

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO NODULAR NOS ESFORÇOS DE USINAGEM DURANTE O TORNEAMENTO

José Aécio Gomes de Sousa, josesousa@utfpr.edu.br¹

Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br^{2,3}

Álison Rocha Machado, alissonr.machado@gmail.com^{4,5}

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

²Faculdade de Engenharia de Joinville, Universidade do Estado de Santa Catarina, Campus Universitário Prof. Avelino Marcante - Bairro Zona Industrial Norte - Joinville - SC - Brasil

³Tupy S.A., Rua Albano Schmidt, 3400 - Comasa, Joinville - SC

⁴Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG 38.400-089, Brasil.

⁵Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Av. Imaculada Conceição 1155, Prado Velho Curitiba/PR, CEP: 80.215-901

Resumo: Os ferros fundidos nodulares possuem características importantes que permitem, em muitas aplicações, substituir tecnicamente os aços. Barras longas de ferro fundido nodulares são produzidas por grandes matrizes que geram barras com enormes seções transversais. Ao longo dessas seções podem ocorrer variação nas propriedades e na microestrutura do material, o que implica em variação da usinabilidade ao longo das enormes seções. Os esforços de usinagem são um importante indicativo do desempenho no processo, podendo inclusive ser utilizados para auxiliarem no monitoramento do desgaste da ferramenta de corte. Este trabalho avaliou o comportamento dos esforços de usinagem ao longo da seção transversal de barras circulares de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua por meio da operação de torneamento. Os parâmetros avaliadores nesses ensaios foram as componentes da força de usinagem. Foram verificados maiores níveis de forças nas ferramentas que usinaram a região do núcleo em relação às ferramentas que usinaram a zona intermediária e a periferia. A microestrutura com matriz perlítica, a dureza e a resistência mecânica foram os que mais contribuíram para as maiores forças de usinagem encontrados nesta região.

Palavras-chave: esforços de usinagem, torneamento, ferro fundido nodular, fundição contínua

1. INTRODUÇÃO

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 ferro fundido 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). A Figura 1a apresenta, de forma esquemática, o processo de fundição contínua.

Segundo Guesser (2009), a boa 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.

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. 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

(Figura 1b), o que pode ocasionar diferentes níveis de propriedades e, conseqüentemente, 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). Assim, geralmente as barras com seções transversais maiores podem apresentar maiores variações de microestrutura e propriedades ao longo do diâmetro, o que pode comprometer a sua funcionalidade em equipamentos mecânicos.

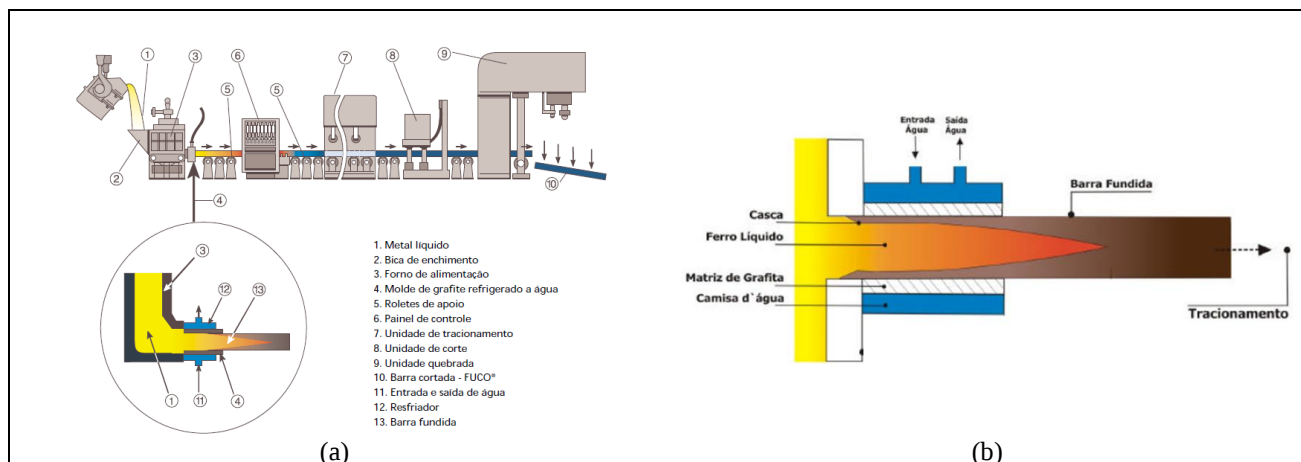


Figura 1 – (a) Processo de fundição contínua (FUCO, 1998); (b) Gradiente de temperatura gerado durante a confecção da barra (ANGELO JUNIOR, 2003)

O objetivo deste trabalho foi verificar o comportamento dos esforços de usinagem ao longo da seção transversal de barras de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua durante o torneamento cilíndrico. Para tanto, as seções transversais das barras foram divididas em 3 setores: periferia, região intermediária e núcleo. Desta forma foi verificada a correlação das variáveis que controlam a usinabilidade com as respectivas microestruturas e propriedades mecânicas dos diversos setores.

