

MONITORAMENTO DO DESGASTE DE FERRAMENTA NUM PROCESSO DE FRESAMENTO DE TOPO

*Alexandre de Albuquerque Kanenobu¹
Carlos Eduardo Célia de Lima²
Guilherme Cruz Rossi³
Gilmar Ferreira Batalha⁴*

Resumo

Em processos de usinagem, mas especificamente, no processo de fresamento de topo, é de grande importância o monitoramento do desgaste da ferramenta de usinagem, já que o desgaste da ferramenta causa um grande prejuízo na indústria através de um gasto maior de material e da produção de peças de menor qualidade. Esse estudo analisou o desgaste da fresa de topo através do monitoramento experimental e determinação dos parâmetros mais significantes para o desgaste e comparou os resultados com os modelos teóricos encontrados na literatura. Para isso foram confeccionados corpos de prova que foram usinados no Laboratório de Máquinas Ferramentas do PMR-EPUSP para serem ensaiados. Os ensaios foram realizados em uma fresadora CNC, controlando-se os parâmetros de corte. Valores máximos e mínimos para os parâmetros de corte da fresadora CNC foram determinados através de ensaios anteriores. Para a concluir, os dados obtidos foram analisados estatisticamente através do modelo de Regressão Múltipla para determinar a influência de cada um dos parâmetros de corte sobre a rugosidade da superfície usinada, alcançando-se assim o objetivo do trabalho.

Palavras-chave: desgaste de ferramenta; fresamento de topo; monitoramento de processo.

Abstract

In machining process, specifically in the end milling process is very important to monitor the machining tool wear since that causes loss in the industry, using more material than it is needed and producing poor quality pieces. This work studied the end milling tool wear through a experimental monitoring, determined the most significant parameters to the wear and the surface finishing of the piece and then compared it to results obtained in the literature.

Key words: tools wear; end milling; process monitoring.

1. Introdução

É amplamente aceito que o monitoramento dos processos de usinagem, principalmente no que diz respeito à condição da ferramenta, é vital para o

¹ Bolsista CNPq/PIBIC 2002/2003.

² Bolsista CNPq/PIBIC 2002/2003.

³ Bolsista FAPESP, processo nº 02-01023/0, período da bolsa: 01/05/2002 a 30/04/2003.

⁴ Professor do Departamento de Engenharia Mecatrônica e Sistemas Mecânicos da EPUSP.

desenvolvimento de máquinas capazes de produzir peças baratas e de alta qualidade a um baixo custo sem a necessidade da intensa supervisão de um operador.

Assim, espera-se propor uma maneira de minimizar os gastos decorrentes a partir da quebra de uma ferramenta, pois à medida que uma ferramenta quebrada continua a ser usada sem que seja detectada a sua quebra, os custos de material irão aumentar e a qualidade das peças irá diminuir **(1)**.

2. Materiais, Equipamentos e Métodos

2.1. Materiais

Para a preparação dos corpos de prova foram utilizadas barras quadradas de aço 1020 trefilado (~170 HB) com 32mm de aresta.

2.2. Equipamentos

Para a usinagem foram utilizadas as máquinas (serra, plaina, fresa e retífica) do Laboratório de Máquinas Ferramentas do PMR-EPUSP. Rugosímetro Taylor Hobson modelo Surtronic 3+.

2.3. Método Experimental

2.3.1. Preparação dos corpos de prova: Os corpos-de-prova foram usinados a partir de barras de aço ABNT 1020 quadradas, com 32 x 32 x 3000 mm.

Para a fabricação de corpos-de-prova, foram seguidas as seguintes etapas:

Em primeiro lugar, foi utilizada uma serra hidráulica FRANHO modelo SF - 250 (Figura 2.3.1.1) para cortar a matéria-prima, fazendo peças já com o comprimento desejado de 320mm (Figura 2.3.1.2).



Figura 2.3.1.1. Serra Hidráulica.



Figura 2.3.1.2. Matéria Prima Serrada

Com os corpos-de-prova já cortados, passou-se para o processo de fresamento, a fim de continuar o processo de fabricação dos mesmos. Foi utilizada uma fresa de topo com 8 pastilhas de metal duro numa fresadora Romi U-30 (Figura 2.3.1.3).

Os parâmetros utilizados para o fresamento foram:

Rotação do fuso: 250 RPM;

Velocidade de avanço: 80 mm/min;

Profundidade de corte: 0,1 a 0,2 mm.



