JOHN FERNEY ALVAREZ ROSARIO

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE NO
TORNEAMENTO DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR
COM CARBONETO**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em Engenharia

**São Paulo
2006**

JOHN FERNEY ALVAREZ ROSARIO

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE NO
TORNEAMENTO DE UM FERRO FUNDIDO NODULAR
COM CARBONETO**

Dissertação apresentada à
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Área de concentração: Engenharia Mecânica
Orientador: Professor Dr. Roberto Martins de Souza

**São Paulo
2006**

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com anuência do seu orientador

São Paulo, 17 de Abril de 2006

Assinatura do autor

Assinatura do orientador

FICHA CATALOGRÁFICA

© Reprodução autorizada pelo autor desde que citada a fonte

Alvarez, Rosario John Ferney
Avaliação da integridade da superfície no
torneamento de um ferro fundido nodular com
carboneto /
John Ferney Alvarez. -- São Paulo, 2006.
138p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da
Universidade de São Paulo. Departamento de
Engenharia Mecânica.

1. Ferro fundido nodular 2. Integridade da
superfície 3. torneamento 4. Carboneto
I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.
Departamento de Engenharia Mecânica I.t.

***“You never know me
Cause I won't let you in
Not all I am
Is on the surface”***

Tomado da música: ***“Weaving Sorrow”***
Rob Halford

À minha Família,

“A mis Padres:

Gonzalo Alvarez y Jiorman Rosario”.

Agradecimentos

Ao orientador Professor Dr. Roberto Martins de Souza, pela paciência e apoio durante a orientação do mestrado;

Ao orientador Professor Dr. Amilton Sinatora, pela confiança e apoio;

À empresa Aços Villares-Sidenor, na figura do Engenheiro Miguel Ângelo de Carvalho, pela bolsa de mestrado FUSP, e pelo apoio e patrocínio em projetos de pesquisa;

À Prof. Dra. Izabel Fernanda Machado, pela colaboração e contribuições na realização dos ensaios;

Ao Prof. Dr. Amauri Hassui, pelos aportes e discussões geradas em torno ao meu trabalho;

À Dra. Maria Cristina Moré Farias, pela amizade, e pelas suas valiosas contribuições durante o planejamento experimental e análise dos resultados;

À empresa Kennametal Brasil, na figura do Engenheiro Gerferson Correia Chagas; e à empresa Sandvik Coromant, na figura do Engenheiro Silvio Baúco, pela doação de ferramentas de corte, ferramental usado nos ensaios de usinagem;

À empresa Sultrade, na figura do Jonas, pela disponibilização do uso de equipamentos para preparação metalográfica com carga controlada;

Ao Departamento de Metalurgia e de Materiais da EPUSP, pela disponibilização do uso do microscópio eletrônico de varredura;

À Fernanda Nascimento Pereira, pela companhia e apoio incondicional;

Ao meu irmão Carlos Gonzalo Alvarez Rosario, a sua esposa Sandra Milena Ricaurte e a Gabriela, por terem partilhado comigo a experiência de estar longe de casa durante todo este tempo;

Aos colegas Colombianos, pela amizade e constante colaboração;

À senhora Silene Carneiro e o senhor Sidney Carneiro, pela disponibilidade e colaboração;

Aos colegas do Laboratório de Fenômenos de Superfície, pela amizade e colaboração.

RESUMO

Neste trabalho, estudou-se a integridade superficial durante o torneamento de um ferro fundido nodular com carbonetos, considerando a heterogeneidade microestrutural (fração volumétrica, tamanho e morfologia de grafita e dos carbonetos) e os efeitos dos parâmetros de corte (avanço, velocidade de corte e profundidade de corte), baseados num planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} .

Este texto apresenta, numa primeira parte, uma revisão baseada em referências bibliográficas clássicas da engenharia de superfícies, na tentativa de definir os conceitos que compõem a integridade da superfície. Posteriormente, descrevem-se os resultados de ensaios preliminares, realizados com a finalidade avaliar os níveis do processo e os efeitos desses parâmetros na integridade da superfície. Finalmente, realizaram-se os ensaios de usinagem em corpos-de-prova de ferro fundido nodular com carboneto, nos diâmetros de 80 mm e 140mm. Durante os ensaios de torneamento empregaram-se duas velocidades de corte (60 m/min e 180 m/min), dois avanços (0,1 mm/rev e 0,3 mm/rev) e duas profundidades de corte (0,2 mm e 0,3 mm). Após os ensaios de usinagem, foram realizadas: a avaliação das propriedades do material usinado (dureza e microestrutura), a análise de topografia da superfície usinada mediante avaliação da rugosidade, e a avaliação da influência dos parâmetros de usinagem na rugosidade. Encontrou-se uma dependência estatisticamente significativa da variação nas propriedades mecânicas dos corpos-de-prova em função da microestrutura, e mostraram-se os efeitos dessas variações em termos da integridade da superfície usinada.

Palavras-chave: Ferro fundido nodular, integridade da superfície, torneamento, carboneto.

ABSTRACT

In this work, the surface integrity of a ductile cast iron with carbides was studied during turning operations, considering the microstructural heterogeneity (volume fraction, size and morphology of the graphite and carbides) and the effect of the machining parameters (feed, cutting speed and depth of cut), based on a fractional factorial design 2^{4-1} .

This work presents, initially, a literature review based on classic works on surface engineering, as an attempt to define the main concepts of surface integrity. Later, the results of preliminary test are described, which were conducted in order to define the process levels and the effects of these levels on the surface integrity. Finally, turning tests were conducted on specimens of ductile iron with carbides, at diameters of 80 and 140 mm. Two cutting speeds (60 m/min and 180 m/min), two feeds (0,1 mm/rev and 0,3 mm/rev) and two depths of cut (0,2 mm and 0,3 mm) were selected during the tests. Machined specimens were analyzed in terms of the properties of the machined material (hardness and microstructure) and of the roughness of the machined surface.

The effect of the machining parameters on the roughness was also studied. A statistically significant dependence was observed for the properties of the machined specimens as a function of the microstructure and the effect of these properties on the surface integrity is presented.

Key words: Ductile cast iron, surface integrity, turning, carbide.

SUMÁRIO

1INTRODUÇÃO.....	1
2REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Integridade da superfície.....	4
2.1.1 Topografia da superfície.....	9
2.1.1.1 Textura da Superfície	11
2.1.1.1.1 Rugosidade	12
2.1.1.1.2 Ondulação	13
2.1.1.2 Orientação das marcas da ferramenta	15
2.1.1.3 Acabamento superficial	17
2.1.2 Características sub-superficiais.....	17
2.1.3 Desempenho na integridade superficial.....	18
2.2 Conjuntos de dados padronizados para avaliar a integridade superficial.....	20
2.3 Técnicas experimentais para a avaliação da Integridade Superficial	24
2.3.1 Metalografia da seção transversal	24
2.3.2 Avaliação da microdureza	26
2.3.3 Determinação da tensão residual.....	28
2.3.4 Topografia	29
2.4 Metalurgia dos ferros fundidos nodulares com carboneto	30
2.5 Integridade superficial dos ferros fundidos nodulares com carboneto.....	31
2.6 Estatística e planejamento de experimentos	33
2.6.1 Planejamento fatorial.....	36
2.6.2 Efeitos.....	37
3OBJETIVO.....	40
4ENSAIOS PRELIMINARES	41
4.1 MATERIAIS E MÉTODOS.....	41
4.1.1 Obtenção dos corpos-de-prova.....	41
4.1.2 Preparação do corpo-de-prova	42
4.1.3 Máquina ferramenta e ferramental de corte	43
4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	44
4.2.1 Ensaios de usinagem.....	44
4.2.2 Avaliação das propriedades do material usinado	44
4.2.2.1 Análise de dureza	44
4.2.2.2 Análise microestrutural.....	45
4.2.3 Análise da topografia da peça usinada	46
4.2.3.1 Textura da superfície.....	46
4.2.3.1.1 Rugosidade	46
4.2.4 Análise da sub-superfície da peça usinada.....	48
4.3 Resultados e discussão	49

4.3.1	Avaliação das propriedades do material usinado	49
4.3.1.1	Caracterização microestrutural qualitativa	49
4.3.1.2	Caracterização microestrutural quantitativa e análise da dureza do material	49
4.3.2	Análise da topografia e da textura da superfície.	51
4.3.3	Influência dos parâmetros de operação e níveis do processo	60
4.3.3.1	Influência do avanço na rugosidade.....	60
4.3.3.2	Influência da velocidade de corte na rugosidade	62
4.3.4	Análise da Sub-superfície	63
4.3.4.1	Análise do nível de usinagem severo na qualidade da superfície, e os seus efeitos na sub-superfície	63
4.4	Considerações dos ensaios preliminares	70
5 ENSAIOS FINAIS		72
5.1	Materiais e métodos	72
5.1.1	Corpos-de-prova	72
5.1.1.1	Obtenção dos corpos-de-prova.....	72
5.1.1.2	Preparação dos corpos-de-prova	72
5.2	Procedimento experimental.....	73
5.2.1	Ensaio de usinagem.....	73
5.2.2	Avaliação das propriedades do material usinado	75
5.2.2.1	Análise de dureza	75
5.2.2.2	Análise microestrutural.....	75
5.2.3	Análise da topografia da peça usinada	76
5.2.3.1	Textura da superfície.....	77
5.2.3.1.1	Rugosidade	77
5.2.4	Análise da sub-superfície da peça usinada.....	77
5.3	Resultados e discussão	77
5.3.1	Avaliação das propriedades do material usinado	77
5.3.1.1	Caracterização microestrutural qualitativa	77
5.3.1.2	Caracterização microestrutural quantitativa e análise da dureza do material	78
5.3.1.2.1	Efeito do diâmetro na microestrutura.....	80
5.3.1.2.1.1	- Efeito do diâmetro nos carbonetos	81
5.3.1.2.1.2	- Efeito do diâmetro na grafita	83
5.3.1.2.2	Efeito do diâmetro na dureza.....	85
5.3.2	Análise da topografia da peça usinada	86
5.3.2.1	Rugosidade	92
5.3.3	Análise da sub-superfície.....	100
5.3.3.1	Análise do nível de usinagem moderado na qualidade da superfície, e os seus efeitos na sub-superfície.....	100
5.3.3.2	Análise do nível de usinagem severo na qualidade da superfície e os seus efeitos na sub-superfície	104
6 CONCLUSÕES		108
7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS		109

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	110
ANEXO 1	114
ANEXO 2.....	117

