de bt teórico.

$$f = \frac{|E_i - E| / (p - p_i)}{E / (n - p)} \quad (9)$$

$$F = F_{(p-p_i), (n-p)} \quad (10)$$

Uma vez que a hipótese é definida como tendo 95 % de confiança de que f está dentro de intervalo de F, para os casos em que f foi menor ou igual a F, obtiveram-se novos valores de σ^2 , Vy e da razão y/Vy, repetindo-se o procedimento anterior até que se chegasse somente em valores de razão maiores do que 1. Para um posterior treinamento de uma rede neural backpropagation com os parâmetros escolhidos houve necessidade de se reduzir ao máximo o número de graus de liberdade do modelo. Com isso, quando se obtiveram apenas números maiores do que 1, excluíram-se os menores do que 2.

Os parâmetros eleitos foram os que apresentaram razões entre y e Vy maiores do que 2 ou os que tiveram f consideravelmente maior do que F, resultando-se numa hipótese recusada.

Utilizou-se a rede do tipo feedforward, com cinco neurônios na entrada e um na saída, para treinamento dos 89 ensaios realizados tanto para as medições de vibração quanto para as de pressão sonora. A função transferência na camada de entrada foi do tipo tangente sigmoidal e a na camada de saída foi linear, sendo que o procedimento de ajuste dos parâmetros utilizados foi de Levemberg-Maquated.

Após os treinamentos da rede, obtiveram-se os erros médios quadráticos entre o número de furos simulados pelas redes e os reais, para os parâmetros de vibração e pressão sonora com normalizações linear e de potenciação. Assim, os menores erros para o modelo ajustado de vibração e para o modelo acústico, foram os indicativos dos melhores parâmetros relacionados com a vida da ferramenta.

3. RESULTADOS

Na Tabela (3) são apresentados os parâmetros de usinagem e vibração com normalização linear do número de furos eleitos por meio dos procedimentos de ajustes, utilizando-se Método dos Mínimos Quadrados e Redes Neurais Artificiais do tipo Backpropagation.

Tabela 3. Parâmetros de usinagem e vibração com normalização linear do número de furos.

Parâmetro	Parâmetro
f	Freq. 125
Freq. 40	Freq. 200
Freq. 50	Freq. 250
Freq. 63	Freq. 1800

Pode-se observar na Tab. (3) que os oito parâmetros mais sensíveis à vida de ferramenta foram o avanço f e bandas de 1/3 de oitava centradas em 40, 50, 63, 125, 200 250 e 1800 Hz.

Verificam-se na Tab. (4) os parâmetros de vibração com normalização de potenciação do número de furos selecionados via ajuste de parâmetros, onde pode-se notar que os sete parâmetros mais sensíveis à vida de ferramenta foram as bandas de 1/3 de oitava centradas em 40, 50, 63, 160, 200, 250 e 1600Hz.

Na Tabela (5) são mostrados os parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalização linear do número de furos escolhidos via utilização do Método dos Mínimos Quadrados e treinamento de Redes neurais feedforward.

Tabela 4. Parâmetros de vibração com normalização de potenciação do número de furos

Parâmetro	Parâmetro
Freq. 40	Freq. 200
Freq. 50	Freq. 250
Freq. 63	Freq. 1600
Freq. 160	--

Tabela 5. Parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalização linear do número de furos

Parâmetro	Parâmetro
Material	Freq. 18
Fator de Crista	Freq. 250
Freq. 16	Freq. 315

Nota-se na Tab. (5) que os seis parâmetros mais sensíveis à vida de ferramenta foram o material da broca, o fator de crista e bandas de 1/3 de oitava centradas em 16, 18, 250 e 315 Hz.

Já na Tab. (6), são explicitados os parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalização de potenciação do número de furos selecionados via ajuste de parâmetros.

