

# RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE CORTE E A RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA NUMA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO DE TOPO <sup>1</sup>

Guilherme Cruz Rossi<sup>2</sup>

Alexandre de Albuquerque Kanenobu<sup>2</sup>

Gilmar Ferreira Batalha<sup>3</sup>

**Resumo:** *Atualmente, a concorrência existente entre os processos produtivos é muito elevada, sendo que as indústrias vêm procurando reduzir custos de fabricação em todas as atividades que desenvolve. Neste contexto também se enquadram os processos de manufatura mecânica, em especial os processos de usinagem. Este trabalho teve como objetivo encontrar as relações existentes entre alguns parâmetros de corte e a rugosidade média da superfície usinada, utilizando para isso o Método da Regressão Linear Múltipla. Os resultados encontrados podem ser utilizados para uma melhor seleção dos parâmetros de corte a serem utilizados em determinadas situações, para que se encontre a melhor relação custo-benefício de cada processo.*

**Palavras-Chave:** Fresamento de Topo; Otimização; Rugosidade; Parâmetros de Corte.

**Abstract:** *Nowadays, the competition between production processes is very big, so the industries have been looking for production costs reduction in all of the activities that they develop. One of these processes is the mechanical manufacturing process, specially the cut processes. This work has the objectives of finding the relations between some cut parameters and the machine-made surface average roughness, using the Multiple Linear Regression Method. The results can be used to better select the cut parameters to be used in some situations, so the best cost-benefit for each process can be found.*

**Key-Words:** End Milling; Optimization; Roughness; Cut Parameters.

---

<sup>1</sup> Contribuição para o I Workshop Novos Desenvolvimentos em Engenharia de Fabricação – 30/11/2004 - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Laboratório de Engenharia de Fabricação.

<sup>2</sup> – Mestrando - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Laboratório de Engenharia de Fabricação – Dept. Engenharia Mecatronica e de Sistemas Mecânicos.

<sup>3</sup> – Professor , Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Laboratório de Engenharia de Fabricação. Dept. Engenharia Mecatronica e de Sistemas Mecânicos

## **1- Introdução**

A técnica de regressão múltipla é uma metodologia para o estudo das relações entre variáveis. É implementada visando à 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, podem-se obter as variáveis preditivas e determinar a relação entre as variáveis do critério e as variáveis preditivas (**Jennrich, 1995**). Neste sentido, a técnica de regressão múltipla seria útil na predição da variável dependente tal como a máxima rugosidade da superfície usinada 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.

## **2- Objetivos**

Este trabalho tem como objetivo encontrar relações entre os parâmetros de corte (e suas interações) e a rugosidade superficial da superfície usinada numa operação de fresamento de topo, para que se possam saber quais os parâmetros que mais influenciam positiva ou negativamente sobre a rugosidade superficial. Estes dados serão de grande valia na determinação dos parâmetros necessários para que se possa obter uma rugosidade desejada num processo de fresamento de topo.

## **3- Materiais e Métodos**

### **3.1- Materiais:**

Para a realização dos ensaios, foi necessária a fabricação de corpos-de-prova (20 ao todo). 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 3.1.1) para cortar a matéria-prima, fazendo peças já com o comprimento desejado de 320mm (figura 3.1.2).



**Figura 3.1.1 – Serra Hidráulica**



**Figura 3.1.2 – Matéria-prima dos corpos-de-prova**

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.

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 3.1.3 – Fresadora Ferramenteira**



**Figura 3.1.4 – Corpo-de-prova semi-acabado**

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  $37,0 \pm 0,5$  mm. Porém, na face em que acontecerá o contato destes com os sensores, será ideal uma rugosidade superficial baixa  $Ra\ 0,8\ \mu\text{m}$ , 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.

Para a medição da rugosidade, foi utilizado um rugosímetro Taylor-Hobson Surtronic 3+.



**Figura 3.1.5 - Retífica**

### 3.2- Métodos

Para a realização deste trabalho, foram desenvolvidos dois ensaios diferentes:

#### 3.2.1- Ensaio Para a Obtenção dos Parâmetros Máximos e Mínimos

São 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 é necessário, pois o experimento do peso dos parâmetros de corte que será realizado numa etapa posterior desta pesquisa, 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 ( $v_c$ ) de acordo com a equação:

$$f = f_z \cdot RPM \cdot Z \quad (1)$$

onde  $z$  = número de dentes.

Segundo a literatura (**Machining Data Handbook, 1980**), o  $f_z$  ótimo para fresas de topo de 16 mm de diâmetro é igual à 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  $v_c$ , 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 média ( $R_a$ ) da superfície usinada, sendo estabelecido a priori um valor limite de 6  $\mu\text{m}$  (**Halevi, 1995**).

