

# UMA ABORDAGEM AO DESGASTE DAS FERRAMENTAS E À SUA RELAÇÃO COM AS FORÇAS DE CORTE EM PROCESSOS DE MAQUINAGEM

J. Paulo Davim <sup>1</sup> e A. Monteiro Baptista <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro

<sup>2</sup> Professor Associado, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto



## RESUMO

*O presente artigo tem como objectivo apresentar os resultados de um estudo experimental sobre o desgaste das ferramentas e sua relação com as forças de corte em processos de maquinagem (torneamento e furação). Foram obtidos exemplos de correlações lineares entre as forças de corte e o desgaste na face de saída das ferramentas. Concluiu-se que a força de avanço se revelou a componente mais sensível ao desgaste na face de saída das ferramentas. Posteriormente, foram obtidos resultados de uma análise em frequência efectuada ao sinal da força de avanço para diferentes tempos de corte e, conseqüentemente, diferentes desgastes na face de saída das brocas e pastilhas de corte. Concluiu-se que análise em frequência poderá constituir um método indirecto de avaliação do estado das ferramentas de corte, nomeadamente, no que respeita ao desgaste na face de saída*

## 1. INTRODUÇÃO

Nesta investigação foram maquinados (torneados e furados) compósitos de matriz de alumínio (AA356/SiC/17p) com ferramentas com insertos de diamante policristalino (PCD).

Em torneamento é comum definir o estado de carga na ferramenta pelas três componentes ortogonais da força de maquinagem - a força de corte ( $F_c$ ), a força de avanço ( $F_a$ ) e a força de penetramento ( $F_p$ ), Fig. 1, enquanto que, na furação é comum utilizar a força de avanço ( $F_a$ ) e o binário ( $M_z$ ), Fig. 2. No caso de uma broca

com as arestas de corte perfeitamente afiadas ou com desgaste equilibrado as forças de penetramento -laterais- ( $F_y$ ) não são significativas, ficando o estado definido pela força de avanço e pelo binário. A medição das várias componentes destas forças foi efectuada por meio de dinamómetros piezoeléctricos (Ferraresi, 1977), (Shaw, 1984), (Davim, 1995) (Davim et. al, 1998).

O desgaste típico observado nas pastilhas foi o desgaste linear na face de saída (principal) que é definido pela sua largura ( $VB$ ) variável ao longo da aresta de

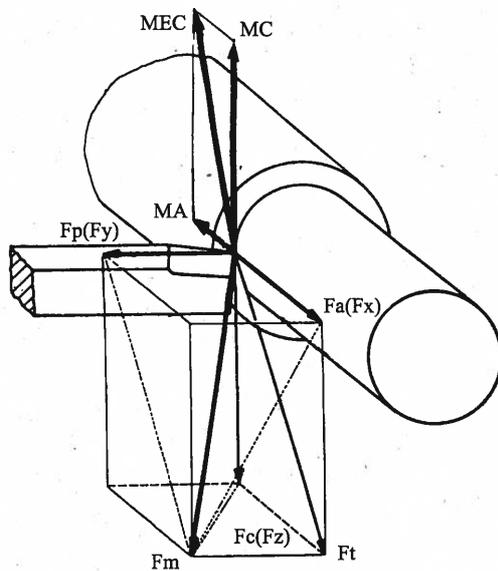
corde.

Na furação verificou-se que o desgaste, nas faces de saída principais da broca, vai crescendo de uma forma aproximadamente linear, do eixo (ponto de velocidade periférica nula) para a periferia, vértice (ponto de velocidade periférica máxima). Verificou-se que, nesta zona, o desgaste mais intenso tende a arredondar o vértice da broca.

A ordem de grandeza dos desgastes a medir (centésimos de milímetro), exige a utilização de meios ópticos com ampliação adequada.

