

# AValiação DA INTEGRIDADE SUPERfICIAL NO TORNEAMENTO DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR COM CARBONETOS.

## **John Ferney Alvarez Rosário**

Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EP-USP, Av. Professor Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária CEP. 05.508-900 - São Paulo/SP Brasil. [john.rosario@poli.usp.br](mailto:john.rosario@poli.usp.br)

## **Roberto Martins Souza**

Laboratório de Fenômenos de Superfície, Departamento de Engenharia Mecânica, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo EP-USP, Av. Professor Mello Moraes, 2231 - Cidade Universitária CEP. 05.508-900 - São Paulo/SP Brasil. [roberto.souza@poli.usp.br](mailto:roberto.souza@poli.usp.br)

**Resumo:** Neste trabalho, estudou-se a integridade superficial durante o torneamento de um ferro fundido nodular com carbonetos, considerando as características microestruturais, com base nos requisitos do conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade superficial recomendados pela American National Standard for Surface Integrity na norma ANS B211.1. Durante os ensaios de torneamento empregaram-se duas velocidades de corte (60 m/min e 180m/min), dois avanços (0,1 mm/rev e 0,3 mm/rev) e duas profundidades de corte (0,2 mm e 0,3 mm), em dois diâmetros diferentes de um mesmo corpo de prova, baseados num planejamento fatorial fracionário  $2^{4-1}$ . Foi avaliada a rugosidade ( $R_a$ ), e realizou-se a descrição da microestrutura na seção transversal e da topografia, para um número mínimo de dois níveis de intensidade do processo. O diâmetro equivalente dos nódulos de grafita mudou em função do diâmetro das peças usinadas, mas, não foi observado um efeito estatisticamente significativo da dureza associado às características microestruturais da grafita. Os carbonetos comprometem a integridade da superfície enquanto aos efeitos na sub-superfície, e a grafita enquanto às características da topografia gerada.

**Palavras Chave:** Ferro fundido nodular, integridade da superfície, torneamento, carboneto.

## **1. INTRODUÇÃO.**

O atendimento das exigências crescentes para a fabricação de componentes com superfícies com um alto grau de perfeição e qualidade requer o entendimento da relação existente entre a metalurgia, a usinabilidade e os ensaios mecânicos. Na tentativa de atender essa necessidade, no final da década de 1960 foi introduzida uma área na engenharia de superfícies denominada “integridade da superfície”, que descreve e avalia as possíveis alterações produzidas numa camada superficial durante a usinagem, incluindo os efeitos nas propriedades do material e o desempenho da superfície em serviço<sup>(1)</sup>.

O conceito de “integridade da superfície” mudou gradativamente e novas definições incluídas. Field e Khales<sup>(2)</sup>, em 1964, cunharam o termo “integridade superficial”, o qual foi aplicado ao estudo de operações de retificação de superfícies e outros procedimentos de acabamento. Whitehouse<sup>(3)</sup> definiu integridade superficial como o conjunto de propriedades utilizadas para descrever as características físicas e geométricas das superfícies usinadas. Numa definição mais recente, Griffiths<sup>(4)</sup> descreve a integridade da superfície como a qualidade (“worth”) topográfica, química, mecânica e metalúrgica de uma superfície fabricada e a sua relação com o desempenho funcional.

Os processos de fabricação podem igualmente produzir mudanças nas propriedades do material numa camada sub-superficial, as quais geralmente acompanham os padrões de textura da topografia

na superfície <sup>(4)</sup>. Segundo o Machinability data center <sup>(1)</sup>, em função do tipo de energia empregada no processo de usinagem (mecânica, elétrica, térmica ou química), as propriedades do material da peça de trabalho ficam afetadas e é produzida uma ampla variedade de efeitos na sub-superfície. Na mesma linha, Griffiths <sup>(4)</sup> indica que as mudanças nas propriedades do material são resultado dos diferentes fatores envolvidos no processo de corte, e que compõem os eventos unitários térmicos, mecânicos ou químicos. As principais causas de alteração da sub-superfície são, portanto as temperaturas elevadas e os altos gradientes de temperatura desenvolvidos durante o processo de remoção de material, deformação plástica e reações químicas com o meio ambiente <sup>(4,5)</sup>. Mais especificamente, Field e Colaboradores <sup>(6)</sup>, Griffiths <sup>(4)</sup> e Whitehouse <sup>(3)</sup> indicam que as principais alterações nas camadas sub-superficiais, decorrentes dos processos de usinagem, são: camada branca, martensita revenida e não revenida, deformação plástica, fluxo lateral, dobramentos e trincas, microtrincas, ataque seletivo, ataque intergranular, entre outras <sup>(3,4,6,7,8)</sup>.

Quando é abordado um estudo relacionado com processos de fabricação, é muito importante lembrar que todos os parâmetros envolvidos no processo de acabamento influenciam diretamente na integridade da superfície do componente. Algumas variáveis da usinagem dos ferros fundidos estão relacionadas com as características do material no que se refere à formação de trincas e defeitos superficiais, principalmente quanto à quantidade, forma, tamanho e dureza relativa de heterogeneidades, além das diferenças de dureza induzidas por tratamento térmico e endurecimento por deformação durante a usinagem <sup>(5)</sup>. Durante uma operação de torneamento a ferramenta pode, teoricamente, transmitir com exatidão a sua geometria na peça de trabalho <sup>(4)</sup>. A afirmação anterior fica comprometida quando, por exemplo, os microconstituintes logo abaixo da superfície geram vazios e descontinuidades que modificam a topografia teórica da superfície usinada.

