

ANÁLISE DA USINABILIDADE DE FERROS NODULARES PRODUZIDOS POR FUNDIÇÃO CONTÍNUA

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

Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br²

Álison Rocha Machado, alissonm@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 da usinabilidade ao longo da seção transversal de barras cilíndricas de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua por meio da operação de torneamento. Os parâmetros avaliadores nesses ensaios foi a evolução do desgaste e vida das ferramentas de corte. Foi verificado maiores níveis de desgaste nas ferramentas que usinaram a região do núcleo em relação as ferramentas que usinaram à região da zona intermediária e da periferia. A microestrutura com matriz perlítica e a resistência mecânica foram que mais contribuiu para os maiores desgastes encontrados nesta região.*

Palavras-chave: *ferro fundido nodular, usinabilidade, fundição contínua, torneamento*

1. INTRODUÇÃO

Na indústria, o aumento na demanda pela busca de novos materiais está relacionado 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).

Segundo informação obtida em sítio da *web* (Anônimo, 2000), 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 da usinabilidade ao longo da seção transversal de barras de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua em diferentes bitolas no processamento de torneamento. Para tanto, as seções transversais das barras foram divididas em setores: periferia, região intermediária e núcleo. Também foi verificada a correlação das variáveis que controlam a usinabilidade e a respectiva resposta das microestrutura e propriedades mecânicas.

Para caracterizar o material foram feitos ensaios de dureza, microestrutura e de tração (limite de escoamento, limite de resistência, alongamento e estrição). Nos ensaios de usinagem os parâmetros considerados foram a evolução do desgaste e vida das ferramentas.

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, com diâmetro de 203 mm. Para usinagem as barras foram cortadas em comprimento de 350 mm. 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 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, 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 idetações (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 36 pontos de medição da dureza (7 pontos na periferia, 9 pontos na zona intermediária e 20 pontos na região do núcleo).

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. Entre estas últimas a diferença foi de apenas 1 HB na média, valor bem menos que o desvio padrão dessas medições.

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, polidas com pastas adiamantadas de 3 μm e atacadas com o reativo de Nital à 2% por 5 segundos, conforme Agarwal *et al.* (2003), Schaeffer *et al.* (2006) e Tan e Ögel (2007) recomenda, e com cruzamento perpendicular das trilhas do movimento de lixamento, de acordo com Pace Technologies (2009). As fotografias foram adquiridas com uma câmara cyber-shot da SONY e as fotomicrografias feitas em um microdurômetro, da marca *Shimadzu*, acoplado a um computador.

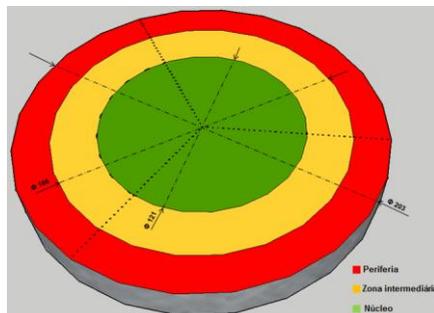


Figura 1 – Direção da sequência dos pontos de medição da dureza

Tabela 1 – Resultados da dureza ao longo das regiões analisadas

Ensaio	Região	Dureza Média (HB)	Desvio Padrão
Amostra Cilíndrica	Periferia	166,6	2,73
	Zona Intermediária	180,0	1,75
	Núcleo	181,0	2,98

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.