Figura 2.3.1.3. Fresadora Ferramenteira



Figura 2.3.1.4. Corpo-de-prova Fresado

Com o fresamento de topo, conseguiu-se atingir a tolerância desejada de 0,1 mm (dimensional e paralelismo), sendo que a medida dos lados dos corpos-de-prova foi definida como $37,0 + 0,5$ mm. Porém, na face em que acontecerá o contato destes com os sensores, será ideal uma rugosidade superficial baixa $Ra 0,8 \mu m$, o que não foi possível conseguir com o processo de fresamento. Assim, um dos lados de cada um dos corpos-de-prova foi retificado numa retífica Mello modelo RPT2 ano 1986 (Figura 2.3.1.5).



Figura 2.3.1.5. Retífica

2.3.2. Ensaaios

2.3.2.1- Ensaio para obtenção dos parâmetros de corte máximos e mínimos:

Foram realizados ensaios para a determinação dos valores máximos e mínimos dos três parâmetros de corte envolvidos neste estudo: velocidade de corte, avanço e profundidade de corte.

Isto foi necessário, pois o experimento do peso dos parâmetros de corte que foi realizado neste trabalho precisa de dois diferentes níveis para cada parâmetro, um nível alto (valor máximo) e um baixo (valor mínimo). Torna-se muito importante, a localização dos máximos e mínimos que podem ser utilizados na fresadora CNC, objeto de estudo desta pesquisa, pois quanto maior o intervalo entre os níveis altos e baixos de cada parâmetro maior será a informação contida nos resultados do experimento do peso dos parâmetros. Esta afirmação admite um comportamento monotônico da força de corte em função da variação dos parâmetros de usinagem.

A metodologia utilizada para a realização deste ensaio, foi a de manter constante o avanço por dente (f_z) e variar os parâmetros avanço (f) e velocidade de corte (vc) de acordo com a equação:

$$f = f_z \cdot RPM \cdot Z$$

onde z = número de dentes.

Segundo a literatura (2), o f_z ótimo para fresas de topo de 16 mm de diâmetro é igual a 0,055 mm/(dente rotação). Inicialmente, a profundidade de corte (a_p) é mantida constante num valor menor do que o máximo especificado pelo fabricante ($d/2 = 8$ mm), sendo $a_p=6$ mm. Depois de encontrados valores máximos e mínimos para f e vc , estes dois parâmetros são fixados em valores próximos aos seus máximos encontrados, e a profundidade de corte é variada, encontrando-se também os seus valores máximos e mínimos.

O critério de decisão para a chegada dos parâmetros máximos e mínimos é a rugosidade da superfície usinada. Um rugosímetro Taylor-Hobson – modelo Surtronic 3+ está sendo utilizado para medir a rugosidade média da superfície (R_a), sendo estabelecido a priori um valor limite de 6 μm (3).

Para este ensaio, foi criado um programa em linguagem G para a operação da fresadora CNC. O esquema do programa assim como um esclarecimento sobre as suas operações está descrito a seguir:

Programa em linguagem G para a usinagem de uma ranhura:

X + 20,000	Y + 24,000	F 500	M 03
X + 20,000	Z – 6,000	F 500	M 03
X + 5,000	Z – 6,000	F 200	M 08
X – 125,000	Z – 6,000	F 50	M 03
X – 125,000	Z + 40,000	F 500	M 03

X + 40,000

Y + 60,000

F 1000 M 00

STOP

O programa basicamente realiza uma operação de ranhurado, na região central da peça. Após alguns testes, estipulou-se que o comprimento da ranhura deveria ser de 120 mm, para tornar possível uma boa avaliação do acabamento da superfície usinada, assim como a medição da rugosidade. Os valores indicados para o avanço e profundidade de corte são referentes ao primeiro ensaio realizado.

2.3.2.2- Ensaio dos Pesos dos Parâmetros:

Foi utilizada uma abordagem de Análise de Regressão Múltipla (Ver Anexo A) para a determinação da influência de cada um dos parâmetros de corte estudados isoladamente assim como as suas correlações sobre a força de corte.

Para isto, foi realizado um delineamento 2k fatorial do experimento, com duas replicações para cada combinação, que está descrito em (4). Delineamentos fatoriais são freqüentemente usados em experimentos envolvendo muitos fatores onde é necessário estudar o efeito dos fatores sobre uma resposta.

Destes, o caso mais importante é o k fatorial com dois níveis, um alto e um baixo. Um ensaio completo requer 2k observações. Pelo fato de só existirem dois níveis para cada fator, deve-se assumir que o comportamento da resposta provocada pelos mesmos é aproximadamente linear dentro da faixa de valores compreendidos entre os dois níveis.