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática dos elementos que compõem a integridade das superfícies.....	4
Figura 2 - Representação esquemática dos efeitos superficiais e sub-superficiais que compõem a tecnologia das superfícies, segundo o Machinability data Center [1980].....	6
Figura 3 - Representação esquemática dos elementos que compõem a tecnologia das superfícies	7
Figura 4 - Representação esquemática dos elementos que compõem a integridade de uma superfície	8
Figura 5 - Representação esquemática dos fatores que definem a integridade da superfície de um produto acabado.....	8
Figura 6 - Representação esquemática das características de uma superfície com falhas e aspecto unidirecional, ilustrando as diferentes ordens de grandeza ao se avaliar a topografia	10
Figura 7 - Símbolos usados para representar as marcas da ferramenta na designação da textura da superfície segundo as normas ANSI Y14.36 de 1978 [ANSI, 1978], e ISO 1302 de 2001 [ISO, 2001].....	16
Figura 8 - Representação esquemática da seção transversal de uma peça usinada. Observa-se as camadas sub-superficiais geradas como resultado do processo de torneamento [Griffiths, 2001].....	18
Figura 9 - Representação esquemática dos fatores que influenciam a integridade superficial na usinagem de metais [Griffiths, 2001]	19
Figura 10 - Níveis diferentes de integridade superficial durante torneamento duro do aço AISI-SAE 52100 tratado termicamente, mudando os parâmetros de operação. a) Formação de uma fina camada escura (martensita sobre revenida). b) ZAM inalterada. c) Formação de camada branca de 7.5 μm . d) Formação de camada branca de 4.5 μm , seguida de uma fina camada escura [Schwach e Guo, 2005].....	26
Figura 11 - Perfil de dureza na escala microscópica avaliada na seção transversal de um componente de aço AISI-SAE 4340, submetido ao processo de retificação nos regimes severo e moderado [Machinability data center, 1980] citando de [Koster e colaboradores, 1976]	27
Figura 12 - Avaliação da tensão residual após o torneamento de um ferro fundido dúctil, a dois níveis diferentes de intensidade [Leskovar e Kovac, 1988]. VB é o desgaste de flanco da ferramenta, f é o avanço, σ é a tensão residual paralela à superfície e Z é a profundidade da peça na qual foi realizada a medição de dureza	29
Figura 13 - Imagem da seção transversal de um ferro fundido nodular depois do processo de retificação. Mostra-se um nódulo de grafita na superfície sendo recoberto por uma camada de ferrita [Griffiths, 2001].....	32
Figura 14 - Exemplo da Tabela de estimativa dos efeitos e do erro padrão de uma resposta, para os fatores a e b, gerada no programa <i>STATISTICA</i>	38

Figura 15 - Representação esquemática das dimensões aproximadas do corpo-de-prova após processo de fundição.....	42
Figura 16 - Representação esquemática das dimensões dos corpos-de-prova após pré-usinagem até as dimensões próximas dos ensaios.....	42
Figura 17 - Representação esquemática das dimensões da pastilha empregada nos ensaios de torneamento preliminares. ($R_e = 1,2$ mm; $M = 16$ mm; $S = 4$ mm)	43
Figura 18 - Esquema representativo da direção de avaliação da rugosidade, feita na direção de avanço da ferramenta de corte.....	47
Figura 19 - Esquema representativo do plano de avaliação da metalografia da seção transversal	48
Figura 20 - MEV do ferro fundido mesclado com grafita nodular. Nota-se os diferentes microconstituintes (grafita nodular, carbonetos eutéticos e matriz perlítica). Aumento de 100X. Análise de elétrons retro-espalhados. Sem ataque	49
Figura 21 - Variação da dureza e da fração volumétrica dos microconstituintes em diferentes diâmetros da peça. Para as condições estudadas, a macrodureza apresentou uma dependência linear com a fração volumétrica dos microconstituintes	50
Figura 22 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 80$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot.....	51
Figura 23 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot.....	52
Figura 24 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 80$ m/min e $f = 0,2$ mm/rot.....	52
Figura 25 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 80$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot.....	53
Figura 26 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot.....	53
Figura 27 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 80$ m/min e $f = 0,2$ mm/rot.....	54
Figura 28 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte (V_c)	

de 80 m/min, e avanço (f) de 0,1 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 22.....	55
Figura 29 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 60 m/min, e avanço f de 0,1 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 23.....	56
Figura 30 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 80 m/min, e avanço f de 0,2 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 24.....	56
Figura 31 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 80 m/min, e avanço f de 0,1 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 25.....	58
Figura 32 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 60 m/min, e avanço f de 0,1 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 26.....	58
Figura 33 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 80 m/min, e avanço f de 0,2 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 27.....	59
Figura 34 - Influência do diâmetro da peça usinada na rugosidade	60
Figura 35 - Influencia do avanço na rugosidade.....	62
Figura 36 - Influencia da velocidade de corte na rugosidade Influencia da velocidade de corte na rugosidade.....	62
Figura 37 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se crateras, dobramentos, rebarbas e outras irregularidades. Aumento de 50X. Analise de elétrons secundários	63
Figura 38 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Além das irregularidades identificadas na Figura 37, observa-se trincamento em diferentes regiões. Aumento de 250X. Analise de elétrons retro-espalhados	64
Figura 39 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se grafita exposta no interior da cratera de maior tamanho. Aumento de 500X. Analise de elétrons secundários	65
Figura 40 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se carboneto eutético na borda da superfície usinada, trincado como resultado da usinagem. Aumento de 1000X. Analise de elétrons retro-espalhados. Ataque com nital ao 3%.....	66

- Figura 41 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se carboneto eutético na borda da superfície usinada, trincado como resultado da usinagem. Aumento de 3500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 66
- Figura 42 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se nódulo de grafita na borda da superfície usinada, recoberto pela matriz metálica como resultado da usinagem. Aumento de 800X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 67
- Figura 43 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se nódulo de grafita destacado na borda da superfície usinada, como resultado da usinagem. Aumento de 1500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 68
- Figura 44 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se que ocorreu alteração microestrutural da borda da superfície usinada, como resultado da usinagem. Aumento de 2500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 69
- Figura 45 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se mudanças microestruturais na borda da peça, acompanhada de grãos de perlita deformados plasticamente na sub-superfície, como resultado da usinagem. Aumento de 6500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 69
- Figura 46 - Representação esquemática das dimensões dos corpos-de-prova após pré-usinagem até as dimensões próximas dos ensaios finais 73
- Figura 47 - Representação esquemática das dimensões da pastilha empregada nos ensaios de torneamento finais. ($R_e = 1,2$ mm; $M = 16$ mm; $S = 3$ mm) 74
- Figura 48 - Variação da dureza e da fração volumétrica dos microconstituintes em diferentes diâmetros da peça. Para as condições estudadas, a dureza brinell apresentou pouca variação em função da microestrutura..... 78
- Figura 49 - Variação do valor médio do tamanho e da morfologia dos microconstituintes em diferentes diâmetros da peça..... 79
- Figura 50 - MEV da superfície no diâmetro de 80 mm, V_c 60 m/min, f 0,1 mm/rev, a_p 0,2 mm. com aumento de a) 100x, b) 200x e c) 500x. E no diâmetro de 140 mm, V_c 180 m/min, f 0,1 mm/rev, a_p 0,2 mm com aumento de d) 100x, e) 200x e e) 500x. Análise de elétrons secundários... 87
- Figura 51 - MEV da superfície no diâmetro de 80 mm, V_c 180 m/min, f 0,3 mm/rev, a_p 0,2 mm. com aumento de (a) 100x, (b) 200x e (c) 500x. E no diâmetro de 140 mm, V_c 60 m/min, f 0,3 mm/rev, a_p 0,2 mm com aumento de (d) 100x, (e) 200x e (f) 500x. Análise de elétrons secundários 89

Figura 52 - MEV da superfície no diâmetro de 80 mm, V_c 180 m/min, f 0,1 mm/rev, a_p 0,3 mm. com aumento de (a) 100x, (b) 200x e (c) 500x. E no diâmetro de 140 mm, V_c 180 m/min, f 0,3 mm/rev, a_p 0,3 mm com aumento de (d) 100x, (e) 200x e (e) 500x. Análise de elétrons secundários 91

Figura 53 - Efeito da interação do diâmetro e da profundidade de corte na altura do pico mais alto ao vale mais profundo do perfil de rugosidade R_t . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%..... 96

Figura 54 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na rugosidade media central R_a . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%..... 97

Figura 55 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na rugosidade media quadrática (RMS) R_q . Intervalo de confiança com nível de significância de 5% 98

Figura 56 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na altura do pico mais alto do perfil de rugosidade R_p . Intervalo de confiança com nível de significância de 5% 98

Figura 57 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na profundidade do vale mais profundo do perfil de rugosidade R_v . Intervalo de confiança com nível de significância de 5% 99

Figura 58 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na altura pico-vale da altura de rugosidade no comprimento de medição. Intervalo de confiança com nível de significância de 5%..... 99

Figura 59 - Efeito do diâmetro e da profundidade de corte no R_t . Intervalo de confiança com nível de significância de 5% 100

Figura 60 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 80 mm após o ensaio de usinagem com (V_c) = 60 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,2 mm; avanço f = 0,1 mm/rot. Observa-se crateras, dobramentos, rebarbas e outras irregularidades. Aumento de 500X. Analise de elétrons secundários 101

Figura 61 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 80 mm após o ensaio de usinagem com (V_c) = 60 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,2 mm; avanço f = 0,1 mm/rot. Observa-se a distribuição dos nódulos de grafita na sub-superfície, e um nódulo de grafita sendo recoberto pela matriz metálica na superfície como resultado da usinagem. Aumento de 350X. Analise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 102

Figura 62 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 80 mm após o ensaio de usinagem com (V_c) = 60 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,2 mm; avanço f = 0,1 mm/rot. Observa-se um nódulo de grafita sendo exposto na superfície como resultado da usinagem. Aumento de 1000X. Analise de elétrons secundários. Ataque com Nital 3%..... 103

Figura 63 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 80 mm após o ensaio de usinagem com com (V_c) = 60 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,2 mm; avanço f = 0,1 mm/rot. Observa-se carboneto eutético na borda da superfície usinada, trincado como resultado da usinagem. Aumento de 2000X. Analise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 103

Figura 64 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $(V_c) = 180$ m/min; profundidade de corte $(a_p) = 0,3$ mm; avanço $f = 0,3$ mm/rot. Observa-se crateras, dobramentos, rebarbas e outras irregularidades. Aumento de 500X. Analise de elétrons secundários 105

Figura 65 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $(V_c) = 180$ m/min; profundidade de corte $(a_p) = 0,3$ mm; avanço $f = 0,3$ mm/rot. Observa-se a distribuição dos nódulos de grafita na sub-superfície, e um nódulo de grafita sendo exposto na superfície como resultado da usinagem. Aumento de 350X. Analise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 105

Figura 66 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $(V_c) = 180$ m/min; profundidade de corte $(a_p) = 0,3$ mm; avanço $f = 0,3$ mm/rot. Observa-se um nódulo de grafita sendo exposto na superfície como resultado da usinagem. Aumento de 1000X. Analise de elétrons secundários. Ataque com Nital 3%..... 106

Figura 67 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $(V_c) = 180$ m/min; profundidade de corte $(a_p) = 0,3$ mm; avanço $f = 0,3$ mm/rot. Observa-se carboneto eutético trincado na sub-superfície como resultado da usinagem. Aumento de 1000X. Analise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3% 107

