MEDIÇÃO DAS FORÇAS DE CORTE EM PROCESSOS DE MAQUINAGEM

J. Paulo Davim [1], J. Gabriel Mendes [2] e A. Monteiro Baptista [3]

[1] Professor Auxiliar, Secção Autónoma de Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro
[2] Assistente, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto
[3] Professor Auxiliar, Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial, Universidade do Porto

RESUMO

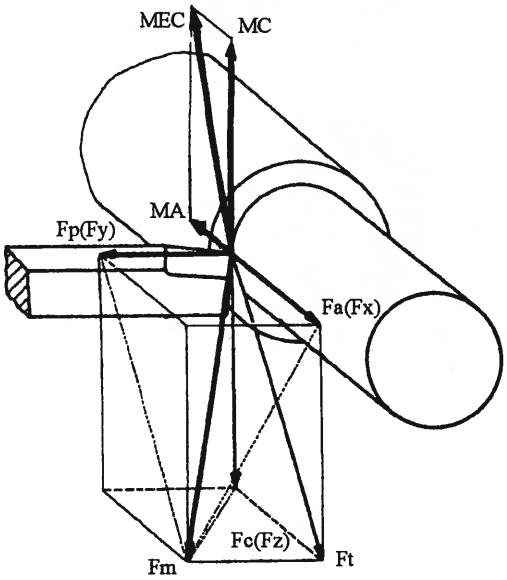
O presente trabalho tem como objectivo apresentar os desenvolvimentos e procedimentos experimentais efectuados para medir as forças de corte com dinamómetros extensométricos e piezoeléctricos durante os processos de maquinagem. Referem-se alguns detalhes do projecto, fabrico e calibração de dois dinamómetros extensométricos, sendo um para torneamento e outro para furação. Desenvolveram-se vários programas de aquisição específicos para ensaios de maquinagem que permitem a obtenção directa e contínua, com visualização gráfica das forças de corte. Concluiu-se que os dinamómetros com sensores extensométricos apresentavam algumas limitações e daí a necessidade de se utilizarem dinamómetros com sensores piezoeléctricos.

1. INTRODUÇÃO

A interacção entre a peça e a ferramenta, durante a maquinagem, dá origem ao aparecimento de uma força de contacto, responsável pelo arranque da apara. Geralmente, por simplificação, consideram-se as componentes dessa força a actuar num ponto de referência cuja posição não varia com as condições de corte, embora, na realidade, actuem sobre uma determinada área de contacto. No torneamento é comum definir o estado de carga na ferramenta pelas três componentes ortogonais da força de maquinagem - a força de corte (Fc), a força de avanço (Fa) e a força de penetramento (Fp), Fig. 1, enquanto que, na furação é comum utilizar a força de avanço (Fa) e o binário (Mz), Fig. 2. Isto acontece porque no caso de uma broca com as arestas de corte perfeitamente afiadas ou com um desgaste equilibrado as forças de penetramento -laterais- (Fy) não são significativas, ficando por isso o estado de carga definido pela força de avanço e pelo binário.

A medição das várias componentes destas forças é normalmente efectuada por meio de dinamómetros ou plataformas dinamométricas. O sistema de medida é constituído pelo dinamómetro, o equipamento de amplificação e o sistema de visualização e registo dos sinais de saída (osciloscópio, registador ou computador). Dos vários tipos de dinamómetros dois são os mais comuns: o baseado no princípio

extensométrico e o baseado no princípio piezoeléctrico. Os sinais provenientes do dinamómetro extensométrico ou piezoeléctrico são introduzidos numa ponte amplificadora, no primeiro caso, e num amplificador de carga, no segundo (Davim, 1995).



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.

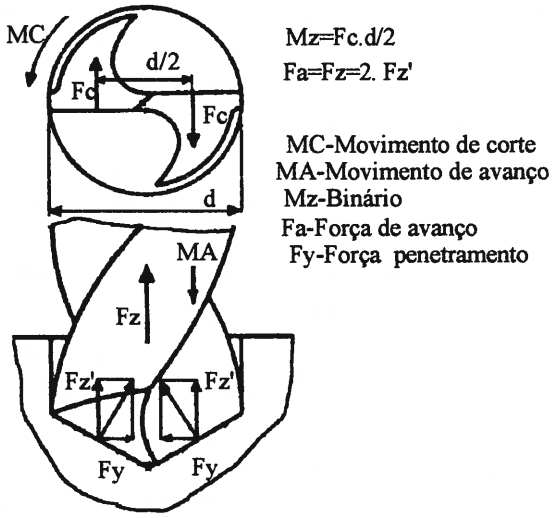


Fig. 2 Sistema de forças aplicadas na broca durante a furação.

A avaliação do desempenho de um dinamómetro ou de uma plataforma dinamométrica é efectuada em função da análise das suas caraterísticas estáticas e dinâmicas. Segundo (Ferraresi, 1977), (Boothroy, 1975) e (Shaw, 1984) salientam-se algumas das seguintes características:

- sensibilidade (factor de calibração)
- sensibilidade transversal
- precisão e repetibilidade
- linearidade
- rigidez linear
- histerese
- influência da temperatura
- frequência própria de vibração

Vejamos agora os diversos tipos de dinamómetros que foram manuseados no decurso desta investigação.

2. DINAMÓMETROS EXTENSOMÉTRICOS

Numa primeira fase deste trabalho, conforme já foi referido, foram projectados, construídos e, mais tarde, calibrados estaticamente dois dinamómetros baseados em extensómetros, sendo um para furação, e outro para torneamento.
Vejamos, então, algumas considerações sobre o seu projecto, instrumentação e calibração.

2.1 Dinamómetro para torneamento

Para o dinamómetro de torneamento a solução construtiva escolhida baseou-se no dinamómetro tubular de Horn e Schüman apresentado por (Ferraresi, 1977) e também construído por (Mesquita, 1988). Esta solução apresentou, entre outras, a vantagem de se poderem utilizar métodos de dimensionamento simples. O dimensionamento foi efectuado para uma força de corte pré-estabelecida de 2kN. O cálculo efectuado mostrou que para a

solução adoptada a rigidez linear era da ordem de $11{,}1 \times 10^7$N/m. Segundo (Shaw, 1984) este valor deve situar-se próximo de 10×10^7N/m. A frequência própria de vibração obtida foi de cerca de 4,2kHz.