É utilizada uma notação especial para representar as possíveis combinações entre os fatores. Em geral, uma combinação de fatores é representada por uma série de letras minúsculas. Se uma letra está presente, então o fator correspondente a ela está no nível alto naquela combinação; se estiver ausente, o fator está no nível baixo. Por exemplo, num experimento 24 fatorial, uma combinação com A e C no nível alto e B e D no nível baixo é representada por ac. Combinações onde todos os fatores estão no nível baixo são representadas por (1). Cada uma dessas representações indica a soma de todas as observações com a mesma combinação de níveis de fatores.

Os três fatores estudados são os seguintes:

Avanço (F) – a nas figuras;

Velocidade de Corte (Vc) – b nas figuras;

Profundidade de Corte (Ap) – c nas figuras.

Os níveis altos e baixos destes parâmetros foram obtidos pelo ensaio dos parâmetros máximos e mínimos.

Para este experimento, deve ser usado um delineamento 2³ fatorial, que possui 8 combinações possíveis de níveis de fatores. Porém, serão feitas duas replicações para cada combinação, resultando em um total de 16 ensaios.

Geometricamente, essa modelagem é um cubo como o da Figura 2.3.2.2.1, com as oito combinações formando os seus cantos. Com este, é possível estimar 3 efeitos

principais (F, Vc, Ap), três efeitos de interação de fatores dois a dois e um efeito da interação dos três fatores juntos.

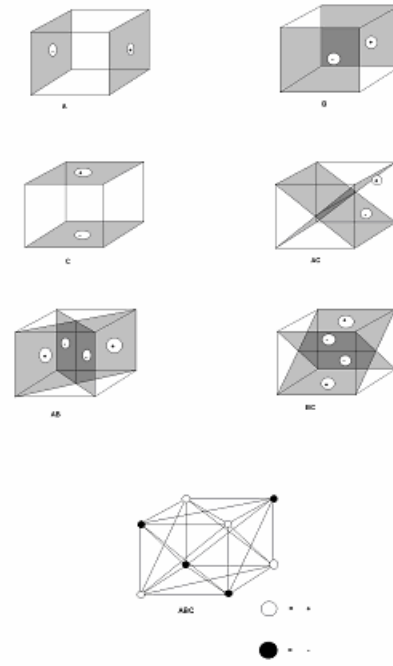
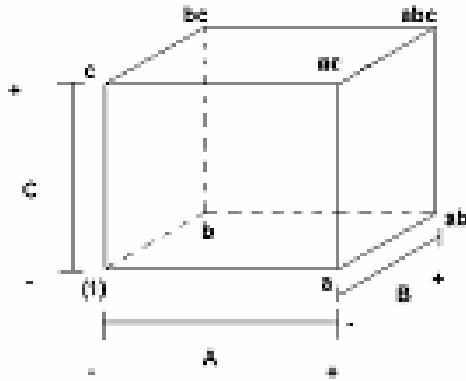


Figura 2.3.2.2.1. Arranjo Experimental

Figura 2.3.2.2.2. Detalhamento dos efeitos de cada fator

Utilizando-se a Figura 2.3.2.2.2, os efeitos podem ser facilmente estimados. Por exemplo, o efeito principal F pode ser estimado somando-se os valores obtidos das quatro combinações do lado direito do cubo, onde F está no nível mais alto, subtraindo deste total a soma dos valores obtidos das quatro combinações do lado esquerdo do cubo, onde F está no nível mais baixo, e dividindo-se este total por $4 \times n$, onde $n = 2$ replicações. Isto resulta em:

$$EfeitoF = \frac{1}{4n} [f + f.vc + f.ap + f.vc.ap - (1) - vc - ap - vc.ap]$$

Da mesma maneira, os outros efeitos principais podem ser estimados, sendo que para o efeito de Vc deve-se usar os lados da frente e de trás do cubo, e para Ap deve-se usar os lados de cima e de baixo do cubo, resultando em:

$$EfeitoVc = \frac{1}{4n} [vc + f.vc + vc.ap + f.vc.ap - (1) - f - ap - f.ap]$$

$$EfeitoAp = \frac{1}{4n} [ap + f.ap + vc.ap + f.vc.ap - (1) - f - vc - f.vc]$$

Os efeitos das interações dos fatores dois a dois são estimados, no caso da interação F-Vc, pela diferença entre a soma dos efeitos de F nos dois níveis de Vc. Por convenção, metade desta diferença é chamada de interação R-Vc. Simbolicamente, as três interações entre os fatores são:

$$EfeitoF - Vc = \frac{1}{4n} \cdot [f \cdot vc \cdot ap - vc \cdot ap + f \cdot vc - vc - f \cdot ap + ap - f + (1)]$$

$$EfeitoF - Ap = \frac{1}{4n} \cdot [(1) - f + vc - f \cdot vc - ap + f \cdot ap - vc \cdot ap + f \cdot vc \cdot ap]$$

$$EfeitoVc - Ap = \frac{1}{4n} \cdot [(1) + f - vc - f \cdot vc - ap - f \cdot ap + vc \cdot ap + f \cdot vc \cdot ap]$$