Lista de tabelas

Tabela 1 - Efeito das propriedades da superfície nas causas de falha de componentes [Machinability data center, 1980]	20
Tabela 2 - Conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície no nível mais baixo de complexidade	21
Tabela 3 - Conjunto padrão de dados para avaliar a integridade da superfície. Segundo nível em termos de complexidade	21
Tabela 4 - Conjunto estendido de dados para avaliar a integridade da superfície. Terceiro nível em termos de complexidade	22
Tabela 5 - Conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície [Griffiths, 2001]	23
Tabela 6 - Conjunto padrão de dados para avaliar a integridade da superfície [Griffiths, 2001]	23
Tabela 7 - Composição Química do Corpo-de-prova	42
Tabela 8 - Parâmetros de corte utilizados.....	44
Tabela 9 - Relação entre o “Cut-off” e comprimento de medição [ASME, 1996]	47
Tabela 10 - Valores dos parâmetros de rugosidade das amostras, obtidos pela media de cinco medições para cada condição	55
Tabela 11 - Valores da rugosidade media teórica das amostras para o caso em que o raio de ponta da ferramenta é grande com relação o avanço [Shaw, 1984).	61
Tabela 12 - Valor médio da composição química nominal dos corpos-de-prova	72
Tabela 13 - Matriz do planejamento experimental dos ensaios	74
Tabela 14 - Matriz do planejamento experimental dos ensaios	75
Tabela 15 - Matriz de experimentos codificada e resultados obtidos para a fração volumétrica de carbonetos. As colunas FV_1 , FV_2 e FV_3, informam o valor médio da fração volumétrica de carbonetos avaliada para cada repetição de ensaio	81
Tabela 16 - Estimativa dos efeitos e do erro padrão da fração volumétrica de carbonetos para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%	82
Tabela 17 - Efeito principal das respostas microestruturais do carboneto 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%	83
Tabela 18 - Matriz de experimentos codificada e resultados obtidos para a fração volumétrica de grafita. As colunas FV_1 , FV_2 e FV_3, informam o valor médio da fração volumétrica de grafita avaliada para cada repetição de ensaio	84

Tabela 19 - Estimativa do efeito e do erro padrão da fração volumétrica de grafita para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%.....	84
Tabela 20 - Efeito principal das respostas microestruturais da grafita 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%	85
Tabela 21 - Matriz de experimentos codificada e resultados obtidos para a dureza do material. As colunas Hardn_1 , Hardn_2 e Hardn_3, informam o valor médio da dureza Brinell avaliada para cada repetição de ensaio.....	86
Tabela 22 - Estimativa dos efeitos e do erro padrão da dureza para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%	86
Tabela 23 - Matriz de experimentos codificada e resultados obtidos para a rugosidade média (Ra). Nas colunas Ra_1 , Ra_2 e Ra_3, informam o valor médio da rugosidade media avaliada para cada repetição de ensaio.....	93
Tabela 24 - Estimativa dos efeitos e do erro padrão da rugosidade média Ra para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%	94
Tabela 25 - Efeitos principais das respostas em rugosidade para os fatores do experimento. Para as variáveis significativas apresenta-se a probabilidade do nível p-level e o valor do efeito. “NS” indica não significância na resposta do nível abordado	95

1 INTRODUÇÃO

A fabricação de peças e componentes de máquinas a partir de ligas metálicas de ferro fundido representa a maior parcela de peças fundidas no mundo [Souza e Castello Branco, 1989]. No Brasil, esses materiais são igualmente importantes, tendo a produção de ferro fundido aumentado significativamente de 1.736.048 de toneladas em 2002 para 1.949.186 de toneladas em 2003 [De Deus, 2005]. Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas baseadas nessa crescente importância que os ferros fundidos vêm assumindo em decorrência do próprio desenvolvimento do país, na tentativa de conhecer melhor tanto a tecnologia de fabricação, como as aplicações destas ligas [Souza e Castello Branco, 1989; Nunes, 2002; Silva, 2002].

Os ferros fundidos nodulares com carboneto são utilizados em aplicações onde se requer uma combinação de ductilidade e boa resistência mecânica e resistência ao desgaste. Um exemplo para a aplicação destes materiais é na elaboração de cilindros para laminação de aços, os quais precisam de um bom desempenho da superfície para garantir a qualidade dos produtos laminados.

Cerca de 70% das empresas de fundição brasileiras que fabricam peças em metais ferrosos entregam suas peças já usinadas, o que agrega valor aos produtos. Das principais dificuldades encontradas por essas empresas na produção de metais ferrosos fundidos, ao longo do ano de 2005, o maior gargalo encontra-se no setor de acabamento e rebarbação, que atinge 38% da totalidade das inconformidades na linha de produção; seguida pelas dificuldades no setor de moldagem, com 24% [Fundição e serviços, 2005].

A qualidade das superfícies usinadas é um fator importante no desempenho de diferentes elementos de máquinas. A combinação de tensões e temperatura elevada gerada durante a usinagem pode induzir alterações na microestrutura, na microdureza, gerar trincas superficiais,

crateras, dobramento, inclusões, deformação plástica e tensões residuais na peça terminada [Tricard, 1994]. A intensidade dos defeitos mencionados anteriormente dependem da interação da energia mecânica e térmica gerada durante o processo de remoção de material e das propriedades do material da peça de trabalho. Dessa maneira, defeitos produzidos por diferentes procedimentos de fabricação podem afetar significativamente o desempenho do componente acabado. Os principais fatores que afetam o acabamento superficial nos processos de usinagem são as condições de corte, a classe e geometria da ferramenta e a rigidez do sistema máquina-peça-sistema de fixação [Shaw, 1984]. A integridade da superfície descreve e controla as possíveis alterações produzidas numa camada superficial e sub-superficial durante a usinagem, incluindo os efeitos nas propriedades do material e o desempenho da superfície em serviço [Field e Kales, 1971].

No presente trabalho será avaliada a integridade superficial de corpos-de-prova de um ferro fundido nodular com carboneto, quando submetido ao processo de torneamento. Esta avaliação será baseada numa metodologia padronizada [Field e Kales, 1971; Whitehouse, 1994; Griffiths, 2001] e que consiste de um conjunto padrão de dados para a avaliação da integridade superficial. Esse conjunto de dados considera a avaliação da topografia (rugosidade, ondulação e aspecto superficial), a macroestrutura (macrotrincas e defeitos superficiais), a microestrutura (microtrincas, deformação plástica, transformações de fase, ataque seletivo, entre outros) e medições de microdureza para avaliar as alterações metalúrgicas e nas propriedades mecânicas na sub-superfície.

No Item 2, será realizada uma revisão bibliográfica baseada em referências clássicas de fundamentos de engenharia de superfícies, o que justifica-se devido à necessidade de definir os elementos e termos que compõem a integridade superficial. Já numa segunda parte da revisão bibliográfica, será feita uma descrição das alterações na integridade superficial e das técnicas e empregadas para avaliá-las; descrição que será baseada numa revisão de artigos e publicações recentes.

Após a apresentação dos objetivos do trabalho (Item 3), o Item 4 expõe uma série de ensaios preliminares realizados para avaliar os níveis do

processo e os efeitos desses parâmetros na integridade da superfície dos corpos-de-prova. Estes resultados permitiram delimitar os ensaios definitivos realizados neste trabalho. O Item 5 tratará desses ensaios definitivos e será avaliada a integridade superficial, considerando os efeitos dos parâmetros do processo de corte e da microestrutura, baseados num planejamento estatístico.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apresentam-se a seguir definições e terminologias que serão empregadas neste trabalho.

2.1 Integridade da superfície

O atendimento das crescentes exigências 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 usinabilidade¹ e os ensaios mecânicos. Na tentativa de atender essa necessidade, em finais da década de 1960 foi introduzida uma disciplina dentro da 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 [Machinability data center, 1980]. Apresentam-se na Figura 1 os elementos que definem a integridade superficial, baseado num conjunto de definições realizadas por diferentes autores [Field e Kales, 1971; Field e colaboradores, 1972; Machinability data center, 1978; ANSI B.46.1, 1980; ANS B211.1, 1986; Whitehouse, 1994; Griffiths, 2001].

Figura 1 - Representação esquemática dos elementos que compõem a integridade das superfícies

¹ “Usinabilidade é uma expressão usada para se referir à resposta de um material em termos de vida da ferramenta, da força de corte, da qualidade da superfície usinada, da taxa de material removido ou da forma do cavaco” [Shaw, 1984].

O conceito de “integridade da superfície” tem mudado nos últimos 50 anos e definições têm sido feitas no decorrer desse tempo. Field e Khales [1971], em 1964, cunharam o termo “*integridade superficial*”, o qual foi aplicado ao estudo de operações de retificação de superfícies e outros procedimentos de acabamento. Em um outro trabalho, Field e Khales [1972] definiram a “*integridade superficial como a relação existente entre as propriedades físicas e o comportamento funcional de uma superfície obtida num processo de usinagem, ou mediante um outro processo de geração de superfícies*”. Whitehouse [1994] definiu integridade superficial como o conjunto de propriedades utilizadas para descrever as características físicas e geométricas das superfícies usinadas. Numa definição mais recente, Griffiths [2001] 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.

O Machinability Data Center [1980], baseado nos trabalhos de Field e Khales [1971; 1972], publicou um dos primeiros textos com ampla informação sobre os resultados experimentais relacionados com o estudo da integridade superficial obtidos até o momento da publicação. No mesmo documento, o Machinability data center [1980] definiu a “tecnologia das superfícies” como “*a atividade que descreve, detalha e avalia a condição do conjunto superfície e camada superficial dos elementos manufaturados*”². A tecnologia das superfícies foi considerada no Machinability data center [1980] como composta da “textura superficial” e da “integridade da superfície”.

Na Figura 2, apresenta-se uma representação esquemática dos elementos que compõem a tecnologia das superfícies segundo o Machinability data center [1980].

² observa-se da definição feita pelo Machinability data center, que a tecnologia das superfícies não considera o estudo do desempenho funcional dos componentes.

Figura 2 - Representação esquemática dos efeitos superficiais e sub-superficiais que compõem a tecnologia das superfícies, segundo o Machinability data Center [1980]

Como observado na Figura 2, a definição de textura superficial feita pelo Machinability data center [1980] considerou os seguintes elementos: a textura da superfície, os efeitos macroscópicos e a geometria. Igualmente, a integridade da superfície foi considerada como os efeitos internos na sub-superfície dos elementos manufaturados. Na Figura 2 apresentou-se os efeitos na sub-superfície estudados até 1980, data de publicação do documento. As definições realizadas no Machinability data center [1980] basearam-se na definição de textura superficial realizada pela norma ANSI B.46.1-1978 [1978], a qual considerava a rugosidade, a ondulação, a orientação das marcas da ferramenta, e os defeitos superficiais como elementos que compunham a textura da superfície. É importante observar que, embora a tecnologia de superfícies esteja baseada no estudo da integridade da superfície e da textura da superfície³, o critério mais tradicionalmente adotado para avaliar a qualidade de uma superfície usinada é a textura superficial [Whitehouse, 1994].

