

ENERGIA MECÂNICA COM ÊNFASE EM PROCESSOS DE USINAGEM – TORNEAMENTO

Fabrina Barbieri Peres¹

Larissa Caliani Uemura²

Larissa Zanghettin³

RESUMO

Um dos processos de fabricação mais utilizados atualmente é o processo de usinagem, que confere forma específica às peças e se utiliza da energia mecânica como fonte principal de trabalho. Neste processo, é dada importância significativa à velocidade e força de corte aplicada para dar forma às peças. Este artigo científico tem como objetivo analisar a energia mecânica utilizada nos processos de usinagem, enfatizando essa energia mecânica no movimento utilizado nos processos de torneamento e a energia específica de corte, força de corte, potência e velocidade aplicada nos mesmos, explicando a importância deste processo na relação máquina x ferramenta. A energia mecânica citada no presente trabalho é a utilizada nos processos convencionais de usinagem, com a ação de uma ferramenta de corte para remoção do material de uma determinada peça.

PALAVRAS CHAVE: Energia Mecânica, Usinagem, Torneamento, Energia Específica de Corte.

ABSTRACT

One of the most widely used manufacturing processes today is the machining process, which gives specific shape to the parts and uses mechanical energy as the main source of work. In this process, significant importance is given to the speed and shear force applied to shape the parts. This scientific article aims to analyze the mechanical energy used in the machining processes, emphasizing this mechanical energy in the movement used in the turning processes and the specific energy of cutting, shearing force, power and speed applied in them, explaining the importance of this process in the relation machine-tool. The mechanical energy cited in the present work is that used in conventional machining processes, with the action of a cutting tool to remove the material of a certain part.

KEYWORDS: Mechanical Energy, Machining, Turning, Cutting Specific Energy.

1. INTRODUÇÃO

Segundo Arons 1989, energia é o poder oriundo de um sistema material, de realizar mudanças no estado de sua vizinhança ou nele mesmo, utilizando diferentes formas, como baterias e combustíveis. Os processos de usinagem de materiais se

¹ Graduanda do curso de Engenharia de Produção – Fundação Eurípedes Soares da Rocha – Marília/SP

² Graduanda do curso de Engenharia de Produção – Fundação Eurípedes Soares da Rocha – Marília/SP

³ Graduanda do curso de Engenharia de Produção – Fundação Eurípedes Soares da Rocha – Marília/SP

baseiam essencialmente na utilização da energia mecânica, criando atrito ou deformação às peças usinadas. Neste processo, muitas vezes se adota a rotação como maneira de adquirir formas a algumas peças, sendo assim, pode-se afirmar que utilizamos a energia cinética de rotação para chegarmos no objetivo final do processo. Um exemplo de processo de usinagem que faz grande uso desse tipo de energia é o torneamento, o qual é de extrema importância na fabricação de peças de revolução com geometrias definidas ou simétricas, como engrenagens ou até mesmo pinos médico-odontológicos.

2. ENERGIA MECÂNICA EM USINAGEM

Podemos definir energia mecânica como a soma das energias potencial e cinética, e está relacionada ao movimento ou a capacidade de realizar um movimento. A energia cinética pode ser tanto de translação como de rotação, é uma energia que se relaciona especificamente com os objetos em movimento, quando estes possuem uma determinada velocidade, conforme equação I (Souza e Santos, 2015).

Equação I – Energia Cinética

$$E_c = m * \frac{V^2}{2}$$

(Souza e Santos, 2015).

Onde,

E_{cin} = energia cinética em J (Joule);

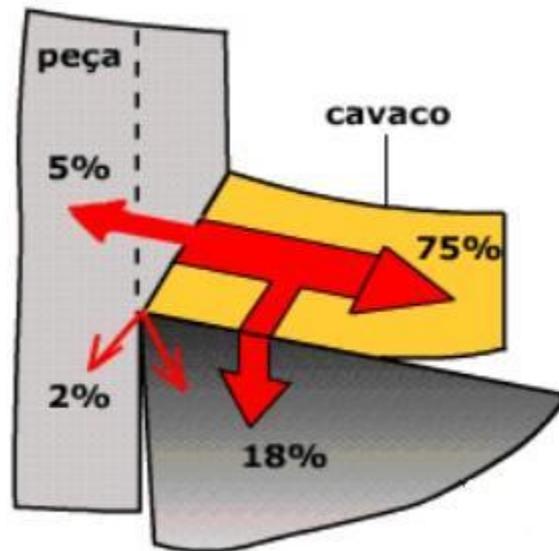
m = massa em kg (quilograma);

v = velocidade em m/s (metros por segundo);

No processo de torneamento, por exemplo, se utiliza a energia cinética em suas duas formas. A Energia cinética de translação é o tipo de energia utilizada pela ferramenta durante o movimento de avanço. A Energia cinética de rotação é o tipo de energia utilizada pela peça durante o processo de corte, enquanto ocorre o movimento de rotação da mesma (Stoeterau, 2007).

