

Estudo comparativo da força de corte no processo de retificação

Patrik Nascimento Lançoni (UNESP) patrik@ladaps.feb.unesp.br

Danilo Augusto Boso (UNESP) daniloboso@feb.unesp.br

Paulo Roberto de Aguiar (UNESP) aguiarpr@feb.unesp.br

Eduardo Carlos Bianchi (UNESP) bianchi@feb.unesp.br

Resumo: *Este trabalho tem como objetivo o estudo comparativo entre a medição da força de corte pela potência e corrente elétrica do motor de acionamento do rebolo e a medição da força por um dinamômetro piezelétrico. Geralmente, a força no processo de retificação é tomada por sensor de corrente ou por transdutor de potência, sendo este último composto de um sensor de corrente e um sensor de tensão cujos sinais são multiplicados, obtendo-se um sinal analógico proporcional à potência ativa de entrada consumida pelo motor inversor. Entretanto, esta potência não corresponde à potência mecânica utilizada no corte, e, portanto, imprecisões ocorrem. Embora o método de medição da potência mecânica baseado na corrente seja bem aceito, existem poucos estudo envolvendo as imprecisões, perdas e atrasos, e, portanto, uma análise comparativa utilizando um dinamômetro de alta precisão (custo elevado) com a medida da força de corte pela corrente é necessária. Os sinais de potência elétrica e força de corte foram coletados com alta taxa de aquisição, com variações da profundidade de corte e da frequência do motor que aciona o rebolo. Estes sinais foram analisados, processados e, posteriormente foi feita uma comparação entre potências elétrica e mecânica, considerando as perdas durante o processo.*

Palavras chave: Retificação; Potência; Motor; Perdas

1. Introdução

O desenvolvimento da indústria metalúrgica está intimamente relacionado à sua capacidade de usinar de forma precisa. A retificação é uma das mais importantes técnicas usadas para se obter peças de alta precisão, sendo responsável por uma considerável parcela do total de operações de usinagem nos países industrializados. Uma alta percentagem de itens manufaturados têm sido usinados por retificação em algum estágio de seu processo de produção, ou têm sido processados por máquinas cuja precisão é um resultado direto de operações abrasivas. Melhoramentos no processo levam a uma maior precisão, produção mais rápida e redução de custos. É necessário buscar melhorias no processo para se ter uma maior produção, com mais precisão e com custos reduzidos.

A finalidade da medição das variáveis do processo de retificação é otimizar este processo com relação ao custo, produtividade, taxa de remoção do material, etc. Existem vários fatores a serem medidos no processo de retificação tais como força de corte, vibração e condição da ferramenta. Entre elas, a detecção da força de corte é especialmente importante por uma série de razões, por exemplo: melhor acabamento na superfície e exatidão dimensional, vida da ferramenta prolongada, e melhor utilização da máquina, resultando assim, em alta produtividade (SHIRAIISHI, 1989).

Dentre os parâmetros relacionados com a usinagem, a importância do monitoramento das forças de corte em usinagem é bem reconhecida em toda a comunidade científica. Tanto na indústria como na pesquisa é de grande importância o conhecimento das forças de corte na usinagem. A força de corte é o indicador mais importante do estado e da qualidade da usinagem (JEONG, 2002). Essas forças encontram aplicação no cálculo da estrutura dos mecanismos de acionamento das máquinas; permitem realizar o cálculo da potência de usinagem e a determinação do rendimento da máquina, para diferentes cargas e velocidades de trabalho (FERRARESI, 1977).

De acordo com TLUSTY, 1983, o problema crucial que deve ser superado para atingir a capacidade máxima de um sistema de usinagem autônomo é o desenvolvimento de sistemas eficazes de sensores para monitorar suas operações. Os sensores mais utilizados para a medição da força de corte são os *dinamômetros*, constituídos de um conjunto de transdutores do tipo strain gages em sua base. Os sensores são pequenos anéis, localizados abaixo dos parafusos que fixarão a peça, sendo a força tangencial obtida a partir da soma das forças exercidas em cada parafuso. Já os sensores de potência medem a tensão, corrente e fatores de potência do motor e calculam a potência desenvolvida pelo motor durante a usinagem.

O sensoriamento tem se tornado de extrema importância no processo industrial, como se pode notar nas máquinas modernas, onde são encontrados diversos de tipos sensores, entre eles os acelerômetros, sensores de força, balanceamento, encoders e sensores de velocidade e posição (ARONSON, 1997).

Praticamente em todas as máquinas-ferramenta são empregados motores elétricos de indução em acionamentos de eixos e controle de avanço da ferramenta de corte. Existem diversos tipos de motores elétricos utilizados nas máquinas modernas dependendo do tipo da máquina-ferramenta e de seu movimento. Os motores mais usados são os trifásicos assíncronos, motores DC com estatores excitados eletricamente, motores síncronos trifásicos com armaduras magnetizadas permanentes e motores DC de campo permanente (MANNAN, 1989).

Os parâmetros relacionadas a motores elétricos, como potência e corrente elétrica, são afetadas pelo sistema de carga, sistema mecânico e pelo dispositivo eletrônico usado para controlar a velocidade desses motores. Os sinais elétricos proporcionais à potência e corrente durante a usinagem carregam componentes afetadas pelas engrenagens, movimentações e pelo circuito eletrônico para controle de velocidade. A medição dos parâmetros em um motor de indução está relacionada diretamente com o seu tipo, ou seja, se o motor é AC ou DC (MANNAN, 1989).