A tecnologia das superfícies envolve diversas áreas do conhecimento. Na Figura 3 apresenta-se os elementos que a compõem segundo, Griffiths [2001].

³ O conceito de textura superficial será abordado com maiores detalhes no Item 2.1.1.1.

Figura 3 - Representação esquemática dos elementos que compõem a tecnologia das superfícies

A avaliação da integridade superficial atualmente, segundo a ênfase histórica, decorre da extensão do estudo da textura da superfície para se incluir a análise dos efeitos do processo de usinagem na sub-superfície, e o desempenho funcional da mesma. A relação entre a integridade da superfície e a textura da superfície é cada vez mais importante. Para avaliar a integridade superficial, Griffiths [2001] define duas categorias: topografia da superfície tridimensional e características sub-superficiais. Na Figura 4, em que detalham-se melhor os elementos da integridade da superfície apresentados na Figura 1, apresenta-se uma classificação dos elementos que determinam a integridade da superfície, e foi baseada nas definições feitas por Field e Kholes [1971], Field e colaboradores [1972], Whitehouse [1994], Morton [1994] e Griffiths [2001]. Nos itens 2.1.1, 2.1.2 e 2.1.3 serão abordadas as definições dos elementos que compõem a integridade da superfície adotando a estrutura do conjunto de itens expostos na Figura 4.

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 a integridade da superfície do componente. Tricard [1994] considera que a integridade das superfícies acabadas pode ser estendida para incluir seis grupos de elementos fundamentais que a definem, e são: os fatores visuais, os fatores dimensionais, as tensões residuais, os fatores tribológicos, os fatores metalúrgicos e um último grupo que reúne fatores diversos.

Figura 4 - Representação esquemática dos elementos que compõem a integridade de uma superfície

Na Figura 5 apresenta-se um diagrama ilustrando a classificação dos elementos chave que definem a integridade da superfície feita por Tricard [1994].

Figura 5 - Representação esquemática dos fatores que definem a integridade da superfície de um produto acabado.

Segundo Griffiths [2001], o entendimento básico das relações existentes entre os aspectos inerentes aos processos de fabricação (aspectos mecânicos, térmicos e químicos) e os seis grupos de fatores ilustrados na

Figura 5, são a chave para a otimização dos processos de acabamento de superfícies. Field e Khales [1971], e Field colaboradores [1972], fizeram uma descrição geral do objetivo da integridade superficial nos diversos processos de fabricação e apresentaram alguns dos métodos existentes para a avaliação da integridade superficial na fabricação de componentes. Um exemplo do observado acima, é o trabalho realizado por Leskovar e Kovac [1988], que, baseado no estudo da tensão residual, sugere o emprego da integridade superficial como critério da qualidade dos componentes em diversos processos de fabricação. Diversos trabalhos [Field e Khales, 1971; Field e colaboradores, 1972; Machinability data center, 1980; Whitehouse, 1994] relacionam a rugosidade da superfície com as propriedades mecânicas do componente usinado.

2.1.1 Topografia da superfície

Segundo a norma ASME B46.1-1996 [ASME, 1996], “*a topografia é a representação tridimensional das irregularidades da superfície geométrica*”⁴. Para o *Machinability Data Center* [1980] e Morton [1994], a topografia de uma superfície pode ser representada ao se avaliar o conjunto rugosidade, ondulação, orientação das marcas da ferramenta e as falhas; enquanto Correa e colaboradores [2004] afirmam que a topografia da superfície é avaliada pela sua textura superficial. Seguindo a linha do Machinability Data Center [1980] e Morton [1994], na Figura 6 apresenta-se uma descrição dos elementos que compõem a topografia de uma superfície usinada com padrões de marcas unidirecionais, na qual se podem observar esquematicamente as diferenças nas ordens de grandeza ao avaliar a topografia.

⁴ Superfície geométrica está definida no Anexo I.

Figura 6 - Representação esquemática das características de uma superfície com falhas e aspecto unidirecional, ilustrando as diferentes ordens de grandeza ao se avaliar a topografia

Os diferentes tipos de processos de usinagem ou de remoção de material têm um grande impacto na geometria de uma superfície. Diversas superfícies têm espaçamentos regulares ou irregulares que tendem a descrever padrões na superfície. Estes padrões são gerados pela combinação de diversos fatores que estão diretamente relacionados ao processo de fabricação ou ao material da peça acabada [Morton, 1994]. Field e colaboradores [1972] expõem que dos fatores devidos ao material do componente, o mais importante é a microestrutura. Quanto aos fatores devidos ao processo de fabricação, no caso das operações de usinagem, é a ferramenta de corte quem tem a maior influência na textura da superfície. Elementos como a forma da ferramenta, a velocidade de corte, o avanço e o fluido de corte afetam a topografia da superfície. Outros fatores que afetam a superfície são: a instabilidade da ferramenta de corte, decorrente de vibração por desbalanceamento, e a folga dos componentes da máquina ferramenta.

2.1.1.1 Textura da Superfície

“A textura da superfície é a combinação de certos desvios repetitivos ou aleatórios da superfície real em relação à superfície geométrica, a qual compõe a superfície topográfica tridimensional”⁵ [Song e Vorburger, 1992; ASME, 1996]. Existem diferentes definições na literatura para os elementos que compõem a textura da superfície. Como exemplos têm-se:

- Whitehouse [1994] apontou que o conjunto de causas de desvio da superfície nominal podem ser identificadas mediante a avaliação de três tipos de irregularidades: a rugosidade, a ondulação e a orientação das marcas da ferramenta na superfície. Ao mesmo tempo, anota como algumas definições de textura da superfície incluem somente a rugosidade e a ondulação, enquanto outras consideram também a direção das marcas da ferramenta, citando a observação feita por Schlesinger [1942], que afirma que algumas superfícies apresentam um, dois ou os três tipos de irregularidades descritas anteriormente.
- O *Machinability Data Center* [1980] acrescenta um quarto elemento à definição de textura superficial feita por Whitehouse [1994], as imperfeições da superfície (*Flaws*).
- Song e Vorburger [1992] afirmam que o termo “*textura superficial*” faz referência às finas irregularidades (picos e vales) produzidas numa superfície durante um processo de fabricação e está definida por dois componentes: a rugosidade e a ondulação.

Exceto pelas marcas da ferramenta, Song e Vorburger [1992] compartilham a afirmação feita por Whitehouse [1994] e Schlesinger [1942], ressaltando que usualmente não é feita uma diferenciação dos termos “*topografia*”, “*textura superficial*” e “*rugosidade*”, o que se deve ao fato de que, dos elementos que descrevem a topografia de uma superfície, a rugosidade é especificada e avaliada mais freqüentemente.

Devido à controvérsia gerada na literatura por diversos autores, para definir os elementos que compõem a textura da superfície, será assumida

⁵ Superfície geométrica e superfície real estão definidas no Anexo I.

neste trabalho a definição feita pela norma ASME B46.1-1996 [ASME, 1996] e Song e Vorburger [1992], segundo a qual a rugosidade e a ondulação são os elementos que definem a textura da superfície.

2.1.1.1.1 Rugosidade

A rugosidade superficial é o parâmetro mais representativo para descrever a textura superficial, devido à sua influência direta no atrito, fadiga e resistência elétrica e térmica [Song e Vorburger, 1992]. Song e Vorburger [1992], Morton [1994], Whitehouse [1994] e ASME [1996] descrevem a rugosidade como as irregularidades finas (ou de alta frequência) geradas numa superfície, como resultado da interação da condição do material e da ação inerente do processo de remoção de material por parte da ferramenta de corte.

Para Griffiths [2001], a rugosidade está relacionada diretamente com o evento unitário de manufatura (os mecanismos inerentes ao processo de geração da superfície) e descreve as irregularidades causadas por cada avanço, abrasivo, partícula, ou faísca gerada durante processo de corte. Segundo Griffiths [2001], a rugosidade pode ser dividida em duas categorias: a rugosidade relacionada com o evento unitário e a micro-rugosidade causada pelas perturbações entre cada evento unitário (exemplo: ruptura, deposição de partículas ou desgaste da ferramenta).

Boothroyd e Knight [1989] classificaram a rugosidade superficial de acordo com as variáveis que compõem e/ou afetam o sistema de geração de superfícies; e a definem como rugosidade ideal e natural. A rugosidade ideal decorre como resultado da geometria da ferramenta e da velocidade de avanço; enquanto que a rugosidade natural é associada às irregularidades do processo de remoção de material, tais como vibração, defeitos microestruturais do material, desgaste da ferramenta de corte, falhas na formação do cavaco, entre outras.

A ASME [1996] faz uma classificação dos parâmetros de rugosidade para os métodos de medição baseados no uso de perfilômetros (parâmetros de rugosidade bidimensionais): “*parâmetros de altura, parâmetros de espaçamento, parâmetros de forma e funções e, finalmente, parâmetros*

híbridos”⁶. A seguir serão apresentados alguns dos parâmetros de altura mais utilizados no estudo das superfícies geradas mediante processos de usinagem [Morton, 1994; ASME, 1996; Whitehouse, 2004].

A rugosidade média (R_a) é um dos parâmetros mais utilizados para caracterizar a rugosidade de uma superfície. Contudo, superfícies usinadas com mesmo valor de R_a podem apresentar perfis diferentes [Whitehouse, 2004]. O parâmetro Rugosidade média quadrática (R_q), junto com o R_a , faz parte do grupo de parâmetros de rugosidade médios. Para perfis de rugosidade na forma de onda senoidal simples, o R_q é proporcional ao R_a , mas, na realidade, tais perfis são muito mais complexos. Nos processos convencionais de usinagem o R_a é o parâmetro mais empregado para caracterizar a rugosidade das superfícies, mas o uso do R_q apresenta importância nas aplicações ópticas, nas quais o parâmetro relaciona-se com a qualidade óptica da superfície [Griffiths, 2001].

Ainda sobre parâmetros de altura, o parâmetro R_v informa a profundidade do vale mais profundo do perfil de rugosidade no comprimento de medição. R_v , R_t (Distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo) e R_p (Altura do pico mais alto no perfil) são considerados parâmetros de avaliação de condições extremas de usinagem e são de muita utilidade em casos onde se tem interesse na identificação de condições pouco usuais no perfil.

2.1.1.1.2 Ondulação

Segundo a ASME [1996], a ondulação é o componente da textura superficial mais espaçado, quando comparado com o comprimento de onda do perfil de rugosidade. A ondulação, segundo Morton [1994], é o conjunto de irregularidades de média frequência na superfície, e sobre a qual se encontra superposta a rugosidade. A ondulação pode ser afetada pelos desvios associados à máquina, como desajustes, vibração, tratamento térmico ou fim da vida da ferramenta de corte. Um dos parâmetros que definem a ondulação é a altura da ondulação (W_t). A altura da ondulação é

⁶ A classificação dos parâmetros de rugosidade para os métodos de avaliação por perfilômetros estão abordados Anexo II

a altura do pico mais alto ao vale mais profundo do perfil modificado; modificações que consistem em remover do perfil a rugosidade e parte da forma mediante filtragem, alisamento, ou outros meios.

