



## ESTUDO DO EFEITO DE PARÂMETROS DE USINAGEM SOBRE A RESISTÊNCIA MECÂNICA DE UM AÇO FERRAMENTA ENDURECIDO

Guilherme C. Gandia<sup>1</sup>, Felipe B. Savella<sup>1\*</sup>, Carlos E. H. Ventura<sup>1</sup> e Armando I. S. Antonialli<sup>1</sup>

*1 - Departamento de Engenharia Mecânica (DEMec), Universidade Federal de São Carlos (UFSCar).  
Rodovia Washington Luís, km 235, São Carlos, CEP 13565-905, SP.  
[felipesavella@estudante.ufscar.br](mailto:felipesavella@estudante.ufscar.br)*

### RESUMO

*O presente trabalho contém uma investigação acerca da influência de parâmetros de usinagem sobre a resistência mecânica em um aço ferramenta tipo O1 endurecido. Corpos de prova foram produzidos a partir de barras do aço recozido, tratados termicamente, e submetidos a um acabamento superficial com configurações diferentes de parâmetros de usinagem, variando-se avanço e velocidade de corte em um planejamento fatorial 2<sup>2</sup> completo. Na sequência, foi avaliada a rugosidade superficial, em termos do desvio aritmético médio (Ra) e da altura máxima do perfil (Rz), e foram realizados ensaios de tração. Verificou-se que os parâmetros Ra e Rz exibem a tendência de diminuição com o aumento da velocidade de corte e tendência de aumento com o incremento do avanço, embora só seja possível afirmar estatisticamente, com 95% de confiança, a influência da velocidade de corte e do avanço sobre Rz. Do mesmo modo, o limite de resistência à tração e a porcentagem de alongamento expressam a tendência de ampliar-se ao aumento da velocidade de corte e reduzir-se com o aumento do avanço, ainda que isso só se confirme estatisticamente, com 95% de confiança, para o efeito do avanço sobre o limite de resistência à tração. Adicionalmente, foi possível estabelecer uma correlação entre o parâmetro Rz de rugosidade e o limite de resistência à tração por meio de uma regressão logarítmica, com coeficiente de relação na ordem de 0,70, indicando que menores valores de rugosidade conduzem a elevados níveis de resistência mecânica.*

**Palavras-chave:** *Torneamento duro, velocidade de corte, avanço, rugosidade, limite de resistência à tração.*

### INTRODUÇÃO

O conceito da Engenharia de Superfícies é uma ciência que agrega os desafios técnicos e científicos de se produzir uma superfície e subsuperfície para determinada aplicação, além do revestimento aplicado e suas interações, onde é abordada a multidisciplinaridade do tema e é o ponto convergente de ciências puras (como a Matemática, Física e Química) e ciências aplicadas (como Resistência e Ciência dos Materiais, Tribologia, Elementos de Máquinas e Tratamentos Térmicos/Superficiais). Dentro da Engenharia Mecânica, pode-se localizar o tema de maneira isolada na Engenharia de Manufatura e em Ciências dos Materiais, e estudar os efeitos combinados de cada área representa os desafios dessa seção da Engenharia<sup>(1)</sup>.

Em relação ao estudo da área, há uma lacuna entre a fabricação e o fim do produto ou equipamento. Dessa forma, o presente trabalho tem a oportunidade de apresentar um conteúdo científico sobre a aplicação do aço O1 em um campo tão abrangente e crescente, e se desenvolver em função da aplicação diretamente na Engenharia de Superfícies, possibilitando o gerenciamento de materiais de maneira mais adequada, o ciclo de vida dos produtos, ferramentas e equipamentos utilizados em sua manufatura, orientada pelo tripé da sustentabilidade: compromisso social, viabilidade econômica e responsabilidade ambiental.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Utilizou-se o aço ASTM A681-O1<sup>(2)</sup>, recebido pela MRW – Máquinas, em barras, no estado recozido com dureza até 230 HB. A composição química do aço encontra-se na Tabela 1 a seguir, na primeira linha destaca-se a composição do aço fornecido e, na segunda, a composição requisitada pela norma.

Tabela 1: Composição química do aço ASTM A681-O1<sup>(2,3)</sup>.