Segundo MANNAN, 1992, entre os sensores usados no processo de corte, em termos de desgaste da ferramenta e sua quebra, os sensores de corrente do motor constituem o melhor método. A maior vantagem do uso de medidas dos parâmetros do motor, como corrente e potência, para detectar defeitos no processo de corte é que os instrumentos de medida não interferem o processo de usinagem.

A corrente elétrica do motor é a mais sensível a mudanças no processo de usinagem, como o desgaste da ferramenta, por exemplo. Os sensores de corrente usam o mecanismo do motor como um “sensor indireto” da força de corte.

A função de transferência entre a força de corte e a correspondente corrente do motor é afetada por não-linearidades no sistema eletro-magnético do motor e pelo sistema de transmissão do sistema de avanço. Para executar o mesmo avanço em temperaturas mais altas, é necessário um menor torque. Ocorre um aumento da corrente de alimentação do motor de avanço para manter um certo nível de torque. As características da mudança de temperatura de um motor de avanço DC são governadas pelas propriedades do material magnético empregado, sendo também a maior parte do aumento de corrente atribuído a perdas magnéticas (MANNAN, 1992).

A análise do processo de manufatura executada por técnicas de medidas tem resultado na identificação e sinalização de falhas no torneamento e obstruções na máquina ferramenta. Para isso, um número de boas soluções é conhecido. Eles são baseados em medidas de força e deformação, análise da corrente elétrica do motor e medidas de potência.

De acordo com TRUMPOLD, 1992, todos esses desenvolvimentos são dirigidos para detectar qualquer ruptura e desgaste nas ferramentas no processo de torneamento. Por outro lado, grandes esforços tem sido realizados para supervisionar e controlar a produção por medidas de tamanho, forma e desvio de posição, bem como a rugosidade da peça. É

necessário empenho para unificar os processos de medidas e análises e a qualidade de dados analisados, incluindo aquisições de dados por meios de aproximações homogêneas.

Uma das informações mais importantes à respeito do processo de corte é a condição da ferramenta de corte. Essa informação pode ser obtida através do monitoramento sensoriado das condições da ferramenta de corte. A maioria deles é baseada em sensores de força de corte, emissão acústica e vibração. O número de sistemas de monitoramento disponíveis no mercado, porém, é muito pequeno. Seus preços são geralmente muito altos devido à complexidade dos componentes de hardware envolvidos e o desenvolvimento de algoritmos computacionais confiáveis. Sistemas monitorados são muito empregados em tornos CNC, mas seu custo também é muito elevado (SZECSI, 1999).

Os sinais de corrente resultantes dos sensores de efeito hall podem ser empregados para medida indireta de força em um sistema de torneamento CNC, podendo-se ter as forças tangencial e axial por técnicas de redes neurais e lógicas fuzzy, a força normal de corte e o coeficiente de fricção podem ser calculados por um modelo de corte mecânico (Xiaoli Li, 2005).

Segundo DINIZ (1995), diversos trabalhos já demonstraram que a dispersão da vida da ferramenta é muito grande, isto é, uma determinada ferramenta pode ter vida muito superior que outra, idêntica, cortando peças também idênticas e nas mesmas condições de usinagem. Portanto, não basta apenas selecionar parâmetros de usinagem que apresentaram bons resultados, é necessário um monitoramento do processo.

A maior parte das fábricas ainda não está disposta a investir em um sistema de monitoramento e controle automático da vida da ferramenta devido ao seu custo ou à falta de confiança neles. Por outro lado, nem a utilização de um número de peças preestabelecido para a vida da ferramenta, nem o uso do operador para a definição do fim da vida parecem ser confiáveis.

Para isso, um computador é utilizado para o armazenamento dos sinais de corrente elétrica (sensor de efeito hall), feito através de uma placa de aquisição de dados A/D, para que se possa fazer uma análise posterior do sinal. O parâmetro utilizado para dar uma idéia do andamento do processo não é o tempo de corte, mas o comprimento de corte, que dá uma melhor idéia de quanto material já foi removido (DINIZ, 1995).

Na maioria dos sistemas autônomos automatizados, é necessária a utilização de sistemas inteligentes para a garantia de qualidade do processo. A queima durante a usinagem do aço em alta velocidade é um processo que necessita ser monitorado para um alto nível de qualidade da peça (SARAVANAPRIYAN, 2001).

A detecção da queima na usinagem pode ser realizada de maneira On-line ou Off-line. A queima no aço pode ser visualmente identificada pela coloração azulada sobre a base do material. Um estudo micrográfico da queima é uma das identificações off-line através do próprio entalhe da superfície queimada. A queima também pode ser identificada através de medidas de microdureza sobre a superfície do material. Mas todas essas técnicas off-line de detecção são geralmente destrutivas e consomem tempo. A detecção da queima on-line apresenta muitas vantagens quando comparada à detecção off-line devido aos vários sensores utilizados, ou seja, emissão acústica, vibração, temperatura e força.