Neste trabalho, objetiva-se avaliar a integridade superficial de um ferro fundido nodular com carbonetos, considerando-se a heterogeneidade microestrutural do material e as conseqüentes diferenças nas propriedades mecânicas, quando submetido ao processo de torneamento. Juntamente com a importância tecnológica deste tipo de material, o mesmo apresenta uma microestrutura morfológicamente rica e, portanto, interessante do ponto de vista da sua influência na integridade superficial dos componentes usinados.

## 2. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Corpos-de-prova de ferro fundido nodular com carbonetos foram obtidos por fundição convencional, com as mesmas dimensões e geometria. Um total de quatro (4) corpos-de-prova, foram fundidos na mesma corrida e apresentaram a mesma composição química nominal, apresentada na Tabela 1. Antes da preparação de cada corpo-de-prova, estes possuíam 150 mm de diâmetro, e 100 mm de comprimento. Os ensaios de torneamento foram realizados em corpos-de-prova cilíndricos, em dois diâmetros diferentes para cada uma das peças, que foram de 140 mm e 80 mm. Para a usinagem foram usadas pastilhas de metal-duro (categoria ISO K15) com geometria triangular ISO TPUN 160312, com revestimento multicamadas de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> e TiN. Foi utilizado um porta-ferramenta convencional para torneamento externo com ângulo de posição da aresta de corte de 90°, com fixação da pastilha por alavanca e de seção transversal de 25 mm x 25 mm; trata-se de um modelo Coroturn RC para torneamento longitudinal com código ISO CTGPR 2525M16 - Kr900. Os ensaios foram feitos sem o uso de fluido de corte e utilizando-se um torno convencional da marca ROMI, modelo S-30.

Tabela 1. Valor médio da composição química nominal dos corpos-de-prova.

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Mg
3,415	0,9975	0,425	0,685	0,0095	0,727	2,8025	0,41	0,05

Os ensaios foram realizados seguindo um planejamento fatorial fracionário 2<sup>n-1</sup> <sup>(9)</sup> com três repetições, onde os níveis pré-estabelecidos dos fatores estão apresentados na Tabela 2. Com os dados contidos na Tabela 2, a matriz dos oito ensaios (quatro níveis, duas condições por cada nível)

ficou definida e está apresentada na Tabela 3. Três repetições foram feitas para cada uma das condições, totalizando 24 ensaios.

Tabela 2 – Níveis dos fatores do planejamento experimental

Variáveis Independentes	Nível inferior	Nível superior
Diâmetro ( $\emptyset$ )	80 mm	140 mm
Avanço (f)	0,1 mm/rev	0,3 mm/rev
Velocidade de corte (Vc)	60 m/min	180 m/min
Prof. De corte (ap)	0,2 mm	0,3 mm

Tabela 3 - Matriz do planejamento experimental dos ensaios

Ensaio	$\emptyset$ (mm)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	ap (mm)
1	80	0,1	60	0,2
2	140	0,1	60	0,3
3	80	0,3	60	0,3
4	140	0,3	60	0,2
5	80	0,1	180	0,3
6	140	0,1	180	0,2
7	80	0,3	180	0,2
8	140	0,3	180	0,3

Na retirada das amostras para a análise da peça usinada, empregou-se um disco diamantado acoplado a uma cortadora de precisão ISOMET, objetivando, assim, reduzir alterações microestruturais induzidas como consequência do processo de corte. Usaram-se condições de corte moderadas e garantiu-se fluxo contínuo de fluido refrigerante na região de corte. Após o corte, foi realizada a preparação metalográfica.

A microestrutura foi caracterizada qualitativamente por meio de microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) e quantitativamente empregando-se analisador de imagens. A preparação das amostras para análise por microscopia óptica foi realizada mediante preparação metalográfica com carga controlada. Foi realizado um lixamento grosseiro com lixa com carboneto de silício (SiC) de granulometria 320, e operações posteriores até polimento fino com solução diamantada de 9  $\mu\text{m}$ . Posteriormente, foi realizada uma etapa de polimento com solução diamantada de 3  $\mu\text{m}$ , e polimento final com sílica coloidal de 0,25  $\mu\text{m}$ . As características gerais da microestrutura foram reveladas mediante ataque químico com reativo de Nital 3%.