A interação F-Vc-Ap é definida como a soma das diferenças entre a interação F-Vc para os dois diferentes níveis de Ap, sendo assim:

$$EfeitoR - Vc - Ap = \frac{1}{4n} \cdot [f \cdot vc \cdot ap - vc \cdot ap - f \cdot ap + ap - f \cdot vc + vc + f - (1)]$$

Normalmente, num experimento como este, seria realizada uma análise de variância (ANOVA), para a determinação de quais são os fatores que realmente possuem efeitos significativos sobre a força de corte. Porém, no caso deste experimento, os fatores estudados já foram pré-selecionados dentre vários outros, e deseja-se realizar um experimento posterior com todos eles para a estimativa do desgaste de fresas de topo, sendo que assim não é necessário desconsiderar nenhum deles, mesmo que seu efeito seja bem pequeno.

Deve-se lembrar que o objetivo deste ensaio é a determinação dos pesos de cada parâmetro de corte, e não eliminar da análise aqueles que por ventura não tenham participação significativa na força de corte.

A partir dos valores estimados para os efeitos de cada parâmetro e suas interações, pode-se avaliar qual é o peso de cada um dos parâmetros de corte sobre a força de corte medida via mesa dinamométrica.

2.3.2.3- Ensaio preliminares de desgaste da fresa (VB, KT):

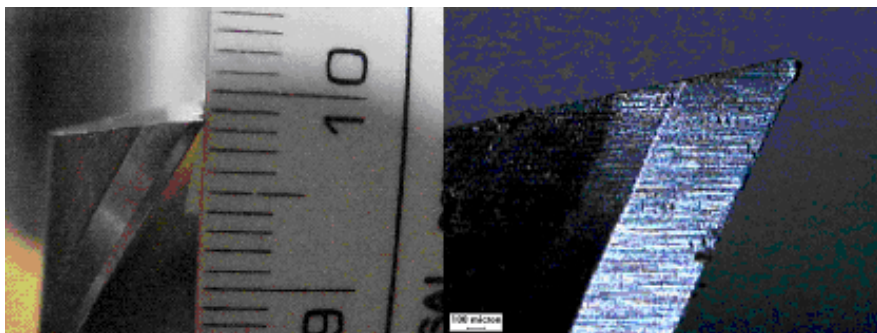


Figura 2.3.2.3.1. Fotos da fresa nova

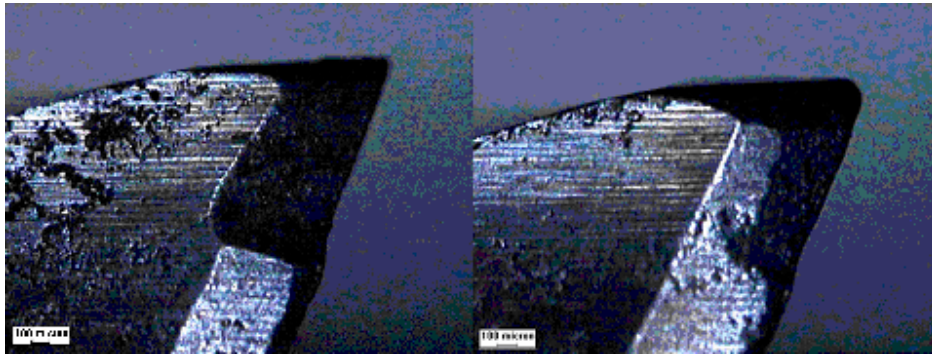


Figura 2.3.2.3.2. Fotos da fresa usada

3. Resultados e Discussão

3.1. Ensaio dos parâmetros Máximos e Mínimos

Seguindo a mesma metodologia utilizada na primeira parte destes ensaios, ou seja, utilizando a equação 18 e mantendo f_z constante igual a 0,055 mm/dente.rotação (valor ideal para fresas e $\phi = 16$ mm, obteve-se a tabela de resultados 3.1.1:

$$f = f_z \cdot RPM \cdot Z \quad (18)$$

Tabela 3.1.1. Ensaio dos Máximos e Mínimos

Ensaio	f (mm/rot)	Rotação (RPM)	ap (mm)	Ra média (μ m)
1	50	450	6	2,44
2	39	355	6	3,28
3	31	280	6	2,48
4	25	224	6	1,96
5	62	560	6	3,32
6	78	710	6	3,22
7	20	180	6	1,98
8 (*)	50	450	8	Falha
9	50	450	1	2,76

(*) O ensaio 8 não pôde ser completado, pois a combinação de parâmetros de corte ao qual ente se refere causou vibração excessiva no sistema e muito ruído, além de

eminência de quebra da ferramenta. Por este motivo, este ensaio teve que ser interrompido por uma parada de emergência.

