

MONITORAMENTO INDIRETO DO DESGASTE DA FERRAMENTA NO CORTE DE AÇOS ENDURECIDOS PELA MEDIDA DA CORRENTE DO MOTOR PRINCIPAL E VIBRAÇÃO DO CABEÇOTE DA FRESADORA

Carlos Alberto D. Ramos*, Fúlvio Queiroz Barbosa, Andersom Clayton Melo, Paulo Roberto R. Miranda, Álissom Rocha Machado

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João naves de Ávila, 2160, Campus Santa Mônica, Bloco 1M, CEP: 38400-902, Uberlândia MG, Brasil.

*Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. Campus IV, av. Amazonas 807, CEP: 38180.000, Araxá, MG, Brasil.

e-mail: cadram@mecanica.ufu.br; fulvioqueiroz@yahoo.com; acamel@mecanica.ufu.br; paulorrmiranda@mecanica.ufu.br; alissonm@mecanica.ufu.br

Resumo. Entre os processos de fabricação a usinagem se destaca pela sua versatilidade. No entanto, no corte de material endurecido o desgaste da ferramenta representa a maior parcela do custo da produção. Desta forma, o monitoramento do desgaste é de fundamental importância. Este trabalho apresenta um estudo no sentido de estabelecer uma relação entre os sinais de corrente elétrica do motor principal, vibração do cabeçote, rugosidade da superfície usinada e o desgaste da ferramenta. Descreve a dependência dos sinais adquiridos no fresamento de topo (canais) de um aço endurecido (VP420). Nesta operação utilizou-se o corte a seco com pastilhas de metal duro revestido com multi-camadas de TiAlN, variando as condições de corte. Os experimentos mostraram que os sinais do sensor de corrente e de vibração apresentaram informações confiáveis e relação direta com o crescimento do desgaste e, desta forma serem viáveis para o monitoramento da vida da ferramenta.

Palavras-chaves: Monitoramento, Usinabilidade, Usinagem de aços endurecidos, Fresamento, Vibração de máquinas ferramentas.

1. INTRODUÇÃO

A substituição da produção em massa pela produção em lotes, através das novas filosofias de produção tais como tecnologia de grupo e o sistema just-in-time (JIT), bem como a crescente busca por produtividade e qualidade das peças fabricadas, apontam para uma clara tendência na automação de máquinas-ferramentas. Diversas máquinas CNC já conseguem substituir várias funções anteriormente realizadas pelo homem, como aproximação, afastamento, posicionamento e percurso da ferramenta, etc. Mas algumas funções ainda permanecem sob a responsabilidade do operador, principalmente o momento da troca da ferramenta de corte. Neste caso, o fim de vida é baseado na observação visual, o que pode levar a produção de peças defeituosas ou até provocar danos nos equipamentos utilizados no processo. Além disso, na usinagem de aços endurecidos, a ferramenta de corte é um fator de extrema importância, porque seu consumo é muito grande e o custo é elevado. Assim, além da escolha adequada, é desejável que se saiba o momento certo para fazer a substituição.

Neste caso o monitoramento do processo para indicar o momento exato da interrupção da operação para troca da ferramenta é de extrema importância tanto para a otimização de sua vida quanto para a prevenção de quebra. Como consequência, possibilita a diminuição dos custos de produção. Contudo, a máxima utilização da ferramenta, deve-se obviamente, respeitar os limites da qualidade da peça produzida.

Assim, uma importante função dos sistemas de diagnóstico e controle de máquinas na usinagem é o monitoramento do desempenho da ferramenta. Neste sentido, especial atenção deve ser dada no desenvolvimento de técnicas seguras e eficazes para o monitoramento da vida da ferramenta. O desempenho da ferramenta é afetado por falhas provocadas por desgastes (contínuo) ou avarias (aleatórias). Tais falhas afetam, significativamente, a qualidade do produto e sua produtividade. As principais características de um bom sistema de monitoramento são (Diniz et al., 1995): confiabilidade, simplicidade, suportar o ambiente industrial, não ser influenciado por ruídos externos, o parâmetro medido deve depender somente do que se quer monitorar, baixo tempo de resposta, ser pouco intrusivo, ou seja, o sensor não deve interferir na operação de usinagem e ter custo acessível para seus propósitos.

Existem vários métodos de monitoramento do processo de usinagem, normalmente divididos em dois grandes grupos: monitoramento direto e indireto. No primeiro, a grandeza estudada é medida diretamente na ferramenta, interrompendo o processo de usinagem. No segundo método, um ou mais parâmetros são medidos e correlacionados com o estado da ferramenta. Segundo Castro et al. (2002), a adoção do desgaste de flanco como método de fim de vida apresenta algumas limitações. Como exemplo, a possibilidade de ocorrer erros de medição e leitura, possibilidade da presença simultânea de desgaste de cratera e de flanco, falhas catastróficas, etc.

Assim, a busca do emprego dos métodos indiretos para determinar o fim de vida de uma ferramenta é justificada por estas limitações e por sua relativa facilidade de implantação. Geralmente, os métodos indiretos são de emprego mais fácil, pois a instrumentação é mais simples, de menor custo e menos intrusiva do que nos métodos diretos. A principal dificuldade na utilização do monitoramento indireto é estabelecer a relação entre o parâmetro medido e o estudo e também, eliminar as interferências de ruídos no sinal medido. Entre os métodos de monitoramento indireto incluem-se as medidas: da força de corte, da vibração, da temperatura de corte, dos parâmetros elétricos do motor e da emissão acústica.