Características qualitativas particulares da microestrutura foram avaliadas em microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo Philips XL – 30 e microssonda EDAX para análise espectrométrica de Raios X com detector de elementos leves. Mediante o uso da metalografia quantitativa por análise de imagem digitalizada no programa QWIN do analisador de imagens LEICA, foram quantificadas as características dos microconstituintes. A caracterização dos microconstituintes consistiu da contagem de fração volumétrica, a avaliação da morfologia e tamanho da grafita e dos carbonetos. Como método de avaliação da morfologia dos microconstituintes foi usado o fator de forma (F), o qual é diretamente proporcional ao quociente entre o comprimento (C) e a largura (L) do microconstituente, como apresentado na Equação 1.

$$F = \frac{C}{L} \quad (1)$$

O diâmetro equivalente ( $\phi_{eq}$ ) foi o método utilizado para caracterizar quantitativamente o tamanho, pois esse valor é diretamente proporcional à área (S) do microconstituente, como apresentado na Equação 2. Empregou-se um aumento de 100X e 50 campos para cada medição no caso dos carbonetos, e foi usado um aumento de 1000X e 50 campos no caso da caracterização das características da grafita.

$$\phi_{eq} \propto S$$

(2)

Após os ensaios de usinagem, as características qualitativas tridimensionais da topografia das superfícies dos corpos-de-prova foram observadas mediante a utilização do MEV. Para cada condição usinada foram registradas imagens com 500X de aumento, na tentativa de observar e identificar os mecanismos gerados na superfície usinada. Os elementos que descrevem a textura da superfície foram baseados no cálculo da rugosidade a partir do perfil efetivo bidimensional, obtido mediante rugosímetro por apalpador. Nessa avaliação não é considerado o perfil de ondulação da superfície usinada, que foi removido do perfil efetivo. As medições de rugosidade foram realizadas em todas as superfícies usinadas, incluindo as repetições. A análise da rugosidade foi baseada na medição do parâmetro de rugosidade Ra.

A caracterização das mudanças na sub-superfície das amostras usinadas, decorrentes do processo de usinagem, foi realizada mediante a avaliação metalográfica da seção transversal. O plano de corte para a avaliação da seção transversal foi paralelo à direção de avanço da ferramenta de corte, como apresentado na Figura 1. O procedimento de preparação metalográfica das amostras após o corte, é o mesmo que foi descrito para a preparação das amostras que foram empregadas na avaliação das características microestruturais da totalidade dos corpos-de-prova.

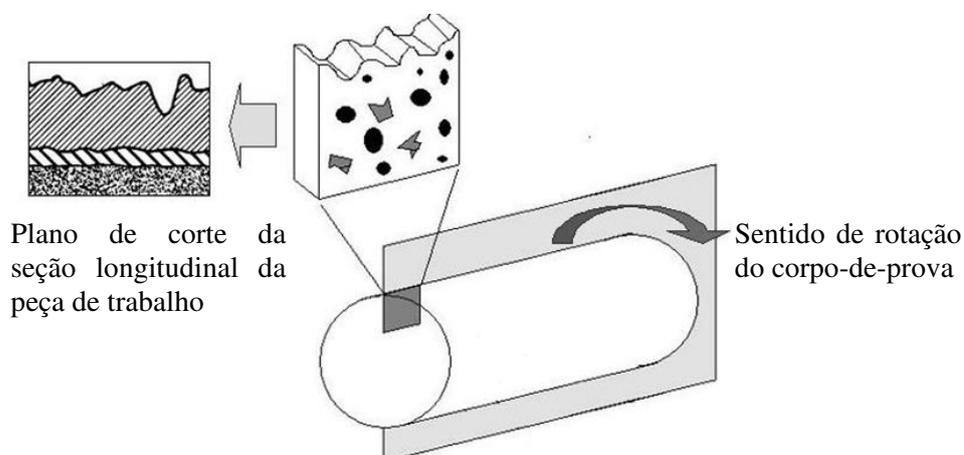


Figura 1 - Esquema representativo do plano de avaliação da metalografia da seção transversal

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Análise da microestrutura

A Tabela 4 foi gerada utilizando-se o programa STATISTICA. Nessa Tabela apresenta-se o valor calculado para o estimador p como resposta do teste de hipóteses nula (hipótese de que o fator não seja significativo). Quando o valor p de um efeito principal ou de interação é menor ou igual ao nível de significância ( $\emptyset$ , freqüentemente de 0,05), a hipótese nula é rejeitada, o que significa que o efeito é significativo. Se o valor de p for maior que  $\emptyset$  se aceita a hipótese nula, ou seja, o efeito é não significativo.

Da análise dos resultados contidos na Tabela 4, no caso dos carbonetos, pode-se inferir que somente o efeito principal do diâmetro na fração volumétrica de carbonetos é significativo. Essa afirmação pode ser feita ao se observar que o valor do estimador p (0,00137) é menor que o nível de significância de 0,05% ( $p$  0,00137 < 0,05). Igualmente, o valor positivo do efeito principal ( $\emptyset$ ) (3,1278) indica que houve um aumento da fração volumétrica de carbonetos conforme o aumento do diâmetro da peça.