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:

<b>X + 20,000</b>	<b>Y + 24,000</b>	<b>F 500</b>	<b>M 03</b>
<b>X + 20,000</b>	<b>Z – 6,000</b>	<b>F 500</b>	<b>M 03</b>
<b>X + 5,000</b>	<b>Z – 6,000</b>	<b>F 200</b>	<b>M 08</b>
<b>X – 125,000</b>	<b>Z – 6,000</b>	<b>F 50</b>	<b>M 03</b>
<b>X – 125,000</b>	<b>Z + 40,000</b>	<b>F 500</b>	<b>M 03</b>
<b>X + 40,000</b>	<b>Y + 60,000</b>	<b>F 1000</b>	<b>M 00</b>

**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.

### 3.2.2- Ensaio do Peso dos Parâmetros

Será utilizada a abordagem de Análise de Regressão Múltipla para a determinação da influência de cada um dos parâmetros de corte estudados isoladamente assim como as suas correlações sobre a rugosidade da superfície usinada.

Para isto, será realizado um delineamento  $2^k$  fatorial do experimento, com duas replicações para cada combinação, que está descrito em (Montgomery, 2001). 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  $2^k$  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  $2^4$  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.

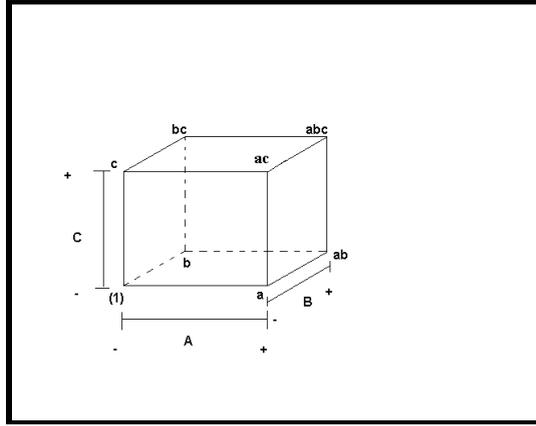
Os três fatores a serem estudados são os seguintes:

- Avanço (F) – **a** nas figuras;
- Velocidade de Corte ( $V_c$ ) – **b** nas figuras;
- Profundidade de Corte ( $A_p$ ) – **c** nas figuras.

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

Para este experimento, será usado um delineamento fatorial  $2^3$ , 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 3.2.2.1, com as oito combinações formando os seus cantos. Com este, é possível estimar 3 efeitos principais (F,  $V_c$ ,  $A_p$ ), três efeitos de interação de fatores dois a dois e um efeito da interação dos três fatores juntos.



**Figura 3.2.2.1 – Modelagem dos Experimentos**

Utilizando-se a figura 3.2.2.1, 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:

$$EfeitoF = \frac{1}{4n} \cdot [f + f.vc + f.ap + f.vc.ap - (1) - vc - ap - vc.ap] \quad (2)$$

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

$$EfeitoVc = \frac{1}{4n} \cdot [vc + f.vc + vc.ap + f.vc.ap - (1) - f - ap - f.ap] \quad (3)$$

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

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

$$EfeitoF - Vc = \frac{1}{4n} \cdot [f.vc.ap - vc.ap + f.vc - vc - f.ap + ap - f + (1)] \quad (5)$$

$$EfeitoF - Ap = \frac{1}{4n} \cdot [(1) - f + vc - f.vc - ap + f.ap - vc.ap + f.vc.ap] \quad (6)$$

$$EfeitoVc - Ap = \frac{1}{4n} \cdot [(1) + f - vc - f.vc - ap - f.ap + vc.ap + f.vc.ap] \quad (7)$$

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

$$EfeitoR - Vc - Ap = \frac{1}{4n} \cdot [f.vc.ap - vc.ap - f.ap + ap - f.vc + vc + f - (1)] \quad (8)$$

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 rugosidade da superfície usinada. 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 rugosidade da superfície usinada.

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 rugosidade medida através do rugosímetro citado no tópico Materiais e Métodos.

## 4- Resultados

### 4.1- Ensaio para Determinação dos Parâmetros Máximos e Mínimos

Seguindo metodologia descrita no item 3.2.1 deste trabalho, os ensaios foram realizados, sendo os resultados encontrados mostrados na tabela a seguir:

**Tabela 4.1.1 – Ensaio dos Máximos e Mínimos**

Ensaio	f (mm/min)	Rotação (RPM)	ap (mm)	Ra média ( $\mu\text{m}$ )
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 e ruídos excessivos no sistema, 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): máximo = 78 mm/min.  
Mínimo = 25 mm/min.
- Rotação do fuso (n): máx = 710 rpm.  
mín = 224 rpm.
- Profundidade de corte (ap): máximo = 6 mm.  
mínimo = 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.

#### 4.1.1 Justificativas:

Devido ao ocorrido no ensaio 8, e como os parâmetros  $f$  e RPM já haviam sido testados nestes valores para  $a_p = 6$  mm, pode-se concluir que  $a_p = 8$  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  $f_z$  constante. Assim, foi decidido que 78 mm/min 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/min 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 valores menores do que estes começariam a surgir forças devido ao “efeito de cunha”.

#### 4.2- Ensaio do Peso dos Parâmetros

Seguindo metodologia descrita no item 3.2.2 deste trabalho, foram utilizadas 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 ranhurado 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 4.2.1, sendo que o valor utilizado para a realização dos cálculos do Método de Regressão Linear Múltipla será a média entre estes três valores.

