

## **ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE NO FRESAMENTO DE AÇOS COM GRÃOS ULTRAFINOS**

**Adriano Trevelin Francoso, Aldo Marcel Yoshida Rigatti, Renato Goulart Jasinievicius**

USP, Universidade de São Paulo, Departamento de Engenharia Mecânica  
Escola de Engenharia de São Carlos-Bairro Parque Arnold Schmidt-CEP 13566-590 – São Carlos-São Paulo  
E-mail para correspondência: [adriano.francoso@usp.br](mailto:adriano.francoso@usp.br)

### **Introdução**

Nos dias de hoje, a usinagem de materiais, em particular o fresamento, vem se tornando um importante meio de estudo devido à sua grande importância no meio industrial e pelo grande avanço nas tecnologias de corte de materiais. Por isso, é necessário observar como as características do processo e dos materiais podem melhorar o processo e torna-lo cada vez mais produtivo num mercado que exige tal procedimento.

Por ser de tão relevante importância econômica, é necessário o conhecimento aprofundado do comportamento dos materiais em usinagem. Tal comportamento pode ser representado pelo que é conhecido como usinabilidade, a qual pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um material em comparação a outro tomado como padrão.

Este conceito, conforme indicado por diversos autores, pode ser desenvolvido a partir de inúmeros critérios, dentre os quais citamos os mais importantes: vida da ferramenta, acabamento superficial dos componentes, características do material, parâmetros de corte e esforços de usinagem (Ferraresi, 1970).

Devido ao pleno desenvolvimento do estudo da usinabilidade de materiais com novas características, como os aços de grãos ultrafinos, é de suma importância a geração de índices de pesquisa. Tendo essa visão, verificamos que a pesquisa e os ensaios relacionados à energia específica de corte são de suma importância, uma vez que se trata de uma das grandezas físicas de usinagem mais relevantes, não abandonando outros conceitos que também apresentam elevado teor de pesquisa como desgaste da ferramenta, temperatura de corte, tempo de corte e força (Rodrigues, 2005).

A energia específica de corte é uma variável que representa a eficiência energética do processo e está sujeita à influência das condições de usinagem. No processo de usinagem, a energia total por unidade de tempo ou mesmo potência de corte pode ser determinada multiplicando-se diretamente a força de corte  $F_c$  pela velocidade de corte  $v_c$ . Entretanto, como muitos parâmetros influem diretamente no valor da energia consumida, ela é normalizada pela taxa de material removido da peça, ou seja, produto da espessura de corte  $h$ , pela largura de corte  $b$  e velocidade de corte  $v_c$ , conforme a Eq. 1 a seguir:

$$u = \frac{F_c \cdot v_c}{h \cdot b \cdot v_c} = \frac{F_c}{h \cdot b} \quad (1)$$

Na expressão acima  $u$  é denominado energia específica de corte, o que pode ser entendido também como a razão entre potência específica de corte e a taxa de remoção de material, o equivalente à energia por unidade de volume (King e Hahn, 1986).

Na usinagem dos materiais, a energia específica tem papel direto nos resultados obtidos em ensaios. Altos valores deste parâmetro correspondem a grandes tensões residuais na peça e elevados valores de transferência de calor, que podem direcionar para uma integridade superficial de baixa qualidade, enquanto que valores mais baixos de energia específica geram menos danos à peça, o que evidencia que a ferramenta de corte é altamente eficaz (Ersoy e Atici, 2004).

### **Objetivos**

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
Artigo CREEM2012

Este trabalho objetivou determinar a influência do aço com grãos ultrafinos na energia específica de corte em conjunto a variação do avanço por dente, que é um dos parâmetros que mais influenciam na energia específica.

**Materiais e Métodos**

Os ensaios de usinagem foram conduzidos em um centro de usinagem CNC HERMLE C800U com ferramenta (suporte R390-016A16-11L e inserto R390-11T308M) coberta de TiAlN de 16 mm de diâmetro. E para aquisição dos dados das forças foi usado um dinamômetro piezelétrico Kistler modelo 9257BA de aquisição em três componentes. A montagem pode ser conferida na Fig. 1. Na montagem vemos um dispositivo para fixação dos corpos de prova ao dinamômetro.