Na Tabela 4, na coluna para a grafita, concluiu-se que os efeitos do diâmetro quanto ao arredondamento ( $p = 0,2207 > 0,05$ ) e fator de forma ( $p = 0,1445 > 0,05$ ) não foram estatisticamente significativos. O anterior sugere que tanto a forma, como a quantidade de grafita não mudou ao longo do diâmetro do corpo-de-prova. Igualmente, da Tabela 4 pôde-se inferir que o efeito principal

do diâmetro da peça no diâmetro equivalente da grafita foi significativo ( $p = 0,0404 < 0,05$ ), e assim, das características microestruturais avaliadas, somente o tamanho dos nódulos de grafita mudaram de um diâmetro da peça para outro. O valor positivo do efeito principal ( $\emptyset$ ) indicou que o diâmetro equivalente de grafita é maior para o diâmetro externo dos corpos-de-prova, e diminui quando avaliado no diâmetro interno da peça.

Tabela 4 – Efeito principal das respostas dos constituintes microestruturais para o diâmetro. Para as variáveis significativas apresenta-se o valor calculado de cada efeito e a probabilidade do nível p-level. Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

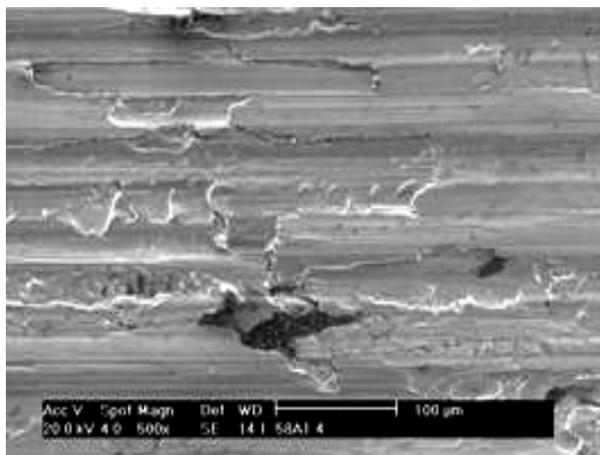
Efeito Principal	Carbonetos		Grafita	
	Variável Independente ( $\emptyset$ )			
Respostas	VALOR	p	VALOR	p
F volumétrica	3,1278*	0,00137	-0,376	0,7244
Arredondamento	0,2968	0,3868	-0,311	0,2207
Fator de forma	0,1483	0,3371	-0,1480	0,1445
$\emptyset$ equivalente	2,1249	0,5154	6,535*	0,0404

### 3.2 Integridade da superfície

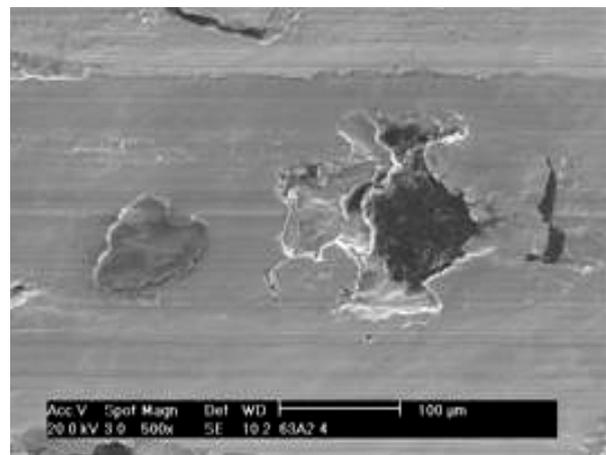
Neste trabalho foi adotado o conjunto mínimo de dados <sup>(10)</sup>, no qual se requer a especificação de algumas características da peça usinada como a dureza, a rugosidade (Ra), e a descrição da microestrutura avaliada na seção transversal, para um número mínimo de dois níveis de intensidade do processo. Os níveis de intensidade podem ser entendidos como condições de acabamento – desbaste, ou condições de usinagem leve-pesada. Antes de se proceder a uma análise mais detalhada da sub-superfície, será feita uma melhor descrição dos fenômenos que aconteceram na superfície usinada.

#### 3.2.1 Análise da topografia:

As Figuras 2 e 3 contêm um conjunto de imagens da topografia das superfícies dos corpos-de-prova usinados, obtido mediante a utilização de microscópio eletrônico de varredura, para uma das repetições das condições testadas. Estas superfícies foram escolhidas considerando a linha de análise do conjunto mínimo de avaliação da integridade superficial <sup>(10)</sup>. Os parâmetros de corte com o qual foram geradas as superfícies correspondem a os dois níveis de intensidade do processo requeridos pela ANS B211.1 <sup>(9)</sup>, e suas magnitudes correspondem aos itens 1, 2, 7 e 8 da matriz codificada mostrada na tabela 3.