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

$$(1) = 1,11 + 1,07 = 2,18.$$

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

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

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

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

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

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

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

$$n = \text{Número de Replicações} = 2.$$

**Tabela 4.2.1 – Ensaio do Peso dos Parâmetros**

Ensaio	Fresa	Fatores	f (mm/min)	n (rpm)	a <sub>p</sub> (mm)	R <sub>a1</sub> (mm)	R <sub>a2</sub> (mm)	R <sub>a3</sub> (mm)	R <sub>a,m</sub> (mm)
1	1 (*)	(1)	25	224	1	1,12	1,16	1,04	<b>1,11</b>
2	2 (*)	c	25	224	6	1,52	1,20	1,32	<b>1,35</b>
3	3 (*)	b	25	710	1	0,78	1,26	0,74	<b>0,93</b>
4	4 (*)	bc	25	710	6	1,48	1,50	1,38	<b>1,45</b>
5	5 (*)	a	78	224	1	4,84	4,62	5,24	<b>4,90</b>
6	6 (*)	ac	78	224	6	2,96	2,48	2,28	<b>2,57</b>
7	7 (*)	ab	78	710	1	1,92	1,70	2,16	<b>1,93</b>
8	8 (*)	abc	78	710	6	1,64	1,64	1,64	<b>1,64</b>
9	8	(1)	25	224	1	1,14	1,04	1,02	<b>1,07</b>
10	7	c	25	224	6	1,10	1,48	1,30	<b>1,29</b>
11	6	b	25	710	1	1,14	1,18	1,28	<b>1,20</b>
12	5	bc	25	710	6	1,70	1,48	1,46	<b>1,55</b>
13	4	a	78	224	1	2,74	2,78	2,72	<b>2,75</b>
14	3	ac	78	224	6	2,74	2,56	3,02	<b>2,77</b>
15	2	ab	78	710	1	1,06	1,32	1,04	<b>1,14</b>
16	1	abc	78	710	6	2,52	2,86	2,70	<b>2,69</b>

*Obs 1: As fresas marcadas com (\*) são fresas novas.*

*Obs 2: a = f; b = n e c = a<sub>p</sub>.*

Assim:

$$\begin{aligned} \text{Efeito f} &= (1/4*n)*[a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] = \\ &= (1/4*2)*[7,65 + 3,07 + 5,34 + 4,33 - 2,18 - 2,13 - 2,64 - 3,00] = \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} &= (1/8)*(10,44) \gg \\ &\gg \text{Efeito f} = \mathbf{1,305}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Efeito RPM} &= (1/4*n)*[b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac]= \\ &= (1/4*2)*[2,13 + 3,07 + 3,00 + 4,33 - 2,18 - 7,65 - 2,64 - 5,34] = \\ &= (1/8)*(-5,28) \gg \\ &\gg \text{Efeito n} = \mathbf{-0,66}. \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Efeito ap} &= (1/4*n)*[c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] = \\ &= (1/4*2)*[2,64 + 5,34 + 3,00 + 4,33 - 2,18 - 7,65 - 2,13 - 3,07] = \ \\ &= (1/8)*(0,28) \gg \\ &\gg \text{Efeito ap} = \mathbf{0,035}. \end{aligned}$$

#### 4.3 - Equação que relaciona a rugosidade e os parâmetros de corte

A partir dos efeitos encontrados para cada um dos parâmetros de corte, pode-se determinar a equação que relaciona a rugosidade da superfície usinada e os parâmetros de corte da seguinte forma:

$$R_a = a*n + b*f + c*ap + E \quad (9)$$

Os parâmetros a, b e c correspondem aos coeficientes que definem a influência de cada um dos parâmetros, e são determinados como a metade da influência do respectivo parâmetro. Assim:

$$a = (\text{Efeito } n) / 2 \quad (10)$$

$$b = (\text{Efeito } f) / 2 \quad (11)$$

$$c = (\text{Efeito } ap) / 2 \quad (12)$$

A variável E corresponde ao erro aleatório devido ao método de regressão linear múltipla empregado para a obtenção dos efeitos dos parâmetros.

O método utilizado para a obtenção do erro aleatório foi o de comparar o resultado fornecido pela equação sem este erro com os dados experimentais obtidos nos ensaios. Este procedimento foi repetido para todos os 16 ensaios realizados, e foi obtida uma média aritmética dos valores de erro, resultando num erro aleatório igual a **1,86 mm**.