Os instrumentos de medição convencionais possuem ferramentas para obter o perfil de ondulação de maneira rápida e satisfatória. Alguns autores afirmam que a ondulação é simplesmente outro comprimento de onda na avaliação da textura da superfície e tem que ser incluída junto com a medição da rugosidade; outros, pelo contrário, ressaltam que não tem que ser inserida [Griffiths, 2001; Whitehouse, 2004]. Whitehouse [2004] levantou uma discussão relacionada com a importância e funcionalidade da avaliação da ondulação no monitoramento das superfícies geradas pelos processos de manufatura. Whitehouse [2004] parte da consideração da ondulação como componente característica da superfície e associada à presença de defeitos nas máquinas-ferramenta. Portanto, ao se avaliar a textura da superfície, deve-se diferenciar a ondulação da rugosidade. Funcionalmente a situação é um pouco mais complexa, já que a avaliação da ondulação depende da natureza da peça usinada. 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. Uma abordagem que pode ajudar a entender melhor essa diferença é exposta por Whitehouse [2004] e baseia-se no fato de que os níveis de energia necessários para gerar cada um dos elementos que compõem a textura da superfície são diferentes. Segundo Whitehouse [2004], a geração da ondulação deve-se à baixa energia durante o processo de fabricação das superfícies; enquanto a geração da rugosidade é devida a fenômenos que necessitam de alta energia.

Os efeitos associados à geração de uma determinada rugosidade nas propriedades do material abaixo da superfície são evidentes a uma profundidade muito menor que os relacionados à geração da ondulação. No caso da rugosidade, essa profundidade corresponde a aproximadamente 0,5 μm [Whitehouse, 2004] e se deve ao fato da localização da máxima tensão da superfície ser determinada pela própria geometria da rugosidade (Ex. a curvatura). O mesmo conceito é aplicado para a ondulação, só que a

localização da tensão encontra-se numa profundidade maior e a magnitude das tensões são menores, o que pode ser relacionado ao comprimento de onda maior. A ondulação e a rugosidade têm efeitos diferentes, portanto, devem ser tratadas em separado em situações onde se tem contato. Não é preciso fazer uma diferenciação entre a rugosidade e a ondulação em aplicações de não contato, como o caso de superfícies com finalidades de natureza visual (aplicações óticas), empregadas para dispersão de luz, por exemplo.

Levando em consideração observação dos parágrafos anteriores, não há dúvida quanto à importância de se avaliar a ondulação, especialmente nas aplicações onde o contato entre as superfícies é um parâmetro importante.

2.1.1.2 Orientação das marcas da ferramenta

Segundo a norma ASME [1996], “a orientação das marcas da ferramenta é a direção predominante dos padrões superficiais, usualmente determinada pelo método de fabricação empregado”. A orientação das marcas da ferramenta é a característica que diferencia a direção dos padrões gerados numa superfície usinada para cada processo de fabricação [Morton, 1994]; por exemplo, marcas paralelas no torneamento e na furação, marcas circulares no faceamento, marcas radiais na retífica ou multidirecionais na usinagem eletroquímica [Griffiths, 2001]. Na Figura 7, apresentam-se os símbolos utilizados para representar a direção das marcas da ferramenta relativas à superfície nominal; simbologia que é apresentada pelo Machinability Data Center [1980] e Griffiths [2001], baseados nas normas ANSI Y14.36 de 1978 [ANSI, 1978] e ISO 1302 de 2001 [ISO, 2001], respectivamente.

Símbolo Gráfico	Interpretação	Padrão de Orientação
=	Paralelo ao plano de vista no qual o símbolo é empregado.
⊥	Perpendicular ao plano de vista no qual o símbolo é empregado.
X	Cruzado em duas direções oblíquas relativas ao plano no qual o símbolo é empregado.
M	Múltiplas direções.
C	Aproximadamente circular relativo ao centro da superfície onde o símbolo é empregado.
R	Aproximadamente radial relativo ao centro da superfície onde o símbolo é empregado.
P	Marcas com orientação particular, não direcionada ou em relevo.

Figura 7 - Símbolos usados para representar as marcas da ferramenta na designação da textura da superfície segundo as normas ANSI Y14.36 de 1978 [ANSI, 1978], e ISO 1302 de 2001 [ISO, 2001]

A forma da superfície é o formato geral da mesma e, excluindo a rugosidade e a ondulação, fica definida pelos erros de forma e as imperfeições. Os erros de forma são os desvios com amplo espaçamento da superfície real, relativos à superfície nominal, os quais não são incluídos na textura superficial. O termo é aplicado aos desvios causados por fatores como os erros no estado da máquina-ferramenta, guias, ou eixo, fixação insuficiente ou alinhamento incorreto da peça de trabalho, ou desbalanceamento associado a partes desgastadas. Os erros de forma são gerados principalmente por defeitos na rigidez do equipamento e pelas deformações devidas às tensões residuais no componente [Morton, 1994].

As Imperfeições (“Flaws”) são as interrupções não intencionais, inesperadas, e não desejadas que ocorrem esporadicamente em uma determinada região da superfície. Não obstante, estas interrupções topográficas são consideradas como imperfeições quando é estabelecido um comum acordo entre os fabricantes e usuários dos componentes [ASME, 1996]. Se as imperfeições são especificadas, a superfície tem que ser

inspecionada por intermédio de algum método mutuamente combinado, para determinar quando uma imperfeição encontra-se presente, e podem ser aceitas ou rejeitadas na tentativa de aperfeiçoar a medição final da rugosidade da superfície. Se as imperfeições especificadas não se encontram presentes, ou se as imperfeições não são especificadas, então as interrupções na topografia da superfície de um componente de engenharia têm que ser incluídas na avaliação da rugosidade [Machinability data center, 1980]. Os defeitos incluem trincas, crateras, inclusões, sulcos, riscos, entre outros.

2.1.1.3 Acabamento superficial

O acabamento superficial é um termo comumente usado para indicar a qualidade geral de uma superfície. O acabamento superficial não está ligado necessariamente à textura ou à orientação das marcas da ferramenta, nem aos valores específicos de rugosidade, mas é expressado como uma característica qualitativa do acabamento para uma determinada aplicação [Morton, 1994]. Por outro lado, em geral um bom acabamento implica em valores reduzidos na rugosidade e vice-versa.

2.1.2 Características sub-superficiais

Os processos de fabricação podem produzir mudanças nas propriedades do material numa camada sub-superficial, as quais geralmente acompanham os padrões de textura da topografia na superfície [Griffiths, 2001]. Segundo o *Machinability data center* [1980], 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. Segundo Griffiths [2001], as mudanças nas propriedades do material se atribuem aos diferentes fatores envolvidos no processo de corte, e que compõem os eventos unitários térmicos, mecânicos ou químicos. O tipo de camada gerada na sub-superfície dependerá do balanço dos níveis de energia térmica, mecânica e química existentes durante o evento unitário de manufatura e, conseqüentemente, estão relacionadas com os fatores próprios do processo de usinagem tais como tipo de tensão, nível de tensão, taxa de aquecimento, taxa de resfriamento e das condições ambientais do

local (Griffiths, 2001). Na Figura 8 são apresentadas esquematicamente as camadas sub-superficiais que são geradas como resultado do processo de remoção de material.

Figura 8 - Representação esquemática da seção transversal de uma peça usinada. Observa-se as camadas sub-superficiais geradas como resultado do processo de torneamento [Griffiths, 2001]

As principais causas de alteração da sub-superfície são: 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 [Shaw, 1984; Griffiths, 2001]. Segundo Field e Colaboradores [1972], Griffiths [2001] e Whitehouse [2004], as principais alterações nas camadas sub-superficiais, decorrentes dos processos de usinagem, são: camada branca, martensita revenida e não revenida, deformação plástica, dobramentos e trincas, microtrincas, ataque seletivo, ataque intergranular, entre outras [Machinability Data Center, 1980; Chou e Evans, 1999; Griffiths, 2001; Bosheh e Mativenga, 2005].

2.1.3 Desempenho na integridade superficial

A influência das características da superfície e sub-superfície nas propriedades dos componentes tem sido estudada amplamente nos diversos processos de remoção de material. Estas mudanças influenciam as propriedades mecânicas da peça de trabalho e conseqüentemente influem na confiabilidade da superfície, como apresentado na Figura 9. Diversos estudos têm mostrado que cada processo de remoção de material tem o seu

próprio efeito e, de igual forma, para cada processo a intensidade, ou nível de energia aplicada, pode ter um efeito diferente no estado metalúrgico específico da peça de trabalho.

Figura 9 - Representação esquemática dos fatores que influenciam a integridade superficial na usinagem de metais [Griffiths, 2001]

A carga dinâmica é reconhecida como um fator importante no projeto de muitas estruturas de engenharia, utilizadas em diversas aplicações. Históricos de serviço e análises de falha de componentes submetidos a carregamento dinâmico mostram que as falhas devido à fadiga freqüentemente se nucleiam na superfície ou imediatamente abaixo da mesma [Griffiths, 2001]. Deste modo, pode-se concluir que o comportamento à fadiga de um componente é também influenciado pelas condições da sub-superfície.

Griffiths [1998] apresentou uma série de informações sobre certas superfícies obtidas por diversos processos de usinagem. Na Tabela 1, baseada no trabalho de Griffiths [1998], apresenta-se a correlação existente entre as propriedades físicas de uma superfície e diversas causas de falha do componente. As informações representadas por círculos na Tabela 1 baseiam-se num trabalho feito por Tonshoff e Brinksmeier [1980]. Da Tabela 1 pode-se concluir, por exemplo, que a textura superficial influencia as falhas ocorridas por fadiga e difusão [Machinability data center, 1980].

Tabela 1 - Efeito das propriedades da superfície nas causas de falha de componentes [Machinability data center, 1980]

Causas de falha	Características da superfície						
	Tensão de escoamento	Dureza	Resistência	Resist. Fadiga	Tensão Residual	Textura	Micro trinca
Deformação plástica	•	•			•		
Adesão		•					
Fratura/Trinca			•				⊙
Fadiga		•		•	⊙	⊙	•
Cavitação		⊙					⊙
Desgaste		•			⊙		
Difusão						○	
Corrosão					⊙		•

- influência forte
- ⊙ influência perceptível
- influência suposta

2.2 Conjuntos de dados padronizados para avaliar a integridade superficial

Nas aplicações onde se requer superfícies usinadas com excelente desempenho, precisa-se fazer uma completa descrição da superfície e da camada sub-superficial após a usinagem, em termos da sua integridade superficial. Field e colaboradores [1972], no início da década de 1970, estabeleceram pela primeira vez os níveis de complexidade para avaliar a integridade de uma superfície, os quais formaram posteriormente a base para o estabelecimento dos níveis para a avaliação da integridade superficial aceitos pela American National Standard for Surface Integrity na norma ANS B211.1. [ANS, 1986].