Composição em peso %	C	Mn	Cr	W	Si
GGD METALS	0,95	1,2	0,5	0,5	0,30–0,35
ASTM International	0,85–1,00	1,00–1,40	0,40–0,70	0,40–0,60	0,10–0,50

Para todo o tratamento térmico<sup>(3)</sup>, utilizou-se o forno Jung TB3012, com capacidade de 30 litros, dimensões úteis 250 x 300 x 400 [mm] e potência de 6 kW. Para a têmpera, com o forno pré-aquecido a 820°C, austenitizado entre 790–820°C e resfriado em óleo até 78°C. Em seguida, aquecido por 1 hora para cada 25 mm de espessura e mais 1 hora para cada 25 mm adicional, resfriado em ar calmo até a temperatura para revenimento; e revenimento, realizado imediatamente após a têmpera, iniciado quando o material atingiu 70°C.

No planejamento experimental, determinou-se como fatores de influência a velocidade de corte ( $v_c$ ) e avanço ( $f$ ) em dois níveis na etapa de acabamento, configurando assim um fatorial 2<sup>2</sup> completo. Fabricaram-se oito corpos de prova (duas réplicas para cada configuração), a fim de se obter uma maior confiança estatística. A Tabela 2 apresenta as condições de usinagem durante o acabamento de cada réplica.

Tabela 2: Configurações de usinagem de acabamento.

	$f_1 = 0,079$ mm/rot	$f_2 = 0,159$ mm/rot
$v_{c1} = 12,25$ m/min	D1, D2	C1, C2
$v_{c1} = 15,32$ m/min	B1, B2	A1, A2

Realizou-se o acabamento dos corpos de prova em um torno horizontal universal da marca IMOR, modelo PRN-320, com potência máxima de 2,50 cv e rotação máxima de 1500 rpm, utilizando um inserto SNMG 12 04 04-PM, classe GC 4225 (ISO HC P25), com cobertura CVD e um porta-ferramentas DSSNL 2020K 12, ambos da marca Sandvik. Toda a operação foi realizada sem fluido de corte, com profundidade de corte fixada em 0,25 mm, variando avanço e velocidade de corte. Estes parâmetros de usinagem foram escolhidos de acordo com especificações do fabricante do inserto e considerando as limitações da máquina-operatriz. A operação de manufatura dos corpos de prova foi feita em conformidade com os padrões da norma para o ensaio de tração<sup>(2)</sup>.

As variáveis de resposta deste experimento provêm de duas fontes, caracterização da superfície e ensaio de tração. Na caracterização da superfície, através da medição da rugosidade do corpo

de prova, obtém-se: rugosidade média ( $Ra$ ) e altura máxima do perfil de rugosidade ( $Rz$ )<sup>(4-6)</sup>. Para caracterização da superfície acabada foi utilizado o microscópio para análise de imagens tridimensionais Alicona Infinite Focus SL, equipado com lente de aproximação de 10 vezes. Como o corpo de prova provém de um torneamento, escolheu-se o  $Ra$  pela facilidade de obtenção e pelo uso amplo na indústria e literatura. O  $Rz$  foi escolhido para representar possíveis erros durante a fabricação, como por exemplo desbalanço da máquina operatriz ou desgaste da ferramenta, que são atenuados pelo cálculo da média aritmética no  $Ra$ . Ambos foram obtidos utilizando-se um cutoff (ou comprimento de amostragem,  $\lambda$ ) de 800  $\mu\text{m}$  conforme recomendação do fabricante do microscópio.

Para os ensaios de tração, a resistência mecânica é representada através do limite de resistência à tração ( $LRT$ ) e da porcentagem de alongamento ( $\%AL$ ). Para inferir a influência da operação de acabamento sobre o comportamento mecânico do material, utilizou-se a máquina de ensaio universal Instron modelo 5500R, operando com célula de carga 50 kN localizada no DEMa-UFSCar, seguindo a norma ASTM E8/E8M - 16a<sup>(2)</sup>. No presente trabalho, o ensaio foi realizado aplicando ao travessão da máquina uma velocidade de 0,1 mm/min no regime elástico e 10 mm/min no regime plástico. Analisou-se o grau de influência dos fatores sobre as respostas através de uma análise de variância<sup>(7)</sup>, com  $a$ ,  $b$  e  $n$  iguais a 2 e um grau de confiança estatística igual a 95%, ou seja, nível de significância ( $\alpha$ ) igual a 0,05.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Abaixo são apresentados os dados obtidos nos experimentos e, em seguida, os resultados da análise de variância. Por fim, apresenta-se a relação obtida entre rugosidade superficial e resistência mecânica. A Figura 1 a seguir, traz os resultados dos parâmetros de rugosidade para cada par de corpo de prova.

