

CONEM 2016
CONGRESSO NACIONAL DE
ENGENHARIA MECÂNICA

21-25
AGOSTO DE 2016
FORTALEZA - CEARÁ

INVESTIGAÇÃO DOS ESFORÇOS DE USINAGEM DURANTE O FRESAMENTO DE FERRO FUNDIDO NODULAR PRODUZIDO POR FUNDIÇÃO CONTÍNUA

José Aécio Gomes de Sousa, aeciosousa@yahoo.com.br¹
Álison Rocha Machado, alisonm@mecanica.ufu.br²

¹Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina, Av. dos Pioneiros, 3131, Londrina, PR, 86036-370, Brasil;

²Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG 38.400-089, Brasil.

Resumo: Este trabalho avaliou o comportamento dos esforços de usinagem ao longo da seção transversal de barras retangulares de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua por meio da operação de fresamento. Os parâmetros avaliadores nesses ensaios foi a força de usinagem e a potência de usinagem. Foi verificado maiores níveis de esforços nas ferramentas que usinaram a região do núcleo em relação às ferramentas que usinaram a região da zona intermediária e da periferia. A microestrutura com matriz perlítica e a resistência mecânica foram que mais contribuiu para as maiores forças e potência encontrados nesta região.

Palavras-chave: ferro fundido nodular, fresamento, fundição contínua

1. INTRODUÇÃO

É notável comumente, na indústria, o aumento na demanda pela busca de novos materiais. Neste sentido, essas buscas estão relacionadas com o custo e a relação “resistência/peso”. No esforço de alcançar estas exigências empregam-se novos materiais com resistência similar, mas com baixa densidade ou aumenta-se a resistência de materiais tradicionais por meio da adição de elementos de liga ou por tratamentos térmicos (Petry, 1999). A escolha geralmente depende de propriedades do material, tais como propriedades mecânicas e térmicas ou condições de contorno como custos de manufatura, reciclagem, aceitação do usuário e usinabilidade (Klocke *et al.*, 2007). Nesta lista, englobam-se os ferros fundidos que, quase sempre, oferecem boa usinabilidade e baixo custo de produção (Barbosa *et al.*, 2007).

Juntamente com os aços, os ferros fundidos são os materiais mais utilizados pela indústria, sendo aplicado em diversos setores, não só devido às suas características inerentes, como também sua imensa versatilidade (Dawson e Schoroeder, 2004). Nos últimos anos o desenvolvimento em pesquisas sobre os ferros fundidos colaboraram para que este material oferecesse uma boa concorrência em relação aos aços (Grzesik *et al.*, 2009).

A substituição do aço carbono pelas barras de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua tem-se mostrado uma excelente alternativa para as empresas que desejam obter menores custos de fabricação, produzindo um maior número de peças por hora-máquina com menos custo de ferramentas (Feres, 2011).

A grande aplicação dos ferros fundidos nodulares na indústria dá origem à necessidade de um aprimoramento ainda maior em pesquisas e inovações, que tem o objetivo de melhor entender o desempenho destes materiais perante aos diversos tipos de processos de fabricação. Estes materiais têm como característica a boa resistência mecânica, ductilidade e tenacidade maiores que o cinzento, devido à forma de nódulos em que a grafita se apresenta, mantendo a continuidade da matriz, gerando, assim, uma menor concentração de tensões (Ghani *et al.*, 2002).

Os ferros fundidos nodulares têm sido influenciados por um número de desenvolvimentos técnicos que tem resultado nas novas oportunidades de negócios para as indústrias de fundição. Estes materiais oferecem uma gama de propriedades que não são encontrados nos outros ferros fundidos, como resistência elevada ao desgaste, resistência à fadiga, ductilidade e tenacidade. Devido a essas propriedades versáteis, estes materiais têm tomado grande parte do mercado dos aços de baixa resistência, tornando-se adequados na fabricação de virabrequim, pistões, engrenagens, tubos e matrizes (Toh, 2004).

