

MODELO NUMÉRICO EXPERIMENTAL DA RUGOSIDADE NO FRESAMENTO FRONTAL DE ACABAMENTO DO AÇO AISI 4140 ENDURECIDO

**Sérgio L. R. Almeida^{1,2*}, Marco Stipkovic Filho¹, Marco Antônio Stipkovic^{2,3}, Éd
Cláudio Bordinassi^{2,3} e Sérgio Delijaicov³**

1: Escola de Engenharia
Universidade Presbiteriana Mackenzie
Rua da Consolação, 930, 01302-090, São Paulo, SP, Brasil
e-mail: slrabelo@terra.com.br, web: <http://www.mackenzie.br>

2: Centro Universitário
Instituto Maua de Tecnologia
Praça Mauá, 01-09580.900, São Caetano do Sul, SP, Brasil
e-mail: marco.stipkovic@schuler.com web: <http://www.maua.br>

3: Centro Universitário
Faculdade de Engenharia Industrial
Av. Humberto de Alencar Castelo Branco, 3972 – 09850.901, São Bernardo do Campo, SP, Brasil
e-mail: sergiode@fei.edu.br web: <http://www.fei.br>

Palavras-chave: Fresamento de Acabamento, Métodos Numéricos, Rugosidade, Aços Endurecidos

Resumo. *Este trabalho se fundamentou na determinação de um modelo numérico experimental para fresamento de acabamento de um aço endurecido, AISI 4140 temperado e revenido com dureza de 58 HRC, realizada com a utilização de pastilhas de CBN (nitreto cúbico de boro), obtida através da variação de três parâmetros básicos de corte (velocidade de corte, avanço e profundidade de corte). O planejamento experimental adotado foi o composto central, muito utilizado em ensaios relacionados a experimentos de usinagem. Os resultados obtidos foram tratados estatisticamente pelo software "Statistica", possibilitando a geração de uma equação matemática que visa a obtenção de um determinado valor de rugosidade em função da otimização dos três parâmetros de corte adotados. As rugosidades encontradas, na faixa de R_a 0,16 a 0,4 μm , indicam claramente que é possível substituir o processo de retificação pelo de fresamento de acabamento com ferramentas de CBN, diminuindo assim o tempo de usinagem e consequentemente o custo da peça usinada. O parâmetro de corte de maior influência na caracterização da rugosidade no processo de fresamento de acabamento foi o avanço de corte.*

1. INTRODUÇÃO

A rugosidade pode ser definida com o conjunto de erros microgeométricos, caracterizado pela presença de saliências e reentrâncias na superfície de um componente. Especificamente no processo de usinagem, a rugosidade é causada pelas impressões deixadas pela ferramenta e pode ser quantificada com uso de aparelhos de medição, chamados de rugosímetros.

A rugosidade exerce papel fundamental na funcionalidade e desempenho do componente gerado pelo processo de usinagem visto que influencia na vida do componente, devido a minimização do tamanho de trincas superficiais que possam se propagar à fadiga; na redução do atrito em movimento de mancais; na melhoria da resistência à corrosão e no aumento da capacidade de vedação de sistemas [1].

Tendo em vista a busca constante em reduzir os custos de fabricação de componentes mecânicos no segmento de máquinas e equipamentos, há uma tendência cada vez maior em substituir o processo de retificação de aços endurecidos na faixa de 45 a 65 HRC, pelos processos de torneamento e de fresamento com ferramentas de nitreto cúbico de boro CBN, que permitem trabalhos com maiores velocidades de corte e altas taxas de remoção de material [2], porém torna-se necessária uma avaliação criteriosa da rugosidade gerada por estes processos.

Este trabalho tem por objetivo o desenvolvimento de um modelo numérico capaz de prever o valor da rugosidade na usinagem de aço AISI 4140 endurecido em função dos principais parâmetros de corte e assim poder auxiliar o processista na correta seleção destes parâmetros.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

O material utilizado foi o AISI 4140 forjado, temperado e revenido com dureza de 58 ± 2 HRC e profundidade de 3 ± 1 mm, com a seguinte composição química atestada através de ensaio realizado: C-0,413; Mn 0,842; Si 0,241; P-0,013; S-0,012; Cr-0,904; Ni-0,045; Mo-0,181; Al-0,030; Cu-0,063; Ti-0,002; V-0,004.