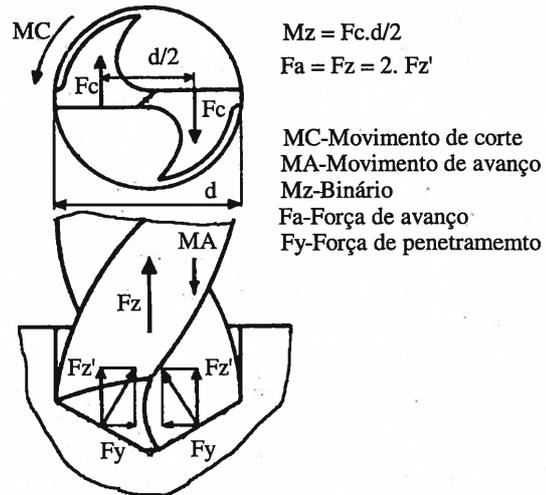
Para a medição rigorosa do desgaste, na face de saída ou folga das pastilhas de corte e das brocas foi utilizado um microscópio de oficina, com uma resolução nos carros de 1 µm.

A medição do desgaste linear na face de saída quer das pastilhas de corte quer das brocas foi efectuada do seguinte modo:



- MEC- Movimento efectivo de corte
- MA- Movimento de avanço
- MC- Movimento de corte
- Fa- Força de avanço
- Fp- Força de penetramento
- Fc- Força de corte
- Ft- Força de apoio
- Fm- força de maquinagem

Fig. 1 Sistema de forças aplicadas na ferramenta durante o torneamento.



$$Mz = Fc \cdot d/2$$

$$Fa = Fz = 2 \cdot Fz'$$

- MC- Movimento de corte
- MA- Movimento de avanço
- Mz- Binário
- Fa- Força de avanço
- Fy- Força de penetramento

Fig. 2 Sistema de forças aplicadas na broca durante a furação.

- colocação da ferramenta (broca ou pastilha), no posicionador adequado fixado no carro de movimentos cruzados do microscópio.
- deslocação do carro longitudinal de forma a efectuar o zero do micrómetro numa zona não desgastada da aresta de pastilha ou no vértice da broca.
- deslocação do carro longitudinal, para a zona B da Fig. 3 e medição do valor do desgaste em três pontos da face de saída da pastilha, equidistantes entre si, VB1, VB2 e VB3; ou para o ponto A da Fig. 4 e medição do desgaste VBmáx. nas duas faces de saída da broca.

O desgaste na face de saída (VB) das pastilhas de corte foi obtido pelo cálculo da média aritmética das leituras VB1, VB2 e VB3. Experiências por nós efectuadas mostraram que não existe vantagem em considerar um maior número de medidas dado que os resultados considerados foram muito próximos dos obtidos com três medidas (Davim, 1997). Este estudo teve origem nas recomendações de Tseng citadas e verificadas por (Mesquita, 1988) segundo os quais diferentes tipos de medição do

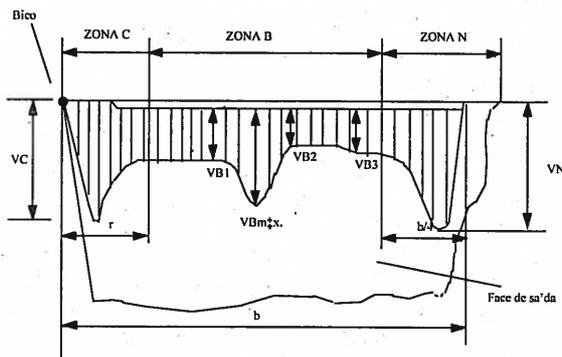


Fig. 3 Medida do desgaste linear da face de saída (folga) numa pastilha de torneamento (segundo a norma ISO 3685).

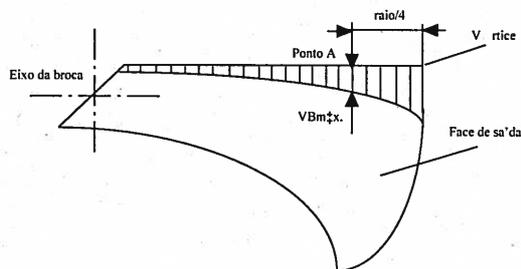


Fig. 4 Medida do desgaste linear na face de saída (folga) numa broca.

mesmo desgaste na face de saída (VB) apresentam resultados diferentes podendo alterar de um modo significativo a vida da ferramenta, se for este o critério de vida empregue. De qualquer modo este mesmo autor refere que a determinação do valor médio na zona B, conforme foi efectuado nesta investigação, parece ser o mais adequado dado que conduz a resultados mais consistentes. A norma ISO 3685 estabelece também que as medições para obter o desgaste linear médio na face de saída devem ser efectuados na zona B, excluindo os desgastes típicos próximos do bico e do entalhe.