2. MÉTODO EXPERIMENTAL

O material dos corpos de provas empregado neste trabalho foi o ferro fundido nodular *FE 45012*, produzido por fundição contínua, com diâmetros de 53 mm, 156 mm e 203 mm. Todas as barras foram fornecidas pela Tupy S.A. 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).

A composição química das barras fundidas foi determinada por espectrometria de emissão de raio X. 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 coquilha 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 de acordo com o diâmetro das bitolas, 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, 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) através da igualdade das áreas das regiões na seção transversal. Em seguida, foram escolhidas, aleatoriamente, três amostras para medição da 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 foram realizadas partindo-se radialmente do núcleo em direção a periferia de cada amostra em raios perfazendo 120°, com cada ponto espaçado de 4 mm um do outro. Esse espaçamento teve o objetivo de evitar possíveis interações entre as indentações (PACE TECHNOLOGIES, 2012). Os ensaios de dureza Brinell foram efetuados em um 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 2 apresenta as regiões do corpo de prova e os seus respectivos pontos onde foram realizadas as medições da dureza ao longo da seção transversal de cada amostra.

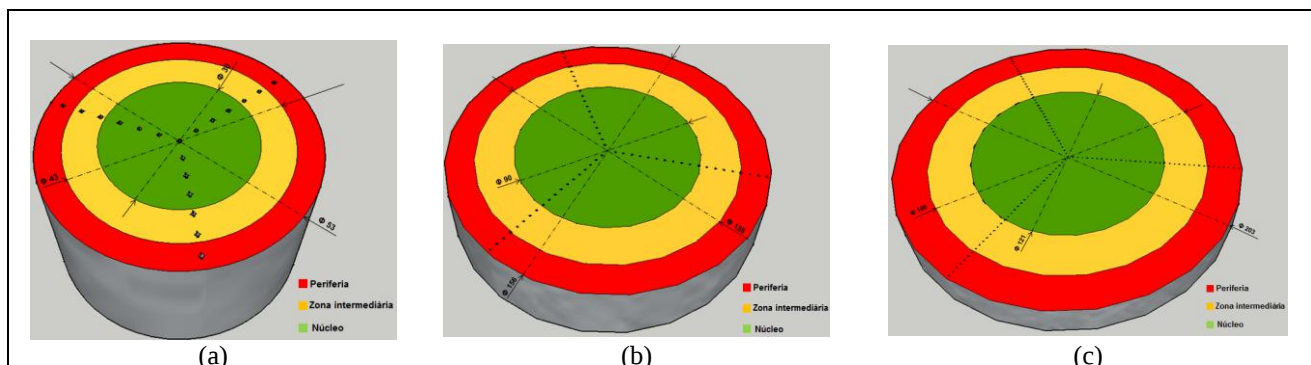


Figura 2 – Direção da sequência dos pontos de medição da dureza; (a) Amostra circular com 53 mm; (b) Amostra circular com 156 mm; (c) Amostra circular com 203 mm

A Tab. 1 apresenta os resultados dos ensaios de dureza realizados ao longo seção transversal das regiões. Verifica-se que a dureza cresce da periferia em direção ao núcleo em valores ligeiramente menores para as bitolas maiores.

Tabela 1 - Resultados dos ensaios de dureza realizados ao longo seção transversal de cada região das amostras.

Amostra	Região	Dureza Média (HB)	Desvio Padrão
$\Phi = 53 \text{ mm}$	Periferia	181,3	2,16
	Zona Intermediária	195,0	1,14
	Núcleo	197,5	2,74
$\Phi = 156 \text{ mm}$	Periferia	176,0	2,74
	Zona Intermediária	195,7	6,10
	Núcleo	196,0	2,76
$\Phi = 203 \text{ mm}$	Periferia	166,6	2,73
	Zona Intermediária	180,0	1,75
	Núcleo	181,0	2,98

Para a análise da microestrutura, as amostras foram, inicialmente, seccionadas em aparelho *Discotom*, da marca Struers, com disco abrasivo *04TRE Struers*. Em seguida, foram lixadas com lixas d'água nas granulometrias #320, #400, #600 e #1200 mesh, com cruzamento perpendicular das trilhas do movimento de lixamento a cada troca de granulometria, polidas com pastas adiamantadas de 3 μm e atacadas com o reativo de Nital à 3% por 5 segundos, conforme Agarwal et al. (2003) e Schaeffer et al. (2006) recomendam. As fotografias foram adquiridas com uma câmara *cyber-shot* da SONY, feitas em um microdurômetro, da marca *Shimadzu*, acoplado a um computador.

As Figuras 3 a 5 apresentam as microestruturas observadas em cada região das amostras analisadas. Pode-se observar que, entre as bitolas, não ocorreu grandes variações das microestruturas nas mesmas regiões.