No caso dos processos de usinagem, a maioria das energias utilizadas no sistema são convertidas em energia térmica (Silva, Pereira, Ferreira e Silva, 2007).

Figura 1 – Transformação de Energia Mecânica em Energia Térmica.



(Stoeterau, UNIFEI-MG).

A figura acima ilustra a porcentagem da transformação de energia mecânica em energia térmica entre a peça, o cavaco e a ferramenta, e suas transferências (calor) por área do sistema.

3. USINAGEM

A norma ABNT NBR 6175 de 1971, descreve usinagem como sendo um processo mecânico mediante a remoção de cavaco por determinada ferramenta, a todos que visa conferir forma a uma peça, as suas dimensões ou acabamentos especificados, ou uma combinação qualquer destes três itens, sendo o cavaco definido como uma porção de material removido da peça por uma ferramenta, o qual apresenta forma geométrica irregular (FERRARESI, 1970). Também pode-se citar a definição pela norma DIN 8580, a qual diz que a usinagem se aplica a todos os processos onde há remoção de materiais, sendo esses definidos em forma de cavaco.

4. TORNEAMENTO

Segundo o Professor Dr. Eng. Rodrigo Lima Stoeterau da Escola Politécnica de Engenharia da Universidade de São Paulo, o torneamento é definido como um processo de usinagem onde a peça executa o movimento de corte rotativo e a ferramenta o movimento de translativo de avanço.

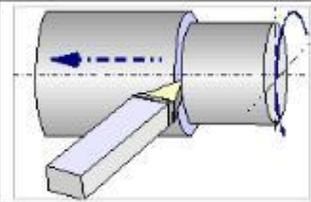
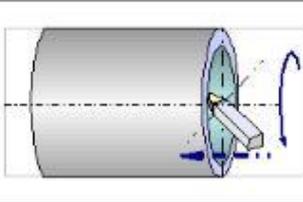
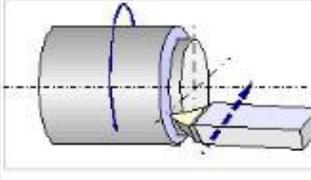
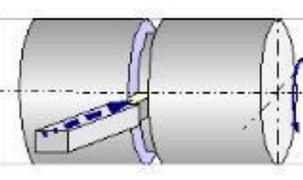
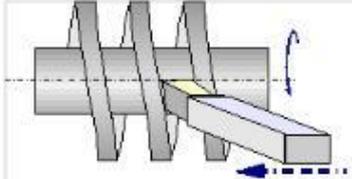
O torneamento tem como objetivo obter superfícies de revolução com auxílio de uma ou mais ferramentas monocortantes, através do movimento giratório da peça em torno do eixo principal de rotação da máquina, com deslocamento simultâneo da ferramenta seguindo trajetória coplanar com o eixo da máquina. A ferramenta é ajustada a uma certa profundidade de corte, e ao mesmo tempo em que a peça gira a ferramenta se desloca a uma determinada velocidade. O resultado desses movimentos é a formação do cavaco, que se move sobre a face da ferramenta.

Figura 2 – Torneamento.



Disponível em: www.industria hoje.com.br.

Figura 3 – Principais Operações do Torneamento – Norma DIN 8589.

Operação de torneamento	Externo	Interno
Longitudinal		
	Faceamento	Sangramento
Plano ou transversal		
Helicoidal		

(Stoeterau, Engenharia Mecatrônica, POLI-USP).

Repare que na figura 3, em todas as operações ocorre o movimento de rotação da peça e de translação de avanço da ferramenta de corte.

4.1. Formação do Cavaco

Segundo o Prof. Dr. Gilmar Ferreira Batalha do Departamento de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, podemos definir o cavaco como sendo uma porção de material que é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta. Esse material sofre deformação plástica, a qual aumenta até que tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo que se inicie um deslizamento entre a porção de material recalcado e a peça. Este deslizamento acontece de acordo com os planos de cisalhamento dos cristais, os quais irão definir uma região entre a peça e o cavaco denominada região de cisalhamento. A região de cisalhamento é aproximada a um plano de cisalhamento, que de acordo com sua direção se define o ângulo de cisalhamento.