No que respeita ao desgaste linear na face de saída das brocas este foi obtido pela média aritmética das leituras do desgaste linear máximo (VBmáx) efectuado a 1/4 do raio da broca medido a partir do vértice de cada uma das arestas de corte principais (no caso geral da broca helicoidal são duas arestas). A escolha deste critério teve por base um estudo ponderado, com vista a eliminar imprecisões que poderiam surgir se a leitura fosse efectuada no vértice da broca

que é uma zona de desgaste acentuado, rápido e de evolução imprevisível. Deste modo, procurou-se tal como foi referido para as pastilhas de corte, evitar que a vida da broca fosse alterada de um modo significativa se fosse utilizado o critério do desgaste admissível na face de saída.

## 2. DESGASTE DAS FERRAMENTAS E SUA RELAÇÃO COM AS FORÇAS DE CORTE

A influência que os diversos tipos de desgaste exercem nas forças de corte tem sido estudada há vários anos. De acordo com (Mesquita, 1988) as primeiras referências ao efeito do desgaste das ferramentas de corte nas forças, datam de 1960, e devem-se a Kobayashi e Thomsen, que ao analisarem as ferramentas verificaram a citada influência.

A medição contínua das forças de corte constitui, efectivamente, um método de medida indirecta de avaliação do estado das ferramentas de corte, incluindo o desgaste progressivo (Boothroy and Knight, 1989).

Parece haver consenso, que no caso dos novos materiais para ferramentas, nas quais se incluem as ferramentas com insertos de PCD, e para as condições de corte usualmente empregues, o desgaste que ocorre de forma progressiva, controlável e preponderante é o desgaste na face de saída.

No torneamento as componentes da força de maquinagem, de avanço e de penetramento são mais sensíveis ao desgaste linear na face de saída -VB- do que a componente de corte (força de corte principal), ao longo do tempo de maquinagem. Igualmente, na furação a força de avanço é mais sensível ao desgaste máximo na face de saída -VBmáx.- do que o binário.

Verificámos que no caso do torneamento foi possível obter ajustamentos lineares do tipo:

$$F_a = a_1 + b_1 VB \quad (1)$$

$$F_p = a_2 + b_2 VB \quad (2)$$

$$F_c = a_3 + b_3 VB \quad (3)$$

sendo,  $F_a$  a força de avanço e  $F_p$  a força de penetramento e  $F_c$  a força de corte e  $VB$  o desgaste médio na face de saída da pastilha.

Os coeficientes de correlação obtidos foram quase sempre superiores a 0,95 excepto no caso da equação (3).

No caso da furação foi possível obter um ajustamento linear com um coeficiente de correlação superior a 0,90 do tipo:

$$F_a = c + d VB_{\text{máx.}} \quad (4)$$

sendo  $F_a$  a força de avanço e  $VB_{\text{máx.}}$  o desgaste máximo na face de saída da broca.

Tentativas por nós realizadas mostraram que o ajustamento linear entre o binário medido e o desgaste máximo na face de saída da broca - $VB_{\text{máx.}}$ - efectuado para várias condições de corte apresentava um coeficiente de correlação extremamente baixo (sempre inferior a 0,35).

Finalmente, verificou-se que, tal como acontece na maquinaria dos materiais tradicionais, a evolução da força de avanço com o tempo de corte é influenciada, de um modo significativo, pelo desgaste na face de saída da ferramenta de corte, quer em torneamento quer em furação (Baptista and Davim, 1995) e (Baptista and Davim, 1997)

A Fig. 5, apresenta exemplos de correlações típicas obtidas, entre as forças de corte e o desgaste na face de saída, no torneamento e na furação (Davim e Baptista, 1998).