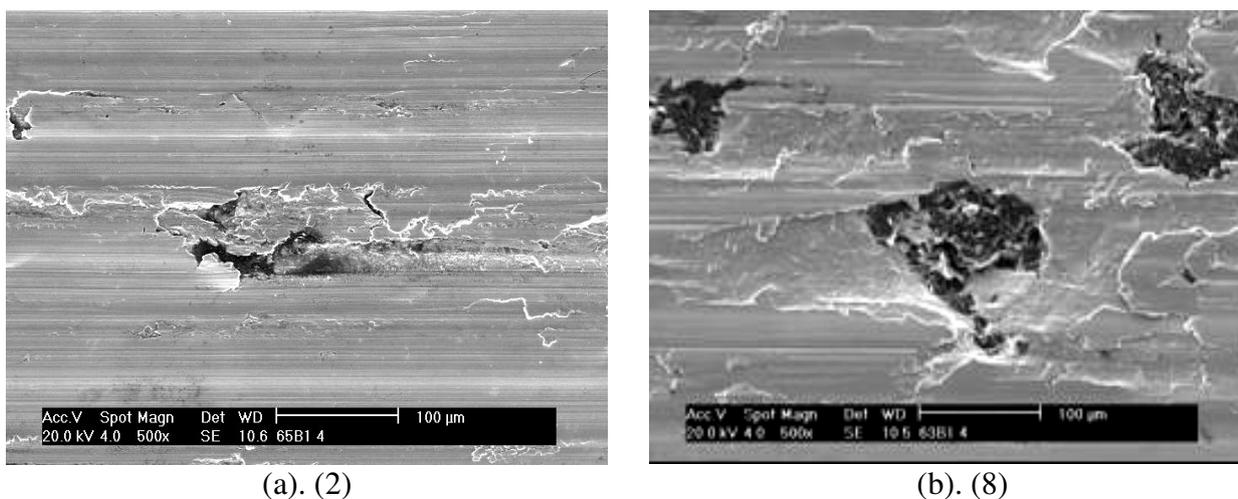
(a). (1)



(b). (7)

Figura 2 – Imagens da topografia das superfícies obtidas na usinagem do diâmetro de 80 mm e  $a_p$  0,2 mm. a). f 0,1 1 mm/rev; Vc 60 m/min. b). f 0,3 1 mm/rev; Vc 180 m/min. Análise de elétrons secundários.

Na figura 2 (a) observa-se que a matriz metálica apresentou maior deformação plástica e maior descontinuidade dos sulcos criados pelo avanço da ferramenta de corte, quando comparados com a superfície apresentada na Figura 2 (b). A superfície apresentada na primeira condição (60 m/min) foi usinada com uma velocidade de corte menor do que a segunda condição (180 m/min), o que sugere valores de rugosidade maiores para a superfície apresentada na Figura 2(a); fato que será corroborado mais adiante. Aparentemente, mediante a observação da topografia das superfícies no diâmetro de 80 mm, é na condição com maior velocidade de corte e maior avanço, que a grafita ficou mais destacada na superfície, como conseqüência de uma melhor remoção da matriz metálica que recobre os nódulos de grafita. Já para a superfície torneada com velocidade de corte menor e menor avanço da Figura 2(a), os defeitos superficiais associados à grafita apresentaram menor tamanho quando comparados com os defeitos da Figura 2 (b). Observa-se cratera de menor tamanho, junto com uma maior deformação plástica da matriz metálica recobrindo os nódulos de grafita expostos na superfície.



(a). (2)

(b). (8)

Figura 3 – Imagens da topografia das superfícies obtidas na usinagem de diâmetro de 140 mm, e  $a_p$  0,3 mm. a).  $f$  0,1 mm/rev;  $V_c$  60 m/min b).  $f$  0,3mm/rev;  $V_c$  180 m/min. Análise de elétrons secundários.

Nas superfícies usinadas apresentadas na Figura 3, observa-se que aumentado o avanço e a velocidade de corte durante a usinagem no diâmetro de 140 mm, e mantendo a mesma profundidade de corte (0,3 mm), ocorre uma diminuição na qualidade da superfície. Este resultado condiz como o expressado na literatura <sup>(5)</sup>, onde um aumento no avanço pode acarretar maior rugosidade e dano na superfície. A condição da superfície mostrada na primeira série de imagens da Figura 2 corresponde ao diâmetro de 80 mm e à menor profundidade de corte empregada (0,2 mm), obtendo-se uma superfície com melhor acabamento e menor número de crateras empregando maiores velocidades de corte e avanço. O caso contrário ocorre para o diâmetro de 140 mm, onde o maior avanço e maior velocidade de corte, combinado com uma microestrutura contendo grafita maior e mais arredondada, facilitam o destacamento da mesma, favorecendo a presença de crateras. Para as condições estudadas, o aumento de fração volumétrica e o tamanho da grafita sugerem ampliação do efeito que o aumento do avanço produz na superfície. Lembrando que as análises estatísticas para avaliar as respostas microestruturais indicaram influência estatística significativa da variação do diâmetro dos corpos-de-prova no tamanho da grafita, poderia inferir-se que os aspectos microestruturais se somam ao efeito da redução da velocidade de corte e o avanço, para prejudicar ainda mais o acabamento das superfícies, durante o torneamento do ferro fundido nodular com carboneto estudado neste trabalho.

### 3.2.1.1 Textura da superfície

Segundo o Machinability Data Center <sup>(1)</sup> e Morton <sup>(11)</sup>, a topografia de uma superfície pode ser representada ao se avaliar o conjunto rugosidade, ondulação, orientação das marcas da ferramenta e

as falhas. Nesta avaliação não foi considerado o perfil de ondulação da superfície usinada; o qual, junto ao perfil de rugosidade são os elementos que compõem a textura de uma superfície<sup>(12,13)</sup>. Nas aplicações onde o contato entre superfícies é fundamental, a ondulação é um parâmetro importante e tanto a ondulação como rugosidade geram efeitos diferentes no componente. Seguindo a linha do conjunto mínimo de dados recomendado pela ANS B211.1<sup>(10)</sup>, os elementos que descrevem a textura da superfície foram baseados no cálculo da rugosidade (Ra) a partir do perfil efetivo bidimensional, obtido mediante rugosímetro por apalpador.