Na região de cisalhamento ocorre uma ruptura parcial ou completa do material da peça, dependendo de suas condições de usinagem e ductilidade, e devido ao

movimento entre a ferramenta e a peça, há um escorregamento da porção de material deformada e cisalhada sobre a superfície de saída da ferramenta, sendo essa o cavaco.

É preciso conhecer o grau de recalque do cavaco para avaliação das condições de usinagem da peça, pois isso permite o cálculo do ângulo de cisalhamento que influencia diretamente na força, energia e temperatura necessárias. Pode-se determinar o grau de recalque conforme equação II.

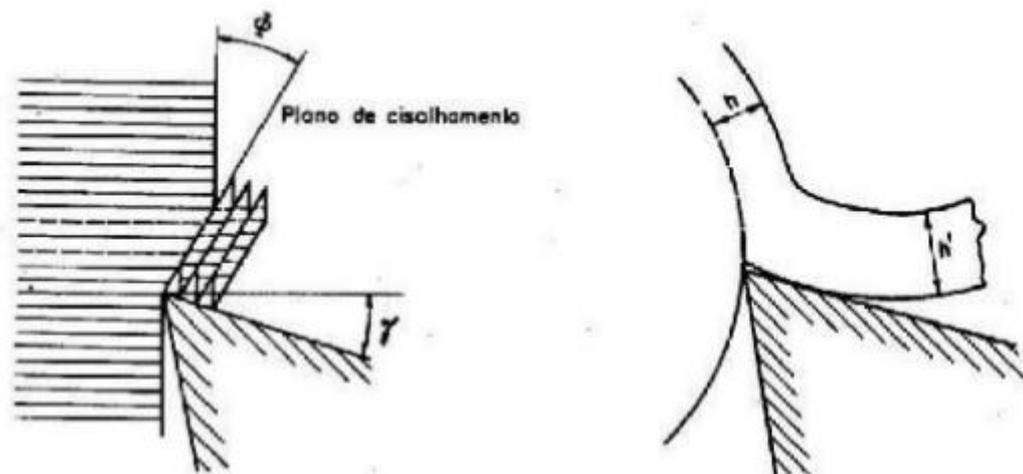
Equação II – Grau de Recalque do cavaco.

$$\frac{Tc}{To} = \frac{\cos(\phi - \gamma)}{\text{sen}(\phi)}$$

(Batalha, USP/SP).

Onde Tc é a espessura do cavaco (mm), To é a profundidade de corte (mm), ϕ é o ângulo de cisalhamento e γ é o ângulo de saída da ferramenta. Para melhor entender, pode-se analisar a figura abaixo.

Figura 4 – Formação do Cavaco.



(FERRARESI, 1977).

A formação do cavaco ilustrada na figura acima depende de diversas variáveis do processo.

4.2. Variáveis que Influenciam no Processo de Torneamento na Usinagem

São diversas as variáveis que determinam um processo de torneamento na usinagem. Citando mais especificamente, são de importante conhecimento a geometria

da ferramenta (ângulo de saída, ângulo de folga e raio de arredondamento) e a taxa de material a ser removida (TMR em mm³/min), conforme equação III.

$$TMR = \pi(D_o + D_f) \times d \times f \times N$$

Equação III – Taxa de Material Removida

Onde D_o é o diâmetro original (mm), D_f é o diâmetro gerado depois da remoção (mm), d é a profundidade de corte (mm), f é o avanço (mm/rot) e N é a rotação da peça (rpm).

O tempo de usinagem também é importante, e pode ser calculado conforme equação IV.

Equação IV – Tempo de Usinagem.

$$T = \frac{L}{(f \times N)}$$

Onde, L : Comprimento usinado da peça.

Ainda pode-se citar como de extrema importância segundo Professor Batalha, as forças de usinagem (força de corte, separação e avanço), sendo a força de corte determinada pela fórmula já citada neste trabalho, de potência de usinagem. O acabamento das peças também deve ser considerado, geralmente são feitos com avanço e profundidade pequenos.

4.2.1. Forças e Potências de Corte

4.2.1.1. Forças de Usinagem

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), as forças de usinagem F_u são consideradas uma ação da peça sobre a ferramenta, sendo a força total resultante que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem, chamada de força de usinagem F_u (N – Newton).