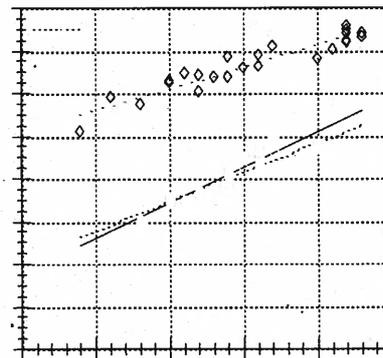
No torneamento foi possível estabelecer boas correlações entre a evolução das forças de penetramento ( $F_p$ ) e de avanço ( $F_a$ ) e o desgaste médio na face de saída da pastilha ( $VB$ ). A correlação obtida entre a evolução da força de corte ( $F_c$ ) e o desgaste médio na face de saída da pastilha ( $VB$ ) não foi tão boa.

Na furação apenas foi possível estabelecer boa correlação entre a evolução da força de avanço ( $F_a$ ) e o desgaste máximo na face de saída da broca ( $VB_{\text{máx.}}$ ) - medido a 1/4 do raio da broca a partir do vértice-. De acordo com estes resultados não parece haver qualquer influência do desgaste máximo na

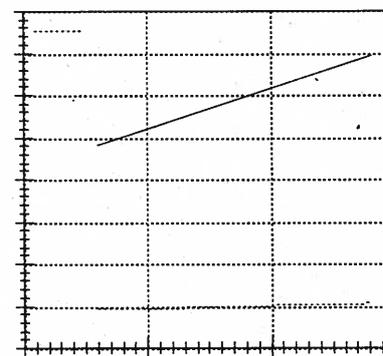
face de saída ( $VB_{\text{máx.}}$ ) no binário (B).

De um modo geral, pensamos poder afirmar que a força de avanço se revelou a componente mais sensível à evolução do desgaste na face de saída das ferramentas. Contudo, em determinadas condições de corte as variações médias da força de avanço são muito pequenas e de difícil detecção. Note-se que a evolução do desgaste ao longo do tempo de corte na face de saída das ferramentas com insertos de PCD é também extremamente lenta.

Neste contexto, uma análise em frequência do sinal da força de avanço poderá justificar-se, no sentido, de clarificar o seu conteúdo, nas componentes de várias frequências. Esta técnica, que iremos apresentar, poderá servir para diagnosticar a existência de uma causa (desgaste na face de saída das ferramentas) em relação à produção de sinais anormais (forças de avanço) durante o corte.



a)



b)

Fig. 5 Evolução das forças de corte com o desgaste na face de saída.

a) Torneamento. b) Furação.

### 3. ANÁLISE EM FREQUÊNCIA

O processamento e análise de um sinal adquirido pode ser efectuado recorrendo, entre outras às transformadas de Fourier e de Hilbert (Kailath, 1985), (Neweland, 1978), (Randal, 1992) e (Jonhson, 1997). O cálculo e a visualização da transformada rápida de Fourier (FFT), do espectro de potência (PS) e da transformada rápida de Hilbert (FHT) foi efectuado em "software" LabVIEW. A transformada de Fourier estabelece uma relação entre o sinal e a sua representação no domínio da frequência. A sua definição para um sinal em função do tempo  $x(t)$  é a seguinte:

$$X(f) = F [x(t)] = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-j2\pi ft} dt \quad (5)$$

sendo  $f$  a frequência.

O algoritmo implementado no "software" LabVIEW é o Split-Radix que permite calcular a FFT.

O espectro de potência (PS) da função  $x(t)$  é definido do seguinte modo:

$$S_{xx}(f) = X^*(f) X(f) = |X(f)|^2 \quad (6)$$

sendo  $X^*(f)$  o conjugado do complexo  $X(f)$ .