No elemento tubular foram colocados oito extensómetros para medida das deformações nas direcções de corte, avanço e penetramento. Este elemento tubular é fixado num apoio apropriado. O conjunto está protegido com blindagens e tampas. Numa das extremidades do elemento tubular foi projectado um rasgo rectangular, excêntrico, para colocação dos suportes das ferramentas. Assim, foi possível regular com auxílio de calços, de maneira a que o eixo geométrico do elemento tubular passe pela ponta da ferramenta.

A ponta da ferramenta deve ser regulada de modo a que se situe no plano horizontal que passa pelo eixo de rotação do torno. Esta regulação permite evitar os momentos torsores devido a uma possível excentricidade da ferramenta. Os oito extensómetros foram dispostos na parede exterior do elemento tubular de acordo com o indicado na Fig. 3.

Os extensómetros 1 e 2, colocados longitudinalmente relativamente ao eixo do elemento tubular, estão ligados em meia ponte nos braços adjacentes de uma ponte de Weaststhone que é utilizada para a medição da força de corte.

Para a medição da força de avanço foram empregues os extensómetros 3 e 4 dispostos igualmente segundo o eixo longitudinal, e a 90º em relação aos extensómetros 1 e 2. Esta disposição, ao longo do eixo neutro das tensões originadas pela força de corte deveria garantir que a força de corte não provocava qualquer sinal nestes extensómetros. Na prática verificou-se sempre um efeito transversal parasita também comprovado por (Mesquita, 1988). O mesmo se passa para os extensómetros 1 e 2 quando solicitados, apenas, pela força de avanço.

A força de penetramento (passiva) é medida pelos extensómetros 5-6 e 7-8 ligados em ponte completa estando o primeiro par disposto transversalmente e o segundo longitudinalmente.

Por acção de uma compressão sobre o elemento tubular, os extensómetros 5-6 ficam à compressão e os extensómetros 7-8 à tracção.

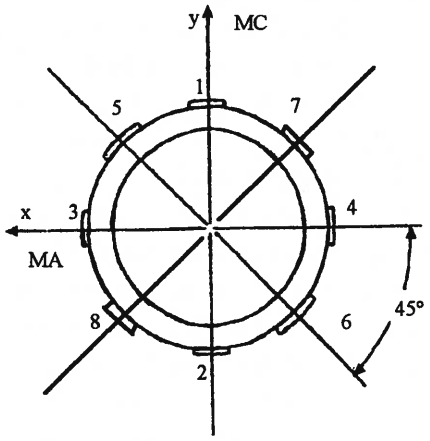


Fig. 3 Esquema de colocação dos extensómetros no elemento tubular.
1-2 força de corte
3-4 força de avanço
5-6 e 7-8 força de penetramento

Para se efectuarem os procedimentos de calibração estática foi concebido um dispositivo, que consiste na montagem do dinamómetro, num torno de duplo deslocamento angular (α'-em torno de um eixo perpendicular à base do torno e β'-em torno de um eixo paralelo à base do torno) apertado numa placa aparafusada a uma parede. Num varão de secção quadrada no qual é fixado uma ponteira esférica de aço endurecido, suspenderam-se pesos através de um suporte, simulando assim os esforços sobre a ferramenta de corte. Esta calibração permitiu relacionar o sinal eléctrico (tensão) com as forças aplicadas. Foram ligados os três canais que medem a força de corte, força de avanço e a força de penetramento a uma ponte amplificadora e as leituras dos sinais de tensão obtidas com um multímetro.

Os ensaios iniciais de calibração mostraram que o dinamómetro tinha baixa sensibilidade a solicitações de compressão, obrigando por isso a utilização de ganhos elevados na ponte amplificadora. Ficou assim confirmado que esta solução (os extensómetros 5-6 ligados transversalmente e 7-8 ligados longitudinalmente) não permite obter bons resultados (Mesquita, 1988).

De seguida foram feitos ensaios de calibração para os canais da força de corte e de avanço com o objectivo de verificar a linearidade entre a carga aplicada em diversas posições (α'=0° e β'=0°, 45° e 90°) e o valor de tensão obtido no multímetro. Existiu o cuidado de efectuar ensaios de carga e descarga para verificar eventuais efeitos de histerese. Na Fig. 4 apresenta-se a título de exemplo alguns dos resultados obtidos. Note-se desde já, que as cargas de ensaio variaram numa gama de 121 a 427N. Constatou-se que o dinamómetro apresenta linearidade verificando-se, no entanto, uma ligeira interferência entre os diferentes canais. No que diz respeito à situação de carga e descarga (histerese) o dinamómetro apresenta igual comportamento.

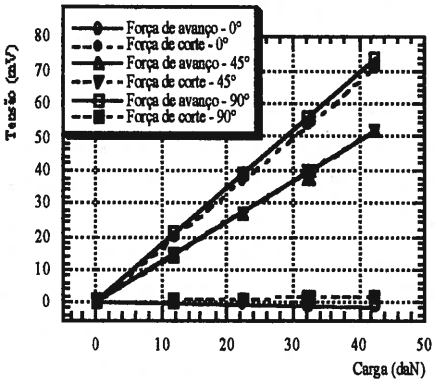


Fig. 4 Evolução do sinal de força de corte e de avanço com a carga aplicada para várias inclinações β' do dinamómetro, com α'=0.

Finalmente, foram efectuados ensaios para uma solicitação a carga constante (223N), variando os ângulos de inclinação do torno de aperto (α' e β') simulando assim as componentes de corte, avanço e penetramento. Utilizaram-se os seguintes ângulos α' - 0°, 15°, 30° e 45° e β' - 0°, 10°, 15°, 20°, 25°, 30°, 45° e 90°. Como no torneamento a força de corte é, geralmente, duas a quatro vezes superior à força de avanço e este facto acontece para ângulos β' entre 10 a 30°, aproximadamente, foi dada especial atenção a esta gama de ângulos.