Neste trabalho serão analisados o comportamento de alguns sinais utilizados nos métodos indiretos de monitoramento da vida da ferramenta (corrente elétrica do motor principal da fresa, sinais de vibração do cabeçote) e comparados com o desgaste da ferramenta e rugosidade da peça durante o corte de um aço inoxidável martensítico VP420 (HRc).

2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

O processo utilizado para os teste foi o fresamento de topo (canais), com corte a seco em uma fresa ROMI INTERACT IV CNC, potência 75cv. Os ensaios de usinagem foram executados sobre uma barra retangular de aço inoxidável martensítico, em conformidade com a ISO/R 683-3, fabricado pela Villares Metals S/A, e tem sua composição descrita na tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço (Villares Metals S/A).

Villares	Similares			Teor (% em peso)			Dureza
	AISI	DIN	WNi	C	Si	Cr	
VP420	420		1.2083	0,40	0,50	13,5	0,25 50 HRc

Utilizou-se uma ferramenta de topo cilíndrica de 32 mm de diâmetro, com três insertos intercambiáveis, com fixação por parafuso [referencia R390-032A32-11M, Sandvik, 1999]. Pastilhas para operação de fresamento de topo e faceamento de canto a 90 graus em aços inoxidáveis com ângulo de rampa $\alpha=3,6^\circ$, dureza Vickers de HV3=1500HV, com a seguinte composição: 10,5 wt-% Co (cobalto) e o restante de WC (carboneto de tungstênio). Este metal duro é revestido com uma camada de TiAlN e TiN de 2 a 6 μm de espessura através de

deposição física a vapor (PVD) [referencia R390-11T308M-MM 2030, sandvik, 2001]. As condições de usinagem utilizadas nos ensaios foram escolhidas conforme um planejamento estatístico (Ramos et al., 2003) e estão relacionadas na Tabela 2.

Tabela 2. Condições de usinagem utilizadas nos ensaios.

Condições	1	2	3	4	2	5	6	2	7
Vc (m/min)	87	115	152		115			115	
fz (mm/z)		0,10		0,08	0,10	0,13		0,10	
ap (mm)		1,00			1,00		0,56	1,00	1,77

Observe na tabela 2 que a condição 2 foi repetida duas vezes. Esta condição central foi realizado por 3 vezes onde se verificou uma boa repetibilidade. Os sinais de corrente elétrica do motor do eixo-árvore foram captados pelo sensor de efeito Hall (Newtronic), cuja faixa de amperagem é de 0 a 50 A e sinal de saída na faixa de 0 a 5 VDC. O sinal analógico é enviado a uma placa de aquisição onde é convertido em digital para, na seqüência, serem armazenados e analisados no microcomputador utilizando o software LabView 5.1, da National Instruments. A aquisição foi a uma taxa de amostragem de 5000 pontos/segundo durante 10s do corte de cada canal. Cada valor de tensão na saída do sensor representa um único valor de corrente, possuindo uma relação de 0,0968V/A, isto é, o valor real da corrente consumida pelo motor é encontrado multiplicando-se o sinal de saída por este fator de conversão.

O critério de fim de vida da ferramenta está recomendado pela norma ISO8688-1,1989, para teste de vida de ferramentas em fresamento de topo. Assim, o desgaste de flanco ($V_B=0,35$ mm) foi tomado como critério para o fim de vida da ferramenta. As medições de desgastes (V_B) e rugosidade (R_a) foram realizadas em intervalos regulares a cada canal (355mm) ou a cada dois canais nos pontos de estabilização da aresta de corte em condições de corte menos severas. Cada medida de rugosidade (R_a) foi obtida pela média de três medições em diferentes pontos pré-determinados do mesmo canal. O aparelho utilizado foi o rugosímetro portátil Mitutoyo modelo Surftest 211. O valor do “cut-off” selecionado, devido a amplitude da rugosidade, foi de 0,8. O desgaste foi medido por um microscópio de ferramentaria dotado de dois parafusos micrométricos com precisão de um centésimo de milímetro, resolução de $5\mu\text{m}$, e aumento de 40x. A vibração foi captada por um acelerômetro do tipo 4367 (B&K) fixo no cabeçote da máquina, e os sinais transportados a um pré amplificador de carga (tipo 2635-B&K) e transferidos para uma placa de aquisição.

O esquema da Figura 1, mostra a montagem utilizada para realização dos ensaios.