A transformada de Hilbert exprime a relação entre as partes real e imaginária da transformada de Fourier de um sinal unilateral. Pode obter-se para a transformada de Hilbert a seguinte expressão:

$$h(t) = H [x(t)] = -\frac{1}{\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{x(\psi)}{t-\psi} d\psi \quad (7)$$

sendo  $\psi$  uma constante de tempo

Os detalhes sobre processamento e análise de sinal, que estão fora do objectivo deste trabalho, podem ser observados na extensa literatura da especialidade, da qual se cita alguma da consultada julgada mais relevante (Kailath, 1985), (Neweland, 1978), (Randal, 1992) e (Jonhson, 1997).

Com o recurso ao "software" LabVIEW e tendo em consideração que a força de avanço ( $F_a$ ), conforme foi anteriormente referido, se revelou a componente mais sensível ao desgaste linear na face de saída das ferramentas, foram obtidos resultados da FFT, PS e FHT para diferentes tempos de corte e, conseqüentemente, diferentes desgastes na face de saída quer das brocas quer das pastilhas de corte (Davim et al., 1996).

A frequência de amostragem utilizada nos exemplos que iremos apresentar foi de 1kHz. A dimensão da amostra representada foi de 256 pontos. Houve o cuidado de utilizar frequências de aquisição apropriadas para evitar o efeito de "aliasing".

Na Fig. 6 podemos observar o resultado da análise em frequência do sinal da força de avanço ( $F_a$ ) obtida em torneamento, nas seguintes condições de corte,  $V_c=350\text{m/min}$ ,  $a=0,1\text{mm/rot}$  e  $p=1\text{mm}$  com emulsão Alusol-B 8%.

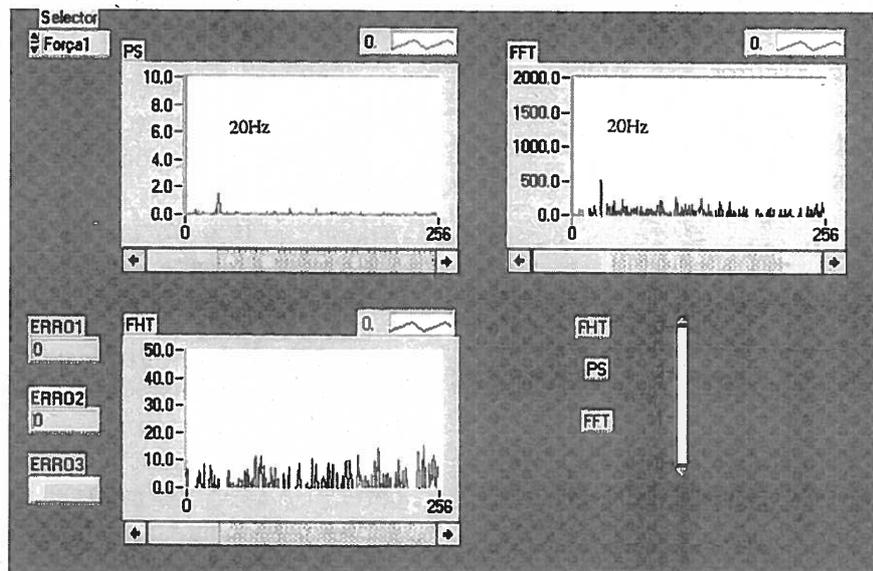
Na Fig. 6 a) a referida análise foi efectuada ao resultado do ensaio 325 com a pastilha no estado de quase nova ( $t_c \approx 1,5\text{min}$  e  $V_B=0,07\text{mm}$ ) e podemos observar que a frequência principal se aproxima da frequência de rotação da árvore do torno, parecendo não existir outra frequência com significado quando comparada com esta. Ao contrário, na Fig. 6 b) a mesma análise foi efectuada ao resultado do ensaio 351 realizado com uma pastilha após um tempo de corte de cerca de 22 minutos e conseqüente desgaste  $V_B=0,29\text{mm}$ . Observámos, neste caso, a existência de outras frequências com amplitudes superiores.

Na Fig. 7 podemos observar o resultado da análise em frequência do sinal da força de avanço ( $F_a$ ) obtida na furação nas seguintes condições de corte,  $V_c=50\text{m/min}$  e  $a=0,1\text{mm/rot}$ . com emulsão Alusol-B 8%.