Tabela 6. Parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalização de potenciação do número de furos

Parâmetro	Parâmetro
Material	Freq. 16
Vc	Freq. 20
RMS	Freq. 315
Fator de Crista	--

Observa-se na Tab. (6) que os sete parâmetros mais sensíveis à vida de ferramenta foram o material da broca, a velocidade de corte Vc, o nível eficaz do sinal (RMS), o fator de crista e as bandas de 1/3 de oitava centradas em 16, 20 e 315Hz.

Com isso foram traçadas as curvas dos valores dos furos reais e teóricos normalizados em função do número de ensaios executados.

Na Figura (1) são mostradas as curvas dos valores dos números de furos reais (azul) e dos simulados (vermelho) via Redes Neurais Artificiais em função dos 89 ensaios realizados. A normalização desses valores é linear e foram utilizados os parâmetros de usinagem e vibração selecionados para o treinamento desta rede.

Verifica-se na Fig. (1) que a simulação do número de furos via rede neurais não está fora da realidade, proporcionando um erro médio quadrático entre ambas as curvas de 5,24 %.

Na Figura (2) são apresentadas as curvas dos números de furos reais (azul) e simulados (vermelho) via Rede Backpropagation em função dos ensaios realizados para os parâmetros de usinagem e vibração com normalização de potenciação. Nota-se que não há diferenças significativas entre a simulação do número de furos via rede neurais e o número de furos real, apresentando um erro médio quadrático das curvas de 5,86 %.

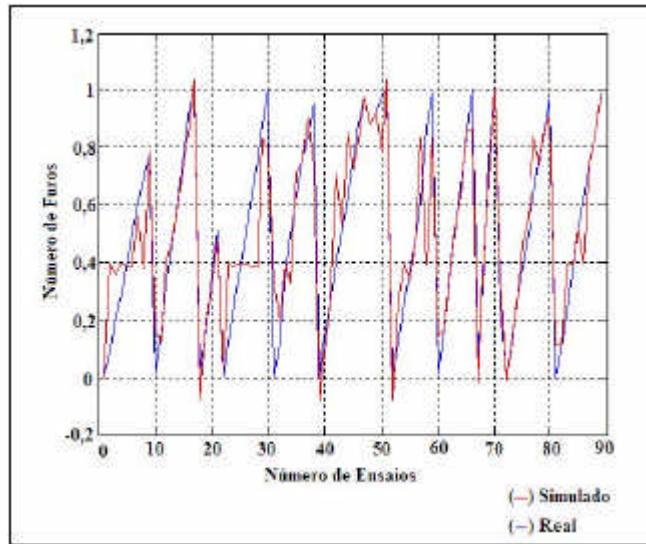


Figura 1. Curvas dos números de furos reais e simulados para os parâmetros de usinagem e vibração com normalização linear.

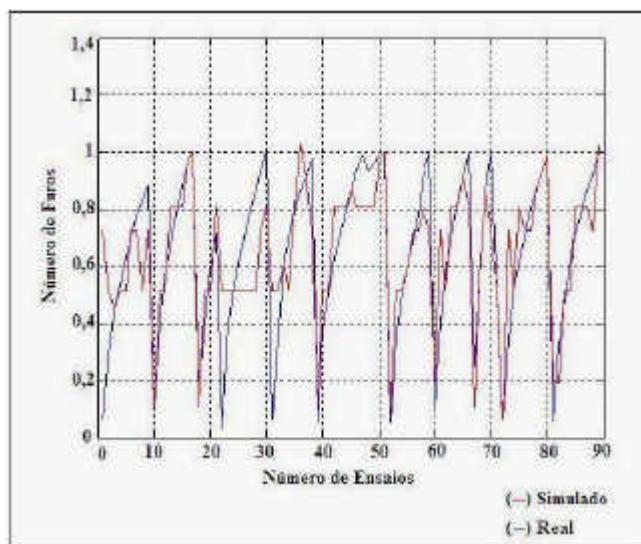


Figura 2. Curvas dos números de furos reais e simulados para os parâmetros de usinagem e vibração com normalização de potenciação.