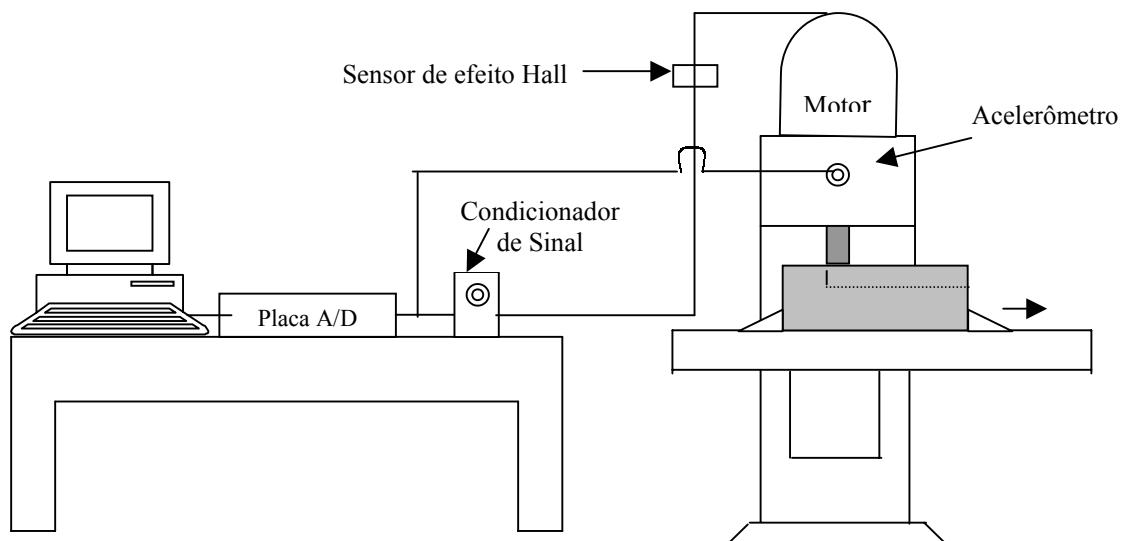


Figura 1- Diagrama esquemático da montagem experimental.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As Figuras de 2 a 5 apresentam o desenvolvimento dos parâmetros analisados durante o corte: desgaste de flanco, corrente elétrica do motor, amplitude de vibração do cabeçote e rugosidade da superfície usinada. Tais parâmetros foram obtidos concomitantemente nos ensaios 1, 2 e 3 (Tabela 2) em que se variou a velocidade de corte em três condições diferentes. A Figura 2 mostra o comportamento da corrente elétrica do motor principal da fresadora pelo comprimento de corte (a) e desgaste da ferramenta (b). A Figura 3 apresenta os desgastes de flanco destas ferramentas durante este deslocamento da ferreamenta.

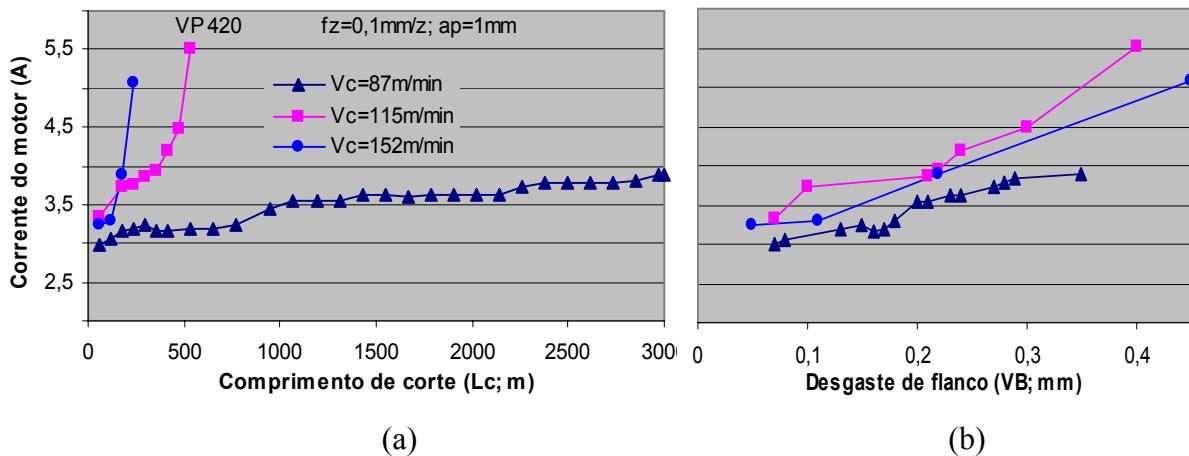


Figura 2 - Corrente do motor principal pelo comprimento de corte (a) e pelo desgaste de flanco (b) para três diferentes velocidades de corte. (condições 1, 2 e 3).

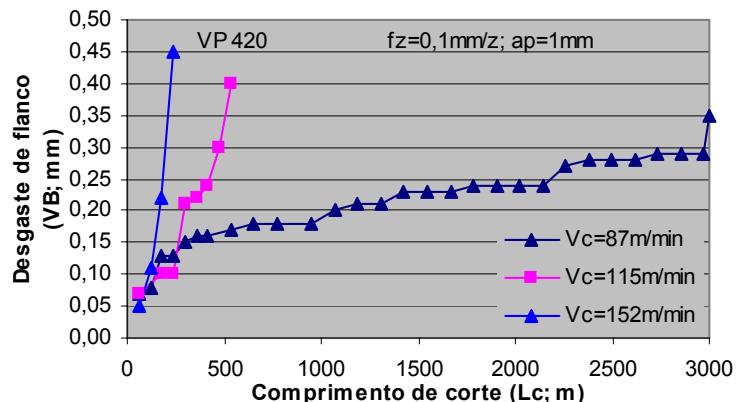


Figura 3 - Desgaste de flanco da ferramenta pelo comprimento de corte para três diferentes velocidades de corte. (condições 1, 2 e 3).

Pode-se observar nas figuras 2 (a) e 3 que as curvas têm comportamentos semelhantes, i.e., os padrões de crescimento das respectivas curvas de uma figura e outra são semelhantes. Elas apresentam uma certa correlação ao longo de todo o deslocamento de corte. Isto comprova a influência do desgaste da ferramenta no crescimento da corrente elétrica do motor de acionamento do eixo árvore. Dada esta influência, pode-se concluir que a corrente é adequada para ser utilizada no estabelecimento do fim de vida da ferramenta. No entanto, qual seria a estratégia a ser utilizada para a definição de fim de vida, de tal forma a ser adequada para todas as condições de corte?