A melhor usinabilidade do ferro fundido nodular se dá pela presença de carbono livre em forma de grafita, o que facilita a quebra do cavaco, bem como atua como lubrificante na interface com a ferramenta de corte. A presença de grafita também é responsável pela menor densidade (10 % menor que a do aço), pela maior condutividade térmica e pela maior absorção de vibração (menor ruído). O ferro fundido nodular produzido por fundição contínua têm características mecânicas similares às do aço, com as vantagens de ser mais leve e apresentar melhor usinabilidade (Guesser, 2009).

O ferro fundido nodular resultante da fundição contínua é mais longo do que o molde, possibilitando, assim, a fabricação de barras nas mais variadas geometrias, e que, posteriormente, poderão ser usinadas. Entretanto, o processo de fabricação produz uma heterogeneidade ao longo da seção transversal da peça fabricada, devido a velocidades de resfriamentos distintas do núcleo para a periferia, o que pode ocasionar diferentes níveis de propriedades e da usinabilidade ao longo da seção transversal do material.

As principais variáveis que determinam a microestrutura dos ferros fundidos nodulares produzido por fundição contínua são a taxa de resfriamento, a composição química e o processo de fabricação. A interação entre as variáveis determinam o comportamento mecânico deste material (Angelo Junior, 2003). Geralmente as barras com seções transversais maiores podem apresentar variações de propriedades ao longo do diâmetro, o que pode comprometer a sua funcionalidade em equipamentos mecânicos.

Assim, a carência de pesquisas publicadas sobre usinagem de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua, principalmente a variação de usinabilidade ao longo da seção transversal de barras fundidas, motivou a realização deste trabalho.

O objetivo geral é verificar o comportamento dos esforços de usinagem ao longo da seção transversal de barras de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua durante a operação de fresamento. Para tanto, as seções transversais das barras foram divididas em setores: periferia, região intermediária e núcleo.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

2.1 Material Usinado

O material dos corpos de provas empregado neste trabalho foi o ferro fundido nodular FE 45012, produzido por fundição contínua, no formato retangular (610 mm x 410 mm) com 40 mm de espessura. Este material é empregado em componentes de máquinas sujeitos a choques mecânicos, engrenagens, porcas, eixos e componentes hidráulicos que operam em alta pressão (êmbolos, guias, tampas, cabeçotes de cilindro, camisas para injetoras, válvulas hidráulicas coquilhas, dentre outros). Todas as barras foram fornecidas pela empresa brasileira Tupy S.A.

A composição química das barras fundidas foi determinada por espectrometria de emissão. Durante a fabricação, corpos de prova (“moeda coquilhada”) foram retirados do metal líquido após os tratamentos de nodularização e inoculação, sendo, posteriormente, vazados em uma coilha de cobre refrigerada com água. Em seguida, esta moeda foi retificada e analisada em um espectrômetro de emissão óptica da marca ARL.

Nesta análise foi possível observar que os teores de C e Si variaram, decrescendo de 3,6 %C e 3,0 %Si para 3,3 %C e 2,6 %Si. Também foi possível observar que o material utilizado neste trabalho não possui elementos de liga perlitizantes em teores significativos, apresentando-os, apenas, como teores residuais.

A medição da dureza foi realizada ao longo da seção transversal de cada corpo de prova. Cada amostra foi separada por regiões (periferia, zona intermediária e núcleo), onde cada região possuía áreas iguais da seção transversal, procedimento adotado para classificar essas regiões. Em seguida, foram escolhidas, aleatoriamente, três amostras para ensaio de dureza.

As peças foram cortadas transversalmente e, posteriormente, passaram pelo processo de torneamento de faceamento. Ambas as operações foram realizadas com a presença de fluido refrigerante para evitar possíveis alterações microestruturais em virtude do aumento da temperatura na região investigada e tiveram como objetivo manter as superfícies paralelas entre si. Este procedimento foi semelhante ao adotado no trabalho de Zipperian (2012).

Depois de seccionadas, as amostras foram separadas e codificadas para ensaios de dureza *Brinell*. As medições partiram do núcleo em direção a periferia de cada amostra, com cada ponto espaçado de 4 mm. Esse espaçamento teve o objetivo de evitar possíveis interações entre as identações (Pace Technologies, 2012). Os ensaios de dureza *Brinell* foram efetuados em Durômetro Universal da marca *Wolpert*, utilizando-se uma esfera de Ø 5 mm e carga de 750 kgf (ISO 6507-1, 2008). Para garantir boa impressão e prevenir excessiva recuperação elástica do material sob a carga exercida, os ensaios foram conduzidos por aproximadamente 30 s, sobre a superfície testada (Schaeffer et al., 2006; Vilas Boas et al., 2007; Dos Santos Junior, 2012).