De acordo com SARAVANAPRIYAN, 2001, usando Redes Neurais Artificiais, em que as variáveis de entrada são dadas pelos sensores descritos anteriormente, é possível obter informações muito importantes do sistema como a vida útil do rebolo antes da dressagem, evitando perda do material.

Em geral, medidas de força no processo de retificação são realizadas através de sensores de corrente de efeito hall ou por transdutores de potência, sendo este último composto de um sensor de corrente de efeito hall e um sensor de tensão (transformador ou piezelétrico) cujos sinais são multiplicados por um circuito integrado e filtrado, obtendo-se

um sinal analógico proporcional à potência ativa consumida pelo motor. No entanto, esta potência não corresponde à potência mecânica utilizada no corte pelo rebolo, e, portanto, imprecisões de medidas ocorrem. Além disso, tal sistema mostrou-se possuir uma resposta lenta e cujo sinal traz consigo as perdas do sistema, conforme experiência de trabalho científico relatada por AGUIAR, 1999. Em se tratando de detecção do fenômeno da queima através da composição do sinal bruto de emissão acústica e do sinal de força de corte, coletados à alta frequência de amostragem, a rapidez de resposta de tais sistemas de medição é um fator muito importante. No caso de se utilizar um medidor de potência elétrica do motor de acionamento do rebolo, ter-se-á uma defasagem de respostas devido ao link DC do conversor de frequência que alimenta o motor, um atraso de respostas devido as constantes de tempo envolvendo os circuitos elétricos do estator e rotor, um atraso ditado pela constante de tempo mecânica do motor de indução trifásico, e finalmente, um atraso referente ao sistema de transmissão mecânica da própria máquina retificadora. Além disso, a potência de corte fornecida pelo rebolo durante a retificação difere da potência elétrica medida ou por um sensor de efeito hall de corrente ou de potência, pelas perdas no conversor de frequência, no motor elétrico e no sistema de transmissão da máquina retificadora. As perdas no conversor de frequência são basicamente caracterizadas pelo chaveamento dos transistores e perdas Joule no link DC.

No caso do motor de indução trifásico, tem-se perda no cobre do estator e rotor, perdas rotacionais e suplementares, perdas por correntes de Foucault e histerese, e perdas por efeito pelicular, sendo as por corrente de Foucault proporcionais ao quadrado da frequência e as de histerese e efeito pelicular proporcionais à frequência (AGUIAR, 1997). O sistema mecânico de transmissão da máquina retificadora também apresenta perdas. Um outro fator importante a ser considerado é o da medição de pequenas forças de corte por um sensor de potência, visto que o motor de indução trifásico é um elemento não linear fazendo com que as leituras de potência sejam distorcidas na região próxima à operação em vazio do motor e na região de saturação, além do fato do motor não operar com uma fonte de alimentação senoidal. Não obstante, um sensor de potência elétrica poderia ser confeccionado e calibrado, necessitando-se de uma calibração aproximada devido aos fatores abordados acima, em que modelos matemáticos e ensaios do conversor, motor e retificadora seriam empregados para a determinação de tais atrasos e perdas e, portanto, ser utilizado para pesquisas no processo de retificação.

2. Materiais e métodos

1.1 Medição de tensão, corrente e potência elétrica e forças de corte.

Para a medição de potência elétrica do motor de indução trifásico de 7,5 cv, responsável pelo acionamento do eixo árvore da retificadora, utilizou-se um sensor de corrente de efeito Hall e um sensor de tensão (piezelétrico), cujos sinais foram multiplicados por um circuito integrado e filtrado, obtendo-se um sinal analógico correspondente à potência de entrada no motor inversor. Foi utilizada uma máquina retificadora tangencial plana do fabricante Sulmecânica no Laboratório de Usinagem por Abrasão do Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia da Unesp – Bauru (Figura 1). O motor foi alimentado por um inversor de frequência de 380 V e 7,5 cv do fabricante WEG. Para a medição de tensão, corrente e potência elétrica utilizou-se um circuito com os sensores acima descritos, confeccionado no próprio laboratório e denominado CURVOPOWER (Figura 2).

O sinal DC proporcional à potência ativa de entrada foi amplificado a um nível compatível com a placa de aquisição de dados. A calibração dos módulos de potência foi realizada no Laboratório de Aquisição de Dados e Processamento de Sinais da Faculdade de

Engenharia da Unesp – Bauru e foram obtidas equações para transformação dos sinais de tensão em valores proporcionais de potência elétrica, corrente e tensão. As equações obtidas são descritas abaixo, onde o sinal proporcional de tensão (v) é transformado para suas unidades reais, ou seja, W, V e A.