Os corpos de prova utilizados tinham geometria retangular medindo 140x110x20 mm (figura 1) com 2 furos nas extremidades para fixação com parafuso de cabeça cilíndrica com sextavado interno embutido. Antes de cada ensaio o corpo de prova passou por um passe de desbaste para evitar desalinhamento e alteração nos parâmetros do ensaio.

A ferramenta utilizada foi um cabeçote fresador com $\varnothing 63$ mm dotado de 5 arestas, com trajetória retilínea através do centro da peça e com todo o diâmetro em contato. O código do inserto de CBN utilizado foi R245 12T3 E CB50.

A fresadora utilizada é mostrada na figura 2, fabricada pela Sanches Blanes modelo FU-1, cone ISO 40, com rotação máxima de 6000 rpm e $V_{fmax}=1500$ mm/min., possui boa rigidez frente aos parâmetros de corte utilizados,



Figura 1. Corpo de prova em operação de acabamento.



Figura 2. Fresadora vertical convencional Sanches Blanes, modelo FU-1 (cone ISO 40).

Foi feito um planejamento experimental de delineamento central composto (DCC) com 6 réplicas no ponto central, que gerou os ensaios conforme Tabela 1.

Ensaio	V_c [m/min]	f_z [mm/rev]	a_p [mm]
1	150	0,05	0,1
2	150	0,05	0,2
3	150	0,15	0,1
4	150	0,15	0,2
5	300	0,05	0,1
6	300	0,05	0,2
7	300	0,15	0,1
8	300	0,15	0,2
9	98,9	0,1	0,15
10	351,1	0,1	0,15
11	225	0,016	0,15
12	225	0,187	0,15
13	225	0,1	0,07
14	225	0,1	0,23
15©	225	0,1	0,15
16©	225	0,1	0,15
17©	225	0,1	0,15
18©	225	0,1	0,15
19©	225	0,1	0,15
20©	225	0,1	0,15

Tabela 1. Parâmetros de corte e planejamento experimental

Para a análise da rugosidade, utilizou-se um rugosímetro portátil Mitutoyo de modelo SJ-301 (figura 3), ajustado para um cut-off de 0,8 mm, em função da rugosidade esperada, no sentido de corte da ferramenta. Para cada superfície medida, a rugosidade adotada foi uma média aritmética estabelecida por três leituras consecutivas.



Figura 3. Rugosímetro Mitutoyo SJ-301 utilizado para medição da rugosidade dos ensaios de acabamento.

3. RESULTADOS

Os valores obtidos para rugosidade, que se encontram na tabela 2 representam a média de três medições realizadas na região central de cada corpo de prova, no sentido paralelo ao de avanço adotado no processo de usinagem.

3.1. Análise de Influência dos Parâmetros

Os dados foram analisados pelo software estatístico STATISTICA com um nível de confiança de 95%. No caso da rugosidade, os fatores de correlação R^2 foi de 0,81 e o R^2_{aj} de 0,64.

PARÂMETROS DE CORTE - FRESAMENTO DE ACABAMENTO (AISI 4140, ENDURECIDO)				
Exp.	Velocidade de corte	Avanço	Profundidade Penetração	Rugosidade
	V_c (m/min)	f_z (mm/rev)	a_p (mm)	R_a (μ m)
1	150	0,050	0,10	0,18
2	150	0,050	0,20	0,19
3	150	0,150	0,10	0,22
4	150	0,150	0,20	0,41
5	300	0,050	0,10	0,19
6	300	0,050	0,20	0,25
7	300	0,150	0,10	0,25
8	300	0,150	0,20	0,29
9	99	0,100	0,15	0,30
10	351	0,100	0,15	0,19
11	225	0,016	0,15	0,16
12	225	0,184	0,15	0,30
13	225	0,100	0,07	0,20
14	225	0,100	0,23	0,25
15©	225	0,100	0,15	0,21
16©	225	0,100	0,15	0,24
17©	225	0,100	0,15	0,25
18©	225	0,100	0,15	0,23
19©	225	0,100	0,15	0,22
20©	225	0,100	0,15	0,23

Tabela 2: Resultados obtidos para a rugosidade.