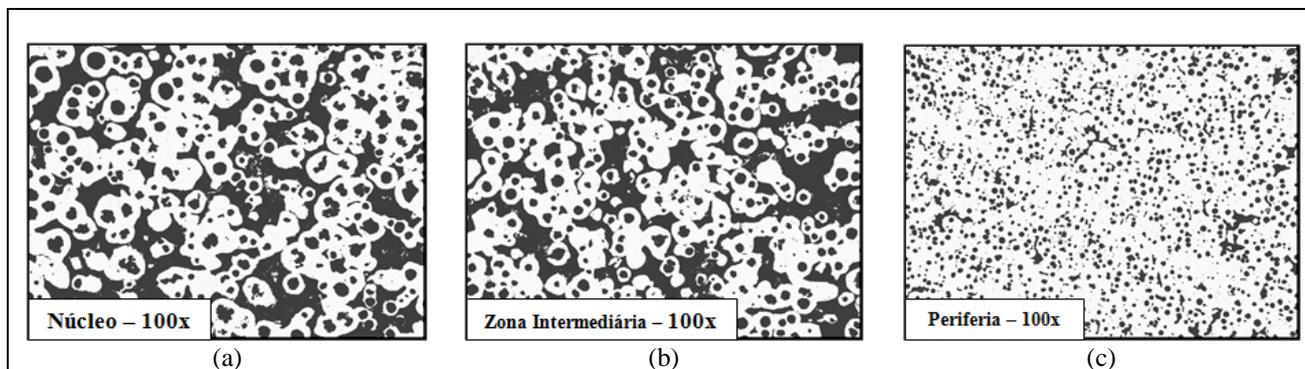


Figura 2 – Microestruturas das barras analisadas – Ataque em Nital 3%; (a) Núcleo – Presença de grafita com matriz ferrítica/perlítica, (b) Zona intermediária – Presença de grafita com matriz ferrítica/perlítica, (c) Periferia – Presença de grafita com matriz ferrítica

Quando submetidas aos ensaios de tração, as amostras de ferro fundido nodular produzido por fundição contínua foram solicitadas uniaxialmente, com esforço gradativo à taxa de deformação constante de 2 mm/min (Courtney, 1990; De Souza, 1982). O objetivo destes ensaios foi avaliar a resistência mecânica e a ductilidade dos materiais ensaiados (Callister, 2006), sob a suposição que este era contínuo (livre de porosidades) e isotrópico (Dieter e Bacon, 1988). Os ensaios foram realizados em uma máquina de tração da marca *Shimadzu*, com capacidade de 600 kN. Para medição das grandezas, foi utilizado o *software "Trapezium"* para aquisição de sinais e determinação das propriedades

A Figura 3-a apresenta uma amostra fixada na máquina de resistência à tração. Os corpos de prova foram extraídos ao longo da seção transversal da barra e preparados de acordo com a norma NBR 6152 (2002). A Figura 3-b apresenta as dimensões do corpo de prova utilizado nestes ensaios.

Foram retirados cinco corpos de prova ao longo de cada um de três raios igualmente espaçados em ângulos de 120° ao longo da seção transversal (um corpo de prova da região da periferia – C1, um corpo de prova da região da zona intermediária - C2 e três corpos de prova da região do núcleo – C3, C4 e C5, respectivamente). A Figura 4 apresenta a localização dos corpos de prova.

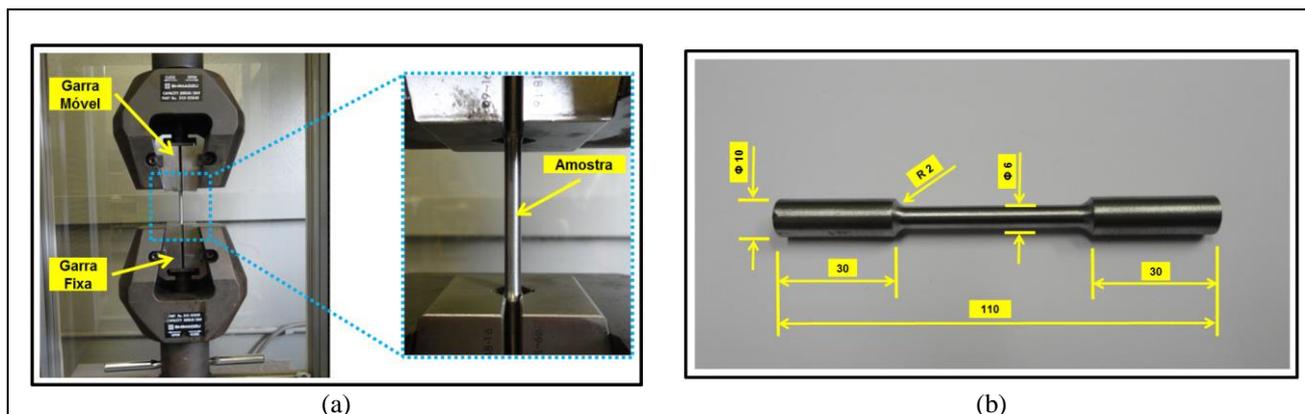


Figura 3 – a) Fixação do corpo de prova na máquina de resistência à tração; b) Dimensões do corpo de prova