$$V_{\text{motor}} = 188,99.v - 8,7 \quad (\text{V}) \quad (1)$$

$$I_{\text{motor}} = 13,39.v - 1,1 \quad (\text{A}) \quad (2)$$

$$P_{\text{motor}} = 1737,97.v - 17,97 \quad (\text{W}) \quad (3)$$

Para a medição da força de corte, foi utilizado um dinamômetro piezelétrico KISTLER – Type 5233 e seu respectivo módulo (Figura 3). Este dinamômetro transmite um sinal de força que é dividido nas coordenadas x (perpendicular ao corte), y (tangencial ao corte) e z (normal ao corte). Depois disso, foi enviado um sinal de tensão para a placa de aquisição, que é proporcional à força exercida. Neste trabalho, escolheu-se a escala de 2 KN, ou seja, 2,5 mV/N. Portanto, sua equação de calibração é:

$$F = \frac{v}{0,0025} \quad (\text{N}) \quad (4)$$

A potência mecânica é o produto do torque pela velocidade do rebolo, sendo o torque o produto da força de corte tangencial pelo raio do rebolo. Então, tem-se :

$$P_{\text{mec}} = F_t \cdot r \cdot \omega \quad (5)$$

onde: P_{mec} = Potência mecânica do motor (W)

F_t = Força de corte tangencial (N)

r = Raio do rebolo (0,1729 m)

ω = velocidade do rebolo (rad/s)

Para a aquisição dos dados, foi utilizada uma placa de aquisição de dados de 12 bits do fabricante National Instruments, modelo AT-MIO-16E-10 , com frequência máxima de amostragem é de 100000 pontos/s, instalada em um microcomputador do tipo PC. Além da instalação física, a placa foi inicializada através do software LabVIEW 6.1 para armazenamento dos dados em arquivos do tipo texto.

O banco de ensaios pode é representado pela Figura 4.



Figura 1 Retificadora Plana

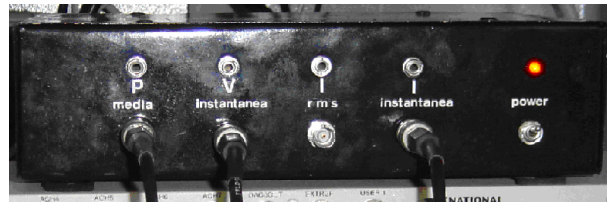


Figura 2 Curvopower

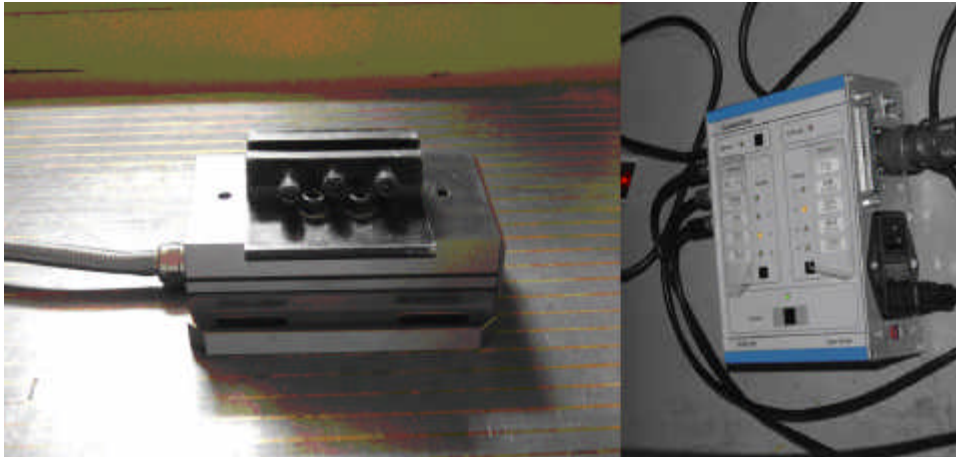


Figura 3 Dinamômetro

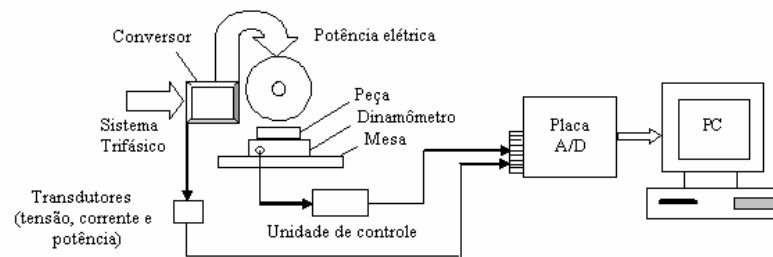


Figura 4 Configuração experimental utilizada no trabalho

2.1 Cálculo da velocidade do motor

A velocidade do motor que aciona o rebolo deve ser conhecida para o cálculo da potência de corte, como descrito anteriormente. Para determinar esta velocidade, foram utilizadas as especificações do motor de indução Eberle – 7,5 CV.

Com os dados do fabricante do motor traçou-se o gráfico Rotação x Corrente (Figura 5). Estabeleceu-se então a equação de calibração, e com o sinal da corrente coletado foi possível calcular a rotação do motor de indução.