Os valores de rugosidade encontrados para os diversos ensaios, revelaram uma rugosidade apropriada para processos de usinagem de acabamento, variando de R_a 0,16 até 0,41 μ m. A figura 4, indica através do diagrama de Pareto, que a rugosidade foi influenciada por dois dos

três parâmetros de corte estudados, o avanço por dente f_z com maior representatividade e a profundidade de penetração a_p .

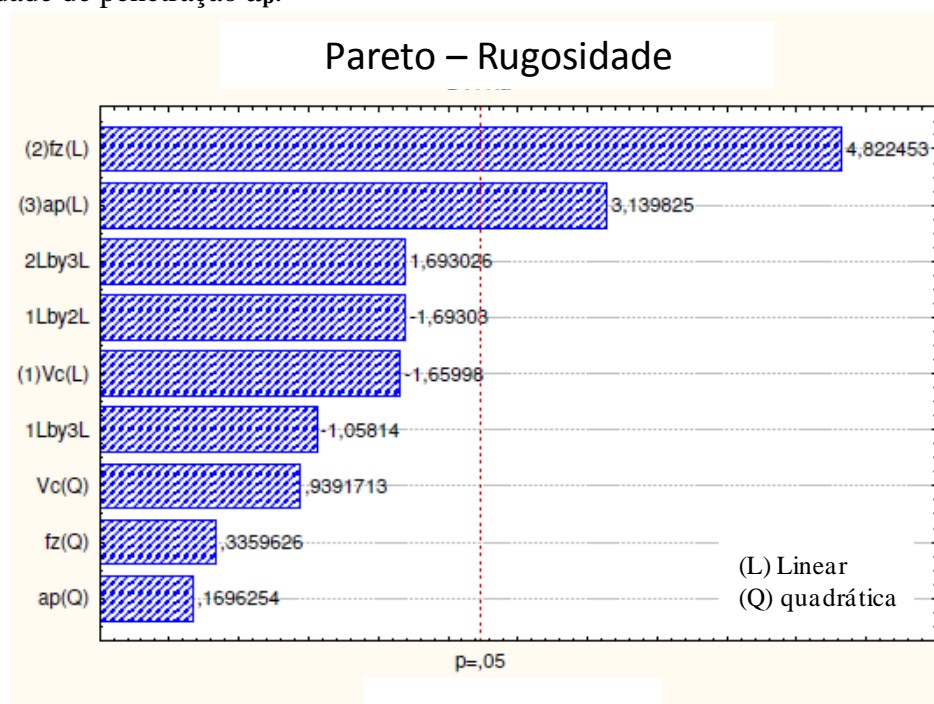


Figura 4. Pareto da influência dos parâmetros de corte na rugosidade.

A influência do avanço na rugosidade ficou evidenciada através dos gráficos, conforme figuras 5 e 6, que mostram o comportamento do avanço em função da velocidade de corte ($f_z \times V_c$), e do avanço em função da profundidade de penetração ($f_z \times a_p$), onde é nítida a relação direta e crescente entre avanço e rugosidade, ou seja, baixas rugosidades são obtidas com avanços pequenos e altas rugosidades com grandes avanços.

A constatação de que avanços maiores prejudicam o acabamento superficial da peça, estão alinhados com o próprio processo de usinagem por fresamento, pois grandes avanços se combinados com ferramentas de pequena área de contato, podem propiciar a geração de ondulações na superfície da peça, piorando a sua rugosidade.

Sobre o comportamento da profundidade de penetração na piora da rugosidade, em função direta da adoção de profundidades de penetração maiores, relaciona-se aos altos esforços de corte passivos gerados durante o processo de fresamento, que se aplicados em máquinas ferramenta e ou peças de baixa rigidez, ou até mesmo, em peças de difícil fixação à mesa da máquina, provocaram vibrações prejudiciais a rugosidade da superfície usinada.