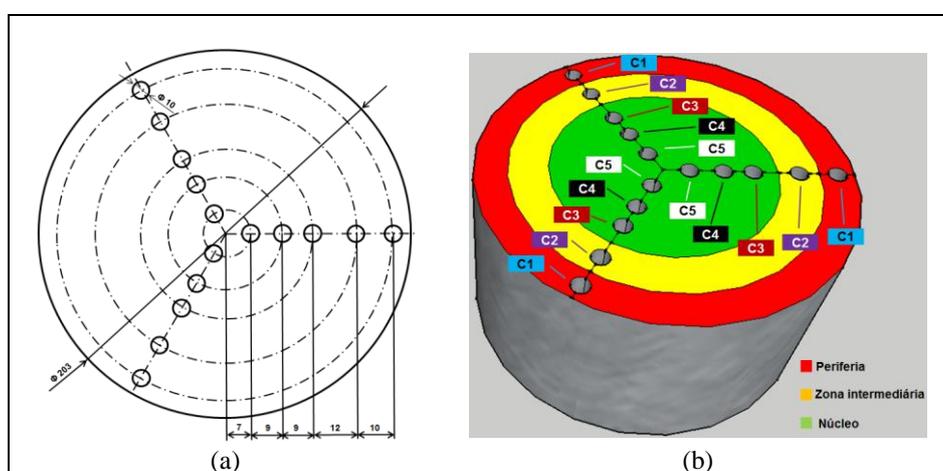


Figura 4 – Amostras para ensaios de resistência à tração nas barras circulares com diâmetro de 203 mm; (a) Localização dos corpos de prova; (b) Distribuição dos corpos de prova para cada região

A Tabela 2 apresenta os valores médios do alongamento, estrição, limite de escoamento e limite de resistência encontrados para as diferentes posições da seção transversal da barra do corpo de prova, como indicado na Figura 4.

Tabela 2 – Resultados obtidos durante os ensaios de resistência a tração

Ensaio	Secção	Alongamento (%)	Estricção (%)	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)
Φ 203 mm	C1	6,36	3,88	304,55	585,96
	C2	9,32	4,04	317,53	579,04
	C3	12,61	5,72	331,32	560,79
	C4	14,31	6,11	355,93	547,01
	C5	15,26	7,77	368,44	532,06

A Figura 5 apresenta, em forma de gráficos, a comparação entre as regiões analisadas no corpo de prova. Observe que as amostras retiradas próximas à região do núcleo apresentaram menores valores de alongamento e estrição e maiores valores de limite de resistência e escoamento. Isto, obviamente, é resultado da presença de estrutura ferrítica/perlítica no núcleo, enquanto que na periferia a microestrutura predominante é ferrítica.

A Tabela 3 apresenta a diferença (aumento/redução) percentual média do alongamento, estrição, limite de escoamento e limite de resistência da barra fundida. Observe que a comparação das amostras para os resultados de alongamentos e estrição foram bastante significativos, chegando, em alguns casos, próximos a 30 %. Para o limite de escoamento e limite de resistência os valores não apresentam grandes diferenças.

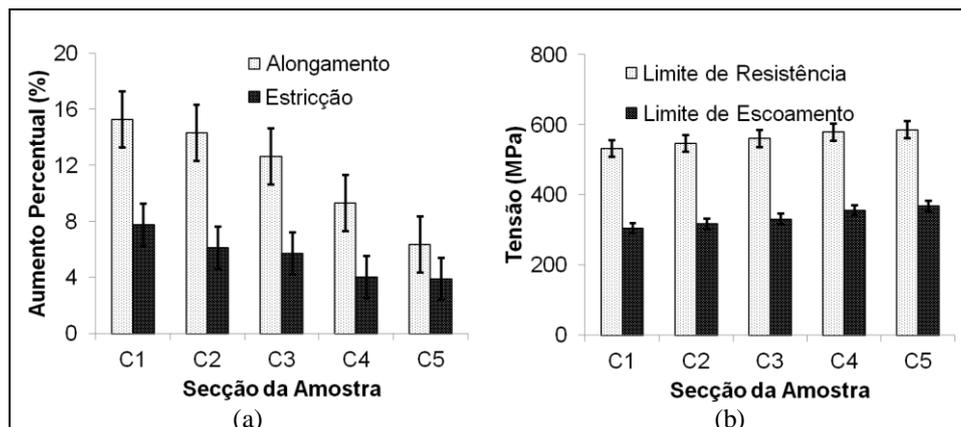


Figura 5 - Comparação dos resultados de ensaios de tração; a) Alongamento e estrição; b) Limite de resistência e limite de escoamento

Tabela 3 – Diferença percentual média dos resultados obtidos durante os ensaios de resistência a tração