Os coeficientes de correlação lineares obtidos pelas curvas de velocidade da figura 2 (corrente elétrica) são menores que suas respectivas curvas na figura 3 (desgaste de flanco), isto pode ser explicado pela sensibilidade do dispositivo de aquisição de sinais elétricos. Assim qualquer perturbação externa, ou mesmo interna ao sistema de aquisição pode afetar os resultados obtidos. Como exemplo, o estado geral do conjunto de alimentação elétrico (motor elétrico, estado das escovas, estabilidade de tensão da rede, etc). Estas perturbações podem gerar flutuações nos sinais de resposta e desta forma, mascarar os resultados. Assim é necessário maior desenvolvimento para solução destes e outros problemas existentes. Observa-se pela figura 2 (b) que o maior valor da corrente durante o corte foi obtido com a velocidade intermediaria e o menor valor da corrente com a menor velocidade.

A partir da Figura 3 pode-se observar um padrão característico de crescimento do desgaste durante a vida da ferramenta. Com exceção da curva da maior velocidade (152m/min), o desgaste ocorre em forma de “degraus”, isto é, um crescimento súbito seguido de um intervalo de taxa de crescimento zero ou bem pequeno, logo após um outro crescimento súbito, e assim por diante. Este padrão de desgaste é devido ao desgaste do tipo lascamento que predominou durante todos os ensaios. Pela figura 2 observa-se que a corrente tem o mesmo comportamento de crescimento observado durante a progressão do desgaste, tipo “degraus”. Neste caso, apresenta uma diferença: ocorre uma pequena oscilação entre um aumento e outro. Esta oscilação da corrente pode ser explicada pelo fato do sistema não ser totalmente estável, por se tratar de acionamento elétrico.

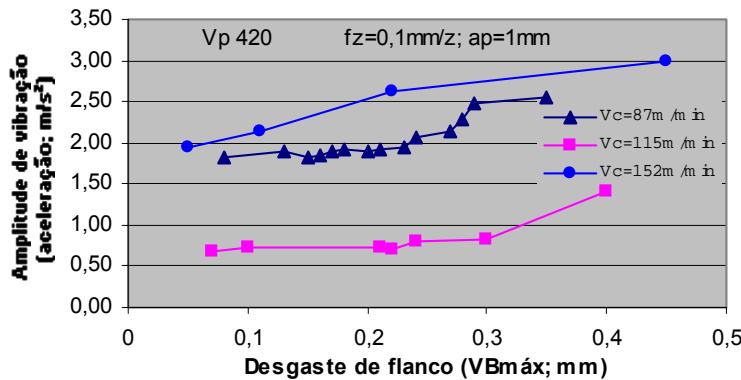


Figura 4 - Amplitude de vibração pelo comprimento de corte para três diferentes velocidades de corte. (condições 1, 2 e 3).

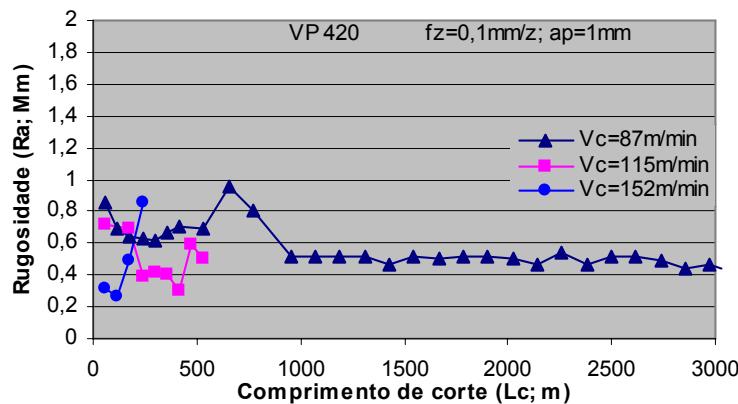


Figura 5 - Rugosidade da superfície usinada (μm) pelo comprimento de corte para três diferentes velocidades de corte. (condições 1, 2 e 3).

A Figura 4 mostra o comportamento da amplitude de vibração com a evolução do desgaste. Apesar dos padrões de crescimento das curvas da Figura 4 e as do desgaste (Figura 3) não serem semelhantes, elas apresentam valores crescentes até o final da vida da ferramenta. Este crescimento foi observado em todos ensaios de vibração realizados, comprovando, também, a influência do desgaste da ferramenta no crescimento da intensidade de vibração do cabeçote da máquina. No entanto, observou-se que este parâmetro sofre maior interferência de fatores externos, principalmente das condições de alinhamento radial e axial do conjunto porta-ferramentas. Observa-se na Figura 4 que em geral, a amplitude de vibração aumenta com o desgaste de flanco, mas a taxa do aumento é relativamente baixa. A menor vibração foi obtida com a velocidade de 115m/min. Desta forma, para as condições analisadas, o processo de corte torna-se mais estável com as velocidades intermediárias.

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 5 que a rugosidade não mostrou promissora como parâmetro de controle do fim de vida da ferramenta. Especialmente para baixas velocidades de corte, onde este parâmetro se mostrou independente do desgaste de flanco. Para a velocidade de corte de 87m/min, inicialmente a rugosidade teve uma pequena oscilação (entre 0,6 a 1,0 μm de Ra) e permaneceu praticamente constante (com uma leve redução) até o fim da vida da ferramenta. Observa-se também que mesmo no corte do último canal a rugosidade não altera significativamente de modo a ser diagnosticado como fim de vida da ferramenta.