A análise dos resultados permite que sejam tiradas algumas conclusões a respeito do aparato experimental montado:

Avanço (f): máx = 78 mm/rot.

mín = 25 mm/rot.

Rotação do fuso (RPM): máx = 710 rpm.

mín = 224 rpm.

Profundidade de corte (ap): máx = 6 mm.

mín = 1 mm.

Deve-se lembrar que estes não são os valores de máximos e mínimos reais, apenas estimativas realizadas, embasadas em metodologia científica, para que a faixa de operação da fresadora fosse esboçada e para que o Ensaio do Peso dos Parâmetros tivesse um resultado mais significativo.

Justificativas:

Devido ao ocorrido no ensaio 8, e como os parâmetros f e RPM já haviam sido testados nestes valores para $ap = 6$ mm, pode-se concluir que $ap = 8$ mm é um valor que o sistema não suporta, embora a indicação do fabricante é de que a profundidade máxima de corte é metade do diâmetro da fresa, ou seja, 8 mm.

O ensaio 6 mostrou que a rugosidade da superfície usinada não varia significativamente quando f e RPM são aumentados mantendo-se fz constante. Assim, foi decidido que 78 mm/rot e 710 rpm seriam os parâmetros máximos, devido a problemas de rigidez do aparato experimental.

Como a rugosidade não aumentou significativamente com a diminuição de f e RPM, foi decidido que seus valores mínimos seriam 25 mm/rot e 224 rpm respectivamente, pois, no Ensaio do Peso dos Parâmetros, um avanço muito grande com rotação do fuso pequena pode causar avarias à ferramenta.

Finalmente, decidiu-se determinar que a mínima profundidade de corte seria igual a 1 mm, pois com a utilização de valores menores, surgiriam forças devido ao “efeito de cunha”.

3.2. Ensaio do Peso dos Parâmetros

Este ensaio foi realizado conforme previsto nos dois relatórios anteriores, exceto pelo fato de que a grandeza medida para correlação com os parâmetros de corte foi a rugosidade da superfície usinada ao invés da força resultante de corte.

Foram utilizadas 8 fresas para a realização dos 16 ensaios, sendo que cada combinação possível de parâmetros máximos e mínimos foi ensaiada duas vezes, um

com uma fresa nova e outra com uma fresa usada. Não foram notadas diferenças significativas entre a rugosidade de uma peça usinada com uma fresa nova de uma usinada com uma fresa usada, para uma mesma combinação de parâmetros de corte.

Isso faz com que se acredite que o desgaste da fresa em um processo de ranhura com os que foram realizados é mínimo, sendo que a vida da fresa é muitas vezes superior a este tempo de usinagem.

Para cada combinação de parâmetros de corte, a rugosidade da superfície usinada foi medida três vezes, conforme a Tabela 3.2.1, sendo que o valor utilizado para a realização dos cálculos do Método de Regressão Linear.

Tabela 3.2.1. Ensaio do Peso dos Parâmetros

Ensaio	Fresa	Fatores	F (mm/rot)	RPM (rpm)	Ap (mm)	Ra1 (μm)	Ra2 (μm)	Ra3 (μm)	Ram (μm)
1	1 (*)	abc	25	224	1	1,12	1,16	1,04	1,11
2	2 (*)	abC	25	224	6	1,52	1,20	1,32	1,35
3	3 (*)	aBc	25	710	1	0,78	1,26	0,74	0,93
4	4 (*)	aBC	25	710	6	1,48	1,50	1,38	1,45
5	5 (*)	Abc	78	224	1	4,84	4,62	5,24	4,90
6	6 (*)	AbC	78	224	6	2,96	2,48	2,28	2,57
7	7 (*)	AB	78	710	1	1,92	1,70	2,16	1,93
8	8 (*)	ABC	78	710	6	1,64	1,64	1,64	1,64
9	8	abc	25	224	1	1,14	1,04	1,02	1,07
10	7	abC	25	224	6	1,10	1,48	1,30	1,29
11	6	aBc	25	710	1	1,14	1,18	1,28	1,20
12	5	aBC	25	710	6	1,70	1,48	1,46	1,55
13	4	Abc	78	224	1	2,74	2,78	2,72	2,75
14	3	AbC	78	224	6	2,74	2,56	3,02	2,77
15	2	ABc	78	710	1	1,06	1,32	1,04	1,14
16	1	ABC	78	710	6	2,52	2,86	2,70	2,69

Obs1: As fresas marcadas com (*) são fresas novas.