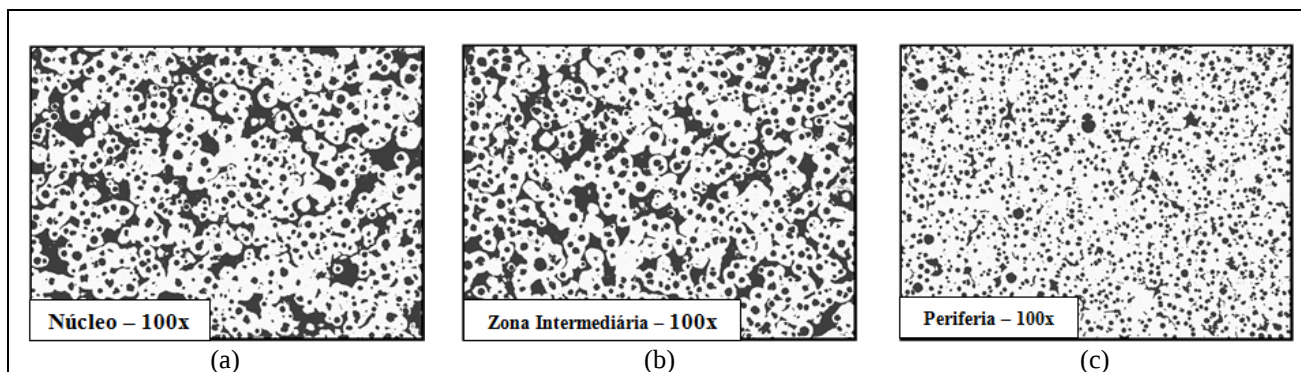


Figura 3 – Microestruturas das barras cilíndricas com bitola de 53 mm de diâmetro – Ataque em Nital 3%; (a) Núcleo, (b) Zona intermediária, (c) Periferia

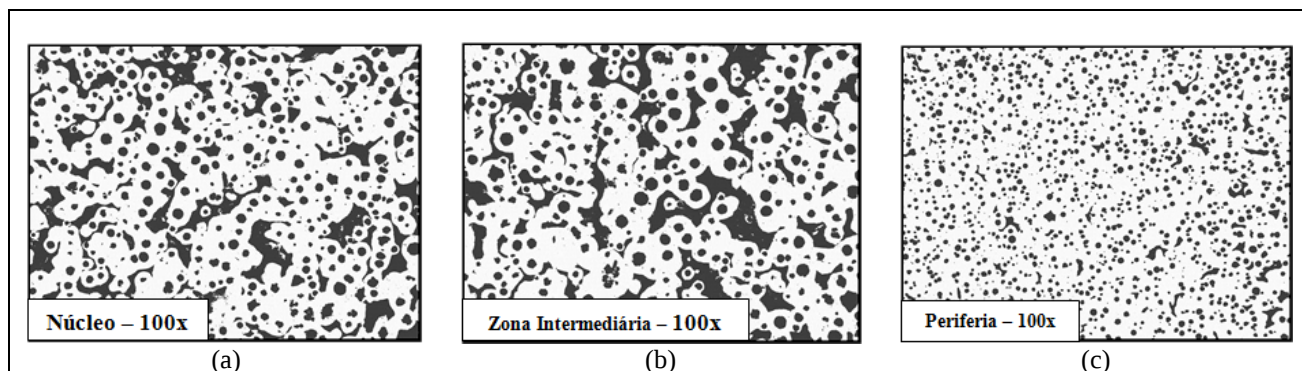


Figura 4 – Microestruturas das barras cilíndricas com bitola de 156 mm de diâmetro – Ataque em Nital 3%; (a) Núcleo, (b) Zona intermediária, (c) Periferia

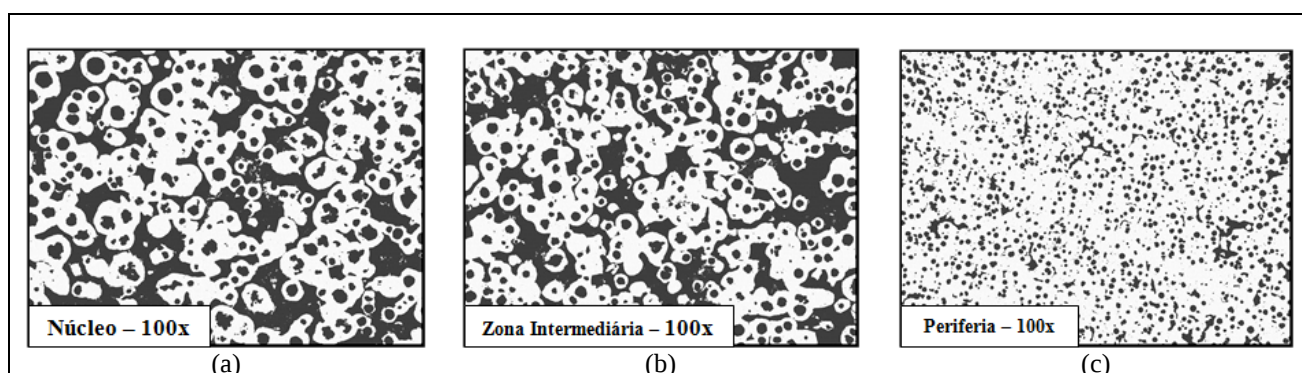


Figura 5 – Microestruturas das barras cilíndricas com bitola de 203 mm de diâmetro – Ataque em Nital 3%; (a) Núcleo, (b) Zona intermediária, (c) Periferia