As componentes da força ativa F_t (componentes de F_u no plano de trabalho) contribuem para a potência de usinagem, pois estão no plano de trabalho, onde os movimentos de usinagem são realizados. Essas componentes são a força de corte F_c , a força de avanço F_f e a força de apoio F_{ap} (Diniz, Marcondes e Coppini, 2001).

Podemos expressar essas três forças através das equações V e VI.

Equação V – Componente da Força Ativa (N).

$$F_t = \sqrt{F_{ap}^2 + F_f^2}$$

Equação VI – Força de Apoio (N).

$$F_{ap} = \sqrt{F_t^2 - F_f^2}$$

Se o ângulo da direção de avanço no torneamento for igual a 90°, expressamos conforme equações VII e VIII.

Equação VII – Componente da Força Ativa (N).

$$F_t = \sqrt{F_c^2 + F_f^2}$$

Equação VIII – Força de Corte (N).

$$F_c = \sqrt{F_t^2 - F_f^2}$$

Ainda segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), a componente de F_u em plano perpendicular ao plano de trabalho F_p , não contribue para a potência de usinagem devido ser perpendicular aos movimentos.

Dadas essas informações, tem-se a seguinte relação entre forças de usinagem ativa e passiva, conforme a equação IX.

Equação IX – Força de Usinagem (N).

$$F_u = \sqrt{F_p^2 + F_t^2}$$

A força de corte pode variar também com as condições de trabalho, conforme equação X.

Equação X – Força de Corte (N).

$$F_c = K_s \times A$$

Onde K_s é a pressão específica de corte em Newton por milímetro quadrado (N/mm²) e A é a área de seção de corte em milímetros quadrados (mm²).

Nos processos de torneamento a área de seção de corte pode ser determinada conforme equação XI.

Equação XI – Área de seção de Corte em Torneamento.

$$A = b \times h.$$

Sendo, b e h em milímetros (mm).

4.2.1.2. Potências de Usinagem

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2001), a potência do sistema máquina x ferramenta serve para girar o eixo-árvore e executar o movimento de corte e executar o

movimento de avanço. Sendo dessa maneira, estabelece-se a relação entre potência de corte e de avanço conforme equação XII.

Equação XII – Relação Potência de Corte e Potência de Avanço (kW).

$$\frac{P_c}{P_f} = \frac{1000 \times F_c \times V_c}{F_f \times V_f}$$

Onde,

$$V_f = f \times n$$

Sendo V_f em milímetros por minuto (mm/min) e,

$$V_c = \frac{\pi \times d \times n}{1000}$$

Sendo V_c em metros por minutos (m/min).

Agrupando todas as equações acima citadas, temos a equação XIII.

Equação XIII - Relação Final entre Potência de Corte e Potência de Avanço.

$$\frac{P_c}{P_f} = (F_c/F_f) \times (\pi \times d \times n/f \times n) = \pi \times (F_c/F_f) \times (d/f)$$

No processo de torneamento, considera-se o valor de $F_c \sim 4.5 \times F_f$ (Diniz, Marcondes e Coppini, 2001).

Além de todos os itens citados acima, a velocidade de corte pode se incluir nessa lista, e é expressa conforme equação XIV.

Equação XIV – Velocidade de Corte em metros por minuto (m/min).

$$V_c = \pi \times D \times N$$

Onde, D = Diâmetro em metros (m) e,

N = Rotação da Peça em rotações por minuto (rpm).

E, por fim, deve-se considerar o tipo de fluido de corte mais adequado para cada operação, já que não existe um fluido de corte universal a ser utilizado. Cada ferramenta vem com especificações do próprio fabricante que indicam o melhor tipo de fluido.

Segundo Salmon (1992), os resultados da usinagem estão diretamente relacionados com a energia específica de corte, e essa energia de corte pode servir para calcular a potência necessária pela máquina-ferramenta. De modo geral, a potência pode ser calculada basicamente pela multiplicação da força de corte pela velocidade de corte, mas também devemos levar em consideração que existem diversos parâmetros que podem influenciar no valor da energia específica de consumo do sistema, então, a

normalização dessa energia se da pela taxa de material removido da peça (cavaco, representado na figura 4), sendo expressa conforme equação XV.

Equação XV – Energia Específica de Corte I.

$$u = \frac{F_c \times V_c}{h \times b \times V_c} = \frac{F_c}{h \times b}$$

Sendo,

u = Energia Específica de Corte (J/mm³);

F_c = Força de Corte (N);

V_c = Velocidade de Corte (m/min);

h = Espessura de Corte (mm); e ,

b = Largura de Corte (mm).