O *Machinability Data Center* [1980] descreve o trabalho feito por Field e colaboradores [1972], onde foi apresentada uma primeira definição de três níveis de complexidade para a avaliação da integridade superficial. O nível de complexidade mais básico está apresentado na Tabela 2 e é formado por

um conjunto reduzido de dados divididos em quatro categorias. Este procedimento implica na realização de uma triagem de variáveis para a análise dos efeitos superficiais, tendo como principal vantagem a de ser o método de avaliação que implica o mais baixo custo para a sua execução, segundo Field e colaboradores [1972]. Basicamente este nível considera informação metalográfica, complementada com medições de microdureza e textura da superfície usinada.

O segundo nível de integridade superficial definido por Field e colaboradores [1972] é apresentado na

Tabela 3. Trata-se de um “conjunto de dados padrão”, no qual, além dos elementos do nível básico, é avaliada a tensão residual e a fadiga de alto ciclo como uma triagem de variáveis.

Tabela 2 - Conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície no nível mais baixo de complexidade

1 Acabamento Superficial
2 Macroestrutura (10X ou menos)
<ul style="list-style-type: none"> ● Macrotrincas ● Indicadores de ataque macrográfico
3 Microestrutura (análise da seção transversal com aumentos de 1000X, de preferência)
Microtrincas
Deformação plástica
Transformações de fase
Ataque intergranular
Microdefeitos (crateras, inclusões, etc)
Depósitos de material na peça associados a aresta postiça na ferramenta
Camadas superpostas
Ataque seletivo
4 Alterações na microdureza

Tabela 3 - Conjunto padrão de dados para avaliar a integridade da superfície. Segundo nível em termos de complexidade

1 Conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície
2 Ensaio de fadiga – só teste de triagem
3 Corrosão conjugada à tensão
4 Tensão residual e medição de distorção

O terceiro nível contém um grande número de dados de fadiga descritos mediante funções estatísticas, os quais são utilizados geralmente no projeto de componentes específicos. Este nível também contém dados especializados, como ensaios de vida de corrosão sobre tensão, realizado com diferentes tipos de exposição ao ambiente. Os elementos que compõem o conjunto estendido de dados são apresentados na Tabela 4.

Griffiths [2001] expõe uma série de críticas aos níveis de integridade superficial definidos por Field e colaboradores [1972]. Algumas das observações feitas por Griffiths estão relacionadas com o fato de que os níveis de avaliação da integridade não especificam com exatidão o tipo de informações que cada nível deve conter e a forma como devem ser geradas. Adicionalmente, os níveis de informação estão baseados, quase na sua totalidade, na descrição de um conjunto de características próprias do componente. Esta falta de exatidão pode ser evidenciada, por exemplo, no nível básico apresentado na Tabela 2, onde é requerida a avaliação do “acabamento superficial”, mas não é especificado um parâmetro de rugosidade específico para avaliá-lo.

Tabela 4 - Conjunto estendido de dados para avaliar a integridade da superfície.
Terceiro nível em termos de complexidade

1. Conjunto padrão de dados para avaliar a integridade da superfície
2. Ensaio de fadiga – dados estatísticos para gerar dados de projeto de componentes
3. Ensaios mecânicos adicionais
<ul style="list-style-type: none"> ● Tensão ● Ruptura conjugada sob tensão ● Fluência ● Especializados: Atrito, desgaste, vedação e desempenho de rolamento

A definição mais recente para os níveis de integridade da superfície foi feita pela *American National Standard for Surface Integrity* na norma B211.1 (ANS, 1986). Essa definição dos níveis de integridade da superfície é apresentada e comentada no trabalho de Griffiths [2001], quem aponta que, mesmo a nova definição sendo baseada no trabalho de Field e Colaboradores [1972], os novos níveis são fundamentados em propriedades

mecânicas, mais do que na descrição de características próprias do componente estudado.

A norma ANS B211.1-1986 [ANS, 1986] definiu apenas dois níveis para a avaliação da integridade superficial. Algumas outras simplificações foram realizadas na nova classificação com relação aos níveis descritos por Field e colaboradores [1972], e apresentados na Tabela 2 a Tabela 4. Os ensaios de distorção, ensaios de corrosão conjugada à tensão e os “ensaios mecânicos adicionais”, contemplados na definição de Field e Colaboradores [1972], foram omitidos, mas um melhor detalhamento do ensaio de microdureza foi inserido. Os dois níveis definidos pela *American National Standard for Surface Integrity* foram denominados como: conjunto mínimo e conjunto padrão de dados para avaliar a integridade superficial, e estão apresentados na Tabela 5 e Tabela 6 [Griffiths, 2001]. No conjunto mínimo de dados requer-se a especificação da totalidade das informações contidas na Tabela 5 para um número mínimo de dois níveis de intensidade do processo, os quais podem ser entendidos como condições de acabamento – desbaste, ou condições de usinagem leve-pesada.

Tabela 5 - Conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície [Griffiths, 2001]

1. Material, dureza do material e tratamento térmico, ou, estado metalúrgico.
2. Processo e nível de intensidade do processo, ou, parâmetros de operação.
3. Rugosidade da Superfície, Ra
4. Microestrutura com ampliação de 1000X da seção transversal da superfície, com a escala de referência e indicação se a microestrutura apresentada é típica o atípica na totalidade da superfície.
5. Microdureza na seção transversal

Tabela 6 - Conjunto padrão de dados para avaliar a integridade da superfície [Griffiths, 2001]

1 Conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície.
2 Perfil de tensão residual.
3 Curva S-N de fadiga de alto ciclo
4 Curva de valor de referência S-N ou linha de base da resistência à fadiga sob cargas oscilantes do material.

Os níveis de complexidade para avaliar a integridade da superfície, descritos na Tabela 5 e Tabela 6, melhoram a definição do conjunto de

dados feita por Field e colaboradores [1972], pois estes novos conjuntos são mais focados na realização de testes e ensaios mecânicos do que na simples avaliação das características do material. Por outro lado, aspectos como a recomendação do Ra como único parâmetro para a avaliação da textura da superfície limitam bastante a potencialidade do conjunto de dados como um procedimento padrão para a caracterização da superfície usinada e a sua influência no desempenho dos componentes.

2.3 Técnicas experimentais para a avaliação da Integridade Superficial

O trabalho de Field e colaboradores [1972] apresentou uma ampla revisão das principais técnicas existentes na época para avaliar a integridade dos componentes manufaturados (avaliação metalúrgica e ensaios não destrutivos), incluindo as características superficiais e sub-superficiais. Desde a realização daquele trabalho até hoje, grandes avanços têm sido realizados no desenvolvimento das técnicas e instrumentos para a medição dos elementos que compõem a integridade da superfície, especialmente no que se refere às técnicas não destrutivas [Griffiths, 1998]. Serão apresentadas a seguir, as principais técnicas que determinam os conjuntos de dados para a avaliação da integridade superficial (Tabela 5 e Tabela 6), expostos no Item 2.2.

2.3.1 Metalografia da seção transversal

Geralmente, as alterações microestruturais na sub-superfície, decorrentes dos processos de manufatura, são de pouca profundidade, na ordem de 25 μm até 76 μm . Sob condições de trabalho muito severas, a profundidade das alterações oscilam na faixa de 127 μm a 380 μm [Machinability data center, 1980]. Alterações microestruturais significativas, microtrincas ou imperfeições de pouca profundidade, como 2,5 μm , são igualmente geradas com frequência durante o processo de remoção de material.

A análise mediante microscopia óptica é um meio importante e econômico para fazer uma rápida avaliação da sub-superfície dos componentes usinados, na tentativa de caracterizar as mudanças que

ocorrem na “*zona alterada no material - ZAM*”, como resultado do evento unitário de manufatura. Não obstante, além da microscopia óptica, o emprego de outras técnicas especiais são necessárias para estudar alguns dos fenômenos que acontecem numa camada sub-superficial, dentro das quais podem ser mencionadas a microscopia eletrônica de varredura (MEV) e a microscopia por força atômica [Griffiths, 2001]. Esta última técnica é empregada na avaliação das mudanças que acontecem a alguns nanômetros abaixo da superfície.

Parâmetros de processo adequados durante a usinagem podem produzir uma integridade superficial favorável, ou, pelo menos, evitar transformações na ZAM, que possam afetar o desempenho do componente. Diversos trabalhos [Mantle e Anspinwall, 1997; Sharman, 2001; Rech e Moisan, 2003; Novonic, 2004; Capello, 2005] têm sido realizados na tentativa de determinar os efeitos que as mudanças dos parâmetros de operação geram na integridade superficial durante o processo de usinagem. Um trabalho que ilustra esse ponto foi realizado por Schwach e Guo [2005]. Esses pesquisadores obtiveram quatro níveis diferentes de integridade superficial mediante a variação das variáveis de processo, durante torneamento do aço AISI-SAE 52100 tratado termicamente. Na Figura 10, apresenta-se um conjunto de imagens da seção transversal (obtidas em microscópio eletrônico de varredura - MEV) das peças estudadas por Schwach e Guo [2005], onde se observam os diferentes tipos e níveis de transformação induzidas na sub-superfície para cada combinação de parâmetros durante o processo de usinagem. Mesmo com a controvérsia encontrada na literatura [Chou e Evans, 1999; Griffiths, 2001; Bosheh e Mativenga, 2005] no que se refere ao verdadeiro impacto que a formação de camada branca tem na resistência à fadiga dos componentes mecânicos, Schwach e Guo [2005] descobriram que uma integridade superficial favorável pode ser produzida utilizando baixo avanço e ferramentas de corte sem desgaste para as condições ensaiadas. Igualmente, observaram que para as condições estudadas o desgaste da ferramenta é o fator predominante para a formação da camada branca e aumento na variação da rugosidade.

a). $V=106,8$ m/min, $f=0,1$ mm/rev,
VB= 0 mm

b). $V=106,8$ m/min, $f=0,02$ mm/rev, VB= 0 mm

c). $V=169,2$ m/min, $f=0,02$ mm/rev,
VB= 0,7 mm

d). $V=169,2$ m/min, $f=0,02$ mm/rev, VB= 0,4 mm

Figura 10 - Níveis diferentes de integridade superficial durante torneamento duro do aço AISI-SAE 52100 tratado termicamente, mudando os parâmetros de operação. a) Formação de uma fina camada escura (martensita sobre revenida). b) ZAM inalterada. c) Formação de camada branca de $7,5\text{ }\mu\text{m}$. d) Formação de camada branca de $4,5\text{ }\mu\text{m}$, seguida de uma fina camada escura [Schwach e Guo, 2005]

2.3.2 Avaliação da microdureza

“A dureza é a propriedade do material que exprime a capacidade de resistir à ação de um penetrador duro” [Tabor, 1954]. Pode-se afirmar que o valor de dureza depende fundamentalmente de 3 variáveis: o material ensaiado, a geometria do penetrador e a força aplicada. A medição da microdureza pode ser feita mediante o uso de microdurômetros, nos quais

podem ser usados diferentes tipos de penetrador (Knoop ou Vickers), e com forças de ensaio entre 1 e 1000 gf (0,098 e 9,8 N). A utilização de ensaios de dureza na escala microscópica (ou microdureza) permite a caracterização de microconstituintes dos materiais.