Ensaio	Seção	Diferença Média Percentual (%)			
		Alongamento	Estricção	Limite de Escoamento (MPa)	Limite de Resistência (MPa)
Φ 203 mm	C2 → C1	+ 6,22	+ 21,36	- 4,26	- 2,81
	C3 → C2	+ 11,87	+ 6,38	- 4,34	- 2,51
	C4 → C3	+ 26,09	+ 29,37	- 7,42	- 3,25
	C5 → C4	+ 31,76	+ 3,96	- 3,51	- 1,19

2.2 Ferramentas de Corte

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 TiCN, Al₂O₃ e TiN, recomendadas para operações que vão desde semi-acabamento até desbaste médio (Tungaloy, 2012). O suporte, utilizado foi o ISO PSSNR2020, fabricado pela Tungaloy. A Figura 6 apresenta a ferramenta de corte utilizada e a montagem da mesma junto ao suporte.

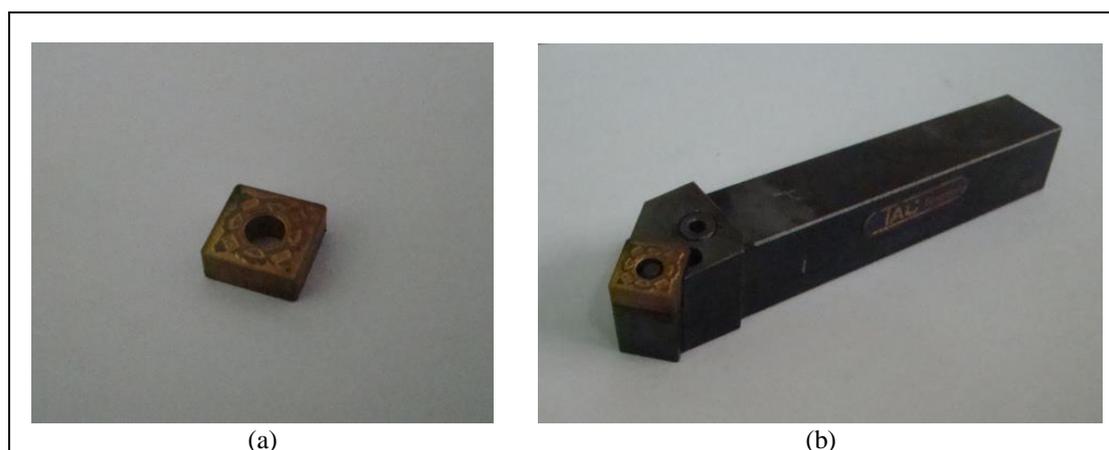


Figura 6 - Ferramenta utilizada nos ensaios de torneamento - a) Insertos quadrados de metal duro; b) Suporte ISO PSSNR2020 montado junto com a ferramenta de corte

2.3 Máquina-Ferramenta

Os ensaios de torneamento foram realizados no torno Romi CNC, modelo *Multiplic 35D*, fabricado pelas indústrias Romi S.A., com 11 kW de potência, rotação variável de eixo de 3 a 3000 rpm, equipado com comando numérico GE FANUC, Series 21i-TB. A Figura 7 apresenta o torno e o painel equipado com comando numérico utilizado nos experimentos.



Figura 7 – Máquina-ferramenta utilizada nos ensaios de torneamento; (a) Torno Romi CNC, modelo Multiplic 35D; (b) Pannel equipado com comando numérico GE FANUC Series 21i – TB

A Figura 8 apresenta uma peça do ferro fundido nodular no interior do torno CNC, usadas nos testes de vida da ferramenta, considerando cada setor separadamente.

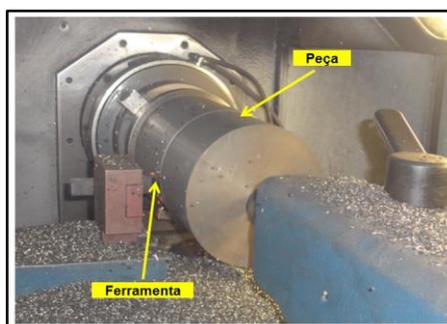


Figura 8 – Montagem da peça no interior no torno CNC

2.4 METODOLOGIA

Todos os testes foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). Antes de iniciar os experimentos, a seção transversal das amostras foi dividido em setores: núcleo, zona intermediária e periferia. Foi tomada a igualdade das áreas da secção transversal como critério de divisão das áreas. A Figura 9 apresenta, de forma ilustrativa, a separação entre as regiões da barra.