Calculando os coeficientes da equação:

$$a = \text{Efeito } n / 2 = -0,66 / 2 \gg$$

$$\gg \mathbf{a = -0,33}$$

$$b = \text{Efeito } f / 2 = 1,305 / 2 \gg$$

$$\gg \mathbf{b = 0,6525}$$

$$c = \text{Efeito } ap / 2 = 0,035 / 2 \gg$$

$$\gg \mathbf{c = 0,0175}$$

E a equação se torna:

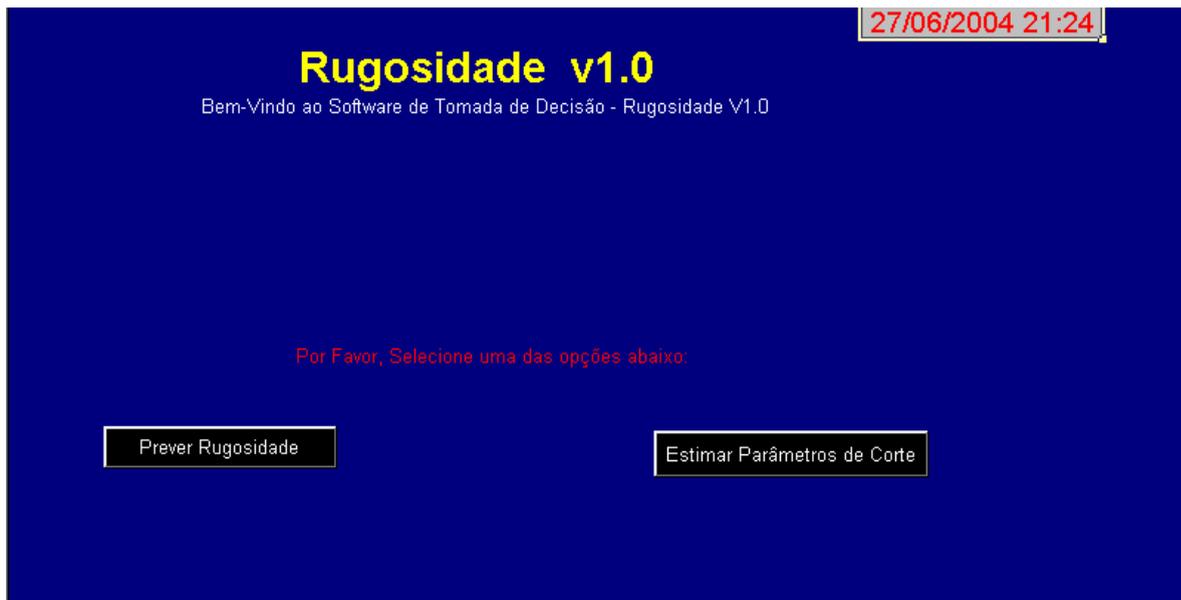
$$R_a = 1,86 - 0,33*n + 0,6525*f + 0,0175*ap \quad (13)$$

#### 5- Software de Auxílio à Tomada de Decisão

Utilizando a equação encontrada através do Método de Regressão Linear Múltipla, foi desenvolvido um software que tem como objetivo auxiliar o operador da máquina em chão de fábrica ou até mesmo o projetista ao desenvolver um novo produto.

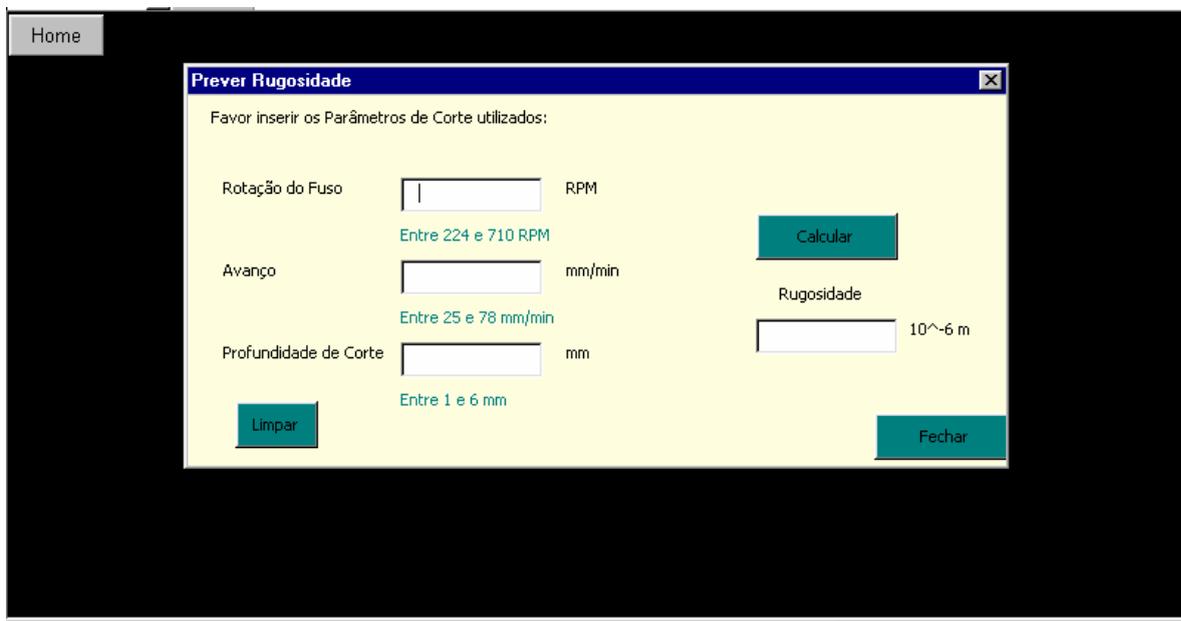
Este software foi desenvolvido em linguagem VBA, com base em um arquivo do Microsoft Excel.