Nas Figuras (3) e (4) são apresentadas as curvas dos números de furos reais (azul) e simulados (vermelho) via Redes Neurais feedforward em função dos ensaios realizados para os parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalização linear e de potenciação respectivamente.

Pode-se observar nas Fig. (3) e (4) que há diferenças visíveis entre ambas as curvas, porém não exacerbadas. Tais distinções são da ordem de 8 %, ou seja, os erros médios quadráticos entre o número de furos real e simulado são de 8,31 e 8,22 % para os parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalizações linear e de potenciação, respectivamente.

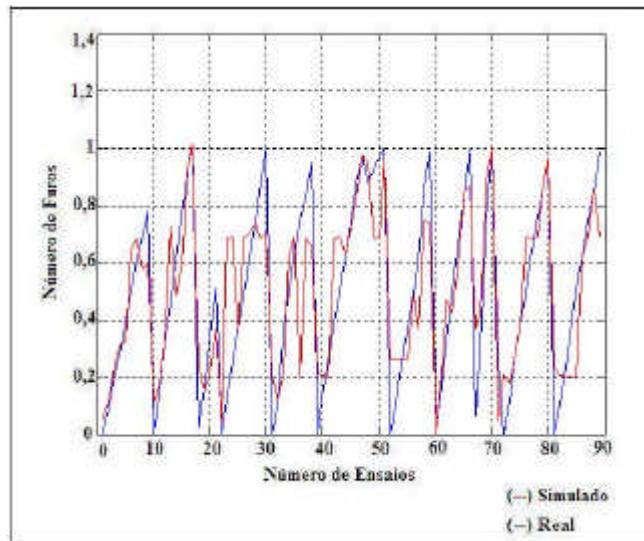


Figura 3. Curvas dos números de furos reais e simulados para os parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalização linear.

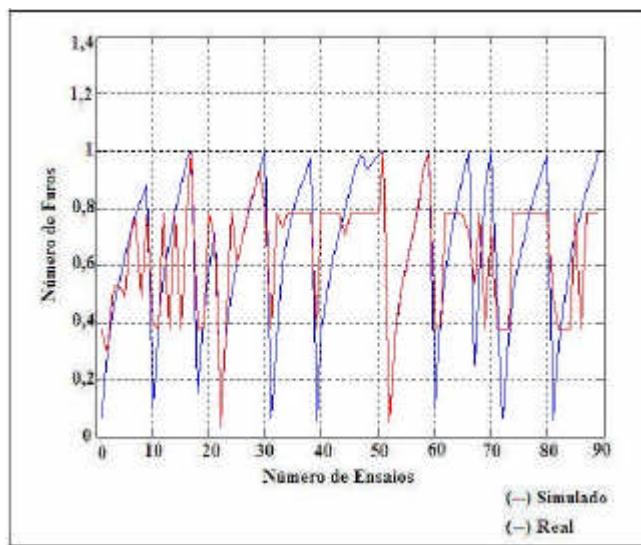


Figura 4. Curvas dos números de furos reais e simulados para os parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalização de potenciação.

Dos resultados obtidos, verificou-se que os erros apresentados para as duas maneiras de normalização são da mesma ordem de grandeza tanto para os parâmetros ajustados de vibração quanto

para os de pressão sonora. Há, no entanto diferenças de algumas casas decimais entre esses erros médios quadráticos, o que leva a selecionar os parâmetros de usinagem e vibração com normalização linear da Tab. (3) e os parâmetros de usinagem e pressão sonora com normalização de potenciação Tab. (6) como sendo os mais sensíveis à vida da ferramenta. Paralelamente, nota-se que os parâmetros de vibrações são aproximadamente 3 % mais significativos do que os acústicos.