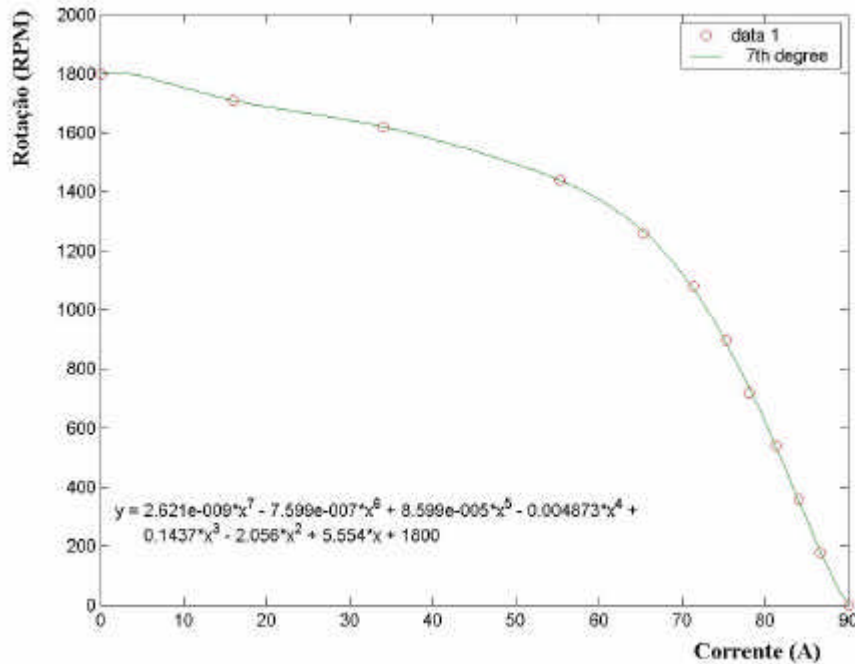


Figura 5 – Gráfico Rotação x Corrente.

3. Resultados e conclusões

3.1 Ensaios realizados

Foram realizados vários ensaios com alta frequência de aquisição de dados (10.000 Hz) para se fazer a comparação entre as potências elétrica e mecânica. Essa taxa de aquisição é necessária para se ter informações dos componentes harmônicos presentes na rede elétrica e resultantes do inversor de frequência. Foram utilizadas diversas condições de usinagem, variando-se a frequência e a profundidade de corte. A Figura 6 ilustra o processo de retificação em andamento.

Para a correta aquisição dos sinais com alta frequência de aquisição (10.000 Hz), foi construído um programa no software LABVIEW 6.1, em que os sinais foram salvos em arquivos de texto determinados pelo usuário. Foi necessário testar o programa várias vezes, para se ter a confiabilidade requerida para este trabalho.

Foram coletados sinais para frequências da corrente de 60 e 50 Hz, variando a profundidade de corte de 0 a 60 μm . Os ensaios foram repetidos três vezes em cada situação para uma maior precisão. Tendo em vista a dificuldade de mostrar todas as curvas obtidas, foi apresentada apenas uma curva, em que foi escolhido o ensaio realizado com uma frequência de 60 Hz e profundidade de corte de 60 μm . As curvas com os sinais coletados e já transformados para suas respectivas unidades são mostradas na Figura 6. O primeiro gráfico refere-se ao sinal de tensão de alimentação do motor. Por ser um sinal senoidal de 60 Hz não modificado, não se pode visualizar sua forma por ser apresentada uma grande quantidade de pontos. É possível notar uma pequena redução da tensão de entrada quando a peça esta sendo usinada. O segundo gráfico é o sinal da corrente. Também não se apresenta manipulado, e devido à grande quantidade de pontos não é possível ter-se alguma conclusão. O terceiro gráfico é o sinal da potência, obtido pela multiplicação do sinal da tensão e da corrente. Nota-se que a potência aumenta conforme a usinagem da peça.

O Quarto gráfico é a força no eixo X. Na direção de referência adotada, essa força é praticamente desprezível, sendo o sinal aproximadamente zero, com alguns pontos fora da média devido ao ruído. O quinto representa a força no eixo Y, sendo essa a direção do movimento da peça sob o rebolo. O sexto gráfico indica a força no eixo Z, que é a força normal exercida pelo rebolo na peça. Há um aumento significativo da força na direção do corte e da força normal durante o contato do rebolo com a peça.

4.1 Processamento dos sinais

Após coletados os sinais, foram realizadas operações com os mesmos com a finalidade de se obter os resultados esperados. Para isso utilizou-se o software MATLAB 6.5.

Inicialmente, foram multiplicados os sinais de tensão e corrente elétrica medidos, sendo então calculada a potência média (ativa) e comparou-se o resultado obtido com o sinal de potência adquirido diretamente da rede.

Para obter a velocidade, primeiramente calculou-se o valor RMS da corrente e então, utilizando os métodos propostos no item 2.1, obteve-se o sinal da velocidade.

Multiplicando os sinais de força tangencial pelo raio do rebolo, obteve-se o sinal do torque. A potência mecânica do motor foi obtida multiplicando-se os sinais de torque e velocidade calculados. Visto que os ensaios em vazio não apresentam potência mecânica, estes não foram manipulados. Todos os sinais foram filtrados como método de filtros digitais Butterworth para melhor visualização dos resultados.

A Figura 7 mostra as curvas obtidas, novamente para um ensaio realizado com uma frequência de 60 Hz e profundidade de corte de 60 μm . Feito esses cálculos com todos os ensaios, as potências médias registradas durante a usinagem do material foram determinadas, utilizando várias ferramentas do software MATLAB 6.5, ou seja, potência elétrica medida, potência elétrica calculada e potência mecânica.

A Figura 8 representa a comparação entre potências elétrica medida, elétrica calculada e mecânica para os ensaios realizados à frequência de 60 Hz; a Figura 9 representa a mesma comparação para ensaios realizados à frequência de 50 Hz.