Basicamente, o software permite ao usuário realizar duas ações diferentes: uma, é prever a rugosidade da superfície usinada, informando ao programa os parâmetros de corte utilizados. A outra, é estimar os parâmetros de corte ideais para um processo de usinagem, informando ao programa dados sobre o processo tais como tipo de material da peça e rugosidade superficial esperada.



**Figura 5.1 - Tela inicial do Software**

O módulo de prever rugosidade superficial funciona como uma aplicação direta da equação que relaciona a rugosidade superficial e os parâmetros de corte.

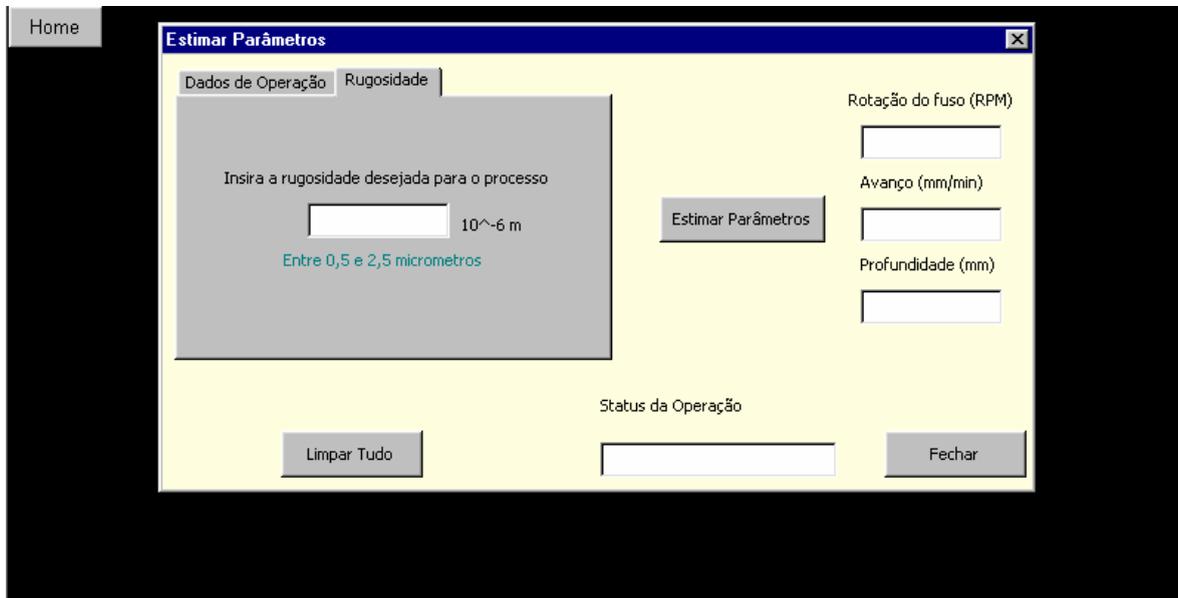


**Figura 5.2 - Módulo de Prever Rugosidade**

Porém, para que os parâmetros de corte possam ser inseridos na equação, estes devem passar por um processo de linearização. Este processo se faz necessário devido ao resultado que o Método de Regressão Linear Múltipla fornece.

Como neste método trabalha-se com níveis altos (+1) e níveis baixos (-1) dos parâmetros, qualquer valor entre estes dois níveis deve ser linearizado no intervalo de -1 até +1. Assim, funções para linearizar os parâmetros inseridos pelo usuário do software foram implementadas.

Já o módulo de estimar os parâmetros de corte, possui algumas regras além da própria equação. O usuário deve inserir os seguintes parâmetros: Tipo de operação (que pode ser desbaste ou acabamento), Tipo de Material da peça (que pode ser de fácil ou difícil usinagem) e rugosidade superficial esperada para o processo.



**Figura 5.3 - Módulo de Estimar Parâmetros**

Assim, para todas as combinações possíveis de informações de tipo de operação e tipo de material (4 combinações possíveis), foram definidos valores de rotação do fuso e de profundidade de corte. Por exemplo, se a operação for de desbaste e o material da peça for de difícil usinagem, a rotação do fuso é determinada como 300 rpm e a profundidade de corte como 3 mm. Já se a operação for de acabamento e o material de fácil usinagem, a rotação do fuso é determinada como 700 rpm e a profundidade de corte como 1 mm.

A partir da rotação do fuso e da profundidade de corte obtidas desta maneira, além da rugosidade da superfície desejada informada pelo usuário, estes dados são inseridos na equação e o avanço é calculado.

Caso não seja possível encontrar um valor de avanço para uma certa combinação de rotação do fuso, profundidade de corte e rugosidade superficial, o software exibe uma mensagem informando que é impossível realizar uma operação com tais parâmetros.