Obs2: a = f; b = RPM e c = ap.

A partir das fórmulas explicitadas e comentadas no item 2.3.2.2, pode-se calcular os efeitos de cada parâmetro e suas interações. Assim, seguem-se os referidos cálculos:

$$abc = 1,11 + 1,07 = 2,18.$$

$$abC = 1,35 + 1,29 = 2,64.$$

$$aBc = 0,93 + 1,20 = 2,13.$$

$$aBC = 1,45 + 1,55 = 3,00.$$

$$Abc = 4,90 + 2,75 = 7,65.$$

$$AbC = 2,57 + 2,77 = 5,34.$$

$$ABc = 1,93 + 1,14 = 3,07.$$

$$ABC = 1,64 + 2,69 = 4,33.$$

n = Número de Replicações = 2.

Assim:

$$\begin{aligned} \text{Efeito f} &= (1/4*n)*[Abc + ABc + AbC + ABC - abc - aBc - abC - aBC] = \\ &= (1/4*2)*[7,65 + 3,07 + 5,34 + 4,33 - 2,18 - 2,13 - 2,64 - 3,00] = \\ &= (1/8)*(10,44) \gg \end{aligned}$$

\gg Efeito f = 1,305.

$$\begin{aligned} \text{Efeito RPM} &= (1/4*n)*[aBc + ABc + aBC + ABC - abc - Abc - abC - AbC] = \\ &= (1/4*2)*[2,13 + 3,07 + 3,00 + 4,33 - 2,18 - 7,65 - 2,64 - 5,34] = \\ &= (1/8)*(-5,28) \gg \end{aligned}$$

\gg Efeito RPM = -0,66.

$$\begin{aligned} \text{Efeito ap} &= (1/4*n)*[abC + AbC + aBC + ABC - abc - Abc - aBc - ABc] = \\ &= (1/4*2)*[2,64 + 5,34 + 3,00 + 4,33 - 2,18 - 7,65 - 2,13 - 3,07] = \\ &= (1/8)*(0,28) \gg \end{aligned}$$

\gg Efeito ap = 0,035.

Análise dos resultados:

Os resultados encontrados para o peso de cada parâmetro de corte são coerentes com os encontrados na literatura sobre o assunto (5). Pode-se perceber que o parâmetro

de corte que mais influencia a rugosidade da superfície usinada é o avanço, seguido pela rotação do fuso e pela profundidade de corte, nesta ordem.

Além disso, os resultados mostram o que já era esperado, ou seja, que enquanto o avanço e a profundidade de corte são diretamente proporcionais à rugosidade, a rotação do fuso é inversamente proporcional a esta.

Isso quer dizer que com um aumento do avanço ou da profundidade de corte, a rugosidade irá aumentar, enquanto que se a rotação do fuso for aumentada, irá se observar uma diminuição na rugosidade da superfície usinada.

A seguir, serão calculados os efeitos das interações entre os parâmetros dois a dois e da interação entre os 3 parâmetros.

$$\text{Efeito } f\text{-RPM} = (1/4 * n) * [ABC - aBC + ABc - aBc - AbC + abC - Abc + abc] = (1/4 * 2) * [4,33 - 3,00 + 3,07 - 2,13 - 5,34 + 2,64 - 7,65 + 2,18] =$$

$$= (1/8) * (-5,9) >>$$

$$>> \text{Efeito } f\text{-RPM} = -0,7375.$$

$$\text{Efeito } f\text{-ap} = (1/4 * n) * [abc - Abc + aBc - ABc - abC + AbC - aBC + ABC] =$$

$$= (1/4 * 2) * [2,18 - 7,65 + 2,13 - 3,07 - 2,64 + 5,34 - 3,00 + 4,33] =$$

$$= (1/8) * (-2,38) >>$$

$$>> \text{Efeito } f\text{-ap} = -0,2975.$$

$$\text{Efeito RPM-ap} = (1/4 * n) * [abc + Abc - aBc - ABc - abC - AbC + aBC + ABC] = (1/4 * 2) * [2,18 + 7,65 - 2,13 - 3,07 - 2,64 - 5,34 + 3,00 + 4,33] =$$