As Figuras de 6 a 9 apresentam o desenvolvimento dos parâmetros adquiridos durante o corte, nos ensaios 4, 2 e 5 em que se variou o avanço por dente em três condições diferentes.

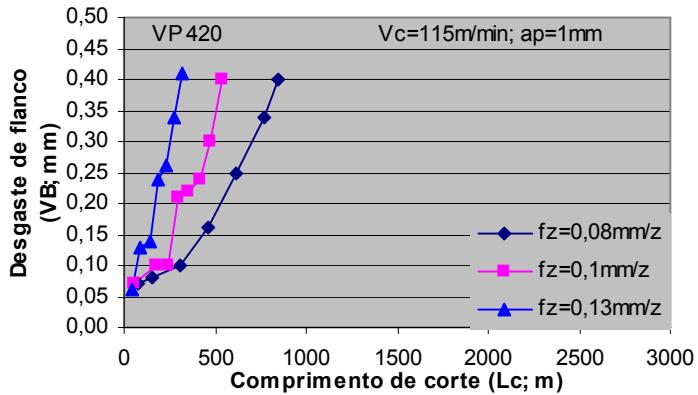


Figura 6 - Desgaste de flanco da ferramenta pelo comprimento de corte para três diferentes avanços por dente (condições 4, 2 e 5).

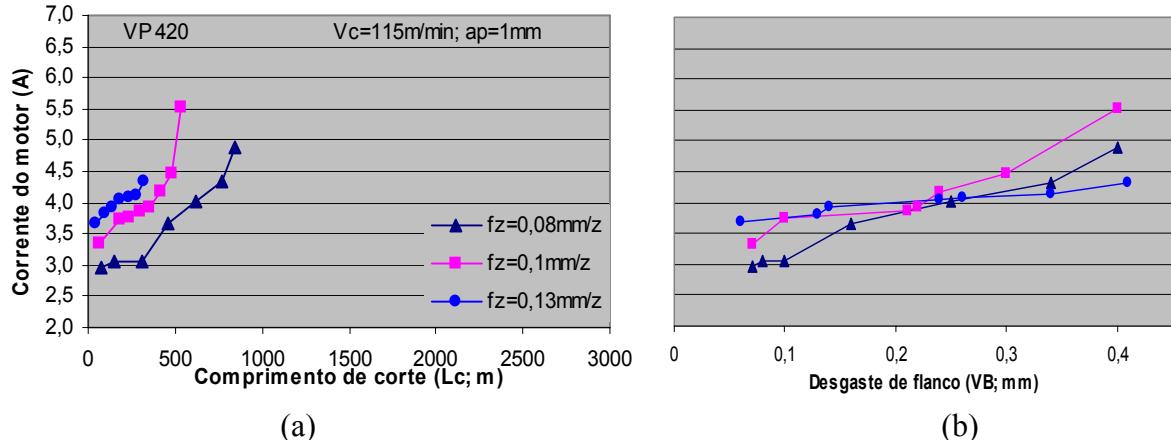


Figura 7 - Corrente elétrica do motor principal pelo comprimento de corte (a) e desgaste de flanco (b) para três diferentes avanços por dente (condições 4, 2 e 5).

Ao observar a Figura 7(b) nota-se que os valores da corrente elétrica aumenta com o desgaste da ferramenta para os diferentes avanços. Confirmando a influência do desgaste da ferramenta no crescimento da intensidade da corrente elétrica do motor. No entanto a taxa de crescimento é bem inferior ao se comparar com as outras condições de corte analisadas (velocidade de corte e profundidade de corte). Principalmente para o maior avanço ($f_z=0,13\text{mm/dente}$). Além disso, estes valores são muito próximos para os diferentes avanços, principalmente com o desgaste próximo de 0,25mm onde apresenta o mesmo valor de corrente elétrica. Até 0,25mm de desgaste de flanco, o maior avanço apresenta o maior valor de corrente e acima de 0,25mm esta condição inverte e este avanço passa apresentar o menor valor de corrente. Estes fatos comprovam a menor influência do avanço na intensidade de corrente elétrica do motor principal relativamente às outras variáveis analisadas.

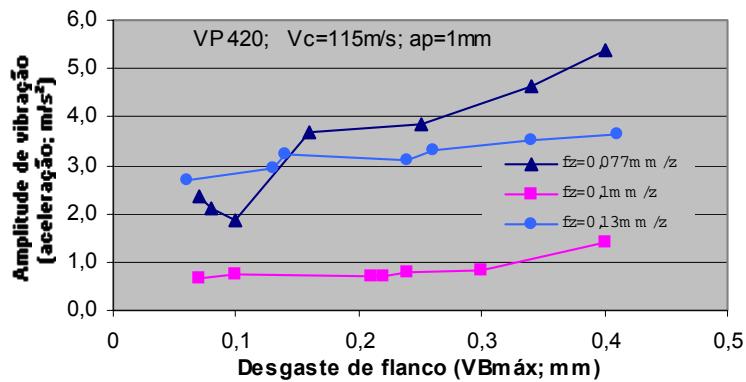


Figura 8 - Amplitude de vibração pelo comprimento de corte para três diferentes avanços por dente (condições 4, 2 e 5).

Observa-se na Figura 8 que, para os três avanços analisados, a amplitude de vibração aumenta com o desgaste da ferramenta, principalmente a partir de 0,25mm de desgaste de flanco. Isto confirma a influência do desgaste da ferramenta no crescimento da amplitude de vibração. Aqui também o processo de corte apresentou mais estável com os avanços intermediários, pois a menor vibração foi obtida durante o corte com 0,1mm/dente de avanço.