Fazendo uma analogia com o processo de torneamento duro, [3] cita a importância de usar componentes endurecidos em máquinas de alta rigidez, de potência suficiente para manter as velocidades de corte e avanço constantes para garantir um bom acabamento superficial.

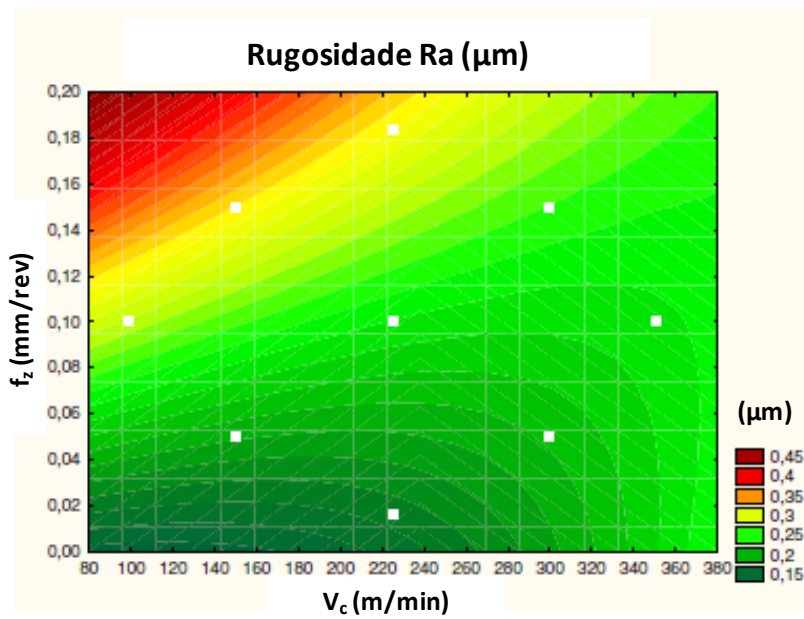


Figura 5. Gráfico ($f_z \times V_c$) para a rugosidade adotando a_p de 0,15 mm.

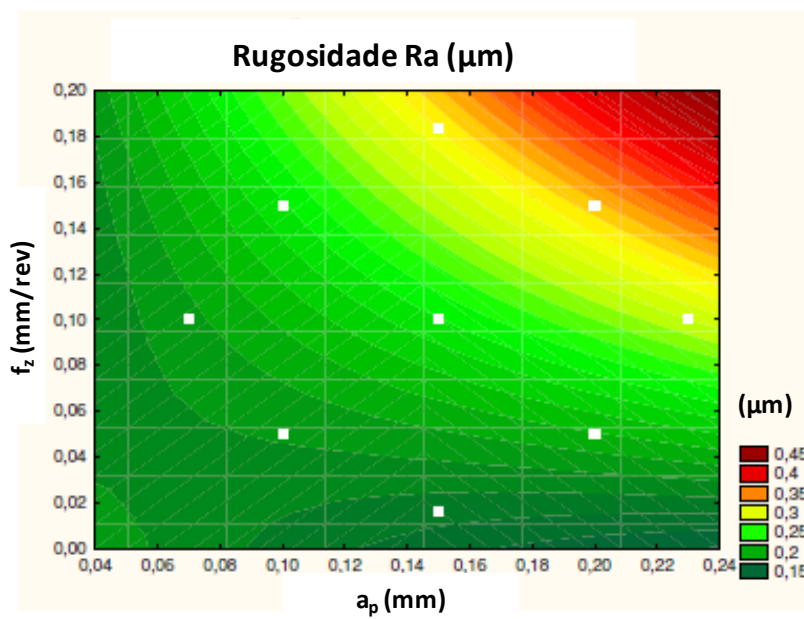


Figura 6. Gráfico ($a_p \times f_z$) para a rugosidade adotando V_c de 225 m/min.

Também através dos gráficos ($f_z \times V_c$) anteriormente mencionados, e do comportamento

apresentado pelo gráfico da profundidade de penetração em função da velocidade de corte ($a_p \times V_c$), apresentado na figura 7, constata-se a pequena influência da velocidade de corte na qualidade do acabamento superficial, dentro da faixa de V_c estipulada no planejamento experimental deste trabalho .