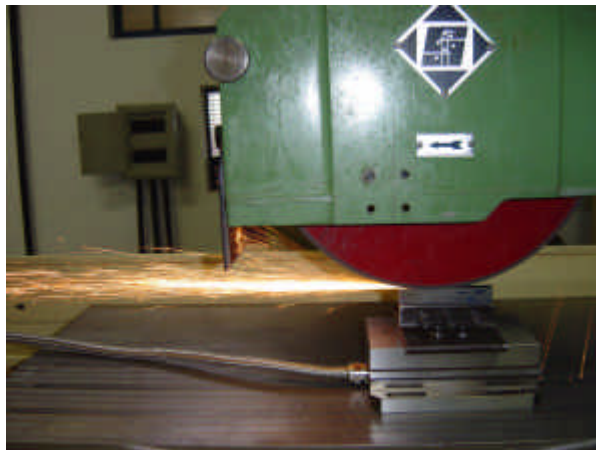


Figura 5 Processo de Retificação

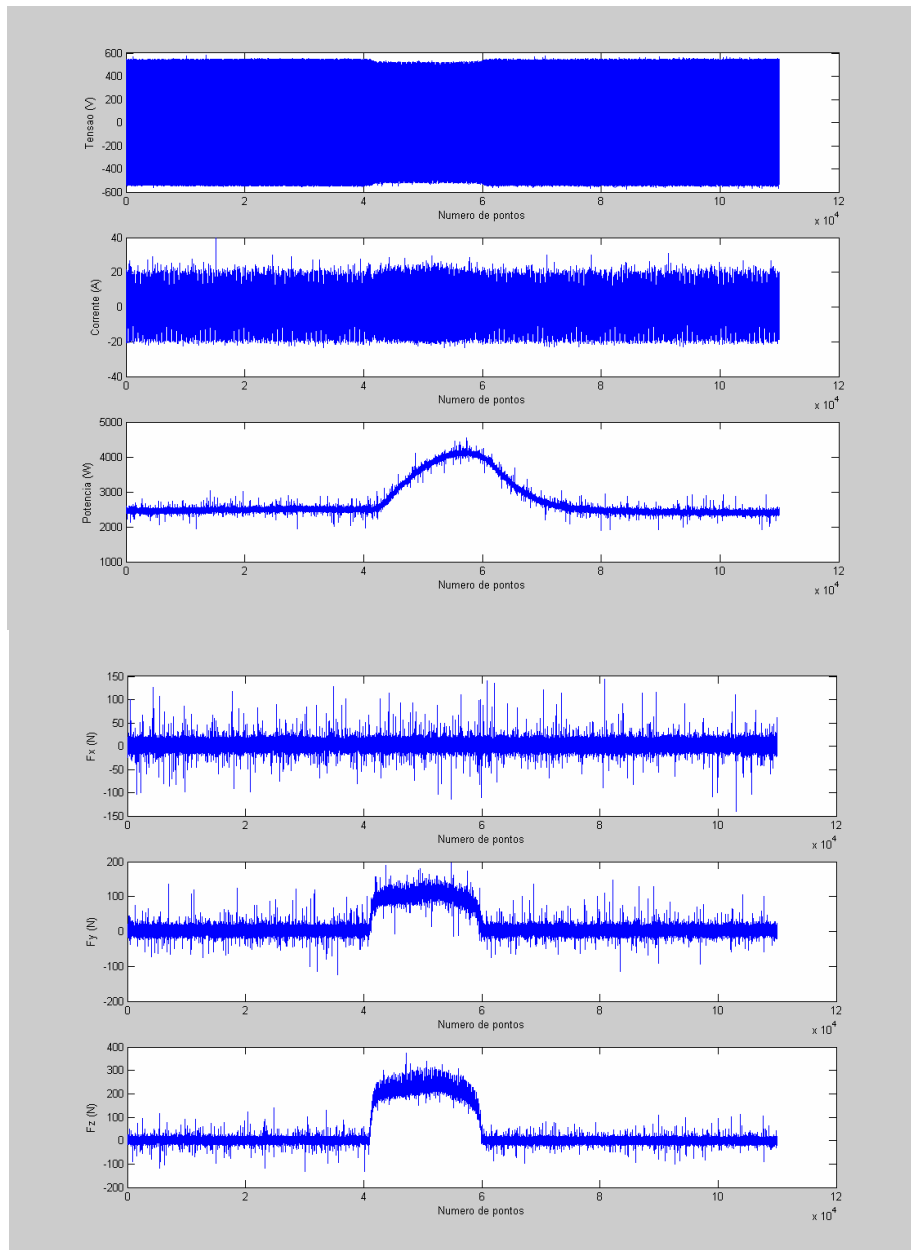


Figura 6 Sinais coleados no ensaio

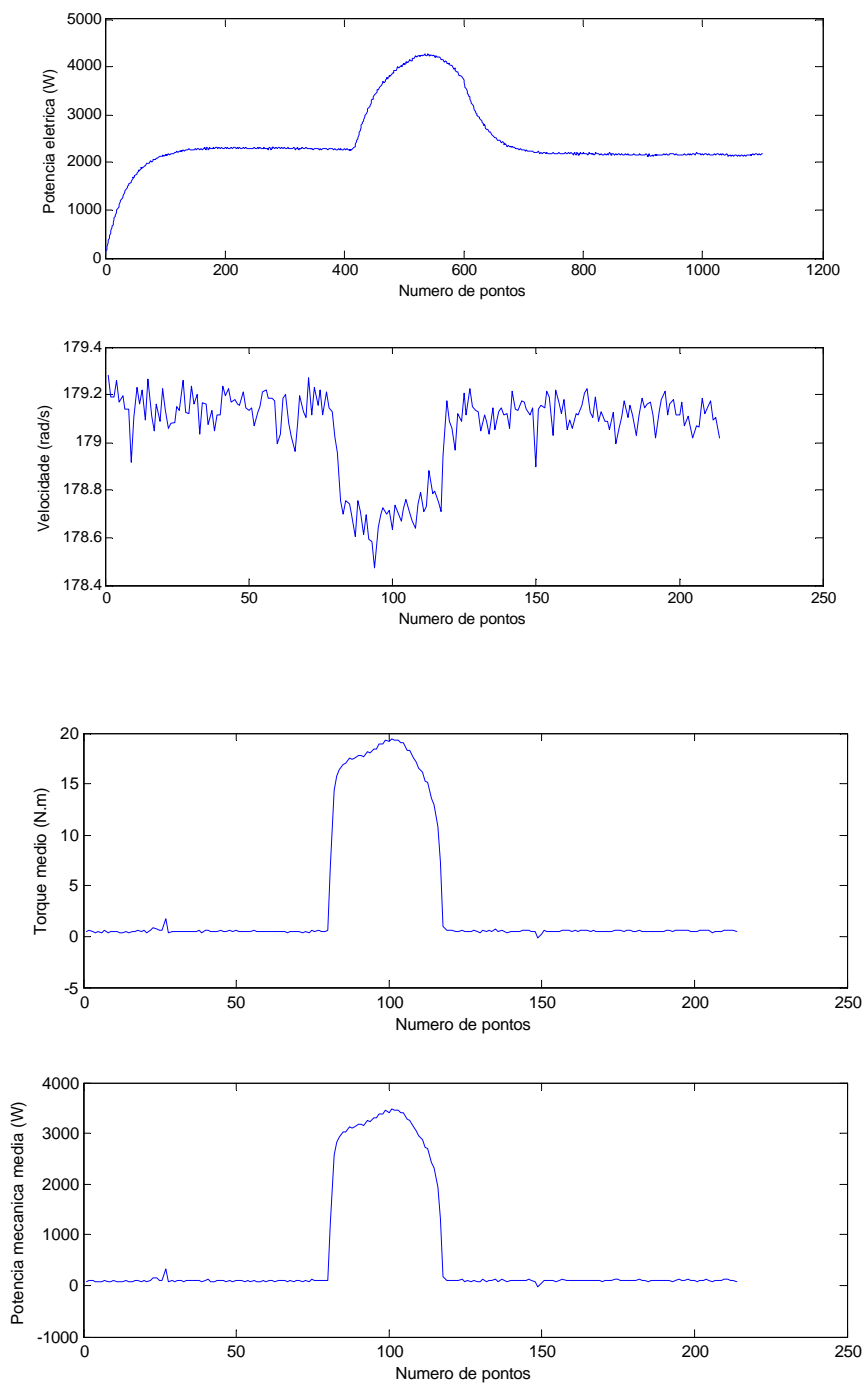


Figura 7 Curvas obtidas

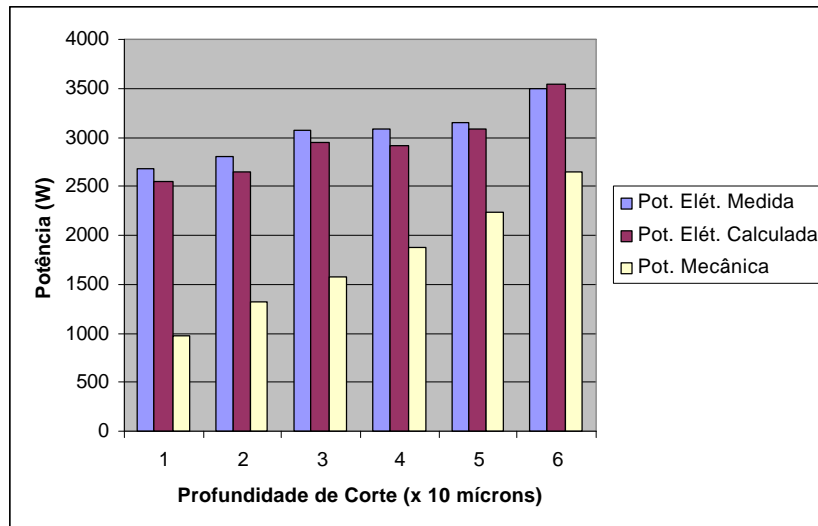


Figura 8 Comparação entre potências médias – 60 Hz

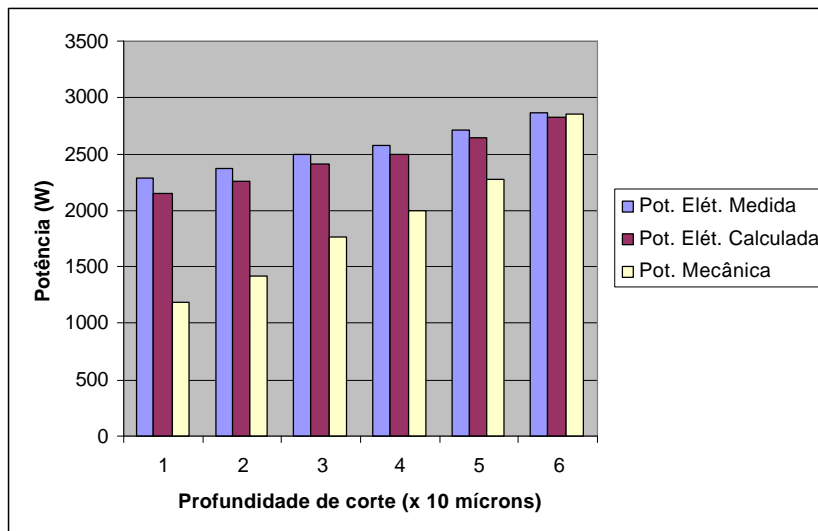


Figura 9 Comparação entre potências médias – 50 Hz

4. Conclusões

De acordo com os resultados obtidos conclui-se que o método apresentado como estudo comparativo entre potências elétrica e mecânica no processo de retificação é confiável e eficaz. Os resultados obtidos foram coerentes com o esperado, ou seja, a visualização das perdas do motor de indução que aciona o rebolo com a variação de carga e frequência foi notada com êxito. As perdas variam proporcionalmente à frequência do rebolo e inversamente proporcionais à profundidade de corte.

Nas Figura 8 e Figura 9 nota-se que a potência elétrica calculada sempre esteve próxima da potência elétrica medida. Estas por sua vez foram proporcionais à potência mecânica. Desta forma, é possível calcular a força de corte com precisão razoável com a informação da potência elétrica, ou mesmo da corrente de alimentação do motor.

A potência elétrica é maior em 60Hz que em 50Hz. As perdas mecânicas são aproximadamente proporcionais à velocidade, e também às perdas por histerese e Foucault. Já a potência mecânica é maior nos ensaios com frequência de 50 Hz, visto que a força de corte é