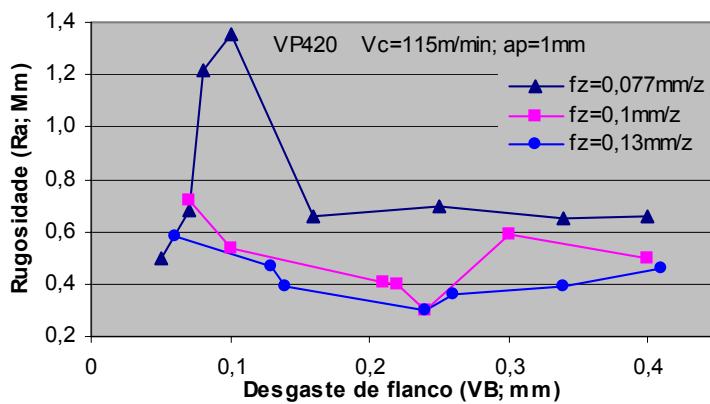


Figura 9 - Rugosidade da superfície usinada pelo desgaste de flanco para três diferentes avanços por dente (condições 4, 2 e 5).

Ao contrário do que diz a literatura a rugosidade apresentou melhores resultados para o maior avanço por dente, com valores em torno de $0,39\mu\text{m}$ para $0,13\text{mm/dente}$ contra $0,85 \mu\text{m}$ para $0,1$ e $0,08 \text{ mm/dente}$ (veja Figura 9). Este resultado indica que a amplitude de vibração exerce influencia marcante na rugosidade.

As Figuras de 10 a 13 apresentam o desenvolvimento dos parâmetros adquiridos durante os ensaios 6, 2 e 7 em que se variou a profundidade axial de corte em três condições diferentes.

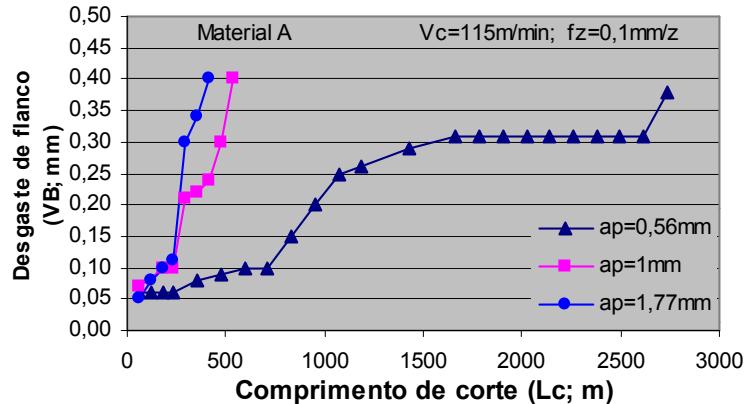


Figura 10 - Desgaste de flanco pelo comprimento de corte para três diferentes profundidades axiais de corte (condições 6, 2 e 7).

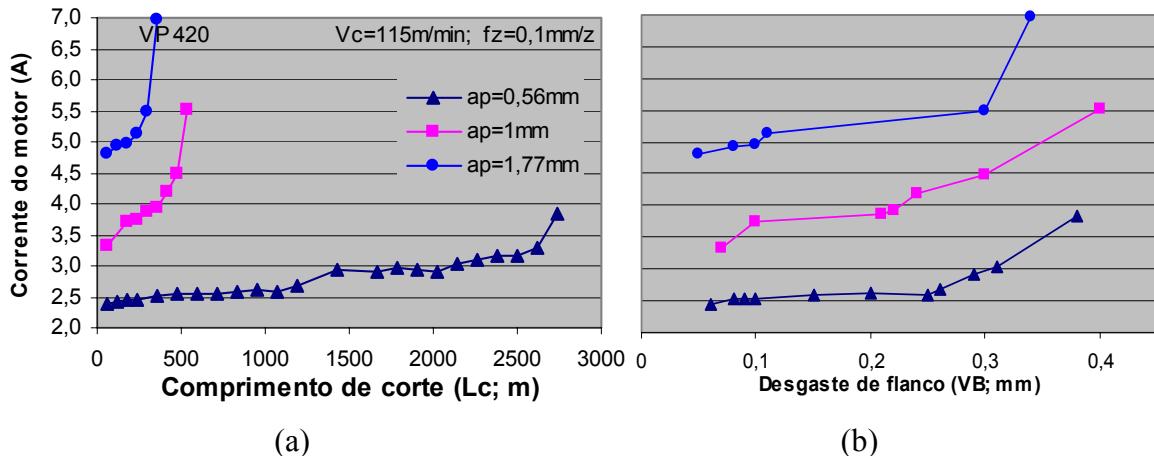


Figura 11 - Corrente elétrica do motor principal pelo comprimento de corte para três diferentes profundidades axiais de corte (condições 6, 2 e 7).