Segundo King & Hahn (1986), u também pode ser considerado a razão entre potência específica de corte e a taxa de remoção de material.

Ainda podemos determinar a energia específica de corte pela equação estudada pela ASME (American Society of Mechanical Engineers), representada conforme equação XVI.

Equação XVI – Energia Específica de Corte II.

$$u = C_a / F^x$$

Na qual,

C_a = contante do material usinado

f = avanço da ferramenta

$x = 0,2$ (ferramentas com geometrias definidas)

4.3. Principais Fatores que Influenciam Diretamente na Energia Específica de Corte

Temos entre os principais fatores que influenciam na energia específica de corte, o material da peça utilizada, a ferramenta e os diversos parâmetros de corte. Podemos afirmar os parâmetros de corte como sendo os mais indagados quando se fala nesse tipo de influência. Segundo dissertação de Rigatti (2010), os parâmetros de corte mais importantes são:

4.3.1. Velocidade de Corte

Quando se fala em parâmetros de corte, podemos considerar a velocidade como sendo a que menos influencia em relação a energia específica de corte. Podemos falar que o efeito da velocidade sobre a energia específica de corte depende de alguns outros fatores. Esses são: temperatura na zona de corte, grau de recalque e atrito entre cavaco-ferramenta. Temos um aumento brusco da temperatura em casos de velocidades de corte muito altas, e conseqüentemente isso diminui a resistência do material ao cisalhamento.

4.3.2. Avanço

Ferraresi (1970), diz que o aumento do avanço da ferramenta acarreta na diminuição da energia específica de corte. A redução de energia específica também é consequência do fato de que praticamente o volume todo de material é transformado em cavaco quando o avanço aumenta, sendo a força consumida neste caso, pequena.

4.3.3. Profundidade de Usinagem

Segundo Ersoy (2004), a profundidade de usinagem é inversamente proporcional à energia específica de corte. Quanto maior uma, menor a outra.

4.3.4. Espessura de Corte

Para casos em que h seja maior que 25 μm , afirma-se que a energia específica é inversamente proporcional à espessura de corte. A equação que expressa essa afirmação se da por:

$$u = 1 / h^x$$

Esse expoente “x” presente na espessura de corte, nos casos de torneamento, que se caracteriza por utilizar ferramentas de geometrias definidas, tem valor de 0,2.

4.3.5. Área da Seção de Corte

Segundo gráfico mostrado na literatura de Ferraresi (1970), o aumento da área da seção de corte, independente do material, podendo considerar desde latão mole até aço maior que 80kg, resulta na queda da energia específica de corte. Isso se explica devido a área da seção de corte ser um conjunto da profundidade de corte e do avanço da ferramenta.

De modo geral, podemos citar ainda que quanto mais refinado ou detalhado for o material, mais se exige da energia específica de corte, tornando-a sempre maior devido a redução da espessura de corte. A lubrificação também é importante para que se forneça menor atrito entre a ferramenta e o cavaco. Uma boa lubrificação significa maior penetração do agente lubrificante na interface ferramenta-cavaco, influenciando na energia específica de corte e em todas as forças de usinagem (Rigatti, 2010).

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se afirmar diante de todas as informações, que a energia mecânica é a principal fonte nos processos de torneamento na usinagem, sendo fundamental para o resultado final de peças que exigem formas específicas, pois a velocidade existente no movimento de rotação da peça já caracteriza perfeitamente a energia cinética do sistema. Conclui-se também através dos estudos, a possibilidade de se fazer diferentes tipos de cavacos no torneamento através do cálculo de cada uma das variáveis que influenciam nas energias específicas do sistema máquina-ferramenta e da análise da resistência do material utilizado na energia mecânica aplicada.

6. REFERÊNCIAS

ARONS, Arnold B. **Developing the Energy Concepts in Introductory Physics** - The Physics Teacher, 27, 506, 1989.

Batalha, Prof. Dr. Gilmar Ferreira. **Processos de Fabricação por Remoção de Material**. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, Depto. de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos; Laboratório de Engenharia de Fabricação. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/pmr/lefa/download/PMR2202-Eng%20Fabrica%C3%A7%C3%A3o%20Usinagem%20GFB%20JPM.pdf>. Disponível em: <http://www.ufjf.br/cursinho/files/2014/05/FISICA-1.pdf>.