Tendo como base os valores lidos no multímetro foram calculados valores com base numa aproximação polinomial. Obteve-se, então, uma curva que representa a evolução do sinal da força de avanço e força de corte com a inclinação α' e β', para a situação de carga constante.

Para todas as posições ensaiadas, com excepção de α'=45°, o desvio máximo do valor lido no multímetro comparativamente com o valor calculado é de, aproximadamente, 6%, quer para a componente da força de avanço quer para a componente da força de corte.

2.2 Dinamómetro para furação

Para o dinamómetro de furação utilizou-se uma solução construtiva com duas células de carga. Uma, a célula de carga superior destina-se a medir o binário aplicado e consiste num volante com quatro lâminas de espessura reduzida, portanto, muito sensíveis a qualquer momento torsor aplicado. A outra, a célula de carga inferior, destina-se a medir a força de avanço e é constituída por um corpo também com quatro lâminas de altura reduzida dispostas na perpendicular à direcção da força de avanço.

Quer a célula de carga inferior quer a célula de carga superior foram instrumentadas com uma ponte de Wheatstone completa, com extensómetros de 120Ω. Para cada um dos casos as pontes foram ligadas com dois extensómetros em tracção e dois extensómetros em compressão.

Na Fig. 5 pode observar-se, em esquema, a colocação dos extensómetros nas células de carga superior e inferior. As lâminas a utilizar foram dimensionadas de modo aapresentarem a resistência mecânica adequada e a permitirem que os extensómetros nelas fixados efectuem leitura de valores de deformação superior a $4x10^{-6}$. Assim, a espessura escolhida para as lâminas da célula de carga superior foi de 3mm e a altura escolhida para as lâminas da célula de carga inferior foi de 4mm. O dimensionamento foi efectuado para um binário aplicado entre 40 a 1400N.cm e uma força de avanço entre 125 a 5000N. Para a célula de carga superior e inferior foi obtida uma frequência própria de vibração de aproximadamente 0,8kHz e 1,5kHz, respectivamente.

Para se efectuarem os procedimentos de calibração estática foi concebido um dispositivo que permite que o dinamómetro seja fixado sobre um pequeno barramento aparafusado a uma placa. Para se simular o binário aplicado durante a furação foram colocados pesos suspensos por cabos de aço através dos roletes de modo a criar um binário. Para se simular a força de avanço os pesos foram colocados, alinhadamente, em cima da tampa do dinamómetro.

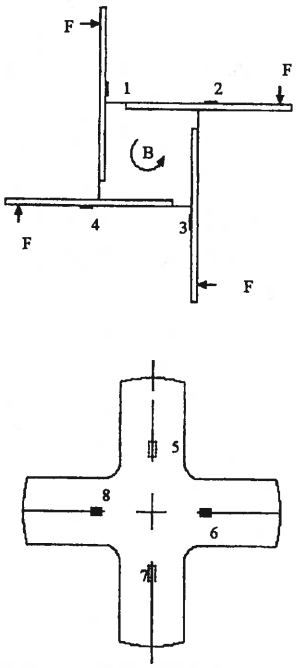
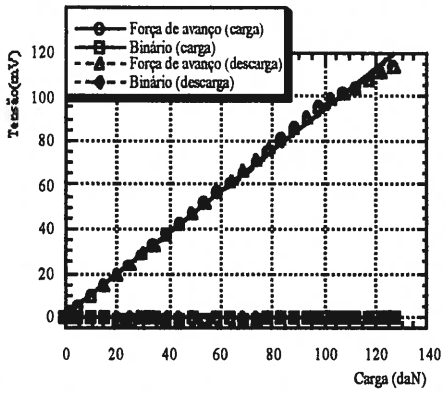


Fig. 5 Esquema de colocação dos extensómetros nas células de carga superior e inferior.
1-2-3-4 binário
5-6-7-8 força de avanço

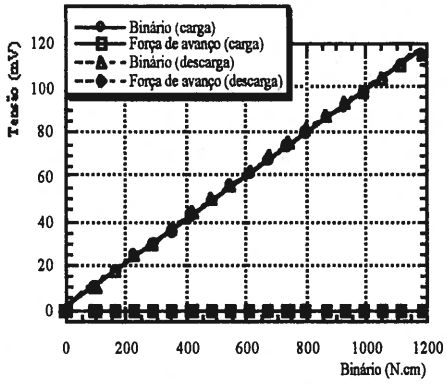
Foram efectuados ensaios de calibração para diferentes forças de avanço com o binário nulo e, ao contrário, com a força de avanço nula e o binário variável. Variou-se a força de avanço discretamente de 49 a 1274N e o binário de 101 a 1184N.cm. A título de exemplo podemos observar alguns resultados na Fig. 6.

Verificou-se que o dinamómetro apresenta linearidade excepto para carga na direcção do avanço, superior a aproximadamente 1000N. No que respeita a carga e descarga (histerese) o dinamómetro apresentou bom comportamento.

Foram também efectuados ensaios para diversas forças de avanço (98, 196, 980N) com o binário a variar discretamente entre 101 e 1120N.cm. Por fim, realizaram-se ensaios para diversos binários aplicados (100, 228, 1120N.cm) com a força de avanço a variar discretamente entre 196 e 980N.



a)



b)

Fig. 6 Evolução do sinal da força de avanço e do binário.
a) Binário aplicado nulo.
b) Carga na direcção de avanço nula.

Os resultados obtidos mostraram que não houve interferência significativa (apenas se observaram valores residuais) nos sinais lidos para o binário, quando aplicada uma carga na direcção do avanço e vice-versa.

3. DINAMÓMETROS PIEZOELÉCTRICOS

A proposta "STC: Recommentation on calibration and operation of machine-tool-dynamometer" elaborada por uma comissão do CIRP referida por (Mesquita, 1988) e que apresenta recomendações a respeitar em termos de características estáticas e dinâmicas para dinamómetros de medição de forças de corte, tais como a sensibilidade

transversal, a histerese, a rigidez linear e a frequência própria de vibração. Seria indispensavel utilizar esta proposta para a validação das medições das forças de corte efectuadas com os dinamómetros extensométricos.