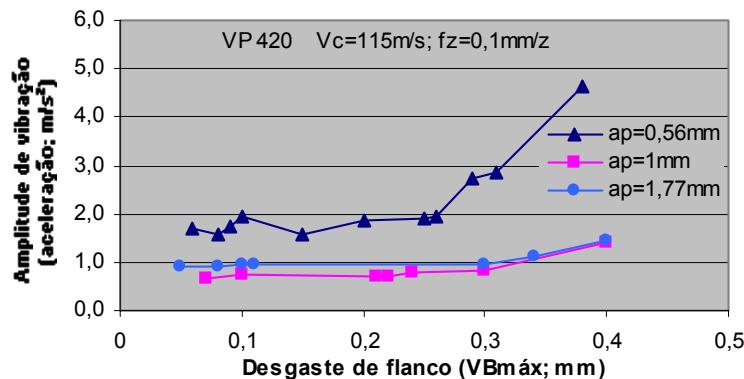


Figura 12 - Amplitude de vibração do cabeçote pelo comprimento de corte para três diferentes profundidades axiais de corte (condições 6, 2 e 7).

Observa-se pelas curvas da Figura 11 que as maiores profundidades de corte apresentam os maiores valores da corrente elétrica e estes valores são distintos e aumentam com o desgaste da ferramenta. Aqui a taxa de crescimento é relativamente maior e tem seu máximo na fase final do desgaste. Também o processo de corte apresentou mais estável com a profundidade de corte intermediária, (Figura 12).

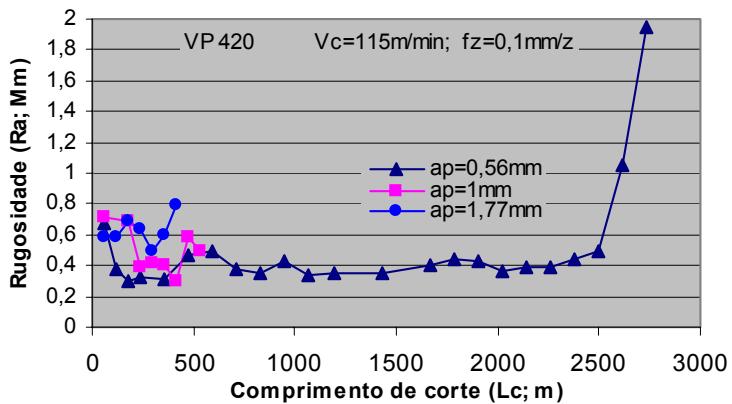


Figura 13 - Rugosidade da superfície usinada pelo comprimento de corte para três diferentes profundidades axiais de corte (condições 6, 2 e 7).

A rugosidade apresentou oscilações entre 0,25 e 0,7 μm nas três profundidades analisadas sem indicação de influência no aumento do desgaste, exceto no último passe quando a ferramenta já estava avariada (Figura 13).

Ao analisar os gráficos relativos à corrente elétrica do motor (Figuras 2, 7 e 11) e mesmo os relacionados à vibração pode-se notar que qualquer valor fixo para o limite da corrente acima da qual se estabeleceria o fim de vida de uma ferramenta não poderia ser utilizado para outra, sob pena de não completar o fim de vida ou ultrapassar o limite de desgaste estabelecido. Neste caso corre-se o risco de dano à peça e à própria máquina-ferramenta. Uma possível estratégia a ser utilizada para a definição de fim de vida, de tal forma a ser adequada para uma faixa de condições de corte, pode ser a de se limitar a corrente final em função destas condições. Os valores dos limites de correntes seriam determinados através de pré-testes. Observando os gráficos das figuras 2, 7 e 11 pode-se concluir que o fator mais influente na intensidade de corrente foi a profundidade e a velocidade de corte. Desta forma, tomando como base os valores das correntes no final de vida das ferramentas para estas duas condições e o critério de desgaste de flanco ($V_B = 0,35 \text{ mm}$), pode-se construir os gráficos das Figuras 14 e 15.

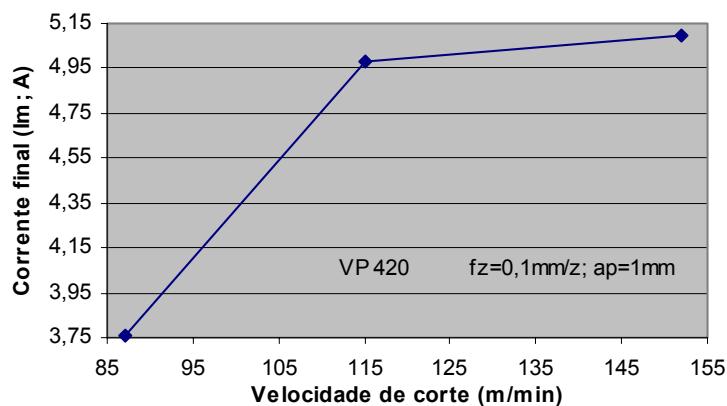


Figura 14 - Corrente final (limite) em função da velocidade de corte.

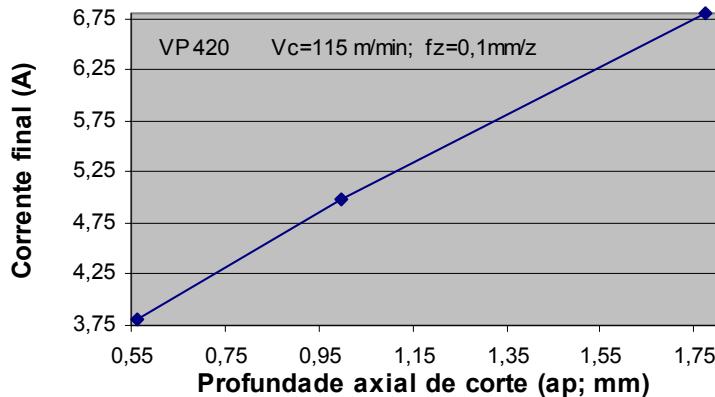


Figura 15 - Corrente final (limite) em função da profundidade axial de corte.