Para análise dos percentuais de carbonetos e de nodularização nas amostras, foram analisados 8 pontos distintos para cada região. As imagens foram analisadas através do software “Image Pro Plus”. A Tabela 2 apresenta, de forma resumida, os valores percentuais médios da matriz perlítica, carbonetos, nodularização e tamanho dos nódulos para as amostras circulares. Observe que para todas as amostras a região da periferia apresentou baixo percentual de matriz perlítica, em comparação às demais regiões, resultante do maior número de nódulos de grafita nestas regiões. Verifica-se ainda a presença de pequenos percentuais de carbonetos junto à periferia, como consequência da alta velocidade de resfriamento nestes locais.

Tabela 2 - Valores percentuais médios da matriz perlítica

Amostra	Região	Matriz Perlítica (%)	Carbonetos (%)	Nodularização (%)	Partículas (mm ²)	Tamanho (μm)
Φ = 53 mm	Periferia	5,8	4	97,4	685,8	15,8
	Zona Intermediária	18,4	0	97,6	250,9	25,4
	Núcleo	19,4	0	97,1	254,8	24,9
Φ = 156 mm	Periferia	5,6	2	98,1	481,4	17,8
	Zona Intermediária	36,0	0	96,4	131,9	33,5
	Núcleo	38,4	0	97,3	117,1	35,4
Φ = 203 mm	Periferia	4,4	1	97,8	670,6	15,8
	Zona Intermediária	17,5	0	98,4	152,6	32,4
	Núcleo	21,3	0	96,8	102,3	38,1

As ferramentas utilizadas nos ensaios de torneamento foram insertos quadrados de metal duro *SNMG 120408-CM T5125*, com oito arestas de corte, *ISO K35*, revestidas com TiN, recomendadas para operações que vão desde semi-acabamento até desbaste médio de ferroso fundidos. O suporte utilizado foi o *ISO PSSNR2020*, fabricado pela

Tungaloy. Foram utilizados duas velocidades de corte (150 e 250 m/min) e dois avanços (0,1 e 0,2 mm/volta), fixando-se a profundidade em 1,0 mm. A operação foi realizada sem fluido de corte.

Para a análise dos esforços de usinagem, um dinamômetro *Kistler*® 9265B, com sensores piezelétricos, foi utilizado para medição das componentes de força de usinagem. Este equipamento foi montado sobre o carro transversal (o carro porta-ferramenta foi substituído pelo dinamômetro) e o suporte porta-ferramenta foi montado sobre o mesmo. A Figura 6 apresenta a montagem do dinamômetro no carro transversal do torno CNC.

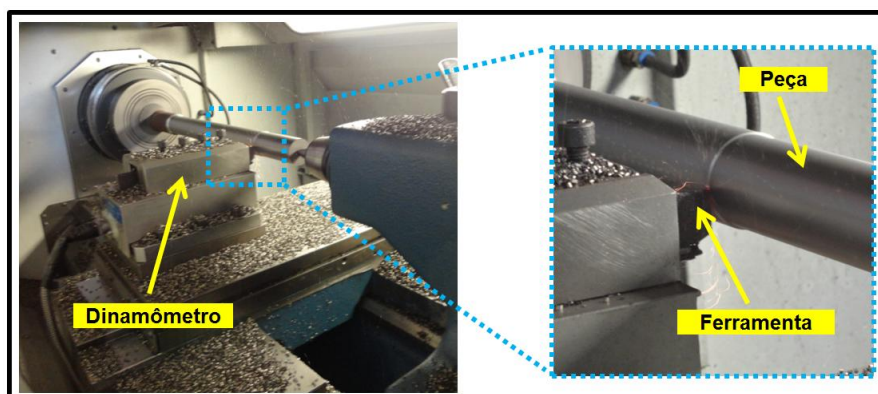


Figura 6 – Montagem do dinamômetro no carro transversal do torno CNC

Também foi utilizado, junto ao dinamômetro, uma caixa de distribuição responsável por separar os sinais de cada componente de forças de usinagem (F_x , F_y e F_z). Após a decomposição, os sinais foram amplificados e condicionados por um amplificador de carga, e, então, via um bloco conector BNC-2110, foram levados ao computador para serem gerenciados pelo software *LabView*™ (Fig. 7).