O estudo da microdureza é importante na avaliação das alterações sub-superficiais, já que permite identificar os possíveis efeitos na ZMA provocados por uma operação de remoção de material severa. O *Machinability data center* [1980] extraiu de um trabalho de Koster e colaboradores [1976] os perfis de dureza na escala microscópica apresentados na Figura 11. Trata-se de um aço AISI-SAE 4340 (temperado e revenido) submetido ao processo de retífica, nos regimes severo e moderado.

Figura 11 - Perfil de dureza na escala microscópica avaliada na secção transversal de um componente de aço AISI-SAE 4340, submetido ao processo de retífica nos regimes severo e moderado [Machinability data center, 1980] citando de [Koster e colaboradores, 1976]

Para as condições apresentadas na Figura 11, observa-se que, para o regime moderado, as alterações na microdureza do material não ficam comprometidas pelo processo de remoção de material. O oposto foi observado no nível severo, onde, devido aos níveis de energia associados ao processo de usinagem, originam-se transformações microestruturais na ZAM, como apresentado no Item 2.3.1. A medição da microdureza acompanha as mudanças na microestrutura e, neste caso, o método permite avaliar a condição sub-superficial do componente usinado.

Quando o processo de fabricação produz mudanças nas propriedades do material na sub-superfície, a integridade do componente pode ficar comprometida [Griffiths, 2001]. Huang e Xing [1991] mostraram como o endurecimento de uma camada sub-superficial, decorrente de uma operação de usinagem, pode levar ao aumento da resistência à fadiga, contrário ao observado acima e em outros trabalhos tradicionais [Leskovar e Kovac, 1988; Tricard, 1994; Griffiths, 2001].

2.3.3 Determinação da tensão residual

Durante o processo de usinagem de um componente, ou depois de um tratamento térmico, ocorrem deformações inerentes ao processo e se induzem tensões residuais no material. A maior parte das tensões residuais induzidas pelos processos de usinagem ocorrem nos primeiros 12,7 μm a 254 μm abaixo da superfície [Machinability data center, 1980].

Existem diferentes métodos para determinar o perfil de tensões residuais. Os dois métodos mais usuais são a difração de raios-X e os extensômetros [1972]. As técnicas de raios-X possibilitam a medição da tensão residual, apesar da profundidade de penetração dos raios-X ser comumente inferior a 20 μm nos aços. Segundo Tricard [1994], as áreas críticas encontram-se localizadas geralmente numa região mais abaixo do componente (150 μm a 200 μm), motivo pelo qual é necessário monitorar cuidadosamente as tensões residuais ao longo da profundidade. Uma opção que possibilita este procedimento é a utilização da técnica de eletropolimento para remoção gradual das camadas superficiais [Machinability data center, 1980].

Leskovar e Kovac [1988] aplicaram o conceito da integridade da superfície como critério de qualidade na fabricação de componentes. O trabalho consistiu na avaliação da tensão residual devida aos efeitos dos parâmetros de torneamento, fresamento, retificação e soldagem, empregando para isso a medição da deformação do corpo-de-prova por extensômetros, durante remoção de camadas com tensão residual. Na Figura 12, apresenta-se o estado de tensões após o torneamento de cilindros para a laminação de aços (fabricados em ferro fundido dúctil). A

usinagem foi realizada para dois níveis de intensidade (regime moderado e severo).

a). Tensão residual após torneamento a $V = 4 \text{ m/min}$ b). Tensão residual após torneamento a $V = 10 \text{ m/min}$

Figura 12 - Avaliação da tensão residual após o torneamento de um ferro fundido dúctil, a dois níveis diferentes de intensidade [Leskovar e Kovac, 1988]. VB é o desgaste de flanco da ferramenta, f é o avanço, σ é a tensão residual paralela à superfície e Z é a profundidade da peça na qual foi realizada a medição de dureza

Os estados de tensão residual mostrados na Figura 12 sofreram influência da velocidade de corte. Para uma velocidade (V) maior, as tensões residuais no material usinado foram preferencialmente tratativas e diminuíram com a profundidade da peça. Igualmente, pode-se observar que com menor grau de desgaste nas ferramentas de corte, foram induzidas tensões tratativas na superfície. O avanço não teve muita influência no perfil de tensão residual.

2.3.4 Topografia

Lee e colaboradores [2001] observaram que a topografia tem muita repercussão nos processos de usinagem pesada. Exemplo disso acontece na usinagem a alta velocidade. Nesse processo, os grandes valores de avanço, que é uma das suas características mais importantes, pressupõem acabamento superficial ruim. A importância de estudos nesta área decorre das cada vez mais crescentes aplicações da usinagem a alta velocidade em

indústrias como a automotiva e aeronáutica, nas quais se requer uma combinação de acabamentos superficiais e tolerâncias dimensionais com níveis exigentes de qualidade [Griffiths, 2001]. As pesquisas iniciais neste tema focaram-se na definição dos fatores que afetam a rugosidade superficial [Machinability data center, 1980].

Tradicionalmente, os requisitos para os processos de fabricação de superfícies têm dois objetivos principais: garantir melhores acabamentos superficiais e, ao mesmo tempo, reduzir os tempos totais das operações de acabamento [Griffiths, 2001]. Tricard [1994] referencia os trabalhos de Rabinowicz [1966], e o de Suh [1986], nos quais se mostra quão importante o acabamento superficial e a textura da superfície são para a tribologia⁷. O impacto que os dois fatores têm na integridade da superfície de um componente é significativo, já que o comportamento ao desgaste das superfícies é influenciado pela rugosidade superficial. Huang [1991] tem estudado a resistência à fadiga de peças torneadas e tem mostrado que a rugosidade superficial, especialmente em altas temperaturas, e as tensões residuais, tem mais efeito na resistência à fadiga do que o endurecimento da superfície.

2.4 Metalurgia dos ferros fundidos nodulares com carboneto

O termo ferro fundido representa uma grande família de ligas ferrosas, mas que, de maneira geral, podem ser definidas como ligas a base de ferro – carbono – silício, que se solidificam com reações eutéticas, e que geralmente contém Mn, P, S, entre outros elementos [Souza e Castello Branco, 1989]. A literatura denomina de mesclado, o ferro fundido que apresenta uma microestrutura composta por regiões de carboneto eutético (ferro fundido branco) e grafita em veios (ferro fundido cinzento), decorrentes da solidificação [Souza e Castello Branco, 1989]. A região com ferro fundido cinzento se solidifica conforme o sistema estável (austenita – grafita), e a região com ferro fundido branco segundo o metaestável (austenita – carboneto).

⁷ A tribologia é o estudo do atrito, desgaste e lubrificação;

Nos ferros fundidos em geral, as propriedades dependem da microestrutura, e esta, nos mesclados em particular, depende fortemente do balanço entre variáveis de processo e composição química. As propriedades mecânicas dos ferros fundidos estão condicionadas à estrutura final obtida, isto é, dependem da matriz metálica, da morfologia e quantidade de grafita e ainda do tamanho e distribuição das células eutéticas [Nunes e colaboradores, 2002]. No presente trabalho, o material de estudo é formado de diferentes regiões de ferro fundido branco, matriz metálica perlítica e grafita nodular decorrentes da solidificação, como resultado da adição de elementos de liga nodulizantes e formadores de carbonetos eutéticos, sem efetuar nenhum tratamento térmico após da solidificação; procedimento que é tradicionalmente apresentado na fabricação dos ferros fundidos mesclados [Souza e Castello Branco, 1989]. Entretanto, é importante lembrar que esta classificação considera a morfologia da grafita em veios, que é característica nos ferros fundidos cinzentos. Devido às diferenças na morfologia da grafita, neste trabalho foi adotada a denominação de ferro fundido nodular com carboneto.

Diversas pesquisas têm sido desenvolvidas baseadas na crescente importância que os ferros fundidos vêm assumindo em decorrência do próprio desenvolvimento do país, na tentativa de conhecer melhor tanto a tecnologia de fabricação, como as aplicações destas ligas [Souza e Castello Branco, 1989; Nunes e colaboradores, 2002; Silva e colaboradores, 2002].

2.5 Integridade superficial dos ferros fundidos nodulares com carboneto

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 [Shaw, 1984].

Durante uma operação de torneamento a ferramenta pode, teoricamente, transmitir com exatidão a sua geometria na peça de trabalho [Griffiths, 2001]. 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. Griffiths [2001] descreve os mecanismos que ocorrem na superfície de um ferro fundido nodular submetido à retificação.

Observa-se na Figura 13 um nódulo de grafita localizado próximo da superfície, o qual, não sendo completamente destacado durante a usinagem, é recoberto pela matriz metálica [Griffiths, 2001]. A matriz metálica sofre deformação plástica como consequência do efeito de entalhe do nódulo, que atua como concentrador de tensões. As camadas de matriz metálica deformadas plasticamente e depositadas na superfície formam protuberâncias de material encruado, que prejudicam o acabamento superficial e afetam a vida da ferramenta. Uma outra situação acontece quando o nódulo de grafita é destacado devido ao estado compressivo de tensões, danificando notavelmente o acabamento superficial e, portanto, comprometendo a integridade da superfície [Griffiths, 2001].

Figura 13 - Imagem da seção transversal de um ferro fundido nodular depois do processo de retifica. Mostra-se um nódulo de grafita na superfície sendo recoberto por uma camada de ferrita [Griffiths, 2001]

Os carbonetos presentes na microestrutura do ferro fundido branco geram desgaste severo na ponta da ferramenta e, como consequência da usinagem em baixas velocidades de corte, é favorecida a formação de aresta postiça [Griffiths, 2001]. O desgaste severo da ferramenta, preferencialmente a altas velocidades de corte, traz como consequência um superaquecimento na interface peça-ferramenta, o qual pode levar à

formação de camada branca. Em condições de usinagem muito severas podem ser geradas grandes tensões na superfície. Na presença dessas tensões, e considerando que a alta dureza e fragilidade dos carbonetos contrastam com a baixa dureza da matriz, pode acontecer trincamento ou quebra dos carbonetos [Tricard, 1994].

Não foi encontrada na literatura uma referência que aborde o estudo da integridade superficial do ferro fundido nodular com carboneto. Como foi apresentado no parágrafo anterior, a literatura [Shaw, 1984; Tricard, 1994] fornece informação sobre a usinagem dos ferros fundidos nodulares, e dos ferros fundidos brancos isoladamente. Porém, pode ser esperado que durante a usinagem do ferro fundido nodular com carboneto se observem os mecanismos presentes na usinagem do ferro fundido nodular e do ferro fundido branco.

2.6 Estatística e planejamento de experimentos

Em qualquer área de pesquisa existe sempre o interesse em conhecer quais variáveis são importantes em algum tipo de estudo que se esteja realizando, assim como os limites inferior e superior dos valores destas variáveis. Por exemplo, neste trabalho, parâmetros de usinagem (velocidade de corte, profundidade de corte e avanço) do ferro fundido nodular com carboneto são variáveis que podem afetar a integridade da superfície.