Nestas Figuras, cada coordenada que forma a linha representa o par: abscissa (velocidade de corte, Figura 14 ou profundidade de corte, figura 15) e sua respectiva provável corrente elétrica final máxima (ordenada), para as condições específicas deste trabalho e utilizando avanço por dente ($f_z=0,1\text{mm}/z$) e profundidade ($ap=1\text{mm}$). Assim, estas linhas formam os limites da vida da ferramenta quando medidas indiretamente através do parâmetro corrente elétrica do motor. Por exemplo, escolhido o material de trabalho e as ferramentas especificadas neste trabalho e a velocidade de corte $105\text{m}/\text{min}$, o valor provável da corrente elétrica do motor principal no final da vida da ferramenta ($VB=0,35\text{mm}$) será de aproximadamente $4,55\text{A}$.

4. CONCLUSÕES

- Os valores da corrente elétrica aumentam com o desgaste da ferramenta nas condições de corte analisadas (variação da velocidade de corte, avanço por dente e profundidade axial de corte). Isto confirma a influência do desgaste da ferramenta no crescimento da intensidade da corrente elétrica do motor. Desta forma pode-se concluir que a corrente elétrica é um bom parâmetro na avaliação do desgaste da ferramenta e o estabelecimento do seu fim de vida.
- Os efeitos da profundidade axial de corte são mais influentes na intensidade de corrente elétrica do motor principal que as demais condições analisadas. Ao contrário do que ocorre para a velocidade de corte e o avanço por dente em que os valores da corrente são próximos, para cada profundidade de corte estes valores são bastante distintos. Também, a taxa de crescimento é bem inferior para o maior avanço ($f_z=0,13\text{mm}/z$).
- Não foi possível utilizar um valor fixo de corrente para todas as condições de corte no qual uma vez ultrapassada definiria o fim de vida da ferramenta. Desta forma, a estratégia a ser utilizada para a definição de fim de vida, é limitada tanto pelas condições utilizadas em cada corte quanto pelo material a ser usinado. Assim, como auxílio a um sistema de monitoramento do fim de vida da ferramenta, pode-se obter um arquivo com informações padronizadas em cada condição específica de corte e material.
- Gráficos com o objetivo de diagnosticar o limite de corrente acima da qual se estabeleceria o fim de vida da ferramenta foram construídos. Estes gráficos são adequados para uma faixa de condições de corte estabelecidas neste trabalho.

- A amplitude de vibração do cabeçote da máquina aumenta com o aumento do desgaste da ferramenta nas três condições de corte analisadas (velocidade de corte, avanço por dente e profundidade axial de corte).
- O processo de corte torna-se mais estável utilizando as condições de corte intermediárias. A amplitude de vibração teve seu valor aumentado a partir das condições de corte intermediárias, nas três condições de corte analisadas (velocidade de corte, avanço por dente e profundidade axial de corte). As menores amplitudes de vibração foram obtidas durante os testes com as seguintes condições: $V_c=115\text{m/min}$; $f_z=0,1\text{mm/z}$ e $a_p=1\text{mm}$.
- A imprevisibilidade da “rugosidade da superfície usinada” sugere que esta resposta não apresenta ser promissora como parâmetro para controle do fim de vida da ferramenta, e, portanto viável para o monitoramento.
- Observou-se que os dispositivos de aquisições de sinais de corrente e principalmente de vibração são muito sensíveis ao estado geral do próprio processo de corte e de perturbações externas tais como: o estado geral do conjunto de alimentação elétrica (motor elétrico, estado das escovas, estabilidade de tensão da rede, etc), a existência de outra máquina em funcionamento na região circunvizinha. Estas perturbações podem gerar flutuações nos sinais de respostas e desta forma, mascarar os resultados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Villares Metals S.A. na pessoa do Engº Celso Antonio Barbosa pelo fornecimento do material da peça e à CAPES e IFM pelo suporte financeiro.

6. BIBLIOGRAFIA

- Castro, R.P.; Sousa, M.M.; Santos, S.C.; Machado, Á.R.; *Sinais de Vibração Mecânica no Monitoramento do Desgaste das Brocas de Aço Rápido*, Revista Máquinas e Metais, vol.434, pp 122-135.
- Diniz, A. E.; Coste, C.E., 1995; “A Corrente Elétrica do Motor da Máquina Mostra o Fim da Vida da Ferramenta”, Revista Máquinas e Metais, vol.434, pp 41-82.
- ISO 8688-2, Teste de Fim de Vida da Ferramenta no Fresamento , Parte 2: Fresamento de Topo, 1989 (E).
- Machado,A.R.; da Silva, M.B; 1999; “Usinagem dos Metais”, Ed. UFU,1999, 244 pgs.
- National Instruments LabVIEW, 2001; “User Manual” e “Measurements Manual” Edição de Novembro de 2001.
- Ramos,C.A.D., Barbosa, C.A.; Miranda, P.R.R.; Machado,A.R.; 2003, “Machinability of a Martensitic Stainless Steel in End Milling Operation Using Surface Response Methodology”, II COBEM- Congresso Brasileiro de Fabricação, Uberlândia, Minas Gerais, Brazil, may 2003.
- Sandvik, 2000, CoroKey, Ferramentas para Melhoria da Produtividade em Torneamento, Fresamento e Furação, 5^a edição, pág 121.
- Trent, E.M., 1991, *Metal Cutting*, 3rd Edition, Butterworths, London, 245 pgs.