## 6- Métodos de Otimização Aplicados a Processos de Usinagem

Para o problema exposto, temos que a relação entre a rugosidade da superfície usinada e os parâmetros de corte pode ser expressa pela seguinte equação (função objetivo):

$$Ra = -0,33*n + 0,6525*f + 0,0175*ap + 1,86 \quad (14)$$

Sendo:

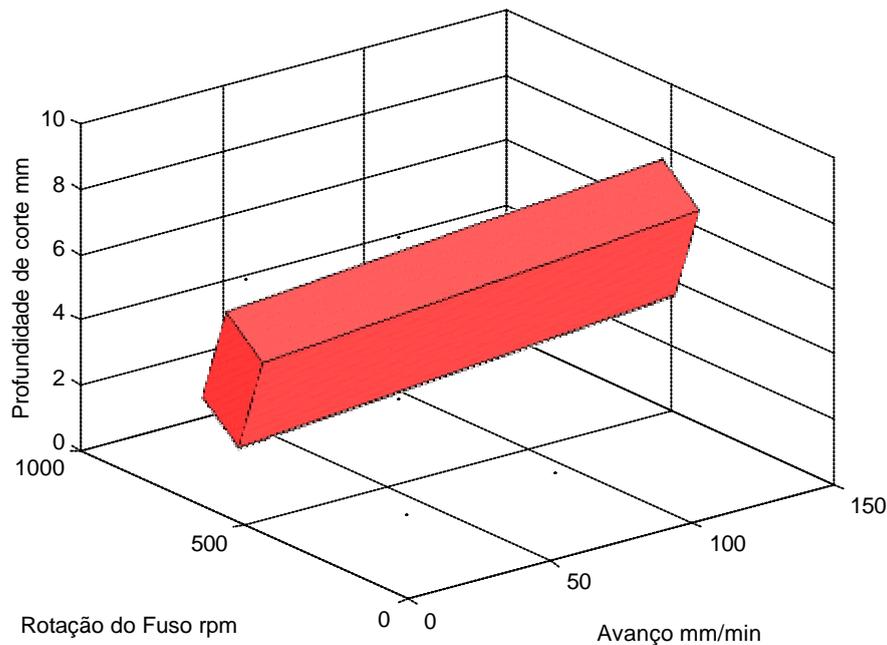
n = Rotação do Fuso (rpm)

f = Avanço (mm/min)

ap = Profundidade do Corte (mm)

As restrições aplicadas ao modelo são os limites máximo e mínimo para os quais a função objetivo é válida. São elas:

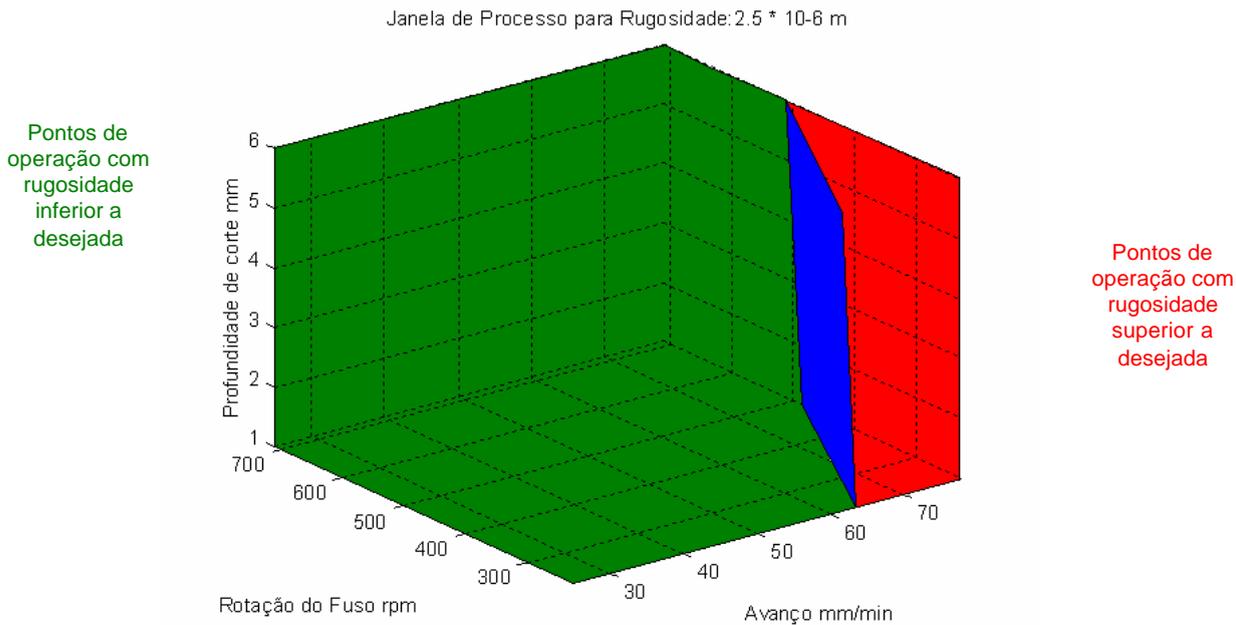
$$\begin{array}{l} 224 < n < 710 \text{ (rpm)} \\ 25 < f < 78 \text{ (mm/min)} \\ 1 < ap < 6 \text{ (mm)} \end{array}$$