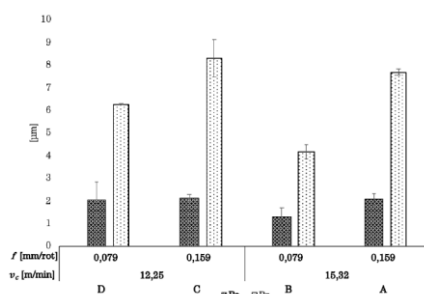


Figura 1: Rugosidade Média ( $Ra$ ) e Altura máxima do perfil de rugosidade ( $Rz$ ) para os corpos de prova.

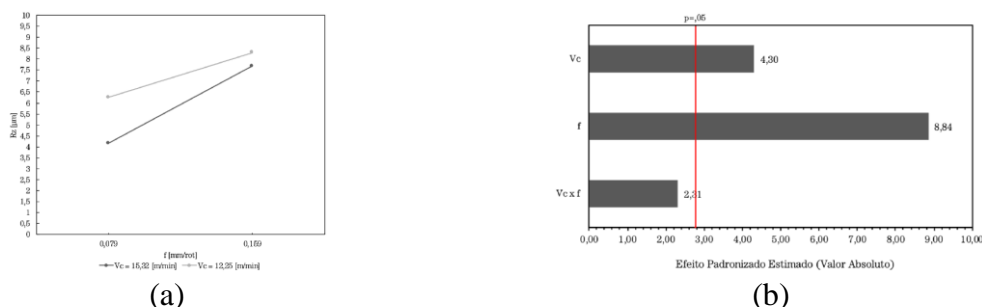


Figura 2: (a)  $Rz$ : Efeitos principais de  $f$  e  $vc$ . (b)  $Rz$ : Diagrama de Pareto de  $f$ ,  $vc$  e  $vc \times f$ .

A análise através da ANOVA<sup>(7)</sup> produz dois gráficos, efeitos principais e Diagrama de Pareto, correspondentes à  $Ra$  e  $Rz$ . Na Figura 2, o diagrama de efeitos principais confirma o aumento

do avanço e a redução na velocidade de corte resultam em um aumento nos níveis do parâmetro. Pode-se afirmar (com 95% de confiança) que  $v_c$  e  $f$  estatisticamente afetam  $R_z$ , com  $f$  em maior intensidade, mas a interação entre  $v_c$  e  $f$  não se mostrou estatisticamente relevante. Em relação à resistência mecânica, a Figura 3 apresenta os resultados obtidos através dos ensaios de tração.

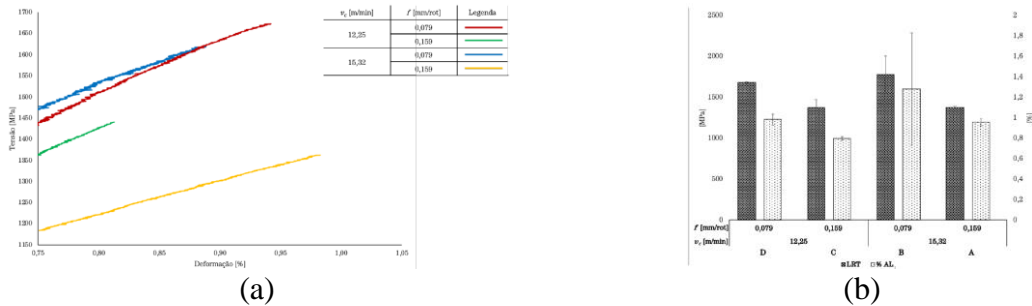


Figura 3: (a) Gráfico da Tensão pela Deformação para os corpos de prova. Enfatizando os pontos após 0,75% de deformação. (b) Limite de resistência à tração ( $LRT$ ) e Porcentagem de Alongamento (%) médios para os corpos de prova.

A primeira é a curva de Tensão pela Deformação de uma réplica de cada uma das configurações de usinagem em acabamento, a segunda apresenta a curva de Tensão pela Deformação enfatizada após os 0,75% de deformação e a terceira apresenta em barras o  $LRT$  e a  $\%AL$  em média para cada par de corpos de prova.

O comportamento para a curva, com uma porção de deformação plástica ínfima e uma ruptura praticamente frágil, já era esperada por conta da composição química do aço, somando-se a elevada dureza obtida através do tratamento térmico por têmpera e revenimento, acentuando o comportamento frágil do material<sup>(8)</sup>.