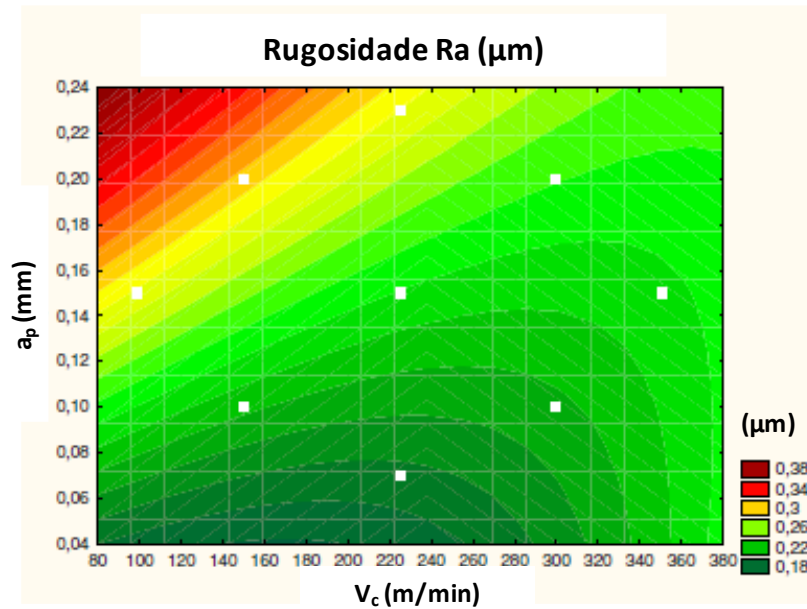


Figura 7. Gráfico ($a_p \times V_c$) para a rugosidade adotando f_z de 0,1 mm/rev.

3.1. Modelo Numérico

Baseado na literatura técnica de usinagem [4], que determina a rugosidade em função dos parâmetros de corte, e nos resultados dos ensaios que mostraram a interação simples de cada um dos três parâmetros de usinagem adotados com a rugosidade da superfície usinada, executou-se uma regressão não linear através do software NLREG, segundo a equação:

$$Ra = k \cdot v_c^a \cdot f_z^b \cdot a_p^c \quad (1)$$

Como resultado da regressão não linear obteve-se a equação:

$$Ra = 3,48 \cdot v_c^{-0,228} \cdot f_z^{0,320} \cdot a_p^{0,373} \quad (2)$$

que apresenta um R^2 de 69,44% ($R^2_{aj} = 63,7\%$). A figura 8 mostra o gráfico da rugosidade em função dos três parâmetros de corte, extraído da equação acima proposta.

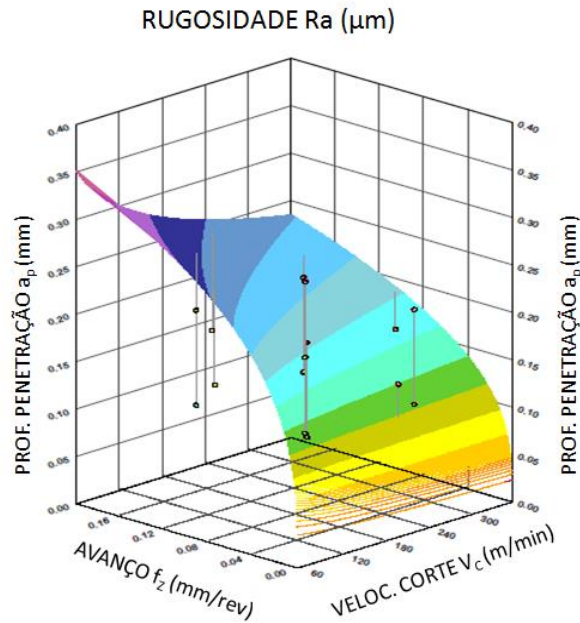


Figura 8. Gráfico do NLREG, relação não linear da rugosidade em função de a_p , f_z e V_c .

