

# RELAÇÃO ENTRE OS PARÂMETROS DE CORTE E A RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA NUMA OPERAÇÃO DE FRESAMENTO DE TOPO

**Guilherme Cruz Rossi**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – [guilherme.rossi@poli.usp.br](mailto:guilherme.rossi@poli.usp.br)

**Gilmar Ferreira Batalha**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – [gilmar.batalha@poli.usp.br](mailto:gilmar.batalha@poli.usp.br)

**Alexandre de Albuquerque Kanenobu**

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – [alexandre.kanenobu@poli.usp.br](mailto:alexandre.kanenobu@poli.usp.br)

**Resumo.** O objetivo deste trabalho é encontrar as relações existentes entre os parâmetros de corte e a rugosidade da superfície usinada numa operação de fresamento de topo. Para tanto, foram realizados experimentos nos quais os parâmetros estudados neste trabalho (rotação do fuso, avanço e profundidade de corte) foram variados, sendo que a rugosidade da superfície usinada foi medida para cada um dos casos. Para interpretar os resultados, foi utilizado o Método da Regressão Linear Múltipla, através do qual foi possível encontrar a equação que rege o comportamento da rugosidade superficial em função dos parâmetros de corte aqui estudados. Verificou-se que o parâmetro de corte que mais influencia a rugosidade superficial é o avanço, seguido pela rotação do fuso (inversamente proporcional) e por fim a profundidade de corte.

**Palavras-chave:** Fresamento, Rugosidade, Métodos de Regressão, Parâmetros de Corte.

## 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**<sup>(1)</sup>.

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.

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.

Para a realização dos ensaios, é 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. Foram realizadas operações de fresamento e retífica, para garantir o paralelismo entre os lados opostos dos corpos-de-prova.

## 2. 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. Não será considerada a influência do desgaste neste modelo, e para isso foram utilizadas fresas novas em cada ensaio.

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).

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**<sup>(2)</sup>, o  $f_z$  ótimo para fresas de topo de 16 mm de diâmetro com 2 dentes 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  $\mu$ m, segundo **Halevi**<sup>(3)</sup>.

### 3. ENSAIO DO PESO DOS PARÂMETROS

Foi utilizada a abordagem de Análise de Regressão Múltipla para a determinação da influência de cada um dos parâmetros de corte estudados sobre a rugosidade da superfície usinada. Para isto, foi realizado um delineamento 2k fatorial do experimento, com duas replicações para cada combinação, que está descrito em **Montgomery**<sup>(4)</sup>.

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. 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** na Tabela 2;
- Velocidade de Corte ( $V_c$ ) – **b** na Tabela 2;
- Profundidade de Corte ( $A_p$ ) – **c** na Tabela 2.

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<sup>3</sup>, que possui 8 combinações possíveis de níveis de fatores. Porém, serão feitas duas replicações para cada combinação, resultando em um total de 16 ensaios. O efeito principal F pode ser estimado somando-se os valores obtidos das quatro combinações onde F está no nível mais alto, subtraindo deste total a soma dos valores obtidos das quatro combinações onde F está no nível mais baixo, e dividindo-se este total por 4 x n, onde n = 2 replicações. Isto resulta em:

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

Da mesma maneira, os outros efeitos principais podem ser estimados, resultando em:

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

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

Os efeitos das interações dos fatores dois a dois e dos três fatores simultaneamente foram desprezados.

## 4. RESULTADOS

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

Seguindo metodologia descrita anteriormente neste trabalho, os ensaios foram realizados, sendo os resultados encontrados mostrados na tabela a seguir:

Tabela 1 – Ensaio dos Máximos e Mínimos

Ensaio	f (mm/min)	Rotação (RPM)	ap (mm)	Ra média ( μm)
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

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 (RPM): máximo = 710 rpm.  
mínimo = 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.

### 4.2. Ensaio do Peso dos Parâmetros

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

Para cada combinação de parâmetros de corte, a rugosidade da superfície usinada foi medida três vezes, conforme a (Tabela 2), sendo que o valor utilizado para a realização dos cálculos do Método de Regressão Linear Múltipla será a média entre estes três valores.