Outro ponto interessante é o aumento do  $LRT$ , que pode ter se originado na escolha de realizar o processo de acabamento após o tratamento térmico. O aço AISI O1 temperado e revenido apresenta uma matriz de ferrita<sup>(9, 10)</sup>, que é a fase necessária para haver encruamento<sup>(8)</sup>. Portanto, realizar a fase de acabamento após o tratamento térmico acabou gerando encruamento à superfície do aço, aumentando a dureza e, conseqüentemente, aumentando o  $LRT$ .

A figura 4 apresenta os resultados obtidos via ANOVA<sup>(7)</sup>. A análise dos efeitos principais torna evidente que ao migrar para uma condição de usinagem que gera superfícies mais rugosas (maior avanço) há uma diminuição significativa do  $LRT$ . O gráfico (b) atesta o que foi evidenciado em (a) mostrando que podemos afirmar (com 95% de confiança) que o avanço estatisticamente influencia o limite de resistência à tração, enquanto  $v_c$  e a interação entre os fatores não são estatisticamente significativos.

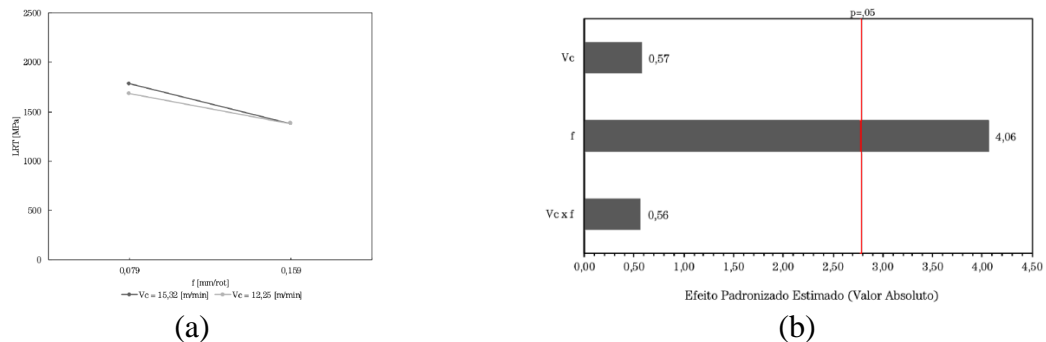


Figura 4: Limite de Resistência à Tração ( $LRT$ ) (a) Efeitos principais de  $f$  e  $v_c$ . (b) Diagrama de Pareto de  $f$ ,  $v_c$  e  $v_c \times f$ .

Para estabelecer uma correlação entre a rugosidade superficial e a resistência mecânica, construiu-se o gráfico da Figura 5.

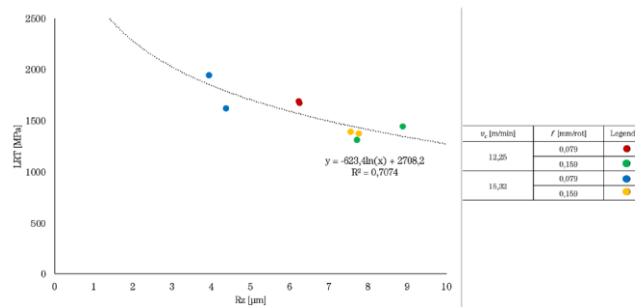


Figura 5: *LRT* em função *Rz*.

O gráfico apresenta a correlação entre o parâmetro de rugosidade *Rz* nas abcissas e o *LRT* nas ordenadas. A dispersão dos pontos pôde ser relacionada através de uma equação logarítmica, com coeficiente de determinação 0,7074. A correlação aponta para um aumento do *LRT* em função da diminuição do *Rz*, o que pode ser explicado pelo fato do avanço ser aquele que estatisticamente mais influencia ambos parâmetros. Através de uma rugosidade superficial menor, ou seja, um acabamento mais fino pode elevar a resistência mecânica<sup>(4, 11-13)</sup>. O fluido de corte é o parâmetro mais influente na rugosidade superficial<sup>(6)</sup>, seguido pelo avanço e pela velocidade de corte. Nota-se que o par B (pontos azuis), portador da menor rugosidade superficial, apresentou os maiores valores de *LRT*. Seguido pelo par D (pontos vermelhos), conforme previsto, pois compartilhava o mesmo avanço.

## CONCLUSÕES

Tendo em vista os resultados obtidos, para as variáveis rugosidade média (*Ra*), altura máxima de perfil de rugosidades (*Rz*), limite de resistência à tração (*LRT*) e porcentagem de alongamento (*%AL*), foi possível concluir que *Ra* e *Rz* apresentam tendências de comportamento similar. Porém, apenas para *Rz* pode-se afirmar que *f* e *vc* afetam de maneira estatisticamente significativa; *LRT* e *%AL* apresentam tendências de comportamento similar. Mas, somente para *LRT* pode-se afirmar que o *f* afeta de maneira estatisticamente significativa e; ao confrontar-se os dados de rugosidade e limite de resistência à tração, foi possível estabelecer uma correlação entre eles. A regressão logarítmica realizada indica que o aumento da rugosidade implica em redução da resistência mecânica.

## REFERÊNCIAS

- BATCHELOR, A. W.; LAM, L. N.; CHANDRASEKARAN, M. Materials degradation and its control by surface engineering. [S.l.]: World Scientific, 2011.
- ASTM International. ASTM A681-08 (2015). Standard Specification for Tool Steels Alloy, p. 14, 2015.
- GGD METALS. GGD O1. 2020. <<https://ggdmetals.com.br/produto/aisi-o1/>>. Acesso em: 11/02/2020.
- DAVIM, J. P.; GAITONDE, V.; KARNIK, S. Investigations into the effect of cutting conditions on surface roughness in turning of free machining steel by ann models. Journal of materials processing technology, Elsevier, v. 205, n. 1-3, p. 16–23, 2008.
- BASHIR, K. et al. Experimental investigation into effect of cutting parameters on surface integrity of hardened tool steel. In: IOP PUBLISHING. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. [S.l.], 2018. v. 344, n. 1, p. 012020.

6. SIVARAMAN, V.; PRAKASH, S. Optimization of cutting parameters in hard turning of aisi o1 steel using pvd tialn coated carbide insert. International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development (IJMPERD), TJPRC Pvt. Ltd., v. 10, 2020.
7. MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. Applied statistics and probability for Engineers. 7. ed. [S.l.]: John Wiley and Sons, Inc., 2018.
8. CANALE, L. d. C. F.; TOTTEN, G. E.; MESQUITA, R. A. Failure Analysis of Heat Treated Steel Components. [S.l.]: ASM international, 2008.
9. GEORGE, F. ASM handbook: Volume 9: Metallography and microstructures. [S.l.]: ASM Internationa, 2004.
10. ZAMBRANO, O. et al. The sliding wear behaviour of steels with the same hardness. Wear, Elsevier, v. 418, p. 201–207, 2019.
11. GÓMEZ-PARRA, Á. et al. Influence of the dry turning parameters on the ultimate tensile strength (uts) of uns a92024 samples. In: TRANS TECH PUBL. Materials Science Forum. [S.l.], 2014. v. 797, p. 65–70.
12. WANG, B.; LIU, Z.; YANG, Q. Investigations of yield stress, fracture toughness, and energy distribution in high speed orthogonal cutting. International Journal of Machine Tools and Manufacture, Elsevier, v. 73, p. 1–8, 2013.
13. RABABA, K. S.; AL-MAHASNE, M. M. Effect of roller burnishing on the mechanical behavior and surface quality of o1 alloy steel. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, Maxwell Science Publishing, v. 3, n. 3, p. 227–233, 2011.

## **STUDY OF THE EFFECT OF MACHINING PARAMETERS ON THE MECHANICAL STRENGTH OF A HARDENED TOOL STEEL**

### **ABSTRACT**

*The present work contains an investigation into the influence of machining parameters on the mechanical strength of a hardened O1-type tool steel. Specimens were produced from annealed steel bars, heat treated, and subjected to a surface finish with different settings of machining parameters, varying feed and cutting speed in a complete 2<sup>2</sup> factorial design. Subsequently, the surface roughness was evaluated in terms of mean arithmetic deviation (Ra) and maximum profile height (Rz), and tensile tests were performed. It was found that the parameters Ra and Rz show a tendency to decrease with increasing cutting speed and a tendency to increase with increasing feed, although it is only possible to state statistically, with 95% confidence, the influence of cutting speed and the feed on Rz. In the same way, the tensile strength limit and the percentage of elongation express the tendency to increase with the increase in cutting speed and decrease with the increase in feed, although this is only confirmed statistically, with 95% of confidence, for the effect of the feed on the tensile strength limit. Additionally, it was possible to establish a correlation between the roughness parameter Rz and the tensile strength limit by means of a logarithmic regression, with a relationship coefficient in the order of 0.70, indicating that lower roughness values lead to high levels of strength mechanics.*

**Keywords:** *Hard turning, cutting speed, feed, roughness, tensile strength limit.*