Os objectivos e o rigor das medições que nos propusemos efectuar levou-nos a seleccionar e a adquirir, dois dinamómetros baseados em sensores piezoeléctricos[1] sendo um mais indicado para furação (9272) que permite medir quatro componentes (Fx, Fy, Fz e Mz) e outro para torneamento, fresagem e rectificação (9257B) que permite medir três componentes (Fx, Fy e Fz). Foi ainda adquirido um dispositivo apropriado (9403) para fixação do buril utilizado nas operações de torneamento. Equipamentos deste tipo são usados também nos diversos centros de investigação na área de corte por arranque da apara.

Os dinamómetros baseados em sensores piezoeléctricos de quartzo apresentam de um modo genérico, as seguintes características:

- elevada rigidez e frequência própria de vibração
- extrema sensibilidade sem histerese
- mínima sensibilidade transversal (≤1%)
- desenho compacto e vida longa
- protecção contra a acção dos fluidos de corte de acordo com a norma IP67

A plataforma dinamométrica que permite medir as três componentes (Fx, Fy e Fz) é constituída por duas placas de aço inoxidável onde se encontram dispostas quatro células de medida. Na Fig. 7 a) pode observar-se a sua disposição e o detalhe de uma célula com a sua constituição. Cada célula é constituída por três pares de cristais de quartzo sendo dois pares sensíveis às tensões tangenciais (Fx - força de avanço e Fy - força de penetramento) e o par restante sensível às tensões normais (Fz - força de corte). Assim, cada uma das células permite medir as três componentes ortogonais das forças aplicadas. A ligação em paralelo de cada um dos canais e a disposição das quatro células permite que a medida total seja independente do ponto de aplicação da carga.

O dinamómetro que permite medir as quatro componentes (Fx, Fy, Fz e Mz) tem montada uma célula de medida conforme se pode observar na Fig. 7 b), em detalhe. No que respeita à medida das forças (Fx, Fy e Fz) o sistema de células de medida é idêntico ao descrito para a plataforma dinamométrica. Para a medida do binário (Mz) são utilizados discos de quartzo cortados de modo a que o eixo sensível ao corte seja tangencial ao círculo disposto no sensor apropriado, Fig. 7 b). Todos os discos de quartzo estão ligados em paralelo, logo a medida total é proporcional ao binário aplicado ao sistema.

3.1 Dinamómetro para torneamento

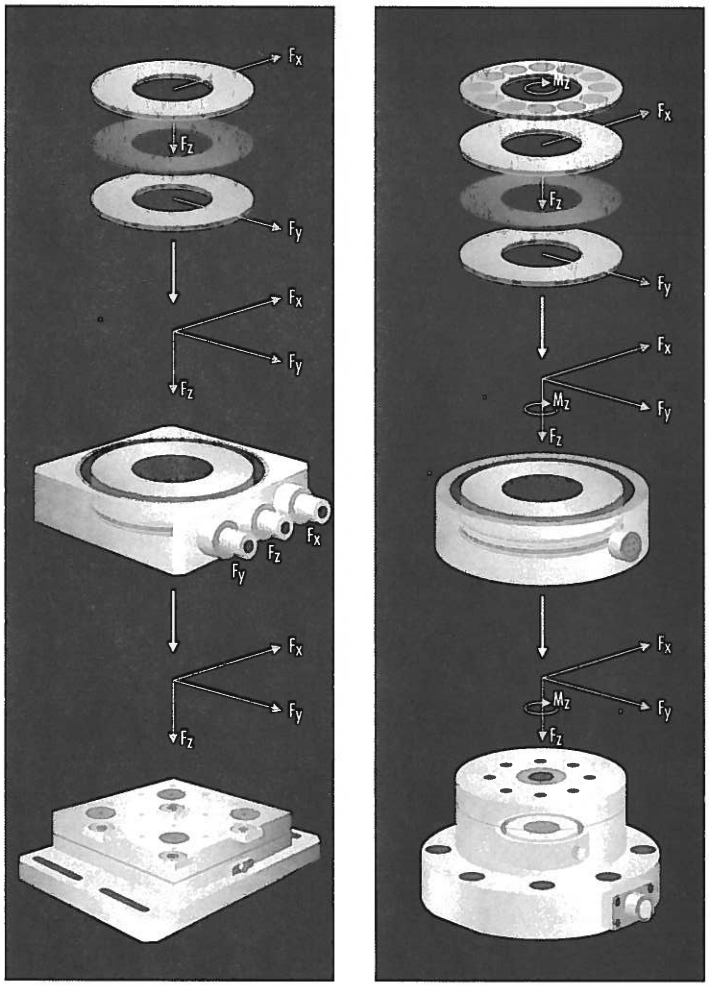
Para a medição das forças de corte (Fx=Fa, Fy=Fp e Fz=Fc) durante as operações de torneamento foi utilizada a plataforma dinamométrica (9275B) com o dispositivo de fixação do suporte da ferramenta (9403) acoplado. Na Fig. 8 pode observar-se o aspecto da montagem no posto de torneamento. Em todos os ensaios efectuados foi respeitada a posição do bico da ferramenta de corte, conforme é aconselhado pelo fabricante.

No que respeita à calibração do dinamómetro foi assumida a efectuada pelo fabricante Kistler Instrument AG.

3.2 Dinamómetro para furação

Para a medição do binário (Mz), força de avanço (Fz=Fa) e das forças laterais (Fy) em operações de furação foi utilizado o

[1] O material piezoeléctrico utilizado é cristal de quartzo. É anisotrópico e as suas propriedades dependem da orientação dos planos de corte do cristal de quartzo.



a) b)

Fig. 7 Princípio de funcionamento dos dinamómetros piezoeléctricos (Do fabricante Kistler Instrument AG).
a) 3 componentes (Fx, Fy e Fz).
b) 4 componentes (Fx, Fy, Fz e Mz).