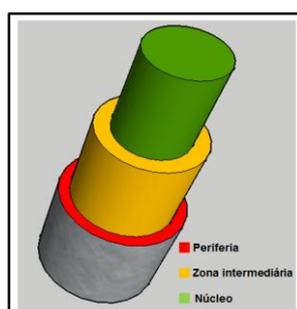


Figura 9 – Distribuição das regiões nas amostras circulares

Os testes de vida nas três regiões, tiveram o cruzamento de duas velocidades de corte (150 e 250 m/min) e dois avanços (0,1 e 0,2 mm/volta), totalizando 4 condições de corte. A profundidade de corte foi mantida constante em 2 mm. Cada ensaio foi repetido duas vezes, totalizando três testes (teste, réplica e tréplica) em cada região e para cada condição de corte. Todos os testes foram realizados sem fluido de corte. Como parâmetro de usinabilidade considerou-se o desgaste de flanco máximo (VB_{max}) atingido pela ferramenta após um volume de material removido estipulado de 4500000 mm^3 .

Para o controle do desgaste das ferramentas foi utilizada uma metodologia que consiste em realizar a medição dos desgastes em intervalos pré-determinados de volume de material removido.

O monitoramento foi feito por meio de um microscópio óptico ferramenta 'SZ6145TR – OLYMPUS', com auxílio do software de captura de imagens 'Image Pro-Express'. Também foi utilizado um sistema de iluminação externa artificial de modo a garantir uma melhor visualização durante a aquisição das imagens.

Para o registro dos desgastes de flanco máximo (VB_{Bmax}), foi realizada uma marcação em todas as ferramentas de corte, a qual consiste da identificação das arestas para cada tipo de região usinada. Para garantir maior confiabilidade, cada aresta foi medida três vezes e, em seguida, calculada a média e o desvio padrão.

Também foi utilizada microscopia eletrônica de varredura (MEV), marca Hitachi, modelo *TM 3000 – Tabletop Microscope*, para observar detalhes da região desgastada das ferramentas e espectroscopia de energia dispersiva (EDS), marca Hitachi, modelo Swift ED3000, para identificar fases presentes. Estes equipamentos podem ser vistos na Figura 10.

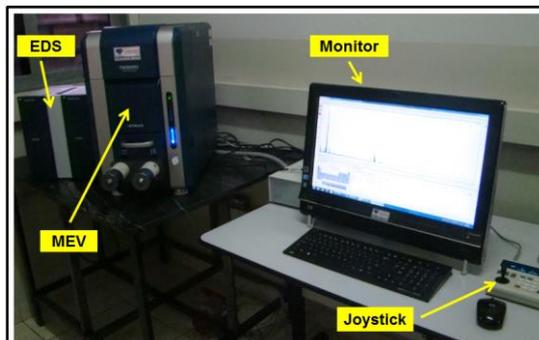


Figura 10 – MEV e EDS utilizados na análise dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A Figura 11 apresenta o comportamento dos valores médios de desgaste (teste, réplica e tréplica) das três regiões da barra ao longo da quantidade de material removido para as diversas condições de corte utilizadas. Observe que a região do núcleo apresentou, independente dos parâmetros de usinagem empregado, maiores desgastes da ferramenta.

