

Material Didático para Unidade 3
Laboratório de Eng. Mecânica 2
**Forças de Usinagem e Rugosidade no
Fresamento**

Prof. Anna Carla Araujo

Março 2, 2016

Índice

1	Breve resumo da aula: teoria e prática	2
1.1	Objetivos da Experiência	2
1.2	Elementos básicos da Programação CNC	3
1.3	Aquisição de Sinais de Força de Usinagem	4
1.4	Forças de Usinagem no Fresamento	6
1.5	Simplificação das Forças desprezando o ângulo de hélice	8
1.6	Forças no Processo de Furação	9
1.6.1	Força de Avanço	9
1.6.2	Torque	12
2	Relatório da Atividade	13
2.1	Itens apresentados no Relatório	13
2.2	Como o relatório será avaliado	14

Capítulo 1

Breve resumo da aula: teoria e prática

1.1 Objetivos da Experiência

A atividade proposta tem os seguintes objetivos:

- Realizar uma demonstração do funcionamento de um centro de usinagem CNC e os elementos principais da máquina-ferramenta e das ferramentas de corte.
- Apresentar ao aluno o sistema de aquisição de forças de corte (dinamômetro, condicionador de sinais, placa de aquisição analógica digital e software de armazenamento dos arquivos de dados).
- Serão realizadas duas operações de fresamento e uma de furação com a aquisição das três componentes ortogonais da força de usinagem durante o processo de fresamento.
- Os alunos irão comparar as forças e as pressões específicas dos três experimentos: no fresamento utilizando a força resultante e na furação, a força de avanço e o torque, quando a área de corte passa a ser teóricamente constante.
- Os alunos realizarão como a comparação dos valores de rugosidade da superfície R_a e R_a , com o cut-off recomendado.
- Os alunos farão a análise e apresentação dos resultados em forma de relatório (descrito ao final deste texto).

1.2 Elementos básicos da Programação CNC

O Controle Numérico Computadorizado (CNC) é uma tecnologia de automação utilizada para controlar operações de máquinas-ferramentas na produção em lotes, a qual as instruções de processamento são diferentes para cada lote. Estas instruções são transferidas ao equipamento através de programas específicos preparados para cada lote (Groover, 2011).

O Controle Numérico é uma forma de automação onde os movimentos e velocidades do equipamento são indicados por uma linguagem de programação por blocos, onde cada bloco indica uma ação da sequência. O programa base é escrito na linguagem ISO e contém códigos alfa-numéricos. As primeiras aplicações do CNC se deram em processos de usinagem, considerados até hoje as principais aplicações.

Os comandos da linguagem ISO indicam um modo de operação, ou um parâmetro de velocidade, ou a localização próximo ponto a ser alcançado pela ferramenta. A posição a ser alcançada pela ferramenta a cada bloco é definida pelas coordenadas x-y-z da máquina com a origem definida pelo operador, que pode ser a própria origem da máquina ou uma nova referência de origem. A velocidade de rotação do eixo, sentido da rotação e a velocidade de avanço, por exemplo, são informadas em blocos da programação para que o controle da máquina assegure estes parâmetros através da leitura interna de dados.

Por exemplo, para executar uma operação de furação, um comando do seguinte tipo deve ser inserido:

```
N010 G00 G90 X70.0 Y 60.0  
N020 G01 G91 Z-20. F175 S500
```

N010 - O **comando N** indica simplesmente o número do bloco que está na sequência de comando do programa.

G00 - O **comando G00** indica que a peça (ou a ferramenta) realizará uma movimentação rápida de posicionamento, sem controlar a posição instantânea e a velocidade de avanço da trajetória traçada até posição final. Não deve ser utilizada durante a usinagem, apenas no posicionamento.

G01 - O **comando G01** indica que a movimentação realizada terá o controle do movimento com uma interpolação linear e contínua. A trajetória é uma combinação dos eixos da máquina, dependendo do ponto final. A resolução da trajetória depende da menor resolução de cada eixo.

G90 - O **comando G90** indica que a posição do ponto que a ferramenta deve alcançar está descrita de acordo com a origem definida no sistema de eixos de coordenadas.

G91 - O **comando G91** indica que a localização do ponto a ser alcançado está descrita utilizando posicionamento incremental, ou seja, relativo a posição atual.