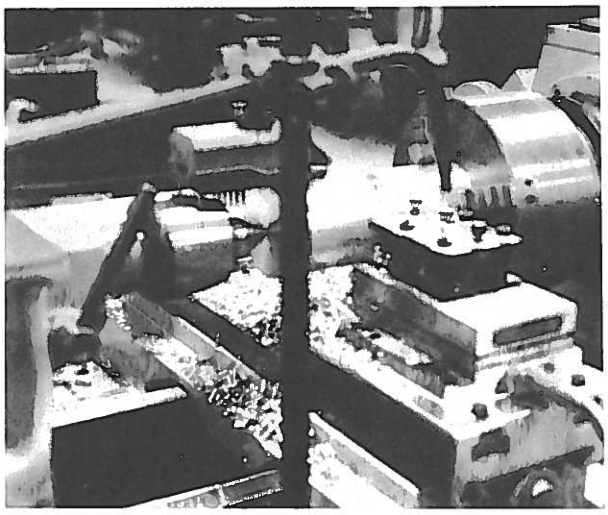


Fig. 8 Aspecto de montagem do dinamómetro no torno.

dinamómetro (9272). Na Fig. 9 podemos observar o aspecto da montagem no posto de furação. Também, neste caso, foi assumida a calibração realizada pelo fabricante.

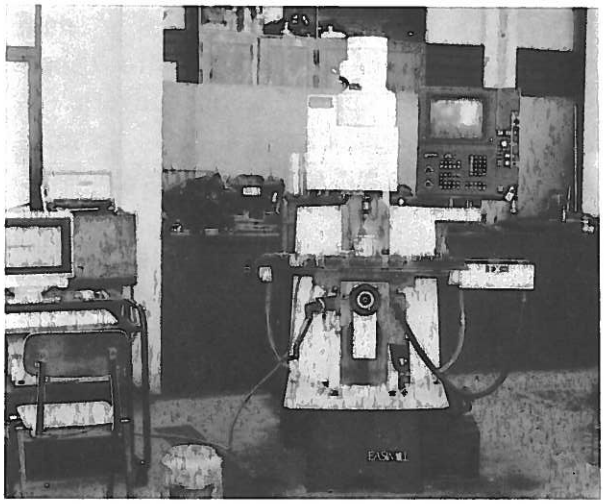


Fig. 9 Aspecto da montagem do dinamómetro na fresadora/furadora.

3.3 Características dos dinamómetros piezoeléctricos

No Quadro 1 apresentam-se, em resumo, as principais características da plataforma dinamométrica piezoeléctrica (9257B) para torneamento e do dinamómetro piezoeléctrico (9272) para furação. É feita uma comparação dos valores indicados pelo fabricante e pela recomendação do CIRP no que respeita à sensibilidade transversal, à rigidez linear, à histerese e à frequência própria de vibração. Verificou-se, assim, que os dinamómetros piezoeléctricos são adequados.

4. AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DE DADOS

Há muito que a aquisição de dados feita da forma tradicional, isto é, do tipo "papel e lápis" está ultrapassada pelos avanços da técnica. Um computador pessoal com placas de aquisição de dados e "software" adequado é uma solução que apresenta elevada flexibilidade e relativamente baixo custo. Estas placas de aquisição integram, habitualmente, conversão analógico/digital e digital/analógico, entradas e saídas do tipo digital, temporizadores, contadores e, eventualmente, outros módulos capazes de executar tarefas específicas.

Neste caso, os sinais provenientes dos três canais (Fx, Fy, Fz) da plataforma dinamométrica (9257B) ou dos quatro canais (Fx, Fy, Fz, Mz) do dinamómetro (9272) foram introduzidos num amplificador de carga de quatro canais (5019A). Este amplificador converte os sinais de carga eléctrica dos sensores piezoeléctricos em sinais proporcionais de tensão.

Os parâmetros adequados (canais, escalas, filtros, contante de tempo ...) podem ser regulados no painel frontal do instrumento ou através de interfaces do tipo RS-232 C ou IEEE-488 por meio de um computador usando "software" apropriado. É possível visualizar o valor da força obtida no canal selecionado no "display" da aparelho.

Para a execução deste trabalho foi adquirida à National Instruments uma placa de aquisição AT-MIO-16 à qual foram ligadas as saídas analógicas do amplificador de carga. Foi, também, adquirido o "software" de instrumentação virtual LabVIEW para efectuar a aquisição e tratamento de dados.

A placa AT-MIO-16 proporciona uma interface para entradas/saídas analógicas e, ainda, algumas linhas digitais para PC, sendo compatível com o "software" de aquisição. É indicada, entre outros aspectos, para aplicação na automação de máquinas, controlo de processos, monitorização e instrumentação.

4.1 Programa de instrumentação virtual

Em 1983 Jeff Kodosky da National Instruments (USA) teve a ideia de criar o instrumento virtual (I.V.) que não é mais que um módulo de "software" que permite que o computador funcione como se de um instrumento virtual se tratasse. Foi baptizado de LabVIEW (Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench) e era interpretado a preto e branco. Corria apenas em computador Apple Macintosh[2] (Johnson, 1997). Instrumentos virtuais tais como, osciloscópio digital, gerador de funções, analisador de espectros, filtros, multímetros, ... são hoje disponibilizados por fabricantes[3] deste tipo de instrumentos de utilização laboratorial. Dispondo de uma significativa biblioteca de funções matemáticas é sempre possível que qualquer dos instrumentos virtuais implementados seja completado, bem como ligado a um instrumento real. Foram desenvolvidos outros tipos de "software" tais como, o LabTeach Notebook, o Real Time Vision e o LabWindows.

Assim, num só aparelho -o computador- podemos reunir todas as tarefas que têm estado dispersas pelos mais variados equipamentos e que envolvem basicamente:

- controlo de instrumentação

---

[2] Actualmente corre em IBM compatível e "workstations".

[3] Hewlett-Packard, Tetronix, Philips, Fluke, Lecroy...

Quadro 1 Principais características dos dinamómetros piezoeléctricos de torneamento e furação.