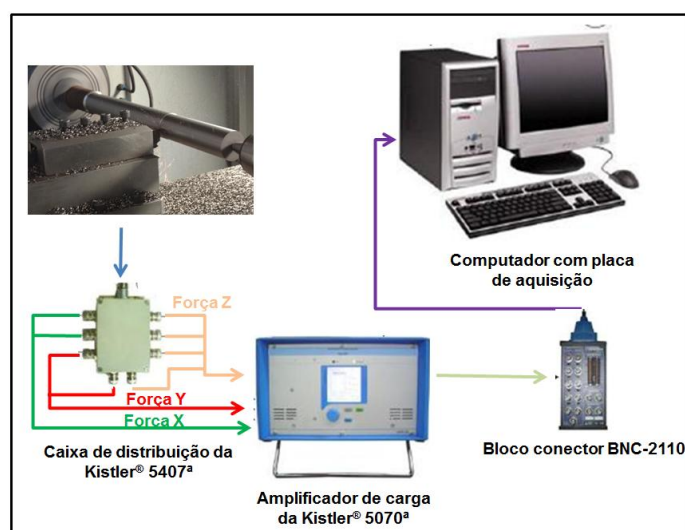


Figura 7 – Esquema de conexão do sistema de aquisição de esforços de usinagem

O sistema foi calibrado para medir componentes da força de usinagem entre 0 e 2000 N, com desvios menores do que 1 % na faixa de medição utilizada. Foi definida uma frequência de aquisição de 0,5 kHz e um tempo de aquisição de 5 segundos. Antes de iniciar os experimentos, foram realizados testes de calibração. Para que o desgaste das ferramentas não influenciasse nos valores dos esforços de usinagem, o desgaste de flanco também foi monitorado e toda vez que o desgaste de flanco médio (VB_B) ultrapassava o valor de 0,1 mm a aresta de corte era substituída por uma nova (AVILA e DORNFELD, 2004; WANIGARATHNE et al., 2005). A medição dos esforços de usinagem durante o torneamento foi realizado sobre diâmetros médios das regiões analisadas e para aumentar a confiabilidade estatística, além dos testes, foram realizadas réplicas e tréplicas em cada condição de corte. Cálculos das médias foram considerados para análise.

Os testes foram realizados, para cada condição de corte, de forma totalmente aleatória. A aleatorização permite proteger os resultados de fatores perturbadores que possam ter um efeito sobre os mesmos (BOX e HUNTER, 1978).

3. RESULTADOS E DISCURSSÕES

3.1 Bitolas de Diâmetro de 53 mm

Nos testes experimentais o dinamômetro mede simultaneamente as três componentes de força, F_x , F_y e F_z , correspondentes às forças de avanço, passiva e de corte. A força de usinagem foi calculada pela soma vetorial das três componentes ortogonais. A Figura 8 apresenta os valores médios de força de usinagem quando usinando as regiões das amostras com bitola de 53 mm de diâmetro.

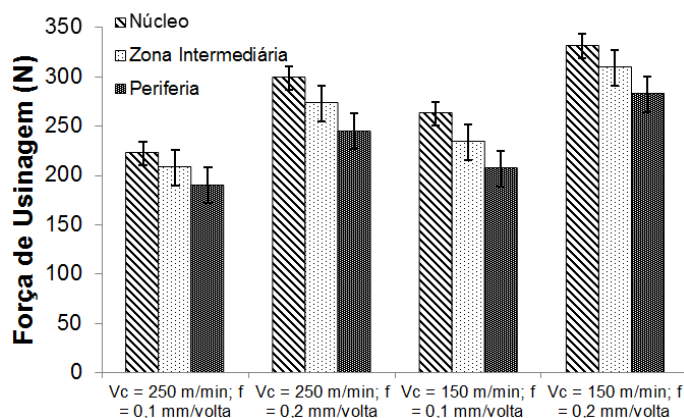


Figura 8 – Comportamento da força de usinagem ao longo das regiões das amostras ($\Phi = 53$ mm)

Pode-se observar que, independente dos parâmetros de velocidade de corte e avanço adotados, há sempre redução na força de usinagem quando se deslocou do núcleo em direção a região da periferia. Possivelmente, esse comportamento possa ser explicado pela maior dureza da região do núcleo em relação à zona intermediária e a região da periferia. Segundo Diniz et al. (2006), regiões de maiores resistência mecânica podem contribuir para um maior valor das forças de usinagem. Machado et al. (2015) também atribuem o aumento da força ao aumento da resistência do material (ou dureza) nos planos de cisalhamento. A matriz perlítica predominante no núcleo e na zona intermediária e ferrítica predominante na periferia explicam esses resultados.

A Tabela 3 apresenta a diferença (aumento/redução) percentual média e estatística da força de usinagem entre as regiões das amostras para os diversos parâmetros de usinagem empregados nos experimentos. Pode-se observar que a comparação realizada entre a região do núcleo e a região da periferia, quando usinado com velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta, foi a que apresentou maior diferença percentual (redução de 22,47 %). Por outro lado, a comparação da força de usinagem entre as regiões do núcleo e da zona intermediária, quando usinado com velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,2 mm/volta, foi a que apresentou menor diferença percentual (redução de 4,96 %).