PIRES, Fabrina B.; UEMURA, Larissa C.; ZANGHETTIN, Larissa. **ENERGIA MECÂNICA COM ÊNFASE EM PROCESSOS DE USINAGEM – TORNEAMENTO**.

DINIZ, Anselmo E; MARCONDES, Francisco C; COPPINI, Nivaldo L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 3ª edição, Ed. Artliber. São Paulo/SP, nov. 2001.

Disponível em: <http://www.if.ufrgs.br/tex/fis01043/20042/gabriel/ENERGIA.HTM>, acesso em 27/10/2016 às 15h58min.

Disponível em: <http://pt.slideshare.net/sergiomaeda3/fabricao-por-usinagem>, acesso em 10/11/2016 às 08h45min.

FARIA, Isabel Maria Abreu Madeira; **Retificação de Materiais Metálicos**, Análise da Influência da Velocidade de Corte, Pág.14. Dissertação para Obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica; Universidade Técnica de Lisboa, Out, 2007. Disponível em: <https://fenix.tecnico.ulisboa.pt/downloadFile/395137460644/Dissertacao.pdf>, acesso em 01/11/2016 às 12h41min.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Vol. 1, Edgard Blücher, 1970.

KING, R. I; HAHN, R. S. Principles of grinding. Handbook of Modern Grinding Technology. EUA, G Chapman and Hall, 1986.

Marques, Gil da Costa. Mecânica - Forças Conservativas e Energia Mecânica. Ebook, CEPA/USP. Disponível em: http://midia.atp.usp.br/ensino_novo/mecanica/ebooks/forcas_conservativas.pdf, acesso em 27/10/2016 às 15h24min.

POSMEC, 2007. Silva, Flávia Cristina S.; Pereira, Janaina Aparecida; Ferreira, Camila C. M.; Silva, Marcio Bacci. **Análise do Torneamento do Aço Inoxidável ABNT 304 Através da Temperatura do Cavaco**, Pág. 3. Artigo POSMEC, 2007, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica. Disponível em: <http://www.posgrad.mecanica.ufu.br/posmec/17/pdf/55.pdf>, acesso em 08/11/2016 às 14h09min.

PETROBRAS. Instituto Federal São Paulo, Campus São José dos Campos. Disponível em: [file:///C:/Users/Samsung/Downloads/fabricao%20mecanica%20aula%202%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Samsung/Downloads/fabricao%20mecanica%20aula%202%20(1).pdf), acesso em 31/10/2016 às 12h51min.

Rigatti, Aldo Marcel Y. **Avaliação da Força de Usinagem e Energia Específica de Corte no Fresamento com Alta Velocidade de Corte**. Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia, UNESP, Ilha Solteira, 2010. Disponível em: http://repositorio.unesp.br/bitstream/handle/11449/94480/rigatti_amy_me_ilha.pdf?sequence=1&isAllowed=y, acesso em 08/11/2016 às 12h38min.

SALMON, S. C. Fundamentals of grinding. Modern grinding process technology. EUA, McGraw-Hill, 1992.

PIRES, Fabrina B.; UEMURA, Larissa C.; ZANGHETTIN, Larissa. **ENERGIA MECÂNICA COM ÊNFASE EM PROCESSOS DE USINAGEM – TORNEAMENTO**.

Silva, Flávia Cristina S; Pereira, Janaína Aparecida; Ferreira, Camila Corrêa M; Silva, Márcio Bacci. **Análise do Torneamento do Aço Inoxidável ABNT 304 Através da Temperatura do Cavaco.** FEMEC-UFU. Uberlândia - MG, 2007.

Souza, Vitor Ribeiro; Santos, Antônio Carlos Fontes. **Uma Aula sobre Energia Mecânica e sua Conservação através do Uso de Analogias.** Universidade Federal do Rio de Janeiro/Instituto de Física, RJ, fev. 2015. Disponível em: http://www.if.ufrj.br/~pef/producao_academica/dissertacoes/2015_Vitor_Souza/material_instrucional_1_Vitor_Souza.pdf, acesso em 10/11/2016 às 09h47min.

Stoeterau, Prof. Dr. Eng. Rodrigo Lima. **Usinagem com Ferramentas de Geometria Definida.** Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2007. slide Aula. Disponível em: <http://sites.poli.usp.br/d/pmr2202/arquivos/aulas/PMR2202-AULA%20RS2.pdf>, acesso em 31/10/2016 às 22h15min.