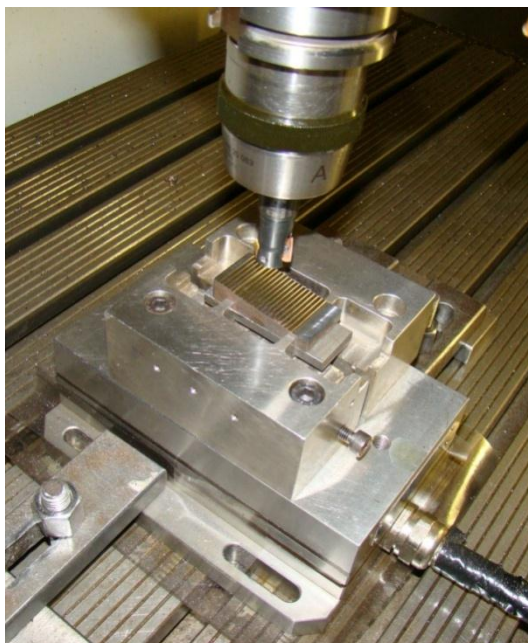


Figura 1- Corpo de prova fixo ao suporte ligado ao dinamômetro

Segundo dados da empresa, o material estudado neste trabalho é um aço baixo-carbono com propriedades melhoradas. Possui limite de resistência de 630 MPa, limite de escoamento de 530 MPa e alongamento de 26%. Em ensaio de impacto com entalhe em V de 2 mm, a energia média absorvida até a fratura à temperatura de 0°C é de 176 J. A dureza Vickers dos corpos de prova, segundo a norma ASTM E 92-92, com carga empregada de 98 N (10 kgf) foi de 198 ± 2,6 HV para o material original “como recebido” e 216,0 ± 4,0 HV para o material tratado termicamente de grãos ultrafinos. O material “como recebido” apresenta um tamanho de grão médio da ferrita de 10,8 µm e o grão ultrafino apresenta um tamanho de grão médio da ferrita de 0,7 µm, medidos através da norma ASTM E 112-95.

Todos os ensaios foram realizados em fresamento de topo concordante, conforme as condições de corte a seguir apresentadas na Tab. 1.

Tabela 1– Condições de corte.

Condições de corte	C1	C2	C3	C4
Velocidade de corte [m/min]	700	700	700	700
Profundidade de corte [mm]	0,5	0,5	0,5	0,5
Avanço por dente[mm/z]	25	35	45	55
Velocidade de Avanço [mm/min]	350	490	630	770

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
Artigo CREEM2012

<b>Espessura de Corte [mm]</b>	2	2	2	2
<b>Volume Removido [mm<sup>3</sup>/min]</b>	350	490	630	770

Os corpos de prova foram produzidos com Cosar 60 (COSIPA S/A) nas dimensões de 24x10x25mm. No total foram fabricados 16 corpos de prova, dois para cada condição de usinagem e em cada corpo de prova foi usinado três larguras de usinagem. A composição química do Cosar 60 é dada pela Tab.2.

Tabela 2– Composição química do COSAR 60.

<b>C</b>	<b>Mn</b>	<b>P</b>	<b>S</b>	<b>Si</b>	<b>Al</b>	<b>Cu</b>	<b>Cr</b>	<b>Ni</b>	<b>Nb</b>	<b>V</b>	<b>Ti</b>	<b>Ceq</b>
0,15	1,49	0,027	0,009	0,27	0,046	0,005	0,276	0,008	0,048	0,044	0,016	0,40

A energia específica de corte foi calculada através da Eq. 2 usando o método da integração 1/3 de Simpson,  $F_x$  e  $F_y$  são as componentes vetoriais do corte,  $v_c$  é a velocidade de corte,  $t_c$  é o tempo de corte e  $V_{cav}$  é o volume de cavaco removido calculado geometricamente.

$$k_s = \frac{v_c}{V_{cav}} \int_0^{t_c} (F_x^2 + F_y^2)^{1/2} dt \quad (2)$$

### Resultados e Discussões

A Tab. 3 apresenta os dados obtidos para energia específica de corte para os diferentes materiais e condições de corte.

Tabela 3– Energia Específica em cada material

<b>Energia Específica de Corte</b>		
<b>Condição</b>	<b>"Como Recebido"</b>	<b>Grãos Ultrafinos</b>
C1	10,3470	12,2282
C2	8,8540	9,4618
C3	7,5930	8,0275
C4	6,4790	7,1475

Com relação ao material temos na Tab. 3 as diferenças de energia específica para o material “como recebido” e para o de grãos ultrafinos, nota-se que o material de grãos ultrafinos com dureza mais elevada apresentou as forças de corte maiores causando uma energia específica de corte também mais elevada. Percentualmente há um aumento médio de 10,3% da energia específica para o material de grãos ultrafinos. Isso se deve principalmente ao aumento da dureza do material ao passar pelo processo de refino e diminuição de grão, devido ao aumento da área de contato entre os grãos no processo o que aumenta a coesão do material.