superior a dos ensaios realizados em mesmas condições à 60 Hz. Isto ocorre porque em baixas velocidades os grãos abrasivos do rebolo demoram mais tempo na zona de corte para efetuar o mesmo trabalho quando comparados com velocidades maiores

É perfeitamente possível a construção de um dispositivo eletrônico que converta o sinal da corrente do motor em uma informação da força de usinagem. Isso será de grande utilidade no controle da operação de usinagem.

5. Referências

AGUIAR, P. R., “*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, 1997.

AGUIAR, P. R., OLIVEIRA, J. F. G., “*Production Grinding Burn Detection Using Acoustic Emission and Electric Power Signals*”, Abrasives Magazine, January 1999, pp. 16-24.

ARONSON, R. B., “*Grinding’s Going High-Tech*”, Manufacturing Engineering, February 1997, pp. 46-55.

JEONG, Y. H. , CHO, D. W. *Estimating cutting force from rotating and stationary feed motor currents on a milling machine*, International Journal of Machine Tools & Manufacture 42 (2002) 1559–1566

FERRARESI, D. *Fundamentos da usinagem dos Metais*, Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1977

DINIZ, A. E., COSTA, C. E., “*A corrente elétrica do motor da máquina mostra o fim da vida da ferramenta*”, Revista Monitoramento, julho 1995.