A Figura 1 apresenta as regiões do corpo de prova e os seus respectivos pontos onde foram medidas as durezas ao longo da seção transversal de cada amostra. Nessas amostras foram obtidos 50 pontos (11 pontos na periferia, 14 pontos na zona intermediária e 25 pontos na região do núcleo).

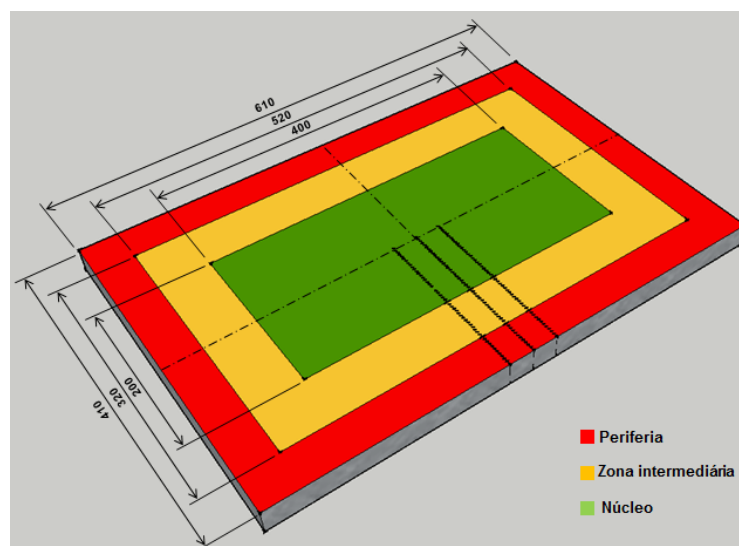


Figura 1 – Direção da sequência dos pontos de medição da dureza

A Tabela 1 apresenta os resultados de dureza média realizados ao longo seção transversal encontrados para cada região das amostras. Observa-se uma diferença de dureza considerável do núcleo em relação à zona intermediária e a periferia.

Tabela 1 – Resultados da dureza ao longo das regiões analisadas

Região	Dureza Média (HB)	Desvio Padrão
Periferia	162,4	1,26
Zona Intermediária	179,4	2,22
Núcleo	183,6	2,54

A Figura 2 apresenta as microestruturas observadas em cada região das amostras analisadas após serem atacadas com 3% de nital. Observa-se que as microestruturas do núcleo e da zona intermediária são muito parecidas, compostas de matriz ferrítica e nódulos de grafita. Na zona periférica, observa-se a matriz é composta praticamente ferrita com nódulos menores de grafita.