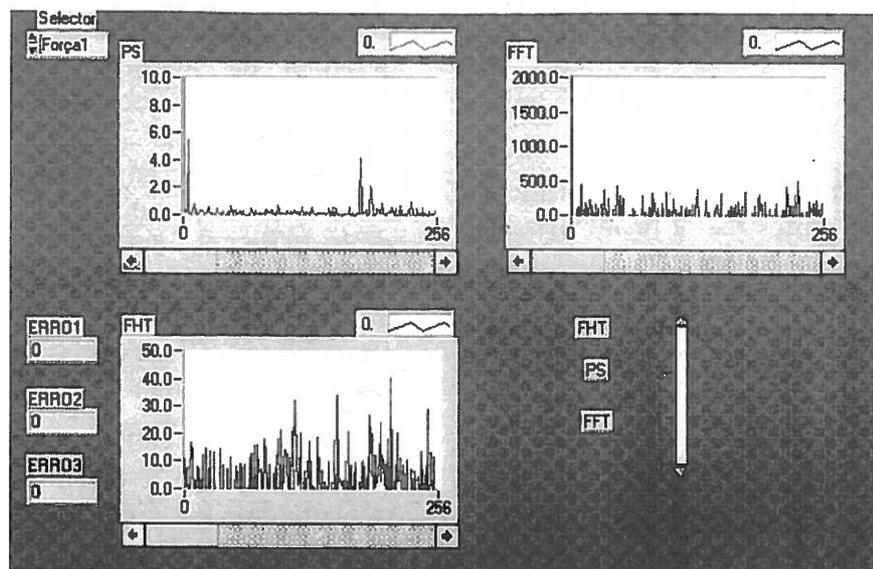
Na Fig. 7 a) a referida análise em frequência foi efectuada ao resultado do ensaio 645 realizado com a broca no estado de quase nova ( $t_c \approx 15\text{s}$  e  $V_{B\text{máx.}}=0,05\text{mm}$ ) e podemos observar, também, que a

frequência principal se aproxima da frequência da rotação da broca, parecendo não existir outra frequência com significado quando comparada com esta. Na Fig. 7 b) a mesma análise foi realizada ao resultado do ensaio 865 efectuado com uma broca após um tempo de corte de cerca de 11,5 minutos e um desgaste  $VB_{máx.}=0,12\text{mm}$ . Observou-se, neste caso, um aumento da amplitude do sinal da frequência principal.

Com base nos exemplos anteriormente apresentados, pensamos poder propor um método indirecto da avaliação do estado das ferramentas de corte, nomeadamente no que respeita ao desgaste na face de saída. A sua aplicabilidade poderá ser interessante quando o aumento do valor médio da força de avanço não for um indicador fiável.

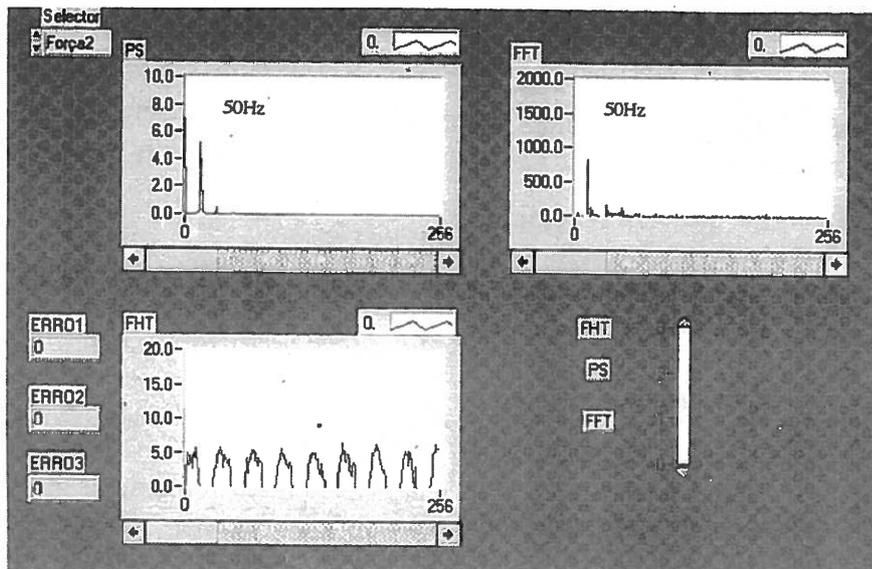


a) Ensaio 325, tempo de corte  $\approx 1,5$  min,  $VB=0,07\text{mm}$ .