Li, X. *Development of Current Sensor for Cutting Force Measurement in Turning* IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, vol 54, n° 1, Fevereiro, 2005

MANNAN, M. A., BROMS, S., “*Investigation into Temperature Dependence of Motor Current Measurements Applied to Monitoring and Adaptive Control*”, Annals of CIRP Vol. 41/1/1992.

MANNAN, M. A., BROMS, S., “*Monitoring and Adaptive Control of Cutting Process by Means of Motor Power and Current Measurements*”, Annals of the CIRP, Vol. 38/1/1989.

SARAVANAPRIYAN A. N.; VIJAYARAGHAVAN L.; KRISHNAMURTHY R.; “*On-line Detection of Grinding Burn by Integrated Sensing*”, Sensors for Industry Conference, Rosemount, Illinois, USA, 5-7 November 2001.

SHIRAIISHI, M., “*Scope of in-process measurement, monitoring and control techniques in machining processes – Part 3: In-process techniques for cutting process and machine tools*”, PRECISION ENGINEERING, January 1989, Vol. 11, no. 1, pp. 39-46.

SZECSI, T., “*A DC motor based cutting tool condition monitoring system*”, Journal of Materials Processing Technology 92-93, 1999, pp. 350-354.

TLUSTY, J., ANDREWS G. C., “*A Critical Review of Sensors Unmanned Machining*”, Annals of the CIRP, Vol. 32/02/1983.

TRUMPOLD, H., MACK, R., “*Process-Integrated Measurements for Quality Control with Turning*”, Annals of the CIRP, Vol. 41/1/1992