**Figura 6.1 - Região viável cúbica, contínua e convexa, definida pelas restrições.**

- Considerando que a região viável e a função objetivo são contínuas, optou-se por utilizar um método de otimização heurístico. Que pode ser facilmente implementado com os poucos resultados experimentais disponíveis.
- Um método meta heurístico, como o de redes neurais, exigiriam um maior número de resultados experimentais para “treinar” a rede.
- Optou-se pela utilização do Método dos Gradientes Reduzidos, de robustez comprovada que permite ainda resolver o problema não linear (mais geral) proposto.
- Para a implementação da ferramenta optou-se pelo ambiente Excel, cujos *solvers* já implantados permitem que se economize tempo além da praticidade dos recursos por ele oferecidos.
- A visualização dos resultados ficou a cargo do *MatLab*, indispensável em sua visualização 3D.

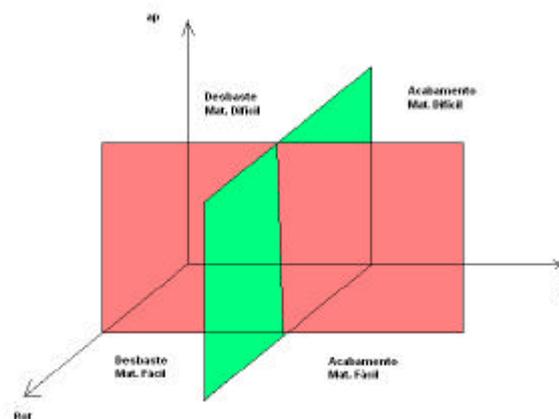
Como resposta da ferramenta implementada, obteve-se o seguinte resultado, para uma rugosidade desejada de 2,5 micrômetros, que pode ser utilizado para auxílio à tomada de decisão em chão-de-fábrica:



**Figura 6.2 – Janelas de Processo para uma determinada rugosidade.**

Para que se possa escolher um ponto coerente com o tipo de operação que está sendo realizada, foram criadas as “Janelas de Processo”, nas quais se definem as regiões do gráfico nas quais as características da operação que está sendo realizada são mais evidentes.

Foram determinadas quatro janelas, que resultaram da combinação de dois fatores: tipo de material da peça a ser usinada (fácil ou difícil usinagem) e tipo de operação (desbaste ou acabamento). O gráfico das janelas de processo pode ser visto na figura a seguir:



**Figura 6.3 – Janelas de Processo**

Com a sobreposição do resultado do método de otimização e as janelas de processo é possível encontrar uma região “ótima” para a determinação dos parâmetros de corte.

## 7- Discussões

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

Efeito f-RPM =

$$\begin{aligned} &= (1/4*n)*[abc - bc + ab - b - ac + c - a + (1)] = \\ &= (1/4*2)*[4,33 - 3,00 + 3,07 - 2,13 - 5,34 + 2,64 - 7,65 + 2,18] = \\ &= (1/8)*(-5,9) >> \\ &>> \textbf{Efeito f-RPM = -0,7375.} \end{aligned}$$

Efeito f-ap =

$$\begin{aligned} &= (1/4*n)*[(1) - a + b - ab - c + ac - bc + abc] = \\ &= (1/4*2)*[2,18 - 7,65 + 2,13 - 3,07 - 2,64 + 5,34 - 3,00 + 4,33] = \\ &= (1/8)*(-2,38) >> \\ &>> \textbf{Efeito f-ap = -0,2975.} \end{aligned}$$

Efeito RPM-ap =

$$\begin{aligned} &= (1/4*n)*[(1) + a - b - ab - c - ac + bc + abc] = \\ &= (1/4*2)*[2,18 + 7,65 - 2,13 - 3,07 - 2,64 - 5,34 + 3,00 + 4,33] = \\ &= (1/8)*(3,98) >> \\ &>> \textbf{Efeito RPM-ap = 0,4975.} \end{aligned}$$

Efeito f-RPM-ap =

$$\begin{aligned} &= (1/4*n)*[abc - bc - ac + c - ab + b + a - (1)] = \\ &= (1/4*2)*[4,33 - 3,00 - 5,34 + 2,64 - 3,07 + 2,13 + 7,65 - 2,18] = \\ &= (1/8)*(3,16) >> \\ &>> \textbf{Efeito f-RPM-ap = 0,395.} \end{aligned}$$

Pelos valores encontrados para os efeitos de segunda e terceira ordem, pode-se afirmar que estes não são desprezíveis quando comparados com os de primeira ordem.

Porém, não é o escopo deste trabalho analisar tais efeitos.