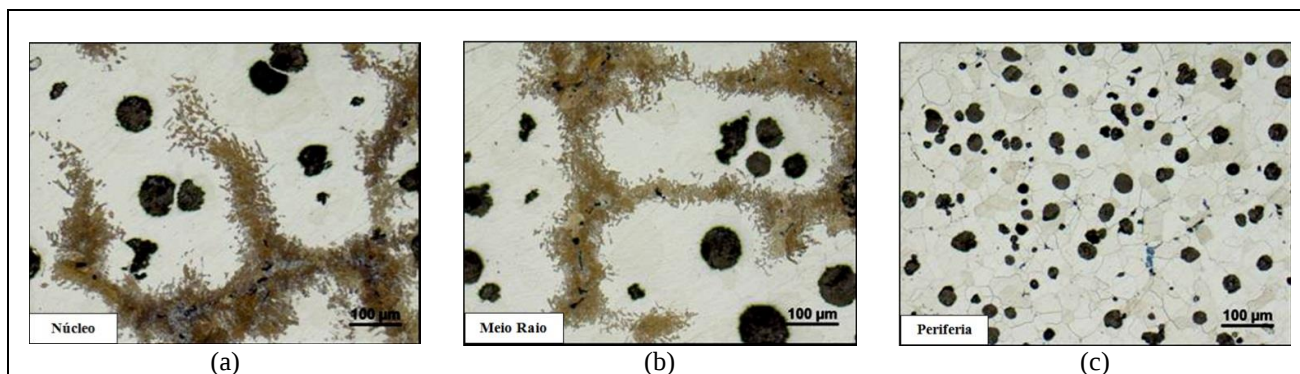


Figura 2 – Microestruturas das barras analisadas – Ataque em Nital 3%; (a) Núcleo – Presença de grafita com matriz ferrítica/perlítica, (b) Zona intermediária – Presença de grafita com matriz ferrítica/perlítica, (c) Periferia – Presença de grafita com matriz ferrítica

2.2 Ferramentas de Corte

Para os experimentos em que o objetivo foi à obtenção dos esforços de usinagem (torque e potência de usinagem) na operação de fresamento de topo, empregou-se a fresa maciça de metal duro, classe 'K', revestida de TiAlN, com designação FX-MG-EDS e diâmetro de 10 mm, fabricada pela OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda (Fig. 3).

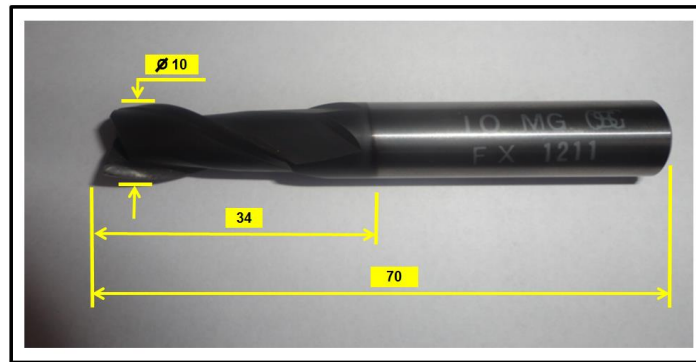


Figura 3 – Fresa helicoidal FX-MG-EDS, Φ 10 mm, revestida de TiAlN

2.3 Máquina-Ferramenta

Os ensaios foram realizados no Centro de Usinagem Vertical CNC da linha Discovery, modelo 760, com comando numérico Siemens 810, no Laboratório de Ensaio e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (Fig. 4). A potência do motor principal e a potência total instalada são de 9 kW e 15 kVA, respectivamente. Esta máquina, fabricada pela Indústria Romi S.A, possui rotação máxima no eixo-árvore de 10.000 rpm.



Figura 4 – Centro de usinagem vertical CNC utilizado nos testes de fresamento

2.4 Metodologia

A medição do torque durante o processo de fresamento foi realizada através do emprego de um dinamômetro rotativo 'Kistler' instrument AG', modelo 9123, que foi fixado no eixo árvore da máquina-ferramenta (Fig. 5).

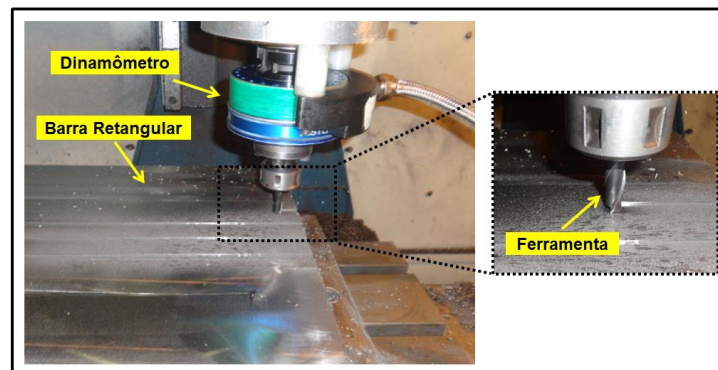


Figura 5 – Montagem do dinamômetro rotativo no interior do centro de usinagem

De modo a verificar o comportamento desta grandeza nas amostras retangulares, foram usinados canais ao longo de cada região das amostras (Fig. 6).