### 3.2.1.1.1 Rugosidade

A Figura 4 apresenta a média do valor do parâmetro de rugosidade Ra para as condições em que foram usinadas as superfícies apresentadas nas Figuras 2 e 3.

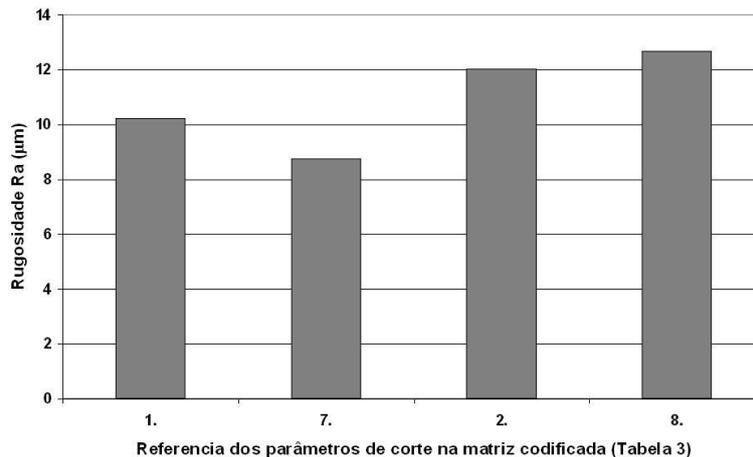


Figura 4 – Valor médio da rugosidade Ra avaliada para cada uma das superfícies que compõem o conjunto mínimo de dados. 1.)  $\phi$  80 mm, Vc 60 m/min, f 0,1 mm/rev., ap 0,2 mm. 7.)  $\phi$  80 mm, Vc 180 m/min, f 0,3 mm/rev., ap 0,2 mm. 2.)  $\phi$  140 mm, Vc 60 m/min, f 0,1 mm/rev., ap 0,3 mm. 8.)  $\phi$  140 mm, Vc 180 m/min, f 0,3 mm/rev., ap 0,3 mm.

Na Figura 4 pode-se observar que quando o avanço e a velocidade de corte são aumentados, o parâmetro de rugosidade Ra tem uma tendência a aumentar ou diminuir em dependência do diâmetro da peça e a profundidade de corte. Além disso, nota-se na Figura 4 que os valores de Ra apresentam-se muito parecidos para o diâmetro de 140mm, mas a diferença no parâmetro Ra mostrou-se maior quando foi usinado o diâmetro de 80mm. O resultado da rugosidade reflete o analisado para a topografia das superfícies usinadas apresentadas nas Figuras 2 e 3. Isso mostra, novamente, que a microestrutura do material da peça teve uma influência tão grande ou maior do que o avanço e a velocidade de corte na rugosidade. As análises estatísticas indicaram que houve um aumento da fração volumétrica de carbonetos e do diâmetro equivalente de grafita conforme o aumento do diâmetro da peça. O diâmetro de 180 mm usinado nas condições mais severas do conjunto mínimo de dados foi o mais prejudicado pela usinagem, sendo o que apresentou o pior acabamento, o que é refletido pela sua topografia e os maiores valores de rugosidade. A seguir, será estudada a seção transversal da superfície da peça usinada com as condições mais severas, na qual se espera observar com maior intensidade os danos na sub-superfície.

### 3.3 Análise das camadas sub-superficiais

As Figuras 5 e 6 apresentam imagens obtidas no MEV, nas quais observam-se alguns aspectos da superfície e da sub-superfície, que não foram possíveis de se observar na Figura 3b. Na Figura 5, observa-se que, para as condições de ensaio utilizadas, ocorreu trincamento na sub-superfície da peça usinada; trincamento localizado no carboneto eutético. Na Figura 5b observa-se trincamento tanto na superfície usinada, como na sub-superfície. O trincamento de carbonetos durante a usinagem é um aspecto característico dos ferros fundidos brancos, o qual compromete a sua

usinabilidade <sup>(5)</sup>. Os carbonetos apresentam uma combinação de dureza elevada e pouca capacidade de suportar altas tensões de cisalhamento, tensões que são próprias do processo de torneamento.