Tabela 3 – Diferença média e estatística da força de usinagem para as amostras com bitola de diâmetro de 53 mm

Vc (m/min)	F (mm/volta)	Comparações	Diferença Média Percentual (%)	p-value
250	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 4,96	0,3818
		Núcleo → Periferia	- 14,53	0,0453
		Zona Intermediária → Periferia	- 10,06	0,1316
	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 7,04	0,3566
		Núcleo → Periferia	- 15,52	0,0834
		Zona Intermediária → Periferia	- 9,12	0,2783
150	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 8,68	0,1228
		Núcleo → Periferia	- 13,75	0,0366
		Zona Intermediária → Periferia	- 5,54	0,3184
	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 8,56	0,2047
		Núcleo → Periferia	- 22,47	0,0165
		Zona Intermediária → Periferia	- 15,21	0,0699

Esta tabela também apresenta a comparação entre as regiões para a força de usinagem, 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 diferem estatisticamente. Desta forma, pode-se observar que todas as comparações entre a região do núcleo e a região da periferia apresentaram diferença estatística significativa, excetuando, apenas, quando foi utilizado velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta.

Por outro lado, se fosse adotado um nível de confiabilidade inferior a 95 %, alguns resultados das comparações poderiam apresentar diferenças significativas. Por exemplo, se for tomado um nível de confiabilidade de 90 %, a comparação entre a região do núcleo e da periferia, quando usinado com velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,2 mm/volta (p-value = 0,0834), e a comparação entre a região da zona intermediária e a região da periferia, quando usinado com velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta (p-value = 0,0699), apresentariam diferença estatística significativa.

Nesta investigação, a Incerteza de Medição (IM) da força de usinagem foi calculada para todas as condições de testes. A Tabela 4 apresenta a avaliação dessa incerteza de medição da força de usinagem, além de todas as informações referentes ao cálculo da mesma, durante o torneamento da zona intermediária quando usinado com velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta.

A avaliação da incerteza mostrou que a força de usinagem possui uma incerteza expandida de 11,5 N para $k = 2,0$ e 95,45% de abrangência. A correção relativa as leituras foi o que mais contribuiu para o cálculo da incerteza padrão (aproximadamente 99,97 %).

Tabela 4 – Incerteza de medição da força de usinagem ($V_c = 250$ m/min; $f = 0,2$ mm/volta; Região: Zona Intermediária)

Grandeza Xi	Estimativa Xi	DP	CS	GL	Incerteza Padrão	Contribuição (%)
S_{leit}	9,995681	N	1	2	33,30454622	99,97370920
$\Delta L_{inDinam}$	0,100000	R	0,02	∞	0,00333333	0,01000601
ΔH_{Dinam}	0,120000	R	0,02	∞	0,00480000	0,01440866
ΔA_c	0,050000	R	1	∞	0,00062500	0,00187613
ΔR_{SM}	0,000001	R	1	∞	0,00000001	0,00000001
Incerteza padrão combinada (u_c) em (N)					5,77176789	
Grau de liberdade efetivo (v_{eff})					>100	
Fator de abrangência (95,45%)					$k = 2$	
Incerteza expandida (U_p) em (N)					11,54353578	
$F_u = 202,487008 \pm (9,995681 + 11,543535) \text{ N}; k = 2 \text{ e } PA = 95,45 \%$						

3.2 Bitolas de Diâmetro de 156 mm

A Figura 9 apresenta os valores de força de usinagem quando usinando as regiões das amostras com bitola de 156 mm de diâmetro.

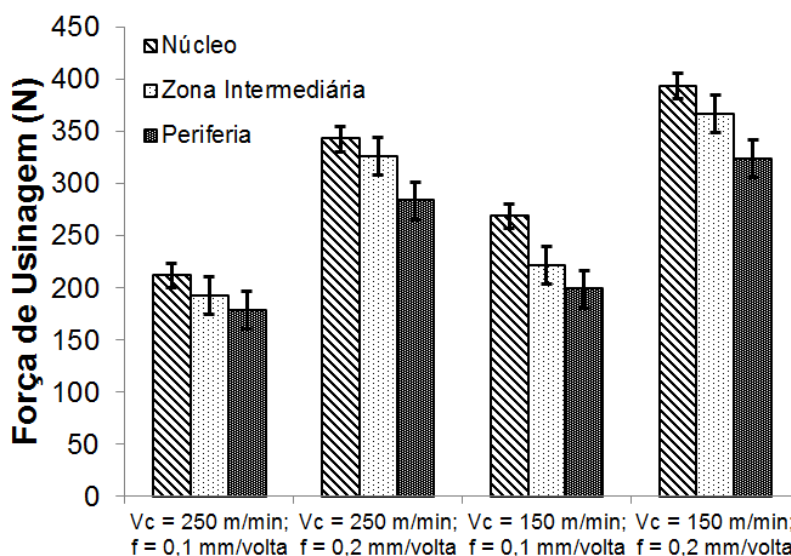


Figura 9 – Comportamento da força de usinagem ao longo das regiões das amostras ($\Phi = 156$ mm)

Observa-se que, assim como ocorreu para as amostras com bitola de 53 mm de diâmetro, também houve redução na força de usinagem quando se deslocou do núcleo em direção a região da periferia, independente dos parâmetros de usinagem utilizados.