X70 - Os **comandos X, Y e Z** indicam a coordenadas da posição a ser alcançada ($X = 70,0$ mm, $Y = 60$ mm em relação a um sistema de coordenadas e $Z = -20$ em posicionamento relativo ao ponto atual).

Para informar onde está a origem do sistema de coordenadas absolutas, informa-se separadamente no registro da máquina-ferramenta. Para identificar diferentes origens, utiliza-se os comandos G55, G56, G57, G58 e G59, enquanto G54 informa que está sendo utilizada a origem da máquina, normalmente no ponto de troca da ferramenta.

F175 - Os **comandos F e S** especificam a velocidade de avanço e a velocidade de rotação a serem utilizadas na operação de furação (velocidade de avanço de 175 mm/min e a velocidade de rotação de 500 rpm).

COMANDO USADO EM AULA NO FRESAMENTO:

1.3 Aquisição de Sinais de Força de Usinagem

O dinamômetro piezoelétrico é um equipamento que contém internamente lâminas de material piezoelétrico que tem a propriedade de transformar em carga elétrica as tensões aplicadas ao elemento sensor. O mais utilizado de todos os materiais piezoelétricos é o quartzo, o SiO_2 cristalino, elemento de estrutura cristalina trigonal, utilizado no dinamômetro utilizado no experimento.

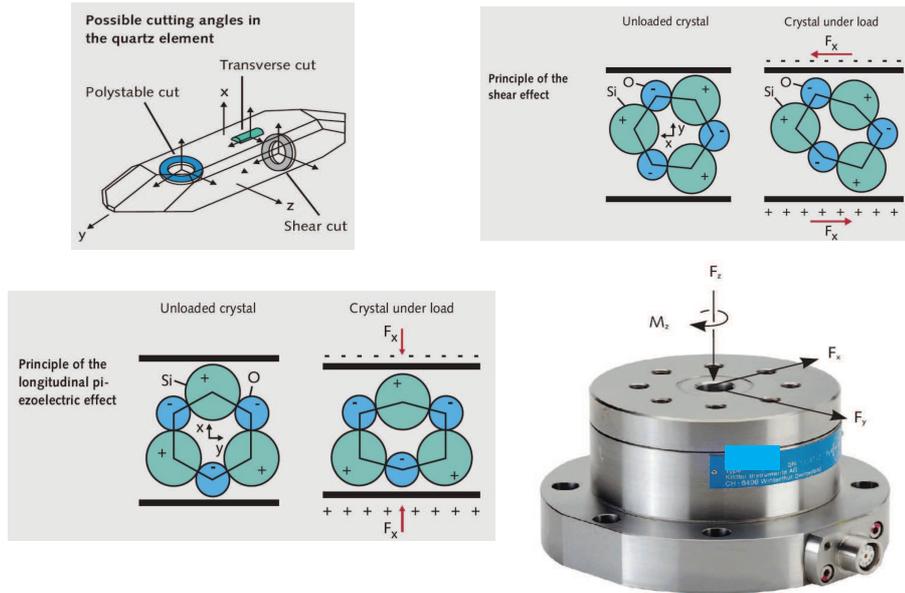


Figura 1.1: Dinamômetro piezoelétrico e o princípio de funcionamento das células de quartzo (Kistler, 2012)

Na figura 1.1 pode-se identificar o funcionamento das lâminas, dependendo da direção cristalina que cada lâmina foi cortada em relação as direções cristalinas quartzo. O posicionamento das lâminas no dinamômetro permite a instrumentação das forças nas direções indicadas na figura.

A peça é fixada ao dinamômetro que é preso à mesa e desta forma, a força de usinagem aplicada a peça é transferia ao dinamômetro. As laminas de quartzo do dinamômetro são conectadas a um circuito elétrico interno que é conectado a um condicionador de sinais, equipamento que amplifica e filtra o sinal. O condicionador é conectado a uma placa de conversão analógica-digital (A/D) que transforma o sinal contínuo em valores discretos que podem ser lidos e armazenados pelo computador. A taxa de conversão dos sinais é função da frequência de amostragem utilizada (f_{aquis}).