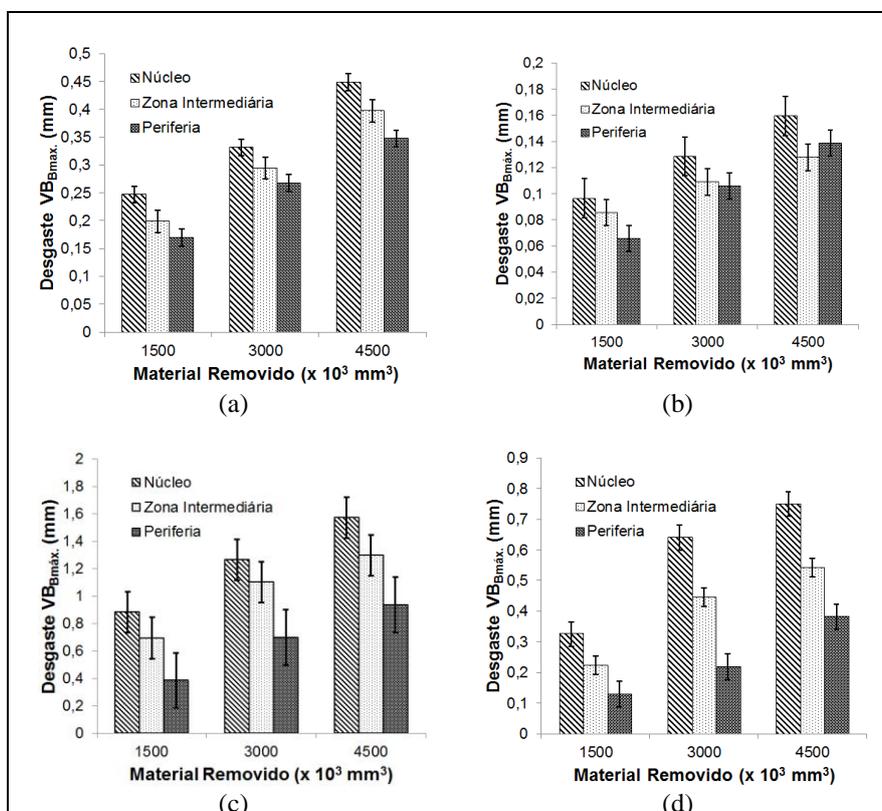


Figura 11 – Comparação dos valores médios dos desgastes ao longo das regiões das amostras com bitola de diâmetro de 203 mm; a) $V_c = 150$ m/min; $f = 0,1$ mm/volta; b) $V_c = 150$ m/min; $f = 0,2$ mm/volta; c) $V_c = 250$ m/min; $f = 0,1$ mm/volta; d) $V_c = 250$ m/min; $f = 0,2$ mm/volta

A Tabela 4 apresenta a diferença (aumento/redução) percentual média e estatística do desgaste de flanco máximo ($VB_{B_{max}}$), entre as regiões da amostras, para o volume de 4500000 mm³ de material removido (volume máximo de material removido estipulado), em diversos parâmetros de usinagem.

Tabela 4 – Diferença percentual média e estatística do desgaste de flanco máximo ($VB_{B_{max}}$)

Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/volta)	Comparação	Diferença Média Percentual (%)	p-value
150	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 11,43	0,0237
		Núcleo → Periferia	- 22,62	0,0034
		Zona Intermediária → Periferia	- 12,63	0,0254
150	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 19,98	0,0174
		Núcleo → Periferia	- 13,09	0,1151
		Zona Intermediária → Periferia	+ 8,61	0,3502
250	0,1	Núcleo → Zona Intermediária	- 17,42	0,4444
		Núcleo → Periferia	- 40,45	0,2074
		Zona Intermediária → Periferia	- 27,88	0,5483
250	0,2	Núcleo → Zona Intermediária	- 27,67	0,1305
		Núcleo → Periferia	- 49,06	0,0116
		Zona Intermediária → Periferia	- 29,56	0,0417

Observe que, quando foi utilizado velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta, a comparação do desgaste da ferramenta entre as regiões do núcleo e da periferia foi a que apresentou maior diferença percentual (redução de 22,62 %). Por outro lado, a comparação do desgaste da ferramenta entre a região do núcleo e a região da zona intermediária foi a que apresentou menor diferença percentual (redução de 11,43 %). Note, também, que ao longo da quantidade de material removido, a ferramenta que usinou a região do núcleo apresentou maiores níveis de desgaste em relação à zona intermediária e à região da periferia (em média 14,01 % e 24,31 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 1500000, 3000000 e 4500000 mm³ de material removido).

Quando foi utilizado a velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,2 mm/volta, a comparação do desgaste da ferramenta entre as regiões do núcleo e zona intermediária e entre núcleo e periferia apresentaram redução (19,98 % e 13,09 %, respectivamente). Por outro lado, a comparação entre as regiões da zona intermediária e periferia apresentou aumento de 8,61 %. Entretanto, ao longo da quantidade de material removido, a ferramenta que usinou a região do núcleo apresentou maiores níveis de desgaste em relação à zona intermediária e à região da periferia (em média 15,44 % e 20,83 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 1500000, 3000000 e 4500000 mm³ de material removido).

O emprego da velocidade de corte de 250 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta apresentaram maiores desgastes das ferramentas que usinaram a região do núcleo, apresentando, em comparação com a região da periferia, a maior diferença percentual (redução de 40,45 %). Por outro lado, a comparação do desgaste da ferramenta entre a região do núcleo e a região da zona intermediária foi a que apresentou a menor diferença percentual (redução de 17,42 %). Esse comportamento também foi observado ao longo da quantidade de material removido, onde a ferramenta que usinou a região do núcleo sempre apresentou maiores níveis de desgaste em relação à zona intermediária e à região da periferia (em média 17,16 % e 47,18 %, respectivamente, números calculados considerando as comparações ao longo de toda a vida das brocas, isto é, com 1500000, 3000000 e 4500000 mm³ de material removido).

