

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

DESENVOLVIMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA MEDIÇÃO DA ENERGIA ESPECÍFICA DE CORTE

Augusto Moura Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br

Rodrigo Garcia Ribeiro, rodrigogr_23@hotmail.com

Rodrigo Cardoso de Menezes, menezes.eng@hotmail.com

Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901

Resumo: O consumo de energia deve ser sempre considerado principalmente quando se leva em conta os custos envolvidos na produção de peças. Determinar a condição de usinagem responsável pelo menor consumo de energia pode então ser vantajoso financeiramente e também levar a um produto final com propriedades mais adequadas. Além disso, conhecer as características do processo, tais como forças e potências envolvidas pode ajudar a determinar qual tipo de equipamento é mais adequado para realizar as atividades necessárias e possibilita também dimensionar as cargas a que os equipamentos devem resistir. Uma maneira de avaliar a energia envolvida no processo de usinagem é por meio da energia específica de corte, que é a energia consumida na geração do cavaco. A determinação desse parâmetro pode, portanto, ser útil no projeto e seleção de equipamentos. Para a determinação da energia específica de corte, um equipamento foi desenvolvido a partir de uma máquina de ensaio de impacto de modo que ferramentas de corte de tornear pudessem ser fixadas ao pêndulo. O equipamento funciona com base no fenômeno da conservação de energia e é capaz de produzir uma interação entre a ferramenta de corte e um corpo de prova adequadamente dimensionado de forma a produzir cavaco, cuja massa é posteriormente determinada por um balança de precisão. Foram realizados testes com dois materiais diferentes (aço ABNT 4340 e ferro fundido cinzento GG30) utilizando-se as ferramentas de corte especificamente recomendadas para cada material, assim como diferentes condições de lubrificação (corte a seco, com jorro de fluido de corte e com mínima quantidade de lubrificante). Os resultados mostraram que o equipamento funciona de forma adequada, apresentando exatidão e repetibilidade satisfatórias. No caso do aço ABNT 4340, os testes demonstraram que menor energia específica foi consumida no corte a seco ($2,72 \text{ J/mm}^3$), seguido pelo corte com MQL ($2,89 \text{ J/mm}^3$) e finalmente pelo corte com jorro de fluido de corte ($3,17 \text{ J/mm}^3$). Já nos testes com o ferro fundido cinzento GG30, a usinagem com MQL apresentou menor energia específica de corte ($1,03 \text{ J/mm}^3$), seguida da usinagem com jorro de fluido ($1,08 \text{ J/mm}^3$) e da usinagem a seco ($1,17 \text{ J/mm}^3$).

Palavras-chave: usinagem, energia específica, aço ABNT 4340, ferro fundido cinzento.

1. INTRODUÇÃO

No cenário industrial atual, a fabricação de componentes com qualidade aliada a um menor custo é de extrema importância para que as empresas consigam se manter competitivas. Independentemente do processo de fabricação aplicado deve-se, portanto, buscar uma redução no custo de fabricação. Dentre os processos de fabricação existentes, a usinagem possui um papel importante principalmente devido a sua grande aplicação. Segundo Trent (1985), estima-se que a usinagem é responsável por transformar 10% da produção mundial de metais em cavaco, além de empregar dezenas de milhões de trabalhadores. A usinagem é um processo de fabricação que se dá pela remoção de uma parcela do material que possui geometria irregular e recebe o nome de cavaco. A remoção do cavaco ocorre por meio da interação entre uma ferramenta de corte (aresta cortante) com o material. Essa aresta cortante é capaz de promover o cisalhamento do material para que o cavaco possa ser removido.

O cisalhamento, porém, não é o único fenômeno que acontece durante as operações de usinagem. Segundo Lucca et al. (1991), a energia total dissipada na formação do cavaco pode ser dividida em cisalhamento, deslizamento (atrito) e deformação plástica. Considerando que esses diversos fatores estão envolvidos na formação do cavaco, Shaw (1995, apud RODRIGUES, 2005) define a energia específica como a resistência oferecida ao corte por um dado material, ou

seja, um material de maior energia específica precisará de uma maior potência para ser usinado e, portanto, levará a um consumo maior de energia. A energia específica pode ser, portanto, utilizada para medir a eficiência energética do processo (QIULIAN et al., 2013 apud BALOGUN et al., 2014).

Rodrigues (2005) afirma que a energia específica é sensível a diversos parâmetros inerentes aos processos de usinagem. Dentre esses parâmetros estão o material da peça, o material e a geometria da ferramenta, bem como os parâmetros de corte utilizados. Devido ao grande número de fatores que influenciam a energia específica e a crescente necessidade de reduzir o consumo de energia, os custos e impactos ambientais, pesquisadores como Balogun e Mativenga (2014) buscaram definir equações que pudessem ser utilizadas para calcular a energia específica, determinando assim, previamente, o gasto energético do processo de usinagem para uma combinação específica de parâmetros.

Segundo Shaw (1984), a energia específica pode ser definida como a energia total consumida por volume removido de material durante a operação de usinagem. Dentre os fenômenos observados durante a usinagem estão o cisalhamento, o atrito e a formação de novas superfícies. Shaw (1984) afirma que as energias de cisalhamento e atrito são as principais componentes da energia específica. Sendo assim, normalmente se considera a energia específica como a união dessas duas parcelas, na qual a energia principal é a de cisalhamento e a energia de atrito pode assumir um terço de seu valor. De acordo com De Garmo et al. (2011), de 60 a 70% da energia total é consumida pelo cisalhamento do cavaco enquanto o atrito consome cerca de 30 a 40%. Dessa forma, é seguro assumir que a maior parte da energia que entra no processo de usinagem é consumida por esses dois fenômenos. Já de acordo com Ren et al. (2009), na usinagem a energia específica inclui a energia consumida para a formação do cavaco, no atrito e na deformação elástica da peça de trabalho.

Rodrigues (2005) define a energia específica de corte como sendo uma das mais importantes grandezas físicas que compõem a fenomenologia da usinagem dos metais, sem ignorar outros parâmetros fundamentais, como força, temperatura de corte, desgaste da ferramenta, entre outros. Analisando pelo lado do comportamento mecânico do material, Shaw (1995 apud RODRIGUES, 2005) afirma que a energia específica é entendida como uma propriedade que representa a resistência ao corte imposta por um determinado material, assim como a dureza e a tensão de tração representam a resistência à deformação plástica.

A energia específica de corte é usualmente calculada por meio da razão entre a potência de usinagem e a taxa de remoção de material. De acordo com Kalita et al. (2012), a potência de retificação é obtida multiplicando a força tangencial (F_t) pela velocidade periférica do rebolo (V_s). Já a taxa de remoção do material se dá pelo produto da penetração de trabalho (a_e), espessura de corte (h) e velocidade transversal da peça (V_w), como mostrado na Eq. (1):

$$u = \frac{F_t V_s}{h a_e V_w} \quad (1)$$

No caso do torneamento, como indicado por Rodrigues (2005), a velocidade do processo (velocidade de corte) é considerada tanto no cálculo da potência, quanto no cálculo da taxa de remoção do material. Nesse caso a energia específica pode ser calculada pela Eq. (2):

$$u = \frac{F_c}{h b} \quad (2)$$

Onde F_c é a força de corte, h é a espessura de corte e b é a largura de corte.

1.1. Fatores que Influenciam a Energia Específica

Segundo Shaw (1984), a energia específica é influenciada por uma série de fatores, entre eles a composição química do material da peça, a espessura de corte e o ângulo de saída da ferramenta (cada incremento positivo de 1° no ângulo de saída diminui a energia específica em 1%).

Segundo Rodrigues (2005), a energia específica é sensível a diversos parâmetros inerentes ao processo de usinagem, a saber: o material da peça e da ferramenta, além dos parâmetros de corte. A dureza do material pode influir na energia específica de corte, isto é, quanto maior a dureza, maior o valor de u , porém deve-se ter em mente que materiais de durezas semelhantes podem possuir valores de energia diferentes em função da composição química ou da estrutura cristalina do material. O material da ferramenta pode também interferir nos valores de energia específica, uma vez que altera as condições de aderência e atrito entre o material da peça e a superfície de saída da ferramenta de corte.

Segundo Boothroyd e Knight (1989 apud RODRIGUES, 2005), a energia específica de corte pode variar consideravelmente para um dado material quando se varia a velocidade de corte. Eles afirmam também que para valores elevados de velocidade de corte, a energia tende a se tornar constante. De acordo com Boothroyd e Knight (1989 apud Balogun e Mativenga, 2014) a seleção inadequada das condições de corte pode levar a valores altos de energia específica de corte durante a retificação, enquanto Ghosh (2008) afirma que a energia específica de corte tende a cair com o aumento da profundidade de usinagem. Testes realizados por Balogun e Mativenga (2014) mostram que com a diminuição dos valores de avanço por dente no fresamento, ocorre um aumento no valor da energia específica e também

que a energia específica varia com a espessura do cavaco não deformado. Para valores mais altos de espessura de corte a energia é praticamente constante, já para pequenas espessuras a energia tende a crescer exponencialmente.

Segundo Rodrigues (2005), a geometria da ferramenta também é capaz de variar a energia específica. A variação dos ângulos de saída e de inclinação modifica o valor das forças e, portanto, afeta a energia. A variação do ângulo de folga também tem um papel significativo, uma vez que para ângulos maiores o contato da peça com a ferramenta é menor, reduzindo a energia específica de corte.

Ainda segundo Rodrigues (2005), o fluido de corte também é capaz de alterar os valores de energia específica, uma vez que sua capacidade lubrificante modifica a condição de atrito, alterando o valor da energia consumida. Quanto maior a penetração do fluido na interface cavaco ferramenta, menor deve ser o valor da energia específica em função do efeito lubrificante do fluido e da queda das forças de usinagem. Estudos realizados por Kuram et al. (2013) mostraram que a energia específica depende consideravelmente do tipo de fluido utilizado. Para o caso em que foi utilizado óleo a base de canola, a energia específica foi 50% da energia consumida com o óleo de girassol. Outro trabalho que avaliou a influência das condições de lubrificação na energia foi o de Kalita et al. (2012), que observaram que a maior energia consumida ocorreu para o fluido a base de água, apresentando uma pequena redução quando se utiliza mínima quantidade de lubrificação (MQL). A tendência de queda se manteve com a utilização de nano-aditivos ao fluido.

Considerando a importância de se definir uma condição de usinagem mais econômica, buscou-se neste trabalho desenvolver um equipamento que fosse capaz de avaliar o consumo de energia durante a usinagem para uma determinada combinação de parâmetros. O objetivo é proporcionar uma condição que se assemelhe de forma mais adequada a condição real de usinagem. Sendo assim, uma máquina de ensaio de impacto Gunt Hamburg WP410 foi adaptada para que pudesse utilizar uma ferramenta de corte e realizar a interação entre o corpo de prova e a aresta de corte.

2. METODOLOGIA

Inicialmente, os esforços do trabalho concentraram-se em realizar a adaptação da máquina responsável pela realização dos ensaios. Uma vez adaptada, passou-se a etapa de fabricação dos corpos de prova e, finalmente, à etapa de realização dos ensaios de esclerometria pendular.

2.1. Adaptação da Máquina

A primeira adaptação necessária ao equipamento foi possibilitar o acoplamento de uma ferramenta de corte ao seu pêndulo. Essa etapa foi realizada tendo em mente que boa parte dos porta-ferramentas de tornear disponíveis para utilização tem uma seção transversal de 20 X 20 mm. Considerando esse fator, a geometria do novo pêndulo foi projetada para que, além de possibilitar a colocação da ferramenta de tornear, permitisse que o seu corpo não interferisse na interação da ferramenta de tornear com o corpo de prova. Para isso, o pêndulo foi produzido com cantos arredondados de modo a evitar que alguma parte colidisse com algum obstáculo durante sua trajetória. A forma do pêndulo confeccionado pode ser visualizada na Fig. 1.

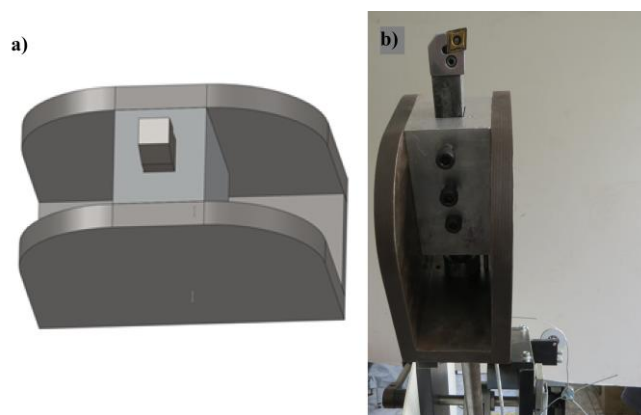


Figura 1. Pêndulo adaptado para fixação da ferramenta de corte: a) desenho b) fotografia.

Após a fabricação do novo pêndulo, foi necessária também a fabricação de uma nova haste para possibilitar a montagem conjunta com o restante da estrutura da máquina. Em seguida foram realizados testes para verificar o funcionamento do equipamento. Para a realização desses testes foi necessário o dimensionamento dos corpos de prova. Esse dimensionamento foi realizado tomando como base o raio da trajetória do pêndulo e a profundidade máxima que a ferramenta deveria atingir. Chegou-se à conclusão de que o corpo de prova deveria possuir um comprimento de 50 mm para que a ferramenta pudesse entrar em contato com ele de forma gradual, evitando grandes impactos.

Durante a fase de testes com os corpos de prova foi percebido que a interação com a ferramenta não ocorria de uma forma que representasse da melhor maneira possível uma condição real de usinagem, visto que tanto a aresta principal quanto a aresta secundária de corte interagiam em toda a trajetória com o corpo de prova. Diante desse fato, decidiu-se

alterar a geometria dos corpos de prova de modo que apenas a aresta principal de corte realizasse majoritariamente o processo de corte. Após a fabricação desses novos corpos de prova foram realizados mais testes, a partir dos quais se concluiu que a trajetória do pêndulo possuía uma oscilação que deslocava a ferramenta, fazendo com que ela perdesse contato com o corpo de prova. Isso ocorreu devido ao contato existente apenas em uma das laterais da ferramenta, de modo que o pêndulo realizava, portanto, a trajetória que oferecia menos resistência. Para limitar a movimentação do pêndulo durante os ensaios, foi implementada uma nova adaptação na máquina para limitar a movimentação lateral na região em que a ferramenta estava em contato com o corpo de prova. Essa limitação na trajetória foi realizada com a colocação de dois mancais de rolamentos, Fig. 2 para restringir a movimentação lateral do pêndulo. Os mancais de rolamento foram utilizados para que ocorresse um contato rolante do pêndulo com a estrutura guia, procurando garantir que a dissipação de energia durante essa interação fosse a menor possível.



Figura 2. Mancais de rolamentos adaptados para controle da trajetória.

Após o ajuste da posição dos rolamentos, pode-se perceber que a trajetória do pendulo já não oscilava tanto quanto anteriormente e que o contato da ferramenta com o corpo de prova ocorria de forma adequada. Percebeu-se, então, a necessidade da fabricação de um dispositivo que permitisse a montagem de corpos de prova para a realização de ensaios de forma mais rápida, já que em todos os testes anteriormente realizados muito tempo era perdido posicionando os corpos de prova adequadamente. Depois de uma avaliação dos demais componentes da máquina e da consideração das dimensões necessárias de um corpo de prova, foi fabricado um dispositivo que permitisse a troca de forma mais ágil. Esse dispositivo está mostrado na Fig. 3.

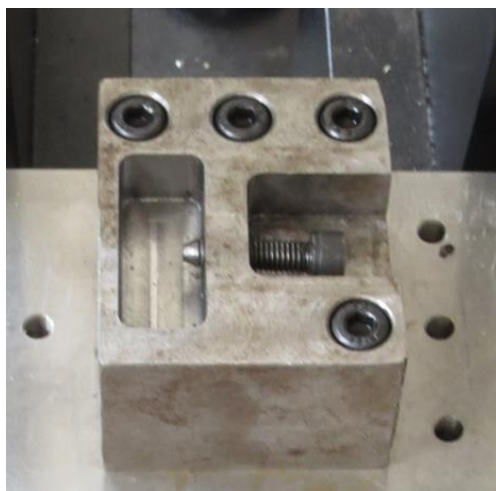


Figura 3. Dispositivo para fixação dos corpos de prova.

Após a verificação da interação adequada entre o corpo de prova e a ferramenta, uma nova série de testes foi realizada para possibilitar a utilização da escala presente na máquina durante os testes de energia. Depois da liberação do pêndulo, sem que ele interagisse com nenhum corpo de prova e utilizando os valores de massa do novo pêndulo, variação de altura entre as posições máxima e mínima e o conceito de conservação da energia, obteve-se uma expressão que transforma os valores indicados na escala do equipamento em valores reais de energia consumida. Considerando que a energia máxima da escala do equipamento representa a energia potencial do martelo e que a energia medida pelo equipamento após a liberação do pêndulo (livre de interações de corte) representa a energia nula em uma escala real, pode-se correlacionar a energia indicada no mostrador do equipamento com a energia real.

O conceito de conservação de energia foi utilizado também para estimar a velocidade de corte durante o ensaio. De acordo com os cálculos realizados, a velocidade de corte atingida pela aresta de corte é de 276 m/mim, compatível com várias combinações de ferramenta e material da peça.

Após estas adaptações, o equipamento estava, portanto, apto a realizar medições de energia consumida para os mais diversos tipos de materiais e ferramentas de tornear. O equipamento, devidamente modificado para a realização dos ensaios pode ser visualizado na Fig. 4.



Figura 4. Equipamento adaptado para ensaios de esclerometria pendular.

2.2. Realização dos testes

Devido ao grande número de fatores que influenciam a energia específica de corte e com o objetivo de facilitar a avaliação da contribuição nos resultados de cada parâmetro modificado, os testes foram realizados com dois materiais diferentes e suas respectivas ferramentas, além de diferentes condições de lubrificação. Os corpos de prova em aço ABNT 4340 e ferro fundido nodular GG30 foram fabricados em um centro de usinagem e padronizados nas dimensões de 10 x 20 x 50 mm.

Para a realização dos testes, os corpos de prova foram colocados no dispositivo mostrado na Fig 3, e o posicionamento da ferramenta de usinagem em relação a esse corpo de prova foi padronizado para todos os testes. Os testes de esclerometria foram realizados pela liberação do pêndulo de uma altura padronizada e a energia específica de corte calculada por meio da variação de alturas e massas dos corpos de prova antes e depois da interação entre ferramenta e corpo de prova. A Fig. 5 mostra um corpo de prova após a realização dos testes, mostrando a região de interação com a ferramenta.



Figura 5. Corpo de prova após o teste.

Os testes para cada material foram realizados primeiramente a seco, depois com o jorro de fluido utilizando o fluido KSO45 a uma concentração de 5% em água e posteriormente MQL com o óleo vegetal Vascomill MMS SE 1 a uma vazão de 65 ml/h e pressão de 6 bar. Foram realizados três testes para cada condição.

Para avaliar a variação de massa dos corpos de prova, eles foram pesados antes e depois de cada teste com a balança Shimadzu modelo AX200 que possui um incremento digital de 0,0001 g. Com os valores de variação de massa e a densidade dos materiais foi determinada a variação volumétrica em cada teste realizado. Finalmente, a energia específica foi calculada então pela razão entre a energia consumida e o volume de material removido.

3. RESULTADOS

Inicialmente serão apresentados os resultados dos testes de esclerometria pendular para o aço ABNT 4340, seguidos dos resultados para o ferro fundido nodular GG30.

3.1. Aço ABNT4340

O comportamento da energia específica para as diferentes condições de lubrificação para os testes realizados com o aço ABNT 4340 pode ser observado na Fig. 6. Percebe-se que a condição de menor energia específica é a usinagem a seco ($2,72 \text{ J/mm}^3$), seguida do MQL ($2,89 \text{ J/mm}^3$) e finalmente pela usinagem com jorro de fluido de corte ($3,17 \text{ J/mm}^3$).

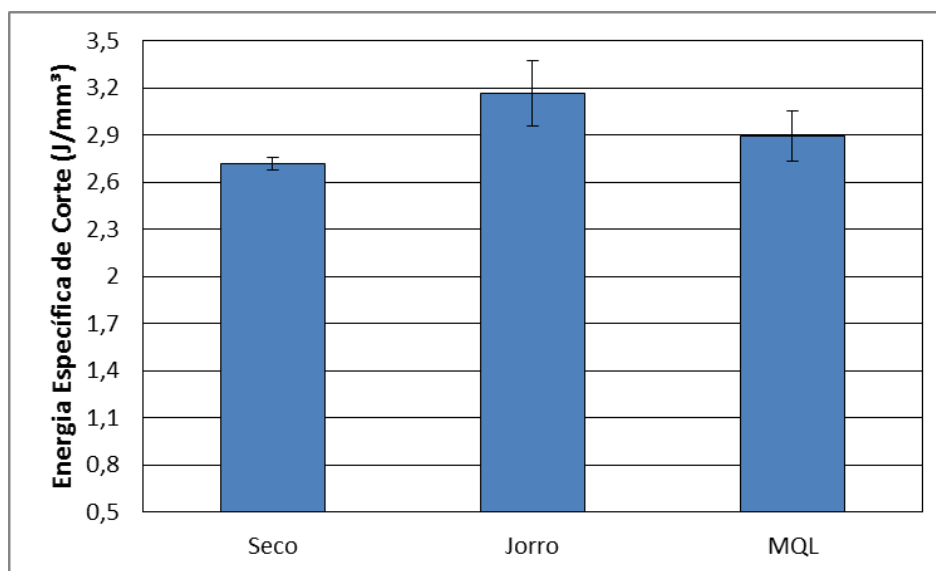


Figura 6. Valores de energia específica para o Aço ABNT 4340.

Os fluidos de corte possuem dentre suas principais funções a lubrificação e a refrigeração, sendo que as propriedades dos fluidos podem fazer com que uma dessas características predomine em relação a outra. De acordo com Sales (1999), quando ocorre a predominância da característica da refrigeração, a energia específica de corte tende a atingir valores maiores. Tal comportamento está de acordo com os valores apresentados no gráfico da Fig. 6, uma vez que no caso da lubrificação com jorro de fluido predomina a característica de refrigeração (principalmente quando comparada ao MQL) e, por sua vez, a energia específica de corte nesta condição de lubrificação é a de maior valor dentre as três condições.

3.2. Ferro Fundido Cinzento GG30

A Fig. 7 mostra o comportamento da energia específica de corte para as diferentes condições de lubrificação nos testes realizados com o ferro fundido cinzento GG30. Percebe-se que a condição de menor energia específica é com a aplicação de MQL ($1,03 \text{ J/mm}^3$), seguida da usinagem com jorro de fluido de corte ($1,08 \text{ J/mm}^3$) e finalmente pela usinagem a seco ($1,17 \text{ J/mm}^3$). Deve-se observar que também nos ensaios com ferro fundido, houve sobreposição dos desvios padrão entre as condições de lubrificação, sugerindo que as diferenças entre as energias específicas de corte para as três condições não são significativas.

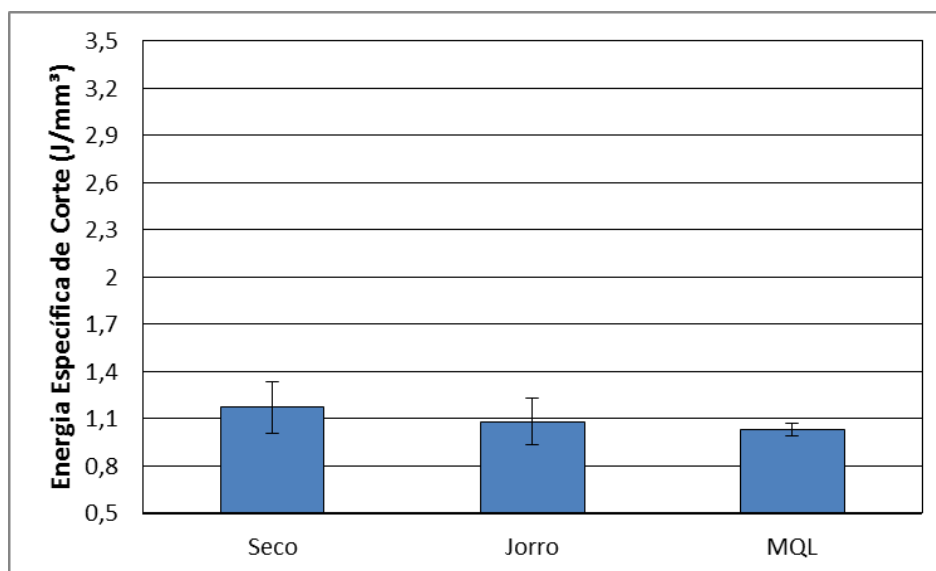


Figura 7. Valores de energia específica para o Ferro Fundido GG30.

Devido à natureza frágil do ferro fundido e ao menor comprimento de contato entre cavaco e superfície de saída da ferramenta, o fluido de corte apresenta maior capacidade de penetração na interface cavaco-ferramenta e contribui para redução do atrito e, consequentemente, da energia específica de corte. Tal efeito é mais evidente quando se utiliza MQL, reconhecido pela superior capacidade de acesso à interface em comparação ao jorro de fluido de corte.

Os valores de energia específica para o aço foram maiores do que os do ferro fundido cinzento sob todas as condições. Uma propriedade que pode ser relacionada a esse comportamento é a dureza. A dureza do aço 4340 foi de 193 HV, enquanto a do ferro fundido foi de 78 HRB que pode ser aproximada por 143 HV. Além disso, o aço, sendo mais dúctil, exige maior deformação plástica e, portanto, um maior consumo de energia devido a essa deformação. O ferro fundido, por sua vez, é um material mais frágil, consumindo maior parte da energia para o cisalhamento, resultando em uma menor energia específica. Outra característica dos materiais que pode ser utilizada para explicar a variação de energia é a resistência ao cisalhamento, já que é necessária a ocorrência de cisalhamento para a formação do cavaco. O aço possui uma maior resistência ao cisalhamento do que o ferro fundido, demandando, portanto, uma maior energia para a formação do cavaco. Sendo assim, a energia específica para o aço tende a ser maior do que para o ferro fundido.

4. CONCLUSÃO

Após a adaptação da máquina de impacto e a realização de ensaios de esclerometria pendular empregando ferramentas de corte, pode-se concluir que:

- O equipamento adaptado e o procedimento realizado são capazes de avaliar a energia específica de corte e de detectar variações decorrentes da modificação do material da peça (maior energia específica de corte para o aço ABNT 4340 em comparação com o ferro fundido cinzento GG30) e do meio lubrificador.
- A energia específica de corte do aço ABNT 4340 foi maior para os ensaios com jorro de fluido de corte, seguido da aplicação de mínima quantidade de lubrificante e pelo corte a seco. No caso do ferro fundido cinzento GG30, a energia específica de corte foi maior para o corte a seco, seguido da aplicação de jorro de fluido de corte e de mínima quantidade de lubrificante.
- A diferença de comportamento em função do meio lubrificador se deve à ductilidade/fragilidade dos materiais testados, ou seja, no caso do aço ABNT 4340, sua ductilidade promove um maior comprimento de contato entre cavaco e ferramenta, dificultando o acesso do fluido de corte, o que não ocorre para o ferro fundido cinzento GG30. Neste caso, o maior acesso à interface do fluido de corte aplicado na forma de MQL propicia uma redução na energia específica de corte.

5. REFERÊNCIAS

- Balogun, V.A., Mativenga, P.T., 2014, "Impact of un-deformed chip thickness on specific energy in mechanical machining processes", Journal of Cleaner Production
- Boothroyd, G.; Knight, W. A. Mechanics of metal cutting. In: Fundamentals of machining and machine tools. 2ed. EUA: Marcel Dekker, 1989. p. 73-108.
- Ernest P. De Garmo, J. T. Black, Ronald A. Kohser. DeGarmo's Materials and Processes in Manufacturing 11.ed. John Wiley & Sons, 2011 p. 547-549.

- Ghosh, S., Chattopadhyay, A.B., Paul, S., 2008. Modelling of specific energy requirement during high-efficiency deep grinding. *Int. J. Mach. Tools Manufact.* 48, p. 1242 - 1253.
- Kuram, E., Ozcelik, B., Bayramoglu, M., Demirbas, E., Simsek, B.T., 2013. Optimization of cutting fluids and cutting parameters during end milling by using D-optimal design of experiments. *J. Clean. Prod.* 42, p. 159-166.
- Lucca D. A., Rhorer R. L., Komanduri R. Energy Dissipation in the Ultraprecision Machining of Copper. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 01/1991.
- Parash Kalita, Ajay P. Malshea, S. Arun Kumar, V.G. Yoganath, T. Gurumurthy. Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication. *Journal of Manufacturing Processes* 14 (2012) p. 160–166.
- Qiulian, W., Fei, L., Congbo, L., 2013. An integrated method for assessing the energy efficiency of machining workshop. *J. Clean. Prod.* 52, p. 122-133.
- Rodrigues, A. R. “Estudo da geometria de arestas de corte aplicadas em usinagem com altas velocidades de corte”, São Carlos, Universidade de São Paulo, 2005.
- Sales, Wisley Falco. Determinação das características refrigerantes e lubrificantes de fluidos de corte. Tese de Doutorado. Uberlândia. Universidade Federal de Uberlândia, 1999.
- Shaw, M.C. Introduction In: *Principles of Abrasive Processing* 1. Ed. New York: Oxford University Press, 1995. Cap 1 p 1-12.
- Shaw, M. C. *Metal cutting principles*. New York: Oxford Science Publications, 1984.
- Trent, E.M. *Metal Cutting*. 2. Ed. London: Butterworths & Co, 1985.
- Y.H. Ren, B. Zhang, Z.X. Zhou. Specific energy in grinding of tungsten carbides of various grain sizes. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 58 (2009) p. 299–302.

6. RESPONSABILIDADE AUTORAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo deste trabalho.

DEVELOPMENT OF AN EQUIPMENT TO MEASURE THE SPECIFIC CUTTING ENERGY

Augusto Moura Martins, augusto.mmartins@yahoo.com.br

Rodrigo Garcia Ribeiro, rodrigogr_23@hotmail.com

Rodrigo Cardoso de Menezes, menezes.eng@hotmail.com

Alexandre Mendes Abrão, abrao@ufmg.br

Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte MG, CEP: 31270-901

Abstract. *Energy consumption must always be considered, especially when taking into account the costs involved in production. The determination of the machining condition responsible for lower energy consumption can be advantageous and lead to a final product with superior properties. In addition to that, knowing the process characteristics such as cutting forces and power can help to determine which kind of equipment is best suited to perform the necessary activities and allows scaling the loads the equipment must withstand. A way to evaluate the energy involved in machining processes is using the specific cutting energy, which is the energy consumed in chip formation. The determination of this parameter can therefore be useful for design and equipment selection. In order to determine the specific cutting energy, an equipment has been developed from a Charpy testing machine in order to allow the fixture of the cutting tool in the pendulum. The machine works based on the energy conservation phenomenon and is capable of producing an interaction between the cutting tool and a properly sized specimen to produce chips which mass is then determined with a precision scale. Tests were performed with two different materials (AISI 4340 steel and GG30 grey cast iron) using the tools recommended for each work material as well as different conditions of cooling and lubrication (dry and wet cutting and minimum quantity lubrication). The results showed that the equipment works properly. In the case of AISI 4340 steel, the tests showed that lower specific energy was consumed when dry cutting (2.72 J/mm^3), followed by cutting under MQL (2.89 J/mm^3) and finally by wet cutting (3.17 J/mm^3). In the tests with GG30 grey cast iron MQL presented the lowest specific cutting energy (1.03 J/mm^3), followed by wet cutting (1.08 J/mm^3) and dry cutting (1.17 J/mm^3).*

Keywords: *machining, specific cutting energy, AISI 4340 steel, grey cast iron*