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 2 – Ensaio do Peso dos Parâmetros

Ensaio	Fresa	Fatores	f (mm/min)	n (rpm)	ap (mm)	Ra1 ( $\mu\text{m}$ )	Ra2 ( $\mu\text{m}$ )	Ra3 ( $\mu\text{m}$ )	Ram ( $\mu\text{m}$ )
1	1	(1)	25	224	1	1,12	1,16	1,04	1,11
2	2	c	25	224	6	1,52	1,20	1,32	1,35
3	3	b	25	710	1	0,78	1,26	0,74	0,93
4	4	bc	25	710	6	1,48	1,50	1,38	1,45
5	5	a	78	224	1	4,84	4,62	5,24	4,90
6	6	ac	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	(1)	25	224	1	1,14	1,04	1,02	1,07
10	7	c	25	224	6	1,10	1,48	1,30	1,29
11	6	b	25	710	1	1,14	1,18	1,28	1,20
12	5	bc	25	710	6	1,70	1,48	1,46	1,55
13	4	a	78	224	1	2,74	2,78	2,72	2,75
14	3	ac	78	224	6	2,74	2,56	3,02	2,77
15	2	ab	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

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

Assim:

Efeito f =  $(1/4*n)*[a + ab + ac + abc - (1) - b - c - bc] = \mathbf{1,305}$

Efeito RPM =  $(1/4*n)*[b + ab + bc + abc - (1) - a - c - ac] = \mathbf{-0,66}$

Efeito ap =  $(1/4*n)*[c + ac + bc + abc - (1) - a - b - ab] = \mathbf{0,035}$

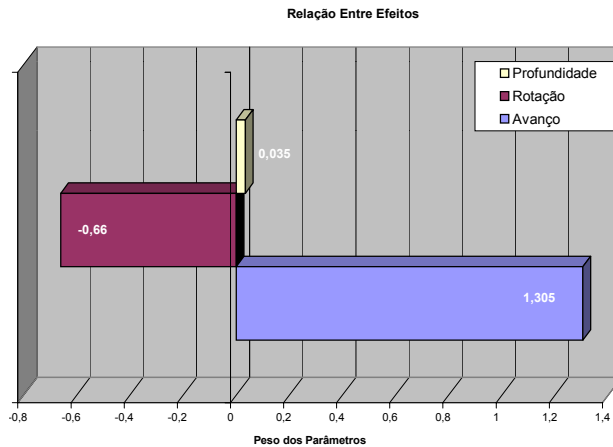


Figura 1 – Relação entre os efeitos dos parâmetros

### 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:

$$Ra = a*rot + b*f + c*ap + E \quad (9)$$

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:

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

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

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

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 micrometros**.

Calculando os coeficientes da equação:

$$a = \text{Efeito rot} / 2 = -0,66 / 2 = -0,33$$

$$b = \text{Efeito f} / 2 = 1,305 / 2 = 0,6525$$

$$c = \text{Efeito ap} / 2 = 0,035 / 2 = 0,0175$$

E a equação se torna:

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

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados encontrados para o peso de cada parâmetro de corte são coerentes com os encontrados na literatura sobre o assunto **Diniz<sup>(5)</sup>**. 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.

Pode-se concluir também que o método da Regressão Linear Múltipla, embora tenha caráter exclusivamente estatístico, pode ser utilizado para os casos em que o comportamento do processo é contínuo e monotônico, e que nestes casos os resultados apresentados representam com fidelidade suficiente o processo real.

## 6. REFERÊNCIAS

- 1 - JENRICH, R. I. – “An Introduction to Computational Statistics – Regression Analysis” - Englewood Cliffs, NJ. Prentice Hall, 1995.
- 2 - 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”, New York : Wiley, Fourth Edition, p. 572-615, c 2001.
- 5 - DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. - Tecnologia da Usinagem dos Materiais, MM editora, São Paulo, Brasil, 1999.

## RELATIONSHIP BETWEEN THE CUTTING PARAMETERS AND THE ROUGHNESS OF THE MACHINED SURFACE ON AN END MILLING OPERATION

**Guilherme Cruz Rossi**

Polytechnic School of São Paulo University – [guilherme.rossi@poli.usp.br](mailto:guilherme.rossi@poli.usp.br)

**Gilmar Ferreira Batalha**

Polytechnic School of São Paulo University – [gilmar.batalha@poli.usp.br](mailto:gilmar.batalha@poli.usp.br)

**Alexandre de Albuquerque Kanenobu**

Polytechnic School of São Paulo University – [alexandre.kanenobu@poli.usp.br](mailto:alexandre.kanenobu@poli.usp.br)

***Abstract.** The purpose of this paper is to find the relations between the cutting parameters and the roughness of the machined surface on an end milling operation. To do this, it were made several experiments. On these experiments, the focus parameters of this study (spindle speed, feed and cut depth) were varied, being the surface roughness measured for each case. To analyze the results, it was used the Multiple Linear Regression Method, that made it possible to estimate the equation that predicts the surface roughness depending on the cutting parameters. The results show that the most expressive parameter to the surface roughness is the feed, followed by the spindle speed (with a negative contribution) and so by the cut depth.*

***Keywords:** End Milling, Roughness, Regression Methods, Cutting Parameters.*