$$= (1/8) * (3,98) >>$$

$$>> \text{Efeito RPM-ap} = 0,4975.$$

$$\text{Efeito } f\text{-RPM-ap} = (1/4 * n) * [ABC - aBC - AbC + abC - ABc + aBc + Abc - abc] = (1/4 * 2) * [4,33 - 3,00 - 5,34 + 2,64 - 3,07 + 2,13 + 7,65 - 2,18] =$$

$$= (1/8) * (3,16) >>$$

$$>> \text{Efeito } f\text{-RPM-ap} = 0,395.$$

Seguem as fotos tiradas durante o Ensaio do Peso dos Parâmetros:



Figura 3.2.1. Arranjo experimental montado

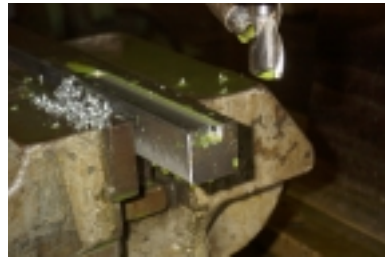


Figura 10.2. Detalhe da Superfície usinada.

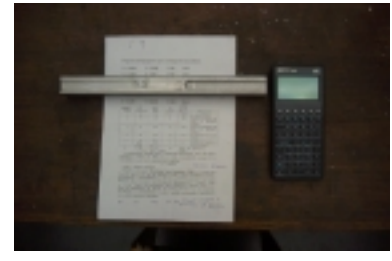


Figura 10.3. Bancada montada para aquisição dos dados de rugosidade

5. Conclusões

Esta pesquisa de Iniciação Científica, somada a trabalhos de formatura, de Mestrandos e Doutorandos que também estão sendo realizados na Escola Politécnica sobre este mesmo assunto, abrem caminho para uma etapa fundamental no prosseguimento dos mesmos: o projeto e concepção de uma mesa dinamométrica para a medição de esforços de usinagem, que além do fresamento, também serviria para a medição desses esforços em operações tais como furação e plainamento.

Esta mesa dinamométrica seria de grande valia para as pesquisas subseqüentes nesta escola, além de auxiliar no processo de formação de novos engenheiros, sendo usada em aulas de graduação.

Assim, entende-se que esta pesquisa foi fundamental no que diz respeito ao mapeamento das faixas de operação no fresamento, sendo que este mapeamento será muito importante no projeto da mesa dinamométrica.

Agradecimentos

Ao CNPq e a Fapesp pela concessão das Bolsas de Iniciação Científica.

Referências Bibliográficas

1. HUANG, P. T.; CHEN, J. C.; CHOU C. **A statical approach in detecting tool breakage in end milling operations.** Journal of Industrial Technology, v.15, n.3, 1999, p.1-7.
2. **Machining Data Handbook**, 1980. Machinability Data Center, Volume 1, third edition, 1980.
3. HALEVI, G.; Weill, R. D. **Principles of Process Planning – A Logical Approach.** Chapman & Hall, 1995.

4. MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical Quality Control**. Wiley, fourth edition, NY. 2001. p. 572-615.
5. DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. MM editora, São Paulo, Brasil, 1999.
6. JENRICH, R. I. **An Introduction to Computational Statistics - Regression Analysis**. Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall, 1995.
7. SANTOS, A. L. B. dos; MILAN, J. C. G.; Silva, M. B. da; Santos, S. C.; Jr., S. S. C. **Diferentes Metodologias Ajudam a Determinar a Equação de Taylor Expandida**. 1º COBEF, Curitiba, 2001.
8. WESTKÄMPER, E.; LANGE, D.; SCHMIDT, T. **Modeling the Grinding Process with Regression Models and Artificial Neural Networks**. Technical University of Braunschweig, Institute for Machine Tools and Production Engineering, 1996.

ANEXO A

Modelagem do Processo Via Regressão:

A técnica de regressão múltipla é uma metodologia para o estudo das relações entre variáveis. É implementada visando a determinação de relações entre variáveis dependentes e independentes, podendo ser usada para analisar dados e gerar um modelo. A partir de um modelo de regressão múltipla, pode-se obter as variáveis preditivas e determinar a relação entre as variáveis do critério e as variáveis preditivas (6). Neste sentido, a técnica de regressão múltipla seria útil na predição da variável dependente tais como a(o) máxima(o) força de corte(torque) em cada rotação via variáveis independentes tais como a velocidade do fuso, avanço e profundidade de corte.