Características	Dinamómetro 9257B (x,y,z) (Torneamento)	Dinamómetro 9272 (x,y,z,Mz) (Furação)	Recomendação do CIRP
Gama de medida			
Fx(kN)	-5 a 5	-5 a 5	–
Fy(kN)	-5 a 5	-5 a 5	–
Fz(kN)	-5 a 10	-5 a 20	–
Mz(N.cm)	–	-20000 a 20000	–
"Threshold"			
Fx(N)	<0,01	<0,01	–
Fy(N)	<0,01	<0,01	–
Fz(N)	<0,01	<0,02	–
Mz(N.cm)	–	<0,02	–
Sensibilidade (pC/N)			
Fx	-7,6	-7,3	–
Fy	-7,5	-7,2	–
Fz	-3,5	-3,8	–
Mz	–	-1,6	–
Linearidade (±%FSO)			
Fx	0,3	0,3	–
Fy	0,3	0,3	–
Fz	0,3	0,3	–
Mz	0,3	0,3	–
Sensibilidade transversal (%)			
Fx - Fy	0,3	1,3	<1,5
Fy - Fx	1,0	-0,1	<0,7
Fx - Fz	-0,4	-1,3	<0,6
Fy - Fz	0,6	-0,4	<0,4
Fz - Fx	0,3	-0,3	<1,7
Fz - Fy	0,5	-0,1	<2,5
Fz - Mz	–	-0,002	–
Mz - Fz	–	-0,004	–
Histerese (%FSO) (todas as gamas)	≤0,5	≤1	<2
Rigidez linear (N/m)			$>10^7$
Fx	$>100x10^7$	$\approx 40x10^7$	–
Fy	$>100x10^7$	$\approx 40x10^7$	–
Fz	$>200x10^7$	$\approx 200x10^7$	–
Frequência própria de vibração (kHz)			>2,5
Fx	≈3,5	≈4	–
Fy	≈3,5	≈4	–
Fz	≈3,5	≈7	–
Mz	–	≈5	–
Peso (kg)	7,3	4,2	–

- aquisição de dados
- análise e processamento de sinal
- estatística e álgebra
- representação de dados
- armazenamento de dados

O "software" LabVIEW permite que o próprio utilizador crie instrumentos virtuais (I.V.) e possa adicioná-los à biblioteca de instrumentos existente. A etiqueta associada a cada I.V. permite construir novos I.V. por incorporação de outros já existentes. A etiqueta pode representar um I.V. ou um módulo lógico de cálculo, de manipulação entrada/saída, tratamento de ficheiros ou outros. A sua programação é efectuada por meio de uma linguagem gráfica designada de G, que facilita esta tarefa, porque vai ao encontro da tendência natural de se utilizarem figuras ou diagramas como modo explícito e intuítivo de mostrar como funciona um processo (Johnson, 1997).
Um instrumento virtual (I.V.) ou um módulo lógico de cálculo, aquisição de dados, tratamento de ficheiros ou outros, é constituído basicamente pelos seguintes elementos:

- o painel frontal (front panel), que é a janela onde se define o painel dos instrumentos pretendidos, usando para isso, botões, sensores, sinalizadores, gráficos, registadores...

- o diagrama (diagram), que é a janela onde se cria a lógica que liga todos estes elementos entre si e é, por conseguinte, o programa.

- a etiqueta (icon), que é um pequeno símbolo que serve para representar unicamente o instrumento assim criado.

Podemos assim dizer, que o LabVIEW constitui uma ferramenta revolucionária, potente, flexível e vocacionada para aplicações em domínios da engenharia, investigação e desenvolvimento. No nosso trabalho este "software" foi utilizado para a aquisição e tratamento matemático (análise) do sinal das forças de corte obtido nos processos de maquinagem - furação e torneamento.

4.2 Programas desenvolvidos

Por meio do LabVIEW 2.5.1 versão para PC, foram desenvolvidos oito programas, totalizando cerca de 1 Mbyte de "software", que foram utilizados no decurso desta investigação e em outros trabalhos nas áreas da tribologia e do comportamento mecânico de estruturas. Vejamos, então, com mais detalhe; o nome, as funções que desempenham e alguns exemplos do painel frontal.

Nome: FUR.1

Funções: obtenção directa e contínua, com visualização gráfica do binário (Mz), da força de avanço (Fz) e da força de penetramento (Fy), na furação. Possibilidade de regulação dos ganhos. Visualização do tempo e do número de amostras. Utilização do relógio do computador (base de tempo) para controlar a aquisição. Frequência da aquisição típica empregue ≈6Hz. Qualquer aquisição pode ser gravada e o ficheiro utilizado em programas de uso comum tipo Excel ou Word em ambiente Windows. Na Fig. 10, pode observar-se o painel frontal com as forças de corte obtidas num ensaio de furação.

Nome: TOR.1

Funções: obtenção directa e contínua, com visualização gráfica das três componentes da força de maquinagem - penetramento, avanço e corte no torneamento. Tem características idênticas ao programa anterior FUR.1.

Nome: A.RAP

Funções: aquisição rápida com visualização após aquisição. Permite seleccionar o número de amostras a adquirir a uma

determinada velocidade de aquisição (amostras/segundo) para três canais. Pode ser utilizado em furação e em torneamento. Frequência da aquisição típica ≈1kHz. Qualquer aquisição pode ser gravada e o ficheiro utilizado em programas de uso comum. Na Fig. 11 pode observar-se o painel frontal com as forças de corte obtidas no ensaio de furação 1354, onde são visiveis a força de avanço, o binário e a força de penetramento. Um detalhe da força de avanço pode observar-se na Fig. 12.

Nome: LE

Funções: efectua a leitura de qualquer um dos ficheiros que se pretenda tratar. É um programa auxiliar.

Nome: GRAVA

Funções: efectua a gravação dos valores da aquisição num ficheiro. É um programa auxiliar.

Nome: ESTATIS

Funções: Lê um ficheiro. Calcula a média e o desvio padrão para três canais de forças e representa o histograma de frequência para o canal seleccionado. É um programa auxiliar.

Nome: ANALYSIS

Funções: permite efectuar o tratamento do sinal das forças de corte. Obtenção e visualização para o canal seleccionado da transformada rápida de Fourier (FFT - Fast Fourier Transform), do espectro de potência (PS-Power Spectrum) e da transformada rápida de Hilbert (FHT - Fast Hilbert Transform) ou de outras funções a implementar. Permite igualmente guardar os valores obtidos num ficheiro que podem ser utilizados em programas de uso comum.