Estes resultados são consequência da microestrutura (Figura 2) e das propriedades (Tabela 1 e 2) variadas ao longo da seção transversal das barras de ferro fundido. Observa-se que a periferia, composta basicamente de ferrita e nódulos de grafita apresenta menor dureza e resistência mecânica, enquanto a zona intermediária e o núcleo são compostos por matrizes ferrítica/perlítica e nódulos de grafita, com maior dureza e resistência mecânica, crescentes em direção ao núcleo.

Quando comparados o desgaste em relação a taxa de avanço (mantendo a velocidade de corte constante), percebe-se que as maiores taxas de avanço de corte produziram menores desgaste. Isso ocorre porque quando se utiliza o menor avanço, embora a seção de corte é menos, a ferramenta passa maior tempo em contato com o material da peça para remover a mesma quantidade de material, o que pode ocasionar aumento na temperatura de usinagem e, conseqüentemente, redução da resistência mecânica da ferramenta (Albrecht, 1960; Machado et al., 2009; Trent e Wright, 2000).

Nesta tabela também é apresentada a comparação entre as regiões para o volume de 4500000 mm³ de material removido (volume máximo de material removido), utilizando a metodologia estatística de comparação de 2 tratamentos, com confiabilidade de 95% para o desgaste de flanco máximo ($VB_{B_{max}}$). Os valores de *p-values* em negrito indicam diferenças significativas para esta confiabilidade.

Ao final dos testes as ferramentas foram analisadas no MEV e em alguns pontos da superfície desgastada indicados foi realizado EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva). A Figura 12 mostra alguns detalhes dessa análise em uma ferramenta que usinou a região do núcleo para a velocidade de corte de 150 m/min e avanço de corte de 0,1 mm/volta. Observa-se uma grande quantidade de material da peça aderido na superfície da ferramenta de corte, confirmada pela

análise por EDS nos pontos indicados na Figura 13-a a presença de elementos que compõe o ferro fundido nodular (Fe, Si e C, por exemplo). Os espectros nos pontos 2, 3 e 4 apresentam elementos que compõem o revestimento (com presença de oxigênio e titânio) da ferramenta, o que indica que a ferramenta atingiu elevados níveis de desgaste atingindo o substrato. Esta figura e outras produzidas nas demais análises realizadas no MEV (Sousa, 2014) confirmam a predominância do desgaste adesivo (*attrition*) e abrasivo em todas as condições de corte testadas e em velocidades de corte maiores (250 m/min) a difusão também contribui.

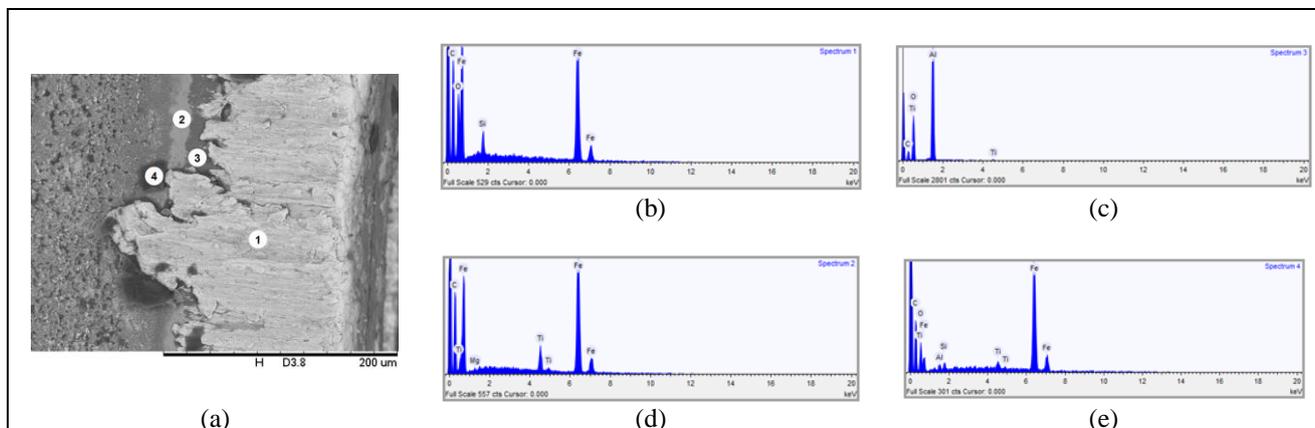


Figura 12 – Análise EDS ($V_c = 150$ m/min; $f = 0,1$ mm/volta); a) Pontos analisados; b) Espectro do ponto ‘1’; c) Espectro do ponto ‘2’; d) Espectro do ponto ‘3’; e) Espectro do ponto ‘4’