4. CONCLUSÕES

As principais conclusões deste trabalho são:

- A utilização de redes neurais do tipo backpropagation mostrou-se uma ferramenta robusta e eficiente como um observador do fim da vida útil de brocas no processo de furação.
- As redes treinadas com os parâmetros de vibração tiveram melhor performance do que as treinadas com os parâmetros de ruído. Entretanto as diferenças observadas não são significativas, uma vez que os parâmetros de vibração resultaram em erros médios quadráticos da ordem de 5% e os de pressão sonora da ordem de 8%, erros estes da ordem dos erros puros calculados na análise de variância. Utilização prévia de um ajuste linear de parâmetros mostrou-se uma ferramenta robusta para a minimização dos parâmetros a serem utilizados como parâmetros de entrada para a rede neural.
- Com relação às normalizações linear e de potenciação, averiguou-se que os erros apresentados para ambas são da mesma ordem de grandeza tanto para os parâmetros ajustados de vibração quanto para os de pressão sonora.
- No que se diz respeito às influências do material da ferramenta e dos parâmetros de corte, o revestimento das brocas e a velocidade de corte tiveram destaque para os parâmetros de pressão sonora ajustados via redes neurais. Para os de vibração, destacou-se apenas o avanço.

5. REFERÊNCIAS

- Beloni dos Santos, A. L., 2001, “Metodologia via Redes Neurais para a Estimativa da Rugosidade e do Desgaste de Ferramentas de Corte no Processo de Fresamento Frontal.”, Tese de Doutorado, Ed. UFU, Uberlândia –MG, Brasil, 186 p.
- Duarte, M.A.V., 1998, “Manutenção Preditiva via Monitoramento de Vibrações”, Ed. UFU, Uberlândia-MG, Brasil, 200 p.
- Haykin, S., 1999, “Neural Networks, A Comprehensive Foundation”, Ed. Prentice-Hall, Inc., New Jersey, 842 p.
- Meola T. Et all, 2003, ”Monitoramento do Processo de Furação em Uma Fresadora CNC Utilizando Sinais de Vibrações Mecânicas” COBEF – 2003, Uberlândia –MG, Anais em CD.
- Neto, B. B., Scarmínio, I. S., Bruns, R. R, 2001, “Como Fazer Experimentos: Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria”, Ed. Unicamp, Campinas-SP, Brasil, 401 p.

TOOL LIFE MONITORING DRILL'S PROCESS USING ACOUSTICS AND VIBRATION SIGNALS

Marcus Antônio Viana Duarte

Faculdade Federal de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

mvduarte@mecanica.ufu.br

Tatiana Meola

Faculdade Federal de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

tatianameola@bol.com.br

Alisson Rocha Machado

Faculdade Federal de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

alissonm@mecanica.ufu.br

Éder Silva Costa

Faculdade Federal de Engenharia Mecânica – Universidade Federal de Uberlândia

escosta@mecanica.ufu.br

Abstract. *The modern works trend has been the inherent necessity to carry out the maintenance or changes of tool of cutting process in its just time, without that it is executed in precocious way, mainly with the advent of ISO 14000, which is against the resultant ambient liabilities of exchange of components before the end of its useful life. Amongst the techniques of real time tool life monitoring, the measurements and analyses of vibration, sounds and cutting efforts are the most used. In this work, the use of sound pressure levels together with measurements of vibrations signals are studied for the esteem of the tool life in fast steel coated drills. To make it, a lot of steel bars was cutting, where holes with 10 mm of diameter had been carried through and had been analyzed which the vibro-acoustic parameters are more sensible to the life of the cut tool, including the type of material of the drill and cutting parameters. The vibration and sound pressure parameters studied had been the traditional time frequency analysis in 1/3 octaves bands. The procedure used to estimate the tool life is based on Artificial Neural Nets feedforward backpropagation type. To minimize the number of parameters used in the net training and avoid overfitting, a methodology based on surface response with linear parameters was studied. Although the background noise levels was high and significant, had been observed that the sound pressure levels in some bands of 1/3 of eighth and for two parameters of cutting and two in the domain of the time, are well correlated with the number of holes carried through for the life tool. Something equal in value was given for the vibration levels, being distinguished as parameter of cutting and some bands of 1/3 of eighth.*

keywords: monitoring, vibration, sound pressure, tool life, drill process