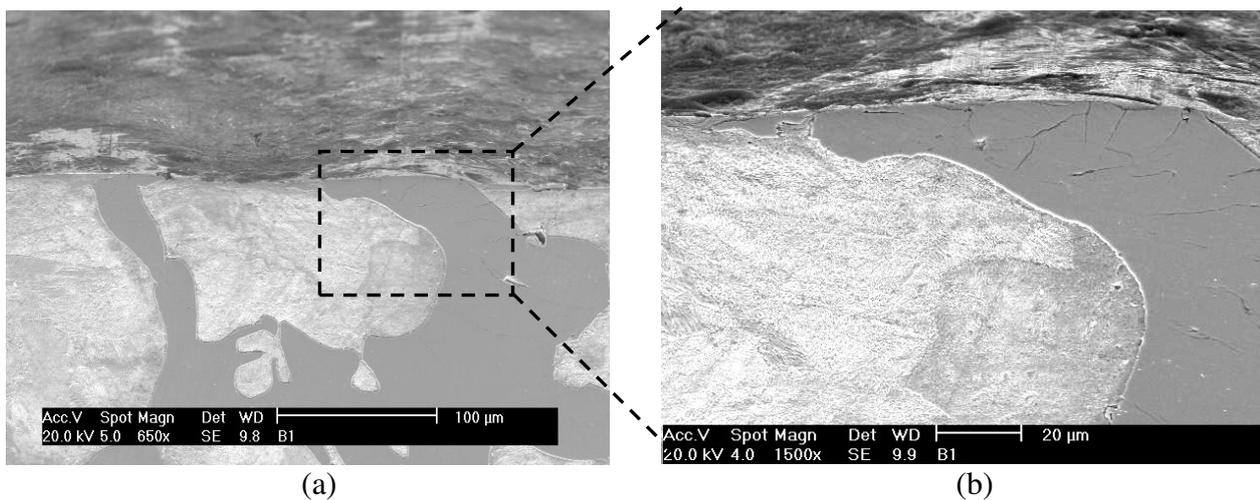


Figura 5 – MEV onde se observa a superfície e a seção transversal do corpo-de-prova como consequência da inclinação do mesmo no microscópio. A amostra corresponde ao diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com  $(V_c) = 180$  m/min; profundidade de corte  $(ap) = 0,3$  mm; avanço  $f = 0,3$  mm/rot. a). aumento de 650X. b) aumento de 1500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%.

A Figura 6 apresenta uma imagem da superfície e a seção transversal da peça, detalhando os aspectos microestruturais na grafita, relacionados com o efeito do nível de intensidade dos parâmetros de corte empregados.

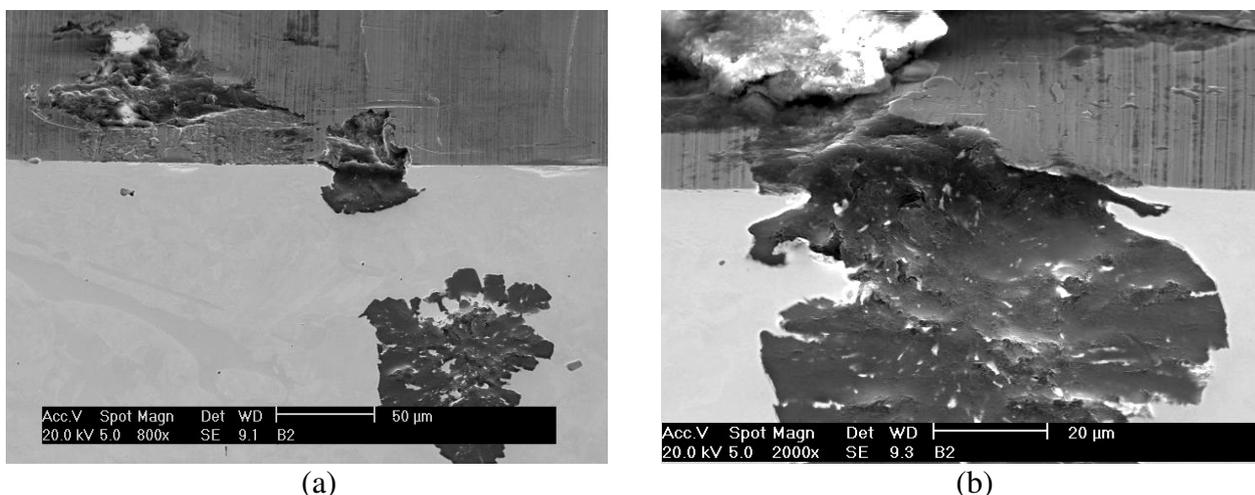


Figura 6 - MEV onde se observa a superfície e a seção transversal do corpo-de-prova como consequência da inclinação do mesmo no microscópio. A amostra corresponde ao diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com  $(V_c) = 180$  m/min; profundidade de corte  $(ap) = 0,3$  mm; avanço  $f = 0,3$  mm/rot. a). aumento de 800X. b) aumento de 2000X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%.

Na Figura 6, apresenta-se um detalhe de um nódulo de grafita destacado da superfície da peça usinada, como resultado do processo de usinagem. Observa-se claramente que o nódulo de grafita que está exposto na superfície não apresenta arredondamento bem definido. A matriz metálica que recobre parcialmente o nódulo apresentado na Figura 6, a qual foi removida quase na sua totalidade durante a usinagem. A grafita nodular, segundo o exposto na literatura, produz interrupções na matriz metálica, o que tem efeito de quebra-cavaco durante a usinagem <sup>(4)</sup>, facilitando, assim, o processo de corte do material da matriz metálica e o desprendimento de cavacos curtos na região de

corte. O anterior explica o fato pelo qual os nódulos de grafita adjacentes na sub-superfície facilitam o arrancamento da matriz metálica, sendo destacados na topografia das peças usinada; característica própria dos ferros fundidos nodulares.