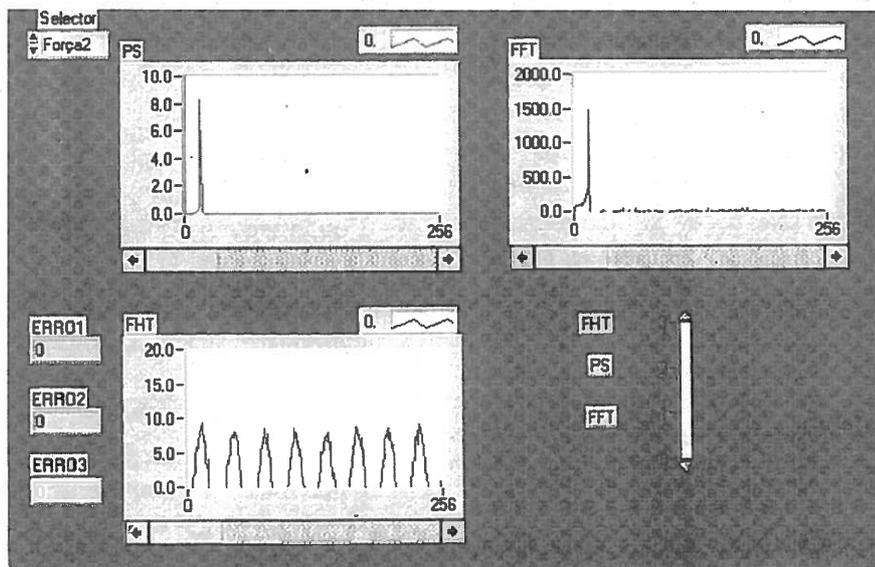


b) Ensaio 351, tempo de corte  $\approx 22$  min,  $VB=0,29\text{mm}$ .

**Fig. 6** Análise em frequência do sinal da força de avanço ( $F_a$ ) obtida em torneamento, com a pastilha N°40,  $V_c=350\text{m/min}$ ,  $a=0,1\text{mm/rot}$  e  $p=1\text{mm}$  com emulsão Alusol-B 8%



a) Ensaio 645, tempo de corte  $\approx 15$ s,  $VB_{\text{máx.}}=0,05$ mm.



c) Ensaio 865, tempo de corte  $\approx 11,5$  min,  $VB_{\text{máx.}}=0,12$ mm.

Fig. 7 Análise em frequência do sinal da força de avanço ( $F_a$ ) em furação, com a broca N°2,  $V_c=50$ m/min,  $a=0,1$ mm/rot com emulsão Alusol-B 8%.

Com base no sinal da força de avanço, seria necessário definir um espectro característico da situação limite de utilização da ferramenta com o qual seriam necessariamente comparados os espectros que fossem sendo obtidos durante a utilização.

#### 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dinâmica dos processos de corte por arranque de apra utilizados nesta investigação -furação e torneamento- foi efectuada com recurso à medição, em contínuo, das forças de corte.

Observámos que para ferramentas de insertos de PCD a evolução das

componentes - de avanço, de penetramento e de corte-, no torneamento, e do binário e da força de avanço, na furação, foi lenta e progressiva tal como o desgaste na face de saída.

As componentes que se revelaram mais sensíveis ao efeito do desgaste foram a força de avanço e de penetramento, no torneamento, e a força de avanço, na furação. O binário revelou-se, menos sensível à variação do desgaste na face de saída das brocas.