4. CONCLUSÕES

Ao dividir a barra de ferro fundido nodular produzida por fundição contínua em três regiões: núcleo, zona intermediária e periferia e testá-las no torneamento, permitiu concluir que:

- O desgaste das ferramentas de corte, para um mesmo volume de material removido, cresceu da periferia para a zona intermediária e desta para o núcleo. Em outras palavras, a usinabilidade da periferia é maior que a zona intermediária, que por sua vez é maior que o núcleo.
- A classificação da usinabilidade das três regiões estão diretamente relacionadas com suas microestruturas e propriedades mecânicas. A periferia apresentou uma matriz ferrítica com nódulos de grafita, enquanto a zona intermediária e o núcleo as matrizes são ferríticas/perlíticas com nódulos de grafita. Tanto a dureza, como a resistência mecânica crescem da periferia em direção ao núcleo.
- Os mecanismos de desgastes predominantes foram adesão (*attrition*) e abrasão. Na maior velocidade de corte a presença de difusão também foi observada. Não houve mudança de mecanismos na usinagem nas diferentes regiões.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à UTFPR, Campus Londrina, pelo o apoio financeiro. São também extremamente gratos ao técnico de laboratório do LEPU/FEMEC/UFU, Cláudio Gomes do Nascimento, pelo apoio na realização dos experimentos conduzidos.

6. REFERÊNCIAS

- Albrecht, P., 1960, “New Developments in the Theory of the Metal-Cutting Process - Part I- The Ploughing Process in Metal Cutting”, *Journal of Engineering for Industry*, p 348 – 357;
- 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;
- 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;
- Callister, W. D., 2006, “Materials science and engineering - an introduction”, Editora McGrall-Hill., 7ª ed., 832 p;
- Courtney, T. H., 1990, “Mechanical behavior of materials”, New York: McGraw-Hill;
- Dawson, S., Schroeder, T., 2004, “Practical applications for compacted graphite iron”, AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA;

- De Souza, S. A., 1982, “Ensaio mecânicos de materiais metálicos: Fundamentos teóricos e práticos”, Edgar Blücher, São Paulo, SP;
- Dieter, G. E.; Bacon, D., 1988, “Mechanical metallurgy”, Londres: McGraw-Hill Book Company;
- 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;
- 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;
- 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;
- 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;
- Machado, A. R., Abrão, A. M., Coelho, R. T., Da Silva, M. B., 2009, “Teoria da usinagem dos materiais”, Editora Edgard Blucher, São Paulo – SP, 371 p;
- NBR 6152, 2002, “Materiais metálicos: Ensaio de tração à temperatura ambiente”, Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, RJ;
- 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;
- Tan, E., Ögel, B., 2007, “Influence of heat treatment on the mechanical properties of aa6066 alloy”, Turkish, J Eng Env Sci, v 31, p 53 – 60;
- Toh, C. K., 2004, “Static and dynamic cutting force analysis when high speed rough milling hardened steel”, Mater Design; v 25, p 41 – 50;
- Trent, E. M., Wright, P. K., 2000, “Metal cutting”, Butterworths, England, v 4, p 446;
- 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;
- Zipperian, D. C., 2012, “Metallographic specimen preparation basics”, Disponível em: <www.metallographic.com/Basics.htm>, Acesso em novembro de 2012.

ANALYSIS OF IRONS MACHINABILITY NODULAR PRODUCED BY CONTINUOUS CASTING

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

Wilson Luiz Guesser, wguesser@tupy.com.br²

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 Uberlândia, Av. Joao Naves de Avila, 2121, Uberlandia, MG 38.400-089, Brazil

Abstract. *This study evaluated the behavior of machinability along the cross section of cylindrical bars of ductile iron produced by continuous casting in turning operation. Evaluator parameters in these trials were the tool life and tool wear. The results showed that higher levels of wear were found in the tools that machined the core region when compared to the that machined the intermediate peripheral regions. The microstructure with pearlitic matrix and the mechanical strength mostly contributed the results.*

Keywords: *nodular cast iron, machinability, continuous casting, turning*