Cada componente F_x , F_y e F_z da força de usinagem (nas direções ortogonais do dinamômetro, apresentados na Fig. 1.1) e o torque (perpendicular ao dinamômetro) são registradas em linhas de um arquivo de dados *.dat.

O espaçamento temporal entre o registro de cada linha de dados experimentais é de $dt = (f_{aquis})^{-1}$, o que normalmente é informado no cabeçalho do arquivo de dados. No caso da aula experimental, este valor foi de:

$$f_{aquis} =$$

$$dt =$$

É fácil compreender que o valor da frequência de amostragem utilizado deve ser definido conhecendo a velocidade de rotação da ferramenta utilizada no processo de usinagem. Desta forma, pode-se ter um número pontos suficiente no tempo da passagem da cada aresta de corte que possa formar uma curva de força de corte para ser interpretada. O número de linhas armazenadas a cada rotação (N_{ppr}), depende da velocidade de rotação e a taxa de aquisição:

$$N_{ppr} =$$

Cada canal do dinamômetro pode ter diferentes faixas de amplificação. A leitura do sinal elétrico (em V) estará relacionada a um valor de força em função da amplificação adotada. Assim, pode-se medir diferentes faixas de força, com diferentes forças máximas, dependendo da faixa de amplificação. Esta opção melhora a relação sinal-ruído elétrico. No experimento realizado os dados enviados aos alunos após a experiência já foram convertidos anteriormente para o valor em N (ou Nm).

*** Faixa de Amplificação utilizada em aula :**

$$F_{max} Din. = \quad \quad \quad \text{N}$$

*** Relação de Amplificação:**

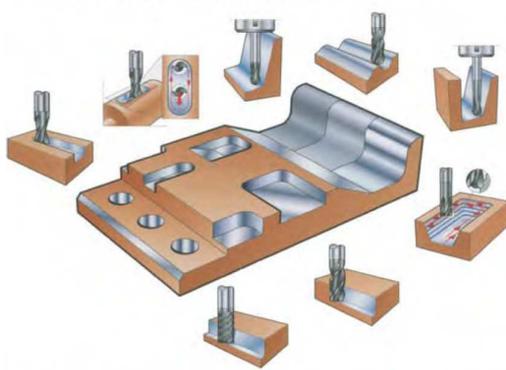
$$r_a = \quad \quad \quad \text{N/V}$$

1.4 Forças de Usinagem no Fresamento

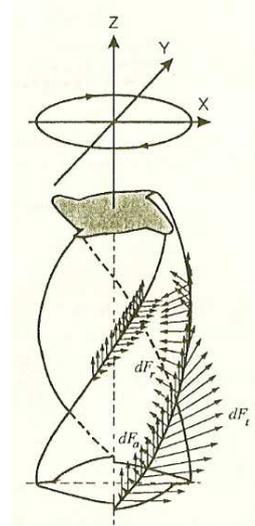
Uma grande variedade de fresas é utilizada na indústria, principalmente na confecção de moldes e matrizes e na indústria aeronáutica, por utilizar materiais de alta resistência, como ligas de titânio, níquel e alumínio e por exigir eficiência e precisão nas operações de fabricação.

Para o cálculo das forças de usinagem, este módulo da disciplina se baseia em um modelo que tem a hipótese que a força provocada por um segmento da aresta de corte db é proporcional à área de cavaco em contato com a ferramenta $dA = t_c db$. Para calcular as forças de corte no fresamento, deve-se considerar **a variação da espessura do cavaco com a rotação** $t_c(\varepsilon)$ e, dependendo da geometria da ferramenta, ao longo da aresta de corte:

$$d\vec{F} = \vec{K} \cdot dA = \vec{K} \cdot t_c(\varepsilon) \cdot db \quad (1.1)$$



(a) Fresas de Topo (Smith, 2008)



(b) Fresa de Topo - Arestas em hélice (Forças locais dF_t e dF_r)

Figura 1.2: Ferramentas de Fresamento

\vec{K} (N/mm^2) é chamada de pressão específica pois é a razão entre a força de usinagem resultante e a área de contato. A componente da pressão na direção da velocidade de corte é chamada pressão específica de corte.