A Tabela 5 apresenta a diferença (aumento/redução) percentual média e estatística da força de usinagem entre as regiões das amostras com bitolas de 156 mm de diâmetro para os pares de velocidade de corte e avanço empregados no processo de torneamento. 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 0,2 mm/volta, foi a que apresentou maior diferença percentual (redução de 26,43 %). Por outro lado, a comparação da força de usinagem entre as regiões do núcleo e da zona intermediária, quando usinado com velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta, foi a que apresentou menor diferença percentual (redução de 5,59 %).

Nesta tabela pode ser observado que a comparação dos valores obtidos entre a região do núcleo e a região da periferia, quando usinado velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,2 mm/volta e velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta, além de todas as comparações realizadas com velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,2 mm/volta apresentaram diferenças estatísticas significativas.

Tabela 5 – Diferença média e estatística da força de usinagem para as amostras com bitola de diâmetro de 156 mm

Vc (m/min)	F (mm/volta)	Comparações	Diferença Média Percentual (%)	p-value
150	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 5,59	0,3314
		Núcleo → Periferia	- 15,51	0,0577
		Zona Intermediária → Periferia	- 10,51	0,1999
	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 7,68	0,0654
		Núcleo → Periferia	- 18,34	0,0091
		Zona Intermediária → Periferia	- 11,55	0,0911
250	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 9,34	0,0676
		Núcleo → Periferia	- 17,56	0,0092
		Zona Intermediária → Periferia	- 9,06	0,0902
	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 13,95	0,0452
		Núcleo → Periferia	- 26,43	0,0016
		Zona Intermediária → Periferia	- 14,49	0,0091

Entretanto, se fosse adotado um nível de confiabilidade de 90%, todas as comparações mostradas nesta tabela apresentaria diferenças estatísticas, excetuando, apenas as comparações entre a região do núcleo e da zona intermediária e a comparação entre a zona intermediária e a periferia, quando usinados com velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta.

3.3 Bitolas de Diâmetro de 203 mm

A Figura 10 apresenta os valores de força de usinagem quando usinando as regiões das amostras com bitola de 203 mm de diâmetro.

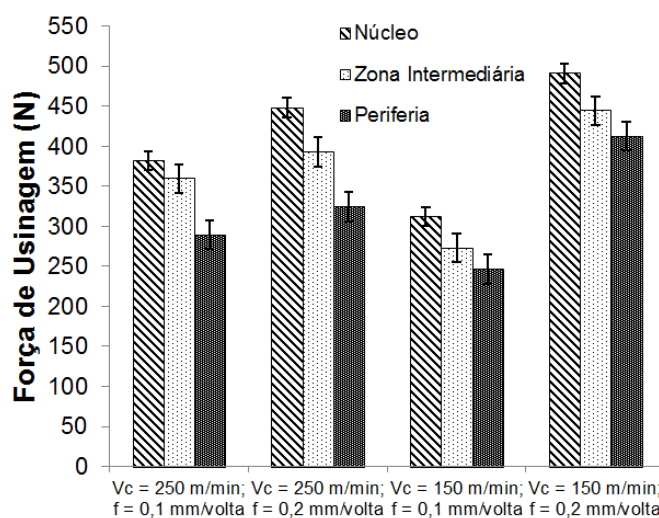


Figura 10 – Comportamento da força de usinagem ao longo das regiões das amostras ($\Phi = 203$ mm)

A Tabela 6 apresenta a diferença (aumento/redução) percentual média e estatística da força de usinagem entre as regiões para as amostras com bitola de 203 mm de diâmetro.

Note que a comparação 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/volta, foi a que apresentou maior diferença percentual (redução de 26,75 %). Por outro lado, a comparação da força de usinagem entre as regiões da zona intermediária e da periferia, quando usinado com velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,2 mm/volta, foi a que apresentou menor diferença percentual (redução de 6,05 %). Esta tabela também mostra que a maioria das comparações apresentou diferença estatística significativa (p-value < 0,05).

Tabela 6 – Diferença média e estatística da força de usinagem para as amostras com bitola de diâmetro de 203 mm

Vc (m/min)	F (mm/volta)	Comparações	Diferença Média Percentual (%)	p-value
250	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 9,61	0,0452
		Núcleo → Periferia	- 25,43	0,0016
		Zona Intermediária → Periferia	- 17,50	0,0091
	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 9,11	0,0748
		Núcleo → Periferia	- 26,75	0,0022
		Zona Intermediária → Periferia	- 19,41	0,0098
150	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 9,92	0,0298
		Núcleo → Periferia	- 15,37	0,0069
		Zona Intermediária → Periferia	- 6,05	0,1437
	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 11,68	0,0696
		Núcleo → Periferia	- 22,07	0,0097
		Zona Intermediária → Periferia	- 11,76	0,0941

4. CONCLUSÕES

Foram observados menores esforços de usinagem na região da periferia, em comparação às regiões da zona intermediária e do núcleo. As menores resistência mecânica e dureza desta região, proporcionadas pela matriz ferrítica garantiram estes resultados, embora com maior ductilidade.