Deste modo, como a variação do valor da força de avanço -em torneamento e furação- foi relativamente pequena ao longo do tempo de corte, embora exista uma correlação excelente entre o valor desta força e o desgaste na face de saída (efectuámos regressão linear para as diversas condições de corte ensaiadas tendo obtido coeficientes de correlação  $R \geq 0,95$  em geral), efectuámos a análise desta força no domínio da frequência -transformada rápida de Fourier (FFT) e espectro de potência (PS). Verificámos que esta análise permite identificar alterações significativas, em frequência, da força de avanço ao longo do tempo de corte e, conseqüentemente, do desgaste na face de saída da ferramenta. Assim, e de acordo com algumas das nossas experiências e das quais apresentámos exemplos, esta técnica poderá constituir um método indirecto de avaliar o estado da ferramenta no que respeita ao desgaste na face de saída. Pensamos que a aplicação desta técnica poderá ser vantajosa em termos de rentabilizar a vida da ferramenta.

Finalmente, apresentamos de um modo sintético as conclusões a retirar do nosso estudo:

- as três componentes -avanço, penetramento e corte- da força de maquinagem no torneamento, aumentaram com o desgaste na face de saída das pastilhas de corte. As forças de avanço e de penetramento mostraram-se mais sensíveis a este factor.
- a força de avanço, na furação, aumentou com o desgaste na face de saída das brocas. O binário

não se mostrou sensível a este aumento de desgaste. A força lateral, na base da broca mostrou-se sobretudo sensível a um desequilíbrio de desgaste nas duas faces de saída principais da broca.

- a análise em frequência da força de avanço quer em furação quer em torneamento, dado que foi a componente que maior sensibilidade revelou ao desgaste na face das ferramentas, constitui um método promissor, para detectar indirectamente a evolução deste desgaste nas ferramentas, ao longo do tempo de corte. Nesta análise utilizou-se a transformada rápida de Fourier (FFT) e o espectro de potência (PS).

## REFERÊNCIAS

- Baptista A. and Davim P., "Drilling aluminum matrix composites", The Tenth International Conference on Composite Materials ICCM-10, Vancouver, (1995)
- Baptista A. and Davim P., "Wear of tooling materials when turning and drilling aluminium matrix composites", Wear of Material's 97, Elsevier, San Diego, (1997)
- Boothroy G. and Knight W., "Fundamentals of machining and machine tools", Marcel Dekker, Inc., New York, (1989).
- Davim P., "Princípios da maquinagem", Ed. Almedina, Coimbra, (1995).
- Davim P., "Estudo da maquinabilidade dos compósitos de matriz de alumínio", Dissertação de doutoramento, FEUP-DEMEGI, Porto, (1997)
- Davim P. e Baptista A., "O desgaste das ferramentas de PCD e sua relação com as forças de corte na maquinagem de um compósito de matriz de alumínio reforçado com SiCp", 1<sup>as</sup> Jornadas Nacionais do Colégio de Engenharia Mecânica da Ordem dos Engenheiros, Porto, (1998)
- Davim P. et al., "Medição das forças de corte em processos de maquinagem", Mecânica Experimental - Revista da APAET, N<sup>o</sup>3, LNEC, Lisboa, (1998)

Davim P. et al., "Aplicação do software LabVIEW na aquisição e tratamento matemático do sinal das forças de corte obtidas nos processos de maquinagem", 1º encontro do PULL, INESC, Lisboa, (1996)

Ferraresi D., "Fundamentos da usinagem dos metais", Ed. Edgard Blücher, São Paulo, (1977)

Jonhson G., "LabVIEW graphical programming", McGraw-Hill, New York, (1997)

Kailath T., "Modern signal processing", Hemisphere Publishing Corporation, (1985)

Mesquita R., "O desgaste das ferramentas de corte e sua relação com as forças de corte", Dissertação de doutoramento, IST, Lisboa, (1988)

Neweland D., "Random vibrations and spectral analysis", Longman Group, London, (1978)

Randal R., "Frequency analysis", Bruel & Kjaer, (1992)

Shaw M., "Metal cutting principles", Oxford University press, London, (1984)