A espessura do cavaco indeformado $t_c(\varepsilon)$ é calculada em função do avanço por dente f_z , e da posição angular $\varepsilon(t)$ do segmento da aresta de corte (Eq. Martelotti):

$$t_c(\varepsilon) = f_z \cdot \text{sen}(\varepsilon(t)) = \frac{f_{rot}}{Z} \cdot \text{sen}(\varepsilon(t)) \quad (1.2)$$

Cade ressaltar que a espessura do cavaco t_c não pode ter valores negativos! Observe na figura 1.3.

O avanço por dente f_z é recomendado pelo fabricante da ferramenta de corte e a velocidade de avanço V_f (mm/min) é calculada conhecendo o número de dentes da fresa (Z) e a velocidade de rotação (n):

$$V_f[mm/min] = f_z[mm] \cdot Z[dentes/rot] \cdot n[rpm] \quad (1.3)$$

O ângulo de rotação da ferramenta $\varepsilon(t)$ varia linearmente com o tempo, já que a velocidade de rotação (n) é constante. A velocidade de rotação é calculada a partir da velocidade de corte (V_c) recomendada para o material, e o diâmetro da fresa D (para fresas cilíndricas):

$$n[rpm] = \frac{1000[mm/m] \cdot V_c[m/min]}{\pi D[mm]} = \quad (1.4)$$

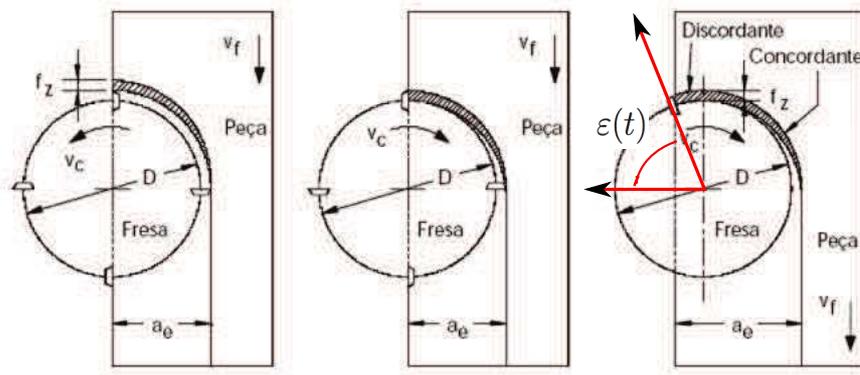


Figura 1.3: Variação da espessura do cavaco com o ângulo de rotação $\varepsilon(t)$

$$\varepsilon(t)[rad] = \frac{2\pi[rad/rot].n[rot/min]}{60[s/min]} \cdot t[s] \quad (1.5)$$

1.5 Simplificação das Forças desprezando o ângulo de hélice

Se o ângulo de hélice da fresa for igual a zero, ou se a profundidade de corte (a_p) for pequena o suficiente para desprezar a inclinação da aresta de corte no plano tz , e o ângulo de posição (inclinação da aresta no plano rz) for zero, a área de corte será igual a:

$$\vec{F}_i = \int_0^b \vec{K} \cdot t_c(\varepsilon) \cdot db \approx \vec{K} \cdot t_c(\theta) \cdot a_p \quad (1.6)$$

Nesta situação, onde não há ângulo de hélice, todos os pontos de uma mesma aresta i estão na mesma posição angular $\theta_i = \varepsilon$.

A mesma força resultante de cada aresta i pode ser decomposta no referencial do dinamômetro (que são as forças experimentais) ou no referencial radial e tangencial (direção da velocidade de corte) da aresta de corte:

$$\vec{F}_i = \begin{bmatrix} F_x(\varepsilon)_i \\ F_y(\varepsilon)_i \\ F_z(\varepsilon)_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\cos(\varepsilon) & -\sin(\varepsilon) & 0 \\ \sin(\varepsilon) & -\cos(\varepsilon) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_t \cdot t_c(\varepsilon) \cdot a_p \\ K_r \cdot t_c(\varepsilon) \cdot a_p \\ K_z \cdot t_c(\varepsilon) \cdot a_p \end{bmatrix} \quad (1.7)$$

Calcular a força $\vec{F}(t) = \sum \vec{F}_i$ significa considerar todas as arestas de corte em cada instante t . A contribuição de cada pastilha é defasadas do ângulo $2\pi/Z$, onde Z é o número de arestas de corte, ou seja $1/Z$ de uma rotação.