É desejável que um modelo deduza um modelo matemático para as suas relações físicas funcionais. Entretanto, isso geralmente é muito difícil ou impossível para o processo de fresamento de topo, devido à grande quantidade de fatores envolvidos. Daí, modelos físicos só podem ser criados nos casos mais simples.

Assim, o modelo deve carregar vários fatores experimentais. Para fazer isso, os fatores devem variar e assumir dois níveis, um máximo e um mínimo, e os resultados devem ser guardados. Depois disso, funções matemáticas devem ser procuradas para aproximar os valores encontrados experimentalmente, dentro de uma certa precisão.

Porém, isso só é válido se a variação dos fatores entre os níveis máximo e mínimo puder descrever o comportamento do mesmo neste intervalo. Para isso, deve-se constatar que o comportamento deste fator é contínuo e monotônico, o que é bem razoável em se tratando de processos de corte tecnológicos, como é o caso do fresamento de topo.

Modelagem do Processo via Redes Neurais Artificiais:

O grande número de variáveis envolvidas e a complexidade dos processos de usinagem geram dificuldades que comprometem a confiabilidade dos modelos obtidos através de Regressão. Neste contexto, o emprego das Redes Neurais Artificiais vem se destacando em diversas áreas de atuação, demonstrando eficiência na determinação de parâmetros e otimização de modelos. Redes Neurais Artificiais são modelos eletrônicos relativamente simples, baseados na estrutura neural do cérebro, mas capazes de resolver problemas matemáticos complexos (7).

Uma das características e talvez a maior vantagem do uso das redes neurais, é que elas não requerem, a priori, um entendimento do comportamento físico do processo. Elas utilizam um procedimento sistemático para relacionar dados de entrada e de saída, substituindo modelos exigentes em termos computacionais (7).

As redes neurais consistem em um conjunto de neurônios, que são logicamente arranjadas em duas ou mais camadas. Há uma camada de entrada e uma camada de saída, cada uma contendo pelo menos um neurônio. As entradas dos neurônios em cada camada vêm exclusivamente das saídas dos neurônios das camadas prévias; as saídas seguem exclusivamente para os neurônios das camadas posteriores (Figura A.1) (7).

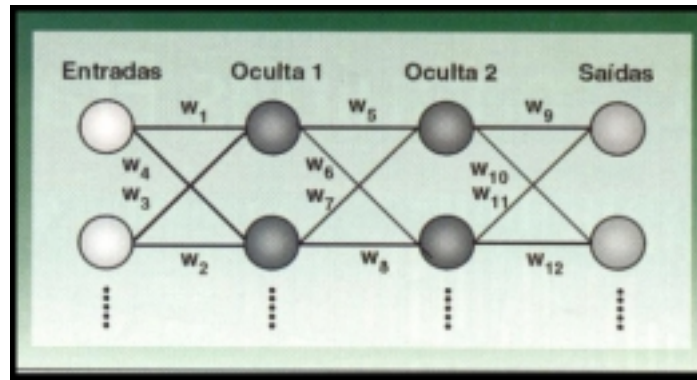


Figura A.1 – Esquema Genérico de uma Rede Neural

A informação processada em um neurônio é feita em dois passos. No primeiro passo (soma) os valores de saída x_i da camada de entrada dos neurônios são multiplicados por pesos correspondentes e somados (produto escalar de x e w (peso)). A ativação y do neurônio é calculada em um segundo passo com a ajuda de uma função de ativação não-linear, geralmente e Sigmodal, cujo argumento soma “S” é previamente determinado. A ativação fica disponível na saída do neurônio e então, passa a representar o valor de entrada do neurônio da camada seguinte da rede (8).

O conhecimento é gravado nas redes neurais através dos pesos das conexões e da função de ativação específica de cada neurônio individualmente. Para que se possa utilizar uma rede neural para uma certa tarefa, primeiro todos os fatores da rede e/ou as funções de ativação devem ser adaptadas. Isso é feito através de exemplos de entrada e saída (chamadas seqüências de treinamento), fazendo com que a saída da rede corresponda, o melhor possível, aos valores de saída desejados de acordo com uma função de erro. O procedimento de adaptação da rede é chamado treinamento ou aprendizado da rede.

Comparação entre o Método de Regressão e as Redes Neurais:

Modelos de Regressão	Redes Neurais
Relativa facilidade de cálculo	Cálculos complexos (pode ser automatizada)
Baixa precisão	Alta precisão
Novos modelos para cada material	Aprendizado de relações arbitrárias (Utilização universal)
Comportamento do processo deve ser contínuo e monotônico	Integração flexível de conhecimento já adquirido

Tabela A.1. – Comparação entre os dois métodos expostos.