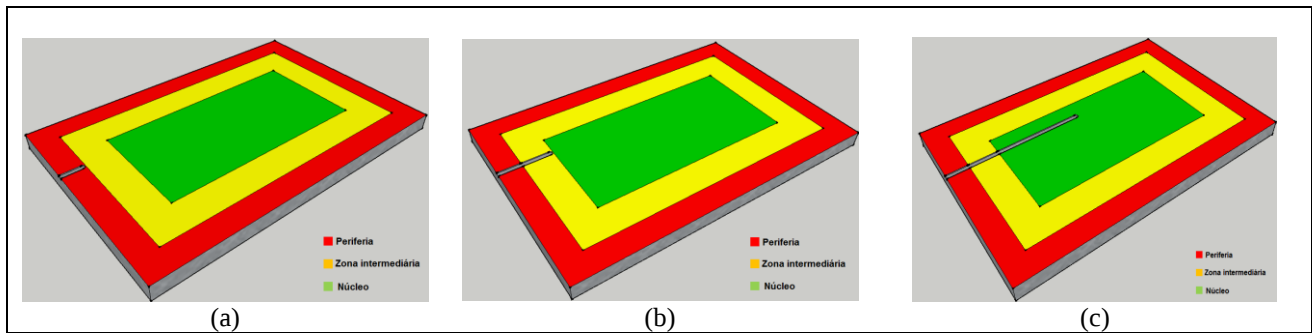


Figura 6 – Simulação da usinagem do canal de fresamento para obtenção dos esforços de usinagem; (a) Periferia; (b) Zona Intermediária; (c) Núcleo

A usinagem destes canais tem como objetivo analisar a existência de possíveis alterações de esforços de usinagem entre as regiões analisadas. Para cada região foram coletados sinais de força e torque durante um período de três segundos. A Figura 4-a apresenta a análise dos esforços de usinagem realizada na região da periferia. Após a usinagem desta região, a ferramenta era retirada e, posteriormente, era feita o monitoramento do nível de desgaste. Caso o desgaste de flanco médio (VB_B) ultrapassasse o valor de 0,1 mm, a ferramenta era substituída por uma nova. Esta análise também foi realizada durante a usinagem da região da zona intermediária (Fig. 4-b) e da região do núcleo (Figura 4-c). Para cada região, os dados de torque eram obtidos por 3s em cada região.

De modo a obter um maior aproveitamento do corpo de prova, foram usinados oito canais ao longo da seção transversal. De modo a garantir maior confiabilidade dos resultados obtidos, foram realizados, ao longo de todos os experimentos, um teste e sete réplicas. A Figura 7 apresenta os canais na seção transversal da amostra, assim como suas respectivas dimensões.

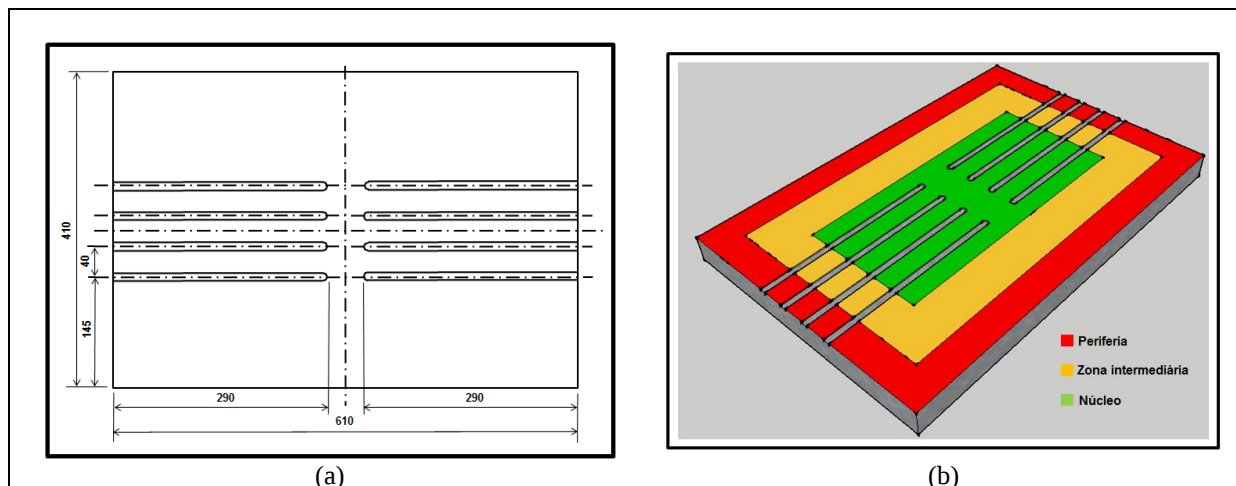


Figura 7 – Esquema dos canais de fresamento para obtenção dos esforços de usinagem. (a) Dimensões, (b) Perspectiva