* Tempo de uma rotação:

$$F(t)_{i+1} = F \left(t + \frac{60}{nZ} \right)_i \quad (1.8)$$

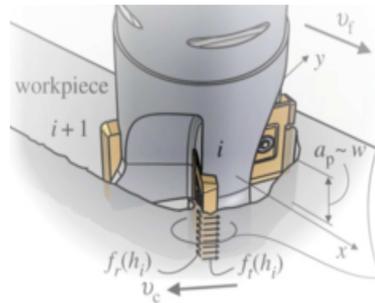


Figura 1.4: Exemplo de Forças de Usinagem de uma fresa com 4 arestas

1.6 Forças no Processo de Furação

O cálculo das forças no processo de furação pode ser dividido em duas partes: uma proveniente da aresta transversal de corte (onde o material é puncionado e escoado lateralmente para a aresta principal de corte) e as forças envolvidas no processo de usinagem das arestas principais de corte. Os mecanismos de deformação provocado por cada uma destas arestas tem características diferentes e particulares. A aresta transversal identa no material para que a aresta de corte possa em seguida provocar a separação do cavaco e removê-lo.

Alguns autores assumem que as forças provenientes da aresta transversal vale aproximadamente de 10 a 15% das forças de avanço e que o torque pode ser desconsiderado, uma vez que o núcleo é pequeno em comparação com o diâmetro da broca. Podemos usar esta hipótese no nosso experimento.

1.6.1 Força de Avanço

É necessário analisar a área de contato do cavaco com a ferramenta para calcular as forças de corte. Neste caso, novamente se dividirá as arestas de corte em segmentos. A direção de avanço é coincidente com o eixo de rotação da ferramenta e a espessura do cavaco indeformado t_c , perpendicular a aresta de corte, é calculada

em função do avanço por rotação f_r , do ângulo da ponta da broca (posição) κ_t e do número de arestas de corte, Z , que no caso das brocas é 2.

$$t_c = f_t \cdot \sin \kappa_t = \frac{f_r \cdot \sin \kappa_t}{Z} = \frac{f_r \sin \kappa_t}{2} \quad (1.9)$$

A força de usinagem é função da pressão específica, como no fresamento, porém no caso da furação, é calculada pontualmente a segmento da aresta de corte pois varia com a velocidade de corte. Pode-se calcular a área com a projeção radial dr do segmento da aresta de corte. As componentes da força de cada elemento de aresta, no referencial da aresta de corte é escrito por:

$$dF_t = K_t(r) \cdot dA \quad (1.10)$$

$$dF_r = K_r(r) \cdot dA \quad (1.11)$$

$$dF_f = K_f(r) \cdot dA \quad (1.12)$$

onde a área de contato de cada elemento de aresta é:

$$dA = t_c \cdot db = \frac{f_r \cdot \sin \kappa_t}{2} db = \frac{f_r}{2} \cdot dr \quad (1.13)$$

Assim, a área do cavaco total A_c , quando a aresta de corte está toda em contato com o furo (após a entrada da ponta da broca):

$$A_c = \int_{\omega}^R f_Z \cdot dr = \int_{\omega}^R \frac{f_r}{2} dr \quad (1.14)$$

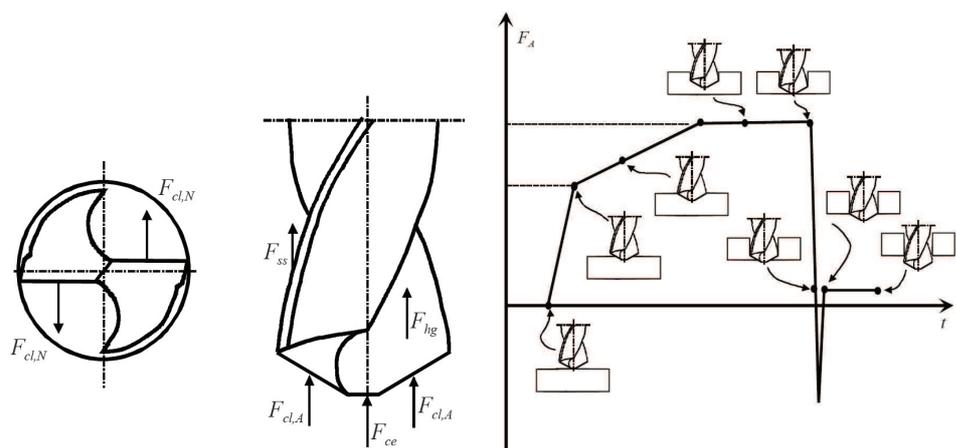
Pode ser observado na figura 1.5(a) que a força na direção radial e tangencial das duas arestas de corte são iguais e tem direções contrárias, com resultante zero. A força axial total é a soma da força de avanço das duas arestas. Considerando a parcela da aresta transversal, será calculada por:

$$F_z = 2 \int_{z_{\omega}}^{z_t} dF_z + F_{zat} \approx 1,15 \cdot 2 \cdot \frac{f_r \cdot \sin \kappa_t}{2} \int_{\omega}^R K_z(r) dr \quad (1.15)$$

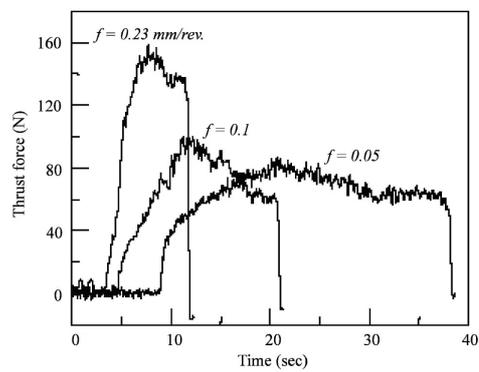
E a força resultante total será calculada por:

$$F_{res} = 2 \int_{\omega}^R dF_{res} + F_{zat} \approx 1,10 \cdot 2 \cdot \frac{f_r \cdot \sin \kappa_t}{2} \int_{\omega}^R K_{res}(r) dr \quad (1.16)$$

Porém, desde o início da entrada da ferramenta até que a ponta da broca esteja totalmente em contato com o material, a área aumenta gradualmente. Uma visão das etapas do comportamento da força axial pode ser observada na Figura 1.5b e alguns exemplos experimentais apresentados na Fig. 1.5c.



(a) Parcelas da Força nas Arestas (b) Etapas de Evolução da Força Axial



(c) Sinal Experimental

Figura 1.5: Força Axial (Avanço) (Davim, 2008)

1.6.2 Torque

O torque (M_z) é calculado de forma similar, considerando a contribuição das forças tangenciais de cada segmento da aresta de corte em seu afastamento radial r :

$$M_z = 2 \int_{\omega}^R r \cdot dF_t \quad (1.17)$$

Pode ser observado na figura 1.6 as etapas do comportamento do torque durante a usinagem.

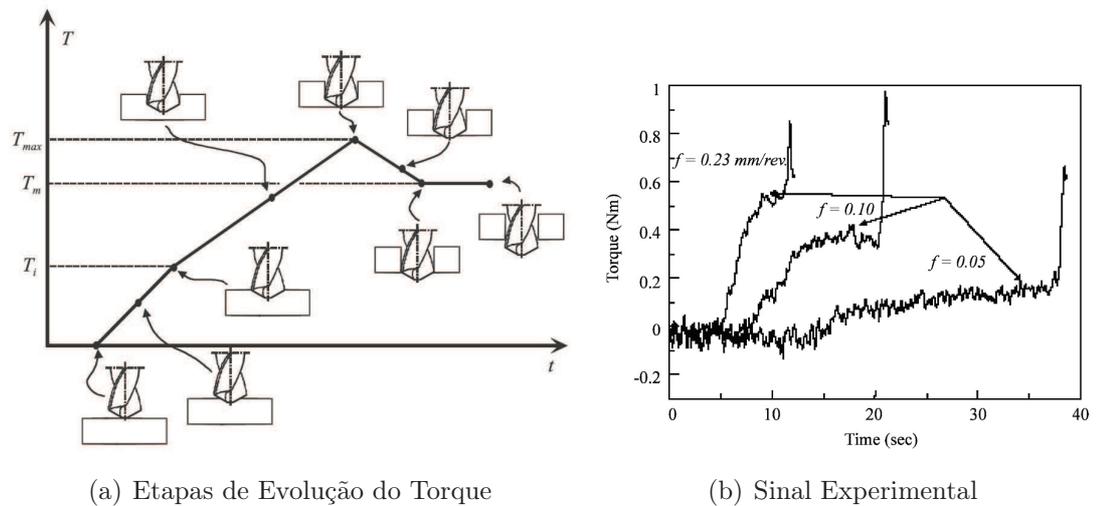


Figura 1.6: Torque na broca durante a furação (Davim, 2008)