Após a escolha, de acordo com a conveniência dos pesquisadores, dos limites inferior e superior de parâmetros como a velocidade de corte, a profundidade de corte e o avanço, corridas experimentais devem ser realizadas a fim de obter dados das respostas de interesse, como parâmetros da topografia da superfície, dureza e microestrutura do material usinado.

A partir da análise inicial, técnicas estatísticas devem ser utilizadas de modo a se obter conclusões em relação à dependência das respostas de interesse em função das variáveis analisadas. Essas técnicas estatísticas podem ser aplicadas para [Box, 1978; Montgomery, 1991]:

- avaliação e comparação de configurações básicas de projeto;

- avaliação de diferentes materiais;
- seleção de parâmetros de projeto;
- determinação de parâmetros de projeto que melhorem o desempenho de produtos e,
- obtenção de produtos que sejam fáceis de fabricar, projetados, desenvolvidos e produzidos em menos tempo e que tenham melhor desempenho e confiabilidade que os produzidos pelos competidores.

O planejamento de experimentos é uma dessas técnicas e que permite a execução de experiências de maneira econômica e eficiente. Por outro lado, embora ajudem a economizar tempo e dinheiro, visto que conduzem à objetividade da análise dos resultados, os métodos de planejamento de experimentos não substituem a imaginação e o bom senso do executor [Box, 1978].

Para melhor entendimento das ferramentas estatísticas utilizadas, é importante destacar alguns conceitos [Mongomery, 1991]:

- Variáveis dependentes: respostas das propriedades de interesse, por exemplo a rugosidade Ra de uma superfície.
- Variáveis independentes: fatores ou parâmetros que influenciam a resposta, por exemplo, a velocidade de corte.
- Níveis: valores dos fatores a serem estudados, sendo que cada valor escolhido representa um nível.
- Codificação dos fatores: para simplificar o planejamento de experimentos e aumentar a precisão na análise estatística, é conveniente codificar os fatores em um sistema de coordenadas adimensionais. Por exemplo, quando se tem os níveis de velocidade de corte de 60 m.min⁻¹ e 180 m.min⁻¹, para o nível mais baixo (60 m.min⁻¹) é dado o valor codificado de -1 e, para o nível mais alto (180 m.min⁻¹), o valor codificado de +1. Para o valor intermediário (médio), é estabelecido o valor codificado de 0. De modo geral, a codificação dos fatores é dada por meio da Equação 1, onde x_{ui} é o valor codificado, X_{ui} é valor original do fator, $\bar{X}_i$ é o valor médio entre o maior e o menor valor original e S_i é a metade da diferença entre o maior e o menor valor original

$$x_{ui} = \frac{X_{ui} - \bar{X}_i}{S_i}, i = 1, 2, \dots, k \quad \text{Equação 1}$$

- Delineamento de experimentos: seqüência dos experimentos a serem realizados, obtida por ferramentas de planejamento de experimentos, na qual são incluídas combinações dos níveis dos fatores a serem estudados.
- Aleatorização: realização de experimentos delineados em uma seqüência casual, aumentando-se com isto a probabilidade de eliminação dos efeitos dos fatores não considerados no delineamento e melhorando-se a análise dos resultados.
- Replicação: com isso é possível obter a estimativa do erro experimental, com o qual é possível verificar se as diferenças observadas nos dados são estatisticamente significativas. Também permite a obtenção de uma estimativa mais precisa dos efeitos dos fatores.
- Blocagem: tem o objetivo de aumentar a precisão de um experimento. Em certos processos, pode-se controlar e avaliar, sistematicamente, a variabilidade resultante da presença de fatores conhecidos (*nuisance factors*) que perturbam o sistema, porém, não se tem interesse de estudá-los. Assim, a blocagem é usada, por exemplo, quando o tempo entre os experimentos causou mudanças nas condições de ensaio, na presença de lotes diferentes de um mesmo material ou de ensaios realizados por diferentes indivíduos.
- Efeito de um fator: é a variação da magnitude da resposta em função dos níveis inferior e superior de um fator.
- Efeito principal: é a média dos efeitos de um fator nos níveis de outro fator.
- Fatores significativos: fatores que têm influência sobre as respostas.
- Fatores não-significativos: fatores que, dentro dos intervalos considerados, não apresentam efeito significativo sobre as respostas.

Com base nos conceitos acima, antes de começar a realizar os experimentos, os objetivos devem estar bem claros, de modo a auxiliar na escolha de:

- variáveis envolvidas nos experimentos;
- faixa de variação das variáveis selecionadas;
- níveis escolhidos para essas variáveis;
- variável(eis) resposta(s) e,
- planejamento experimental.

As quatro etapas iniciais geralmente envolvem um grupo de pessoas e delas depende o sucesso de um planejamento de experimentos. Se o número de variáveis envolvidas nos experimentos for muito elevado, é melhor escolher inicialmente dois níveis para essas variáveis.

Na etapa de planejamento experimental, deve ser considerado o tamanho da amostra (número de repetições), a seleção da ordem de execução dos experimentos e a possibilidade ou não de fazer a blocagem.

Neste trabalho, foram empregadas ferramentas estatísticas com o objetivo de selecionar os principais fatores que influenciaram a integridade da superfície. Neste contexto, foi abordada uma ferramenta estatística de seleção de fatores: o planejamento fatorial.

2.6.1 Planejamento fatorial

O **planejamento fatorial** é uma técnica estatística que permite quantificar os efeitos ou influências de um ou mais fatores, além de ser a única maneira de se determinar interações entre os fatores [Mongomery, 1991].

Nos planejamentos fatoriais, a magnitude de uma resposta é determinada em função de uma combinação completa dos níveis de todos os fatores. Se houve n_1 níveis do fator 1, n_2 do fator 2,..., e n_k do fator k , o planejamento será um fatorial $n_1 \times n_2 \times \dots \times n_k = n^k$ [Box, 1978].

Os planejamentos fatoriais mais simples e mais importantes são aqueles em que todos os fatores são estudados em apenas dois níveis: para k fatores, é necessária a realização de $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ensaios. Por isso, são chamados de **planejamentos fatoriais 2^k** [Mongomery, 1991]. As 2^k combinações dos níveis dos fatores (ensaios) constituem a **matriz de planejamento**.

Quando se realizam todos os experimentos de um planejamento fatorial é dito que se tem um **planejamento fatorial completo**. No entanto, nota-se que, nos planejamentos fatoriais, o número de experimentos aumenta exponencialmente em função do número de fatores e

de níveis, tornando-se, muitas vezes, inviável a realização de todos os experimentos de um planejamento fatorial completo. Para contornar esta situação, opta-se por utilizar um **planejamento fatorial fracionário**, cujo principal objetivo é a redução do número de experimentos por meio da realização de uma fração do número de experimentos do planejamento fatorial completo.

Assim, quando se pretende verificar o efeito de quatro fatores com dois níveis (2^4), pelo método fatorial fracionário pode-se realizar apenas 8 ou 4 experimentos (metade ou um quarto do número total de experimentos do fatorial completo 2^4).

É importante ressaltar que a redução do número de experimentos traz como consequência um **“conflito”** entre efeitos principais e interações ou somente entre interações. Este conflito não permite determinar os efeitos e as interações separadamente, devido ao número reduzido de experimentos ou, na linguagem estatística, devido à falta de graus de liberdade. No entanto, é possível realizar uma fração de experimentos, suficientes para estimar, no mínimo, os efeitos principais sem conflito com as interações entre dois fatores, dado que os efeitos entre mais de dois fatores são hierarquicamente menos significativos, a ponto de serem desprezíveis [Montgomery, 1991].

2.6.2 Efeitos

Existem dois procedimentos que permitem obter os efeitos dos fatores: a tabela de coeficientes de contraste e o algoritmo de Yates [Box, 1978]. Quando há possibilidade de se repetir os experimentos, é possível verificar a significância estatística dos efeitos principais e de interação. Para tanto, empregam-se três métodos: a análise de variância (*analysis of variance* - ANOVA), a comparação do erro padrão dos efeitos com a suas magnitudes e a análise por meio dos gráficos normais [Box, 1978; Montgomery, 1991].

No cálculo dos efeitos, utilizando o programa *STATISTICA*, uma tabela é gerada em que se apresentam os seguintes parâmetros: efeito, valor, erro padrão-erro puro, $t(N)$, p e limite de confiança (-95 %, + 95 %). Na

Figura 14, apresenta-se um exemplo de uma Tabela de efeitos gerada pelo programa *STATISTICA* para estudar os efeitos entre os fatores a e b.

Factor	Effect	Std.Err. Pure Err	t(16)	p	-95,% Cnf.Limt	+95,% Cnf.Limt
Mean/Interc.	2,140	0,146	14,670	0,000	1,831	2,450
(1)a	-0,167	0,292	-0,571	0,576	-0,785	0,452
(2)b	1,086	0,292	3,722	0,002	0,468	1,705
1 by 2	0,228	0,292	0,783	0,445	-0,390	0,847

Figura 14 - Exemplo da Tabela de estimativa dos efeitos e do erro padrão de uma resposta, para os fatores a e b, gerada no programa *STATISTICA*

Na coluna de fator “Factor”, apresentam-se os respectivos símbolos adotados para identificar os efeitos principais e de interação entre fatores (“a”, “b” e “1 by 2”), bem como a média de todos os efeitos. Na coluna efeito (“Effect”), mostra-se o valor calculado de cada efeito. Na coluna erro padrão-erro puro (“Std.Err. Pure Err”), mostra-se o valor do erro padrão, calculado a partir das repetições dos experimentos. O valor de $t(N)$ (“t(16)”) é o valor de uma variável aleatória com distribuição t (ou distribuição de Student) e com N graus de liberdade referentes à obtenção do desvio padrão. Na análise dos efeitos, t é calculada para o número total de ensaios, incluindo as repetições. Os efeitos considerados estatisticamente significativos são aqueles cujas estimativas são superiores em valor absoluto ao produto do erro padrão com o valor da distribuição de Student, $t(N)$. O programa *STATISTICA* também calcula 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 (α , 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 α se aceita a hipótese nula, ou seja, o efeito não é significativo. Por fim, a coluna limite de confiança (“Cnf.Limit”), indica o intervalo em que variam os valores dos efeitos para um nível de confiança de 95 %⁸.

⁸ Neste trabalho, visto que o programa *STATISTICA* foi utilizado no cálculo e análise dos efeitos dos fatores, não é abordado o cálculo dos valores dos efeitos, erro padrão, $t(N)$, p e nem do intervalo de confiança. O cálculo destes parâmetros pode ser consultado no texto de Montgomery [1991].

Os efeitos calculados podem ter sinal positivo ou negativo. O sinal positivo significa que se forem alteradas as condições experimentais do nível mais baixo para o mais alto do fator, há um aumento no valor da resposta. Em contraposição, o sinal negativo, para a mesma forma de variação dos níveis do fator, significa que há uma diminuição do valor da resposta.

Uma outra ferramenta útil do programa *STATISTICA* é o gráfico das Médias Marginais. Por meio deste é possível visualizar os efeitos de interação, bem como determinar sua influência nas respostas de interesse