A usinagem do ferro fundido nodular com carbonetos permitiu verificar características tanto dos ferros fundidos brancos, como nodulares. Percebe-se nas Figuras 5 e 6, que com o mesmo nível de intensidade do processo de corte, a sub-superfície apresentou dois tipos de respostas associadas à microestrutura; formação de trincas nos carbonetos localizados na superfície, e recobrimento da grafita pela matriz metálica e/ou destacamento na superfície. Sendo assim, para o conjunto de situações analisadas, é possível dizer que a grafita comprometeu a integridade da superfície quanto aos efeitos na topografia, e os carbonetos comprometeram a integridade da superfície quanto aos efeitos na sub-superfície.

#### 4. Conclusões

Por meio da análise dos resultados dos ensaios, pode-se concluir que:

- Uma mesma peça fundida em ferro fundido nodular com carbonetos pode apresentar diferenças microestruturais estatisticamente significativas, em função da fração volumétrica de carbonetos e tamanho da grafita.
- A interação dos parâmetros de corte com as características microestruturais acarreta efeitos na textura da superfície durante o torneamento do ferro fundido nodular com carboneto.
- A grafita compromete a integridade da superfície quanto aos efeitos na topografia, e os carbonetos comprometem a integridade da superfície quanto aos efeitos na sub-superfície.

#### 5. Agradecimentos

Manifestamos os nossos agradecimentos às empresas Kennametal Brasil e Aços Villares Sidenor pelos materiais concedidos.

#### 6. Referências Bibliográficas

1. MACHINABILITY DATA CENTER. **Machining data handbook**, Machining data center, v. 2, 1980. p 18-39/18-136.
2. FIELD, M.; KALES, J.F. **Review of surface integrity of machined components**, Annals of the CIRP, v. 20/2, 1971. p. 153 – 163.
3. WHITEHOUSE, D.J. **Surfaces and their measurement**. Hermes Penton Science, London , 2004. 394 p.
4. GRIFFITHS, B. **Manufacturing surface technology: Surface integrity & functional performance**. London: Penton Press, 2001. 237p.
5. Shaw. **Metal Cutting Principles**. Clarendon, Great Britain, 1984. 590 p.
6. FIELD, M. e colaboradores. **A review of measuring methods for surface integrity**, Annals of the CIRP, v. 21/2, 1972. p. 219-238.
7. CHOU, K.Y.; EVANS, C.J. **White layers and thermal modeling of hard turned surfaces**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 39, 1999. p. 1863 – 1881.
8. BOSHEH, S.S.; MATIVENGA, P.T. **White layer formation in hard turning of H13 tool steel at high cutting speeds using CBN tooling**. International Journal of Machine Tools & Manufacture xx, 2005. p.1 – 9.
9. BOX, G.E.P. **Statistics for experimenters : introduction to design, data analysis and model building**. New York : John Wiley, 1978.
10. ANS B211.1. **American National Standard for Surface Integrity**. 1986.
11. MORTON, R.K. **Topography of surfaces**. In: ASM Handbook. Surface engineering. v.5, 1991. p. 136-138.

12. ASME. American Society of Mechanical Engineers. B46.1. **Surface Texture (Surface roughness, Waviness, and Lay)**. 1996.
13. SONG, J.F.; VORBURGER, T.V. **Surface texture**. In: ASM Handbook. Friction, lubrication and wear technology. v.18. 1992. p. 184-190.

## **Evaluation of surface integrity on turning of the ductile cast iron with carbides.**

### **John Ferney Alvarez Rosario**

Surface Phenomena Laboratory, Mechanical Engineering Department, University of São Paulo, Escola Politécnica, Avenida Prof. Mello Moraes 2231, 05508-900 São Paulo, Brazil.  
[john.rosario@poli.usp.br](mailto:john.rosario@poli.usp.br)

### **Roberto Martins Souza**

Surface Phenomena Laboratory, Mechanical Engineering Department, University of São Paulo, Escola Politécnica, Avenida Prof. Mello Moraes 2231, 05508-900 São Paulo, Brazil.  
[roberto.souza@poli.usp.br](mailto:roberto.souza@poli.usp.br)

**Abstract :** *In this work it was studied the surface integrity of nodular cast iron with carbides during machine process. It was considered the microstructure features, based on requirements of minimal data sets, to evaluate the surface integrity, as recommended by the American National Standard for Surface Integrity under the ANS B211.1. standard. During turning test, it were fixed two cutting speeds (60 m/min and 180m/min), two feeds (0,1 mm/rev and 0,3 mm/rev) and two depths of cut (0,2 mm and 0,3 mm), at two different diameters of the same specimen, based on a fractional factorial design 24-1. The surface roughness parameter Ra was evaluated. Microstructure and topography features was described for, as minimal, two level process intensity. Equivalent diameter of graphite nodules changed as a function of the turned specimens diameters. It was not appreciated an significance statistical effect of hardness correlated to the microstructural graphite features. Carbides affected the surface integrity of the surface layer, and graphite as the features of topography.*

**Keywords:** Ductile cast iron, surface integrity, turning, carbide.