Capítulo 2

Relatório da Atividade

- O relatório deverá ser entregue pessoalmente em versão impressa pelo sub-grupo **completo**. A listagem dos sub-grupos pode ser consultada no blog da mecânica. Na entrega, um dos alunos (escolhido aleatoriamente) apresentará brevemente o trabalho realizado em grupo.

Recomenda-se que os resultados sejam discutidos em grupo pois o aluno arguido será responsável pelo trabalho. Não compreende-se que cada aluno faça uma parte do trabalho, uma vez que as atividades propostas estão encadeadas e produto do trabalho é único.

- Relatórios iguais (ou com resultados idênticos) terão nota zero.
- Os gráficos devem obrigatoriamente ser gerados a partir de um dos *softwares* matemáticos: Mathematica, Matlab, MathCad ou Origin. **Não é aceito *softwares* de planilha de dados, como Excel, para apresentação dos resultados de força em forma de gráfico.**
- Todos os valores apresentados devem seguir o formato do exemplo: $B = 50.1 \pm 4.6mm^2$ (conforme recomendado na disciplina pré-requisito de Métodos Experimentais, utilizando a incerteza calculada com a distribuição de probabilidade recomendada).

2.1 Itens apresentados no Relatório

1. Descrição do experimento: Parâmetros de corte utilizados na aula (diâmetro da fresa, velocidade de corte, etc), material usinado, ferramenta utilizada, etc.
2. Memória de cálculo das variáveis calculados a partir dos dados utilizados em aula para cada caso experimental.

Fresamento

3. No processo de fresamento, a partir dos dados experimentais das componentes F_x , F_y e F_z , calcular e produzir um gráfico do módulo da força de usinagem em função do tempo. Colocar no relatório apenas uma janela temporal correspondente ao tempo de 4 rotações da fresa para cada experimento. É natural que não utilize a entrada da fresa na peça.

Note que o gráfico deve ser apresentado no texto e não "jogado" no relatório.

4. Simular a força de usinagem teórica (resultante) considerando a pressão específica igual a 1200 N/mm^2 . Apresentar um gráfico com a mesma janela no tempo que o item anterior (usando os dados de cada experimento).
5. Comparar os resultados experimentais com a previsão (de cada experimento).
6. Calcular a pressão específica $|\vec{K}|$ dos dados experimentais, justificando como foi calculado.

OBS: Utiliza a seguinte relação: $K_r = 0,3.K_t$ e $K_z = 0,15.K_t$.

7. Apresentar os resultados de rugosidade, comparando os dois casos. Identificar se é possível ver no perfil medido o espaçamento do avanço por dente.

Furação

8. Descrever a variação da velocidade de corte com a distância do centro de rotação, indicando a velocidade de corte máxima na aresta de corte, no processo de furação.
9. Apresentar e discutir o resultado experimental da força de avanço no processo de furação em função do tempo, explicando a sua evolução.

Conclusões

10. Avaliação técnica do aluno a respeito dos resultados apresentados no relatório.

2.2 Como o relatório será avaliado

- Apresentação do relatório - Serão considerados: se o texto foi claro e é original dos alunos e se os gráficos apresentam de forma clara. Os gráficos devem apresentar as respectivas legendas, unidades e estar inserido no texto do relatório.

- Conteúdo - Será avaliado se o método realizado está apresentado de forma clara e tecnicamente correta.

OBS: Sem a presença na aula prática, o aluno não poderá entregar o relatório.

Bibliografia

[Davim, 2008] Davim, J. P. (2008). *Machining - Fundamentals and Recent Advances*. Springer.

[Groover, 2011] Groover, M. (2011). *Introduction to Manufacturing Processes*. JOHN WILEY & SONS, INC.

[Smith, 2008] Smith, G. T. (2008). *Cutting Tool Technology - Industrial Book*. Springer.