Na busca de uma equação, mais precisa, tentou-se uma regressão linear da rugosidade em função dos parâmetros de corte, apoiando-se num trabalho desenvolvido por [5], que visou estabelecer uma relação linear entre a rugosidade e os parâmetros de corte para operações de fresamento de topo, seguindo a expressão:

$$Ra = a \cdot v_c + b \cdot f_z + c \cdot a_p + k \quad (3)$$

Aplicada a regressão linear, através do mesmo software NLREG, constatou-se que a precisão desta equação foi um pouco menor do que a não linear, com R^2 de 66,8% ($R^2_{aj} = 60,1\%$). O gráfico, ilustrado conforme figura 9, apresenta como a rugosidade se comporta com relação aos três parâmetros de corte estudados.

$$Ra = -0,002 \cdot v_c + 0,872 \cdot f_z + 0,579 \cdot a_p + 0,1089 \quad (4)$$

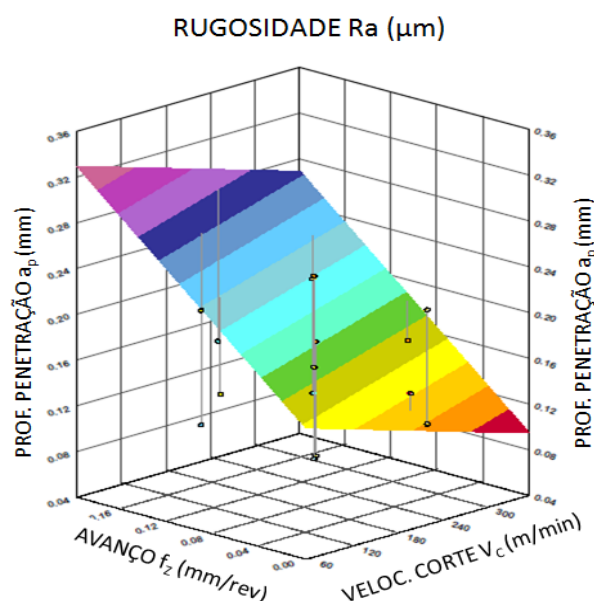


Figura 6.22: Gráfico do NLREG, relação linear da rugosidade em função de a_p , f_z e V_c .

4. CONCLUSÕES

Os valores de rugosidade variaram de R_a 0,16 a 0,41 μm .

A rugosidade interagiu com o avanço por dente e a profundidade de penetração, de tal maneira que grandes avanços combinados com grandes profundidades de penetração geraram um pior acabamento superficial.

Velocidades muito baixas prejudicaram o acabamento superficial.

A fresadora utilizada demonstrou ter rigidez estrutural suficiente para não influenciar os resultados da rugosidade dentro dos parâmetros de corte adotados.

Foi possível estabelecer um modelo numérico relacionando, avanço por dente f_z , profundidade de penetração a_p e velocidade de corte V_c , com a rugosidade através de uma regressão não linear e linear.

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que o fresamento de acabamento de aços endurecidos com ferramenta de CBN sem a presença de refrigerante, gera um acabamento superficial tão bom quanto aos encontrados pelo processo de retificação, com a vantagem de ser mais rápido e menos agressivo ao meio-ambiente pela eliminação do fluido refrigerante.

REFERÊNCIAS

- [1] M. S. Souza; C. H. Lauro; L. C. Brandão, “Análise de rugosidade em função da velocidade de avanço em operações de torneamento”, VI CONEM, (2010).
- [2] C. Lahiff,; S. Gordon; P. Phelan, , *PCBN tool wear modes and mechanisms in finish hard turning. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, v.23, p.638-644, (2007).

- [3] B. Gaurav, S. K. Choudhury, *State of the art in hard turning. International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.53, p. 1-14, (2012).
- [4] A. Diniz; F. C. Marcondes; N. L. Coppini. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. 3 ed., São Paulo: Artliber Editora, (2001).
- [5] G. F. Batalha; G. C. Rossi; A. A. Kanenobu, *Relação entre os parâmetros de corte e a rugosidade da superfície usinada numa operação de fresamento de topo*. 3º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, v.3, p.1-10. Joinville, (2005).