4.3 Interligação dos programas desenvolvidos- Esquema de utilização

Na Fig. 13 apresenta-se esquematicamente a interligação do funcionamento dos equipamentos com os programas desenvolvidos para tratamento das forças de corte (Davim et al., 1996) e (Davim, 1997).

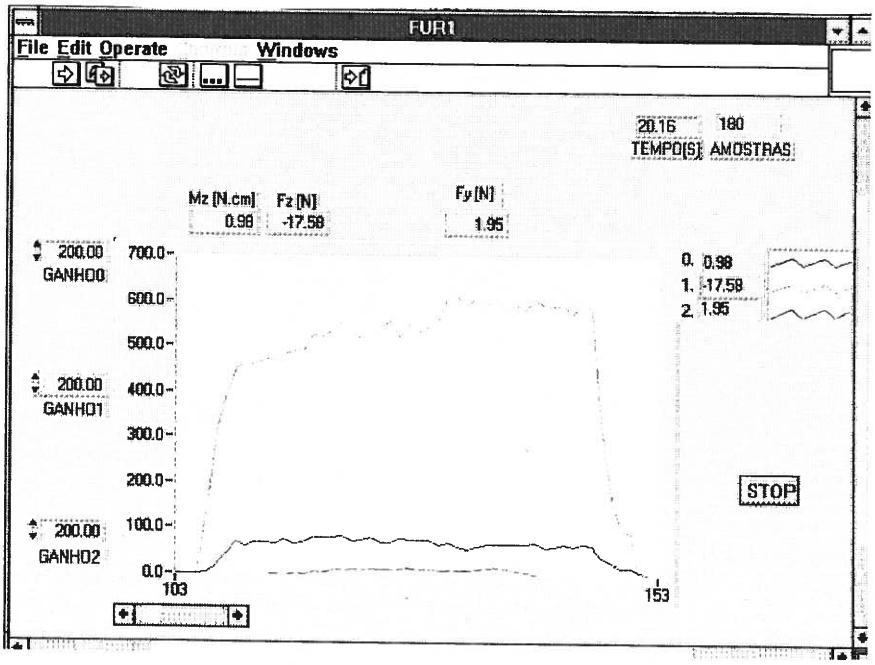


Fig. 10 Programa FUR.1, painel frontal. Ensaio de furação.

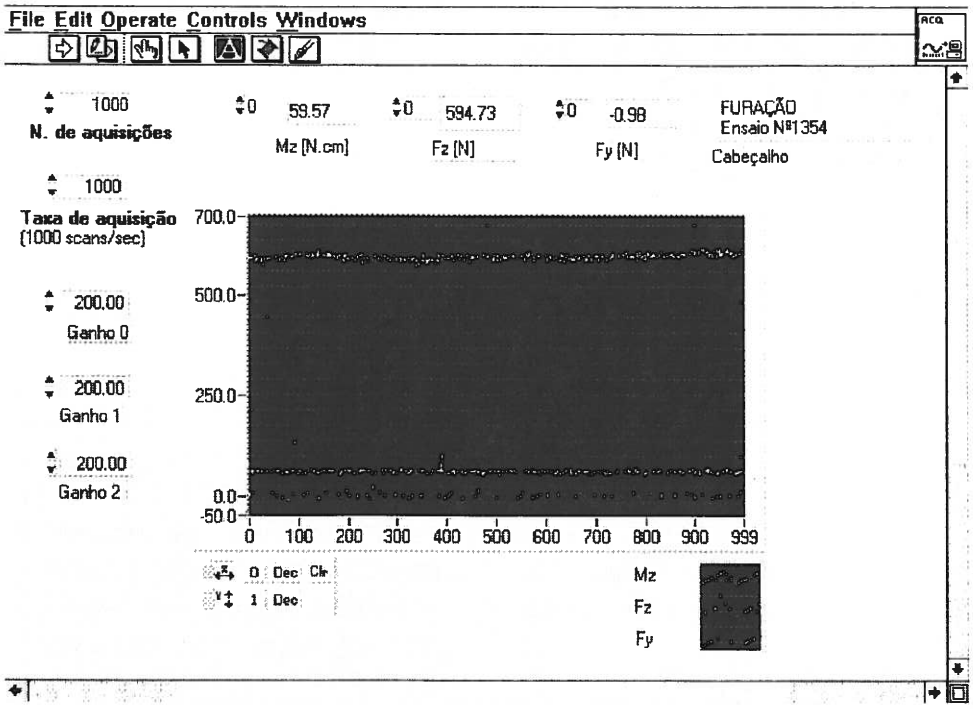


Fig. 11 Programa A.RAP, painel frontal. Ensaio de Furação 1354

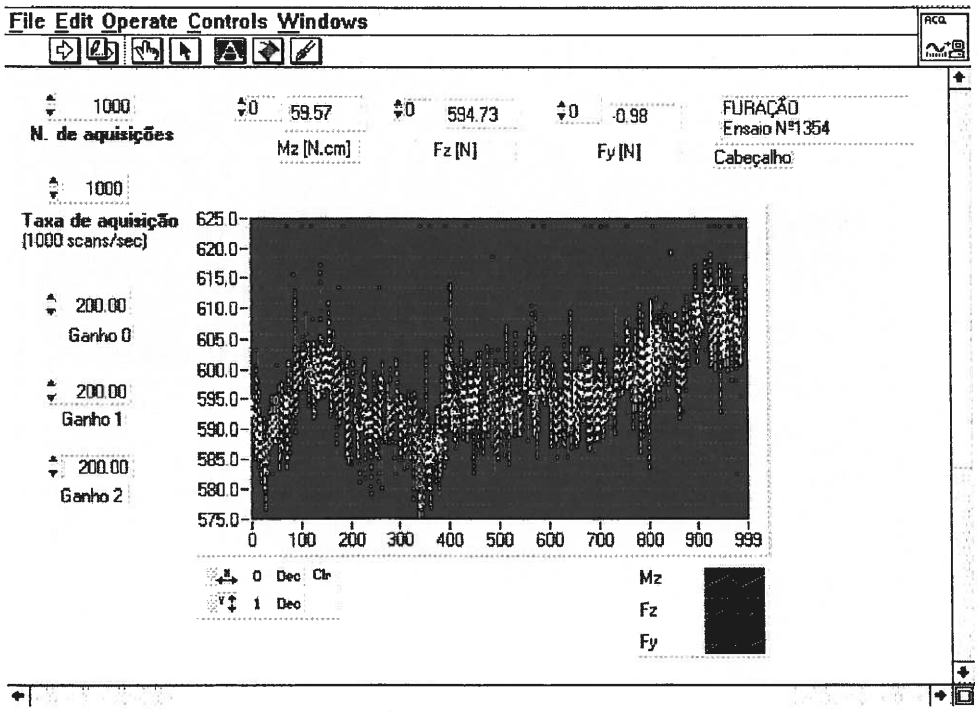


Fig. 12 Programa A.RAP, detalhe do painel frontal. Ensaio de furação 1354.