Todas as comparações dos esforços de usinagem entre a região do núcleo e a região da periferia apresentaram diferenças estatisticamente significativas, com nível de confiabilidade de 95%.

O aumento no avanço de corte contribuiu para o aumento na força de usinagem, porém, o aumento na velocidade de corte possibilitou menores forças de usinagem.

Estes resultados mostram os benefícios, para a usinabilidade, da presença de alto número de nódulos de grafita, o que pode ser conseguido por altas velocidades de resfriamento ou ainda pelo uso de inoculantes especiais. Operações de usinagem que se concentram na remoção da periferia são naturalmente beneficiadas pelo gradiente microestrutural natural das barras de ferro nodular. A presença de pequenos residuais de carbonetos junto à periferia, imersos em matriz ferrítica, não se mostrou importante nos ensaios de usinagem realizados.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Uberlândia e a Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Campus Londrina pelo apoio à pesquisa. Agradecem, também, à Fundação Araucária, da Secretaria de Estado da Ciência, Tecnologia e Ensino Superior do Paraná, FAPEMIG, CAPES e CNPq 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.
- Agarwal, H., Gokhale, A. M., Graham, S., Horstemeyer, M. F., 2003, “Void growth in 6061-aluminum alloy under triaxial stress state”, Materials Science and Engineering, v 341, p 35 – 42.
- Avila, M. C.; Dornfeld, D. A., 2004, “The Effect of Kinematical Parameters and Tool geometry on Burr Height in face Milling of Al-Si Alloys”, LMA. University of California at Berkeley, USA.
- Box, G. E. P.; Hunter, W. G. & Hunter, J. S., 1978, “Statistics for experimenters: An introduction to design, data analysis and model building”, New York: John Wiley & Sons.
- Dawson, S., Schroeder, T., 2004, “Practical applications for compacted graphite iron”, AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA.

- Diniz, A. E., Marcondes, F. C., Coppini, N.L., 2006, “Tecnologia da usinagem dos materiais”, Editora Artber.
- Dos Santos Junior, M. C., 2012, “Emprego de ferramentas estatísticas para avaliação da usinabilidade de ligas de alumínio”, Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG.
- 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.
- Machado, A.R.; Abrão, A.M.; Coelho, R.T.; Da Silva, M.B., 2015, “Teoria da Usinagem dos Materiais”, Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, 3ª Edição 407 pgs., ISBN: 978-85-212-0846-4.
- Pace Technologies, 2012, “Metallographic Preparation”, Disponível em: <www.metallographic.com/Etchants/>, Acesso em novembro de 2012.
- 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.
- Vilas Boas, J. M., Souza Silva; L., Carvalho Sá, J., De Almeida Maribondo Galvão, N. K., 2007, “Uma nova metodologia para o cálculo de durezas”, In: II Congresso de Pesquisa e Inovação da Rede Norte Nordeste de Educação Tecnológica, João Pessoa, PB.
- Wanigarathne, P. C. Kardekar, A. D., Dillon, O. W., Poulachon, G., Jawahir, I.S., 2005, “Progressive tool-wear in machining with coated grooved tools and its correlation with cutting temperature”, Wear, vol 259, p 1215 - 1224;
- Zipperian, D. C., 2012, “Metallographic specimen preparation basics”, Disponível em: <www.metallographic.com/Basics.htm>, Acesso em novembro de 2012.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

ANÁLISE DA INFLUÊNCIA DA MICROESTRUTURA DO FERRO FUNDIDO NODULAR NOS ESFORÇOS DE USINAGEM DURANTE O TORNEAMENTO

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

Álison Rocha Machado, alissonm@mecanica.ufu.br^{2,3}

Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br^{4,5}

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

²Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlandia, Av. Joao Naves de Ávila, 2121, Uberlândia, MG 38.400-089, Brasil, e-mail: rosemarbsilva@yahoo.com.br

³ Mechanical Engineering Graduate Program, Pontifícia Universidade Católica do Paraná – PUC-PR, CEP 80215-901, Curitiba/PR, Brasil. E-mail: alisson.rocha@pucpr.br

⁴Tupy S.A., Joinville, SC 89206-900, Brasil, e-mail: wguesser@tupy.com.br

⁵Center of Technological Sciences, UDESC, Santa Catarina State University, Joinville, SC 89223-100, Brasil

Resumo: *The nodular cast irons have important characteristics that allow, in many applications, to technically replace the steels. Long nodular cast iron bars are produced by large arrays that generate bars with huge cross sections. Throughout these sections there may be variation in the properties and microstructure of the material, which implies in varying the machinability along the huge sections. Machining efforts are an important indication of process performance and may even be used to assist in the monitoring of cutting tool wear. This work evaluated the behavior of the machining efforts along the cross section of circular bars of nodular cast iron produced by continuous casting by means of the turning operation. The evaluation parameters in these tests were the components of the machining force. Higher force levels were verified in the tools that machined the core region in relation to the tools that machined the intermediate zone and the periphery. The microstructure with perlite matrix, hardness and mechanical strength contributed the highest machining forces found in this region.*

Palavras-chave: *Nodular cast iron; Continuous casting; End milling*