A Fig. 2 apresenta os dados obtidos para energia específica de corte para os diferentes materiais e condições de corte e nela temos um equacionamento para energia específica em função do avanço por dente com um fator de ajuste de 0,99 para os grãos ultrafinos e 0,98 para o “como recebido”.

**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
 Artigo CREEM2012

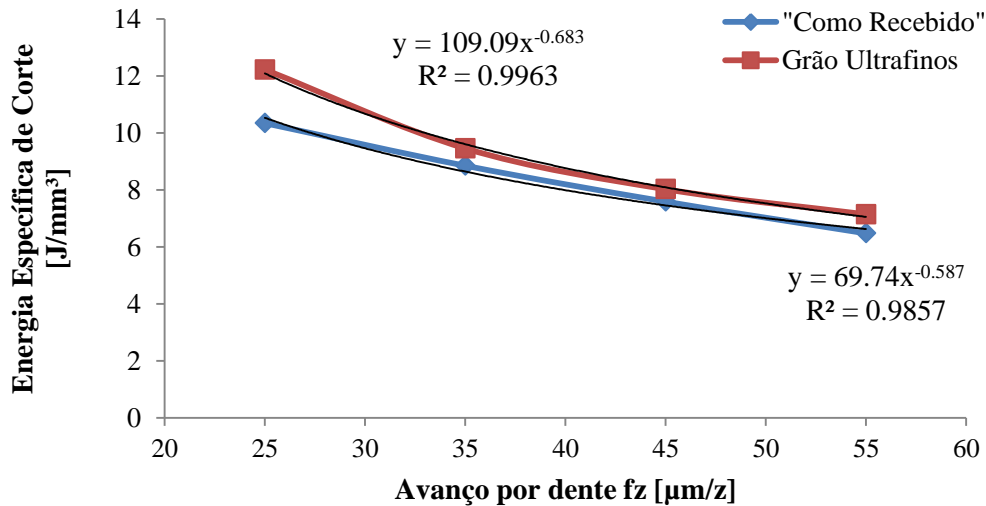


Figura 2 – Gráfico de Energia Específica em função do avanço por dente.

Na Fig. 2 podemos observar também o comportamento inversamente proporcional da energia específica em função do avanço, para pequenos avanços por dente temos elevados valores para energia específica de corte que reduzem com o aumento do avanço por dente. Temos neste caso evidenciado o efeito de escala, onde a energia específica é altamente elevada para pequenos avanços por dente principalmente menores que o raio de aresta da ferramenta (Rigatti, 2010). Analisando-se as expressões geradas pelos ajustes dos pontos para ambos os materiais, observa-se que o fator multiplicativo para o material de grãos ultrafinos (109,09), maior que o do “como recebido” (69,74), conduz a energia específica a maiores valores. O expoente negativo do avanço determina o grau de curvatura da curva, pois quanto maior seu valor, mais assintótica é a curva em relação ao eixo y. Em outras palavras, o expoente é indicador da sensibilidade do material ao efeito de escala, sendo mais perceptível o crescimento da energia específica com a diminuição do avanço na condição de grãos ultrafinos (-0,683) que para o material “como recebido” (-0,587).

### Conclusões

Apresentou-se neste trabalho um estudo essencialmente experimental para se avaliar o efeito dos diferentes materiais no comportamento da energia específica de corte. Concluímos que o aço de grãos ultrafinos é um material inovador, pois em comparação com o mesmo material no caso “como recebido” apresenta uma energia específica maior e isso indica melhores características de dureza e resistência. Também temos que com o aumento do avanço por dente há uma queda da energia específica e isso é benéfico, pois leva a uma diminuição no gasto energético e uma eficiência no corte, levando a um trabalho com melhor êxito.

### Referências Bibliográficas

- Ferraresi, D., “Fundamentos da Usinagem dos Metais”, Ed. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil, 1977, 751p.
- Rigatti, A. M. Y. “Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte” Ilha Solteira: [s.n.], 2010 87 f. il.
- Rigatti, A. M. Y. “Efeito de Escala na Energia Específica de Corte em Microusinagem” São Carlos: [s.n.], 2012 42 f. il.
- Ersay, A., Atici, U. “Performace characteristics of circular diamond saws in cutting of different type of rocks. Diamond and Telated Materials”, v. 13, p. 22-37, 2004.
- Rodrigues, A. R., 2005. “Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte”. 2005. 227 f. Tese (Doutorado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de



**XIX Congresso Nacional de Estudantes de Engenharia Mecânica - 13 a 17/08/2012 – São Carlos-SP**  
Artigo CREEM2012

São Paulo, São Carlos.

King, R. I; Hahn, R. S. Principles of grinding. In: \_\_\_\_\_. Handbook of modern grinding technology. EUA: Chapman and Hall, 1986. p. 30-71.