## 8- Conclusões

Os resultados encontrados para o peso de cada parâmetro de corte são coerentes com os encontrados na literatura sobre o assunto (**Diniz, 1999**). 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 ferramenta de auxílio à tomada de decisão foi desenvolvida e fornece resultados muito úteis na determinação dos parâmetros de corte a serem utilizados. A parte da ferramenta implementada com métodos de otimização, exige uma análise mais refinada por parte do usuário, porém, seus resultados são melhores, uma vez que são maleáveis a ponto de poder incorporar a experiência do usuário.

## 9- Referências Bibliográficas

- (Altintas, Yellowey e Tlusty, 1988) – ALTINTAS, Y., YELLOWLEY, I. e TLUSTY, J. – **The Detection of Tool Breakage in Milling Operations**, J. Engineering for Industry, 110, 271-277, 1988.
- (Diniz, 1999) - DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. - **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**, MM editora, São Paulo, Brasil, 1999.
- (Da Cunha, 2000) - DA CUNHA, V.L.C. - **Monitoramento de Desgaste em Fresas de Topo Através da Medição do Torque**, Exame de Qualificação de Mestrado, Escola Politécnica da USP, São Paulo, Brasil, 2000.
- (Dos Santos, 1998) - DOS SANTOS, .M. T. - **Estudo do Monitoramento do Desgaste de Fresas de Topo Baseado no Emprego de Sensores**, Tese de Doutorado, EPUSP, São Paulo, Brasil, 1998.
- (Dos Santos, 2001) – DOS SANTOS, A. L. B.; MILAN, J. C. G.; DA SILVA, M. B.; SANTOS, S. C.; JR., S. S. C. – **“Diferentes Metodologias Ajudam a Determinar a Equação de Taylor Expandida”** – 1º COBEF, Curitiba, 2001.
- (Dos Santos, Milan, Da Silva, Santos, Cunha Jr., 2001) – DOS SANTOS, A. L. B.; MILAN, J. C. G.; DA SILVA, M. B.; SANTOS, S. C.; CUNHA JR., S. S. – **Comparação das Técnicas de Análise Dimensional, Otimização de Ensaios e Redes Neurais para Determinação da Equação de Taylor Expandida no Processo de Fresamento de Topo**, 1º COBEF, 2001.
- (Halevi 1995) – HALEVI, G., WEILL, R. D. – **Principles of Process Planning – A logical approach**, Chapman & Hall, 1995.
- (Huang, 1999) – HUANG, P. T., CHEN, J. C. & CHOU, C. – Y. – **“A statical approach in detecting tool breakage in end milling operations”** - J. of Industrial Technology, v.15, n.3, maio-junho 1999, pp.1-7.
- (Jennrich, 1995) – JENRICH, R. I. – **“An Introduction to Computational Statistics – Regression Analysis”** - Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall, 1995.
- (Ko, Cho e Jung, 1994) – KO, T. J.; CHO, D. W. e JUNG, M. Y. – **On line Monitoring of Tool Breakage in Face Milling using a Self Organized Neural Network**. Manufacturing Systems, 14, 2, 80-90, 1994.
- (Lan e Naertheim, 1986) – LAN, M. e NAERHEIM, Y. - **In-process Detection of Tool Breakage in Milling**, Engineering for Industry, 108, 191-197, 1986.
- (Machining Data Handbook, 1980) – MACHINABILITY DATA CENTER, Volume 1, third edition, 1980.
- (Montgomery, 2001) - MONTGOMERY, D. C - **“Introduction to Statistical Quality Control”** , New York : Wiley, Fourth Edition, p. 572-615, c 2001.
- (Príncipe e Yoon, 1991) – PRÍNCIPE, J. C., YOON, T. – **A new Algorithm for the detection of tool breakage in Milling**, Machine Tools Manufacturing, 31, 4, 443-454, 1991.
- (Roberto e Alexandre, 2002) – SAITO, A. M.; TANAKA, R. Y. – **Modelagem das Forças para a Aplicação m Monitoramento do Desgaste da Ferramenta em Fresamento de Topo** – Trabalho de Formatura – EPUSP, São Paulo, 2002.

- (Sarhan, 2001)** - SARHAN, A.; SAYED, R.; NASSR, A. A.; EL-ZAHRY, R. M. – **Interrelationships between cutting force variation and tool wear in end-milling** – Journal of Materials Processing Technology, number 109, 2001
- (Stemmer, 1989)** – STEMMER, C. E. – **Ferramentas de Corte**, Editora da UFSC, Florianópolis, Brasil, 2001.
- (Tansel e McLaughing, 1993)** – TANSEL, I. N. e MC LAUGHIN, C. - **Detection of Tool Breakage in Milling Operations – I e II**. Machine Tools Manufacturing 33 (4), 531-558, 1993.
- (Westkämper, 1996)** – WESTKÄMPER, E.; LANGE, D.; SCHIMIDT, T. – **“Modeling the Grinding Process with Regression Models and Artificial Neural Networks”** – Technical University of Braunschweig, Institute for Machine Tools and Production Engineering, 1996.
- [ISO8688-2]** - INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Tool life testing in milling – part 2: End milling** – ISO 8688-2. Genève, 1989