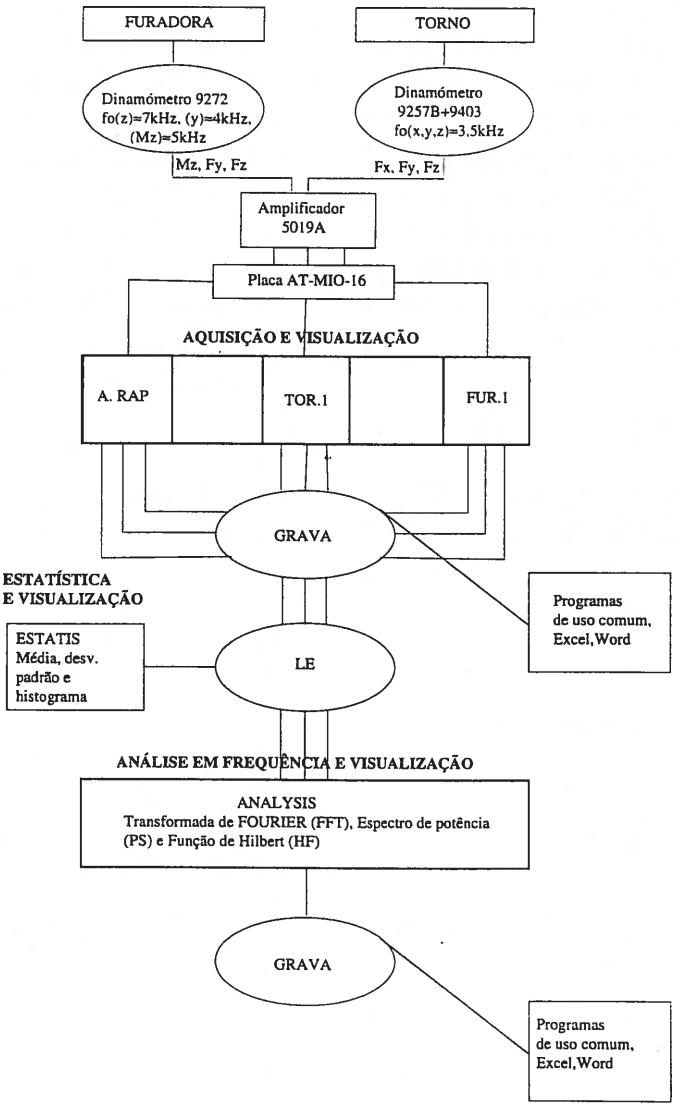


Fig. 13 Esquema funcional do equipamento e dos programas desenvolvidos para tratamento das forças de corte .

5. SÍNTESE E CONCLUSÕES

Os desenvolvimentos experimentais efectuados no decurso deste trabalho revelaram-se indispensáveis para o estudo da medição das forças de corte nos processo de maquinagem. Salientamos, os seguintes:

• calibração estática de dois dinamómetros com sensores extensométricos sendo um para torneamento e outro para furação. Embora estes dinamómetros tenham sido pouco empregues na medição das forças de corte, a sua calibração permitiu tirar ilacções muito importantes para a escolha dos dinamómetros apropriados.

• selecção e aquisição de dois dinamómetros com sensores piezoeléctricos, sendo um preferencialmente para furação, e outro para torneamento, fresagem e rectificação. Instalação de dois postos de ensaio, um para furação e outro para torneamento, que incluiu além da escolha do amplificador de carga adequado para os referidos dinamómetros, a fabricação de diversos cabos e a escolha da placa de aquisição para transferência de dados para o computador.

• desenvolvimento com o "software" LabVIEW de vários programas para aquisição de dados e seu tratamento estatístico e matemático. Estes programas foram construídos para a aquisição e

tratamento dos sinais das forças de corte obtidas nos processos de maquinagem, podendo também ser utilizados noutras áreas tais como a tribologia (já foram realizados vários ensaios de desgaste com base num destes programas na aquisição de sinais de forças de atrito e temperatura do contacto) bem como no comportamento mecânico de estruturas (aquisição de sinais provenientes de células de carga).

Finalmente, concluiu-se que os dinamómetros com sensores extensométricos apresentavam algumas limitações na medição das forças de corte e daí a necessidade de se utilizarem dinamómetros com sensores piezoeléctricos.

GLOSSÁRIO

"software", aplicação desenvolvida por recurso a uma linguagem de programação
"threshold", limiar

"display", ecrã, mostrador, dispositivo utilizado para visualização de informações

"timer's", temporizador, dispositivo de medição usados nos computadores para medir o tempo de cada tarefa em intervalos de milisegundos

"FSO-Full Scale Output", valor do fim de escala

"front panel", painel frontal

"diagram", diagrama

"icon", etiqueta

"workstation", posto de trabalho

"Mbyte", cerca de um milhão de bytes (1 048 576 bytes)

"Scale", escala

"Windows®", sistema operativo gráfico da Microsoft que funciona em sincronia com o DOS

REFERÊNCIAS

Boothroy G., " Fundamentals of metal machining and machine tools", Ed. McGraw-Hill, Tokio, 1975.
Davim P., "Princípios da maquinagem", Ed. Almedina, Coimbra, 1995.

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

Davim P., "Estudo da maquinabilidade dos compósitos de matriz de alumínio", Dissertação de doutoramento, FEUP-DEMEGI, Porto, 1997.

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

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

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

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