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

As tendências dos resultados de momento torçor, que foi utilizado como grandeza para medição dos esforços durante a usinagem das amostras retangulares, apresentou um aumento significativo quando se deslocou da região do núcleo para a periferia.

A Figura 8 apresenta o comportamento das regiões das amostras retangulares para os diferentes parâmetros de velocidade de corte e avanço empregados durante os experimentos. Esses resultados são referentes à média de três repetições da medição efetiva da grandeza analisada.

Em todos os pares de parâmetros adotados, a região do núcleo sempre apresentou maiores valores de momento torçor. Esse comportamento pode ser explicado pela maior dureza e resistência a tração da região da periferia em relação à zona intermediária e a região do núcleo.

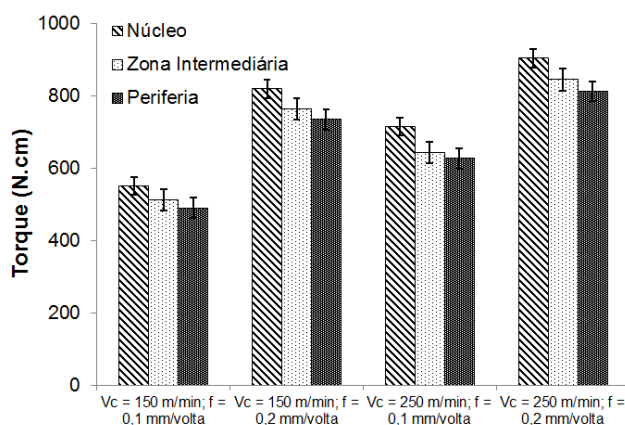


Figura 8 – Comportamento do torque ao longo das regiões das amostras retangulares

A Tabela 2 apresenta a diferença (aumento/redução) percentual média e estatística do torque entre as regiões das amostras retangulares para os diversos parâmetros de usinagem empregados nos experimentos. Note que a comparação realizada entre a região do núcleo e a região da periferia, quando usinado com velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/dente, foi a que apresentou maior diferença percentual (redução de 12,39 %). Por outro lado, a comparação da força de usinagem entre as regiões da zona intermediária e da periferia, quando usinado com os mesmos parâmetros de usinagem, foi a que apresentou menor diferença percentual (redução de 2,61 %).

Tabela 2 – Diferença percentual média e estatística do momento torçor para as amostras retangulares

Velocidade de Corte (m/min)	Avanço (mm/volta)	Comparações	Diferença Média Percentual (%)	p-value
150	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 6,99	0,1498
		Núcleo → Periferia	- 10,98	0,0491
		Zona Intermediária → Periferia	- 4,29	0,3677
150	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 6,76	0,0627
		Núcleo → Periferia	- 10,25	0,0179
		Zona Intermediária → Periferia	- 3,73	0,2578
250	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 10,04	0,0294
		Núcleo → Periferia	- 12,39	0,0149
		Zona Intermediária → Periferia	- 2,61	0,4801
250	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 6,46	0,0542
		Núcleo → Periferia	- 10,04	0,0138
		Zona Intermediária → Periferia	- 3,82	0,2098

Esta tabela também apresenta a comparação entre as regiões para o torque, utilizando a metodologia estatística de comparação de 2 tratamentos, com confiabilidade de 95%. Os valores de p-value < 0,05 mostram que os resultados obtidos apresentam diferenças significativas. A comparação do momento torçor do núcleo com a periferia mostrou diferença estatística significativa em todas as condições de corte usadas (com valores de p-value de 0,0491; 0,0179; 0,0149 e 0,0138, respectivamente). A comparação da região do núcleo para a zona intermediária, para a velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/dente também apresentou diferença estatística significativa (p-value = 0,0294). Por outro lado, se fosse adotado um nível de confiabilidade de 90 %, dois outros resultados das comparações apresentariam diferenças significativas (comparação do núcleo com a zona intermediária, para a velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,2 mm/dente, onde p-value = 0,0627, e a comparação do núcleo com a zona intermediária, para a velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,2 mm/dente, onde p-value = 0,0542).

4. CONCLUSÃO

O ferro fundido nodular FE45012 apresentou uma tendência de redução da força de avanço quando se deslocou do centro da amostra em direção à periferia (núcleo → zona intermediária → periferia).

De forma geral, pode-se concluir que a região da periferia apresentou menores esforços de usinagem, em comparação às regiões da zona intermediária e do núcleo. A menor resistência mecânica e dureza desta região, proporcionadas pela matriz ferrítica garantiram estes resultados, embora com maior ductilidade.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UTFPR, Campus Londrina, pelo o apoio financeiro. São também extremamente gratos à Tupy Fundições pelo material fornecido.

6. REFERÊNCIAS

- ANGELO JUNIOR, E. C. A., 2003, “Caracterização de ferro fundido nodular obtido por fundição contínua”, Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, PUC, Curitiba, PR;
- Barbosa, P. A.; Costa, E. S.; Machado, A. R., 2007, “Usinabilidade do ferro fundido austemperado e nodular perlítico em furação”, 17º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia;
- Feres, F., 2011, “Ferro fundido nodular pode substituir o aço – Tendências e oportunidades”, O mundo da Usinagem, v 6, p 35 – 36;
- Ghani, A. K., Choudhury, I. A., Husni, G., 2002, “Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool”, Journal of Materials Processing Technology, v 127, p 17 – 22;
- Grzesik, W., Rech, J., Zak, K., Claudin, C., 2009, “Machining performance of pearlitic – ferritic nodular cast iron with coated carbide and silicon nitride ceramic tools”, International Journal of Machine Tools & Manufacture, v 49, p 125 – 133;
- Guesser, W. L., 2009, “Propriedades mecânicas dos ferros fundidos”, Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, v 1, p 309;
- Klocke, F., Klöppe, C., Lung, D., Essig, C., 2007, “Fundamental wear mechanisms when machining austempered ductile iron (ADI)”, CIRP vol. 56, p 73-76;
- Pace Technologies, 2012, “Metallographic Preparation”, Disponível em: <www.metallographic.com/Etchants/>, Acesso em novembro de 2012;
- Petry, C. C. M., 1999, “Avaliação das propriedades de impacto e dos mecanismos de fratura de ferros fundidos nodulares ferríticos”, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre – RS;
- Schaeffer, L.; De Lima, D. R. S.; Yurgel, C. C., 2006, “Study of microstructure and hardness of materials”, In: Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais, Foz do Iguaçu, PR;
- Toh, C. K., 2004, “Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel”, Mater Design; v 25, p 41 – 50;
- Zipperian, D. C., 2012, “Metallographic specimen preparation basics”, Disponível em: <www.metallographic.com/Basics.htm>, Acesso em novembro de 2012.

7. RESPONSABILIDADE AUTURAL

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo das informações contidas neste artigo.

MACHINING DURING IRON MILLING CAST NODULAR PRODUCED BY CONTINUOUS CASTING

José Aécio Gomes de Sousa, aeciosousa@yahoo.com.br¹

Álison Rocha Machado, alisonm@mecanica.ufu.br²

¹Federal Technological University of Parana, Av. dos Pioneiros, 3131, Londrina, PR, 86036-370, Brazil;

²Institution and address for third author Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, Av. Joao Naves de Avila, 2121, Uberlandia, MG 38.400-089, Brazil

Abstract. *This study evaluates the behavior of machining forces along the cross section rectangular bars of nodular cast iron produced by continuous casting by means of the milling operation. Evaluators parameters in these trials was the strength of machining and machining power. It has been found greater levels of effort in the tools usinaram the core region regarding the tools usinaram the region of the intermediate zone and the periphery. The microstructure with pearlite matrix and the mechanical strength were that contributed to the larger forces and power found in this region.*

Keywords: *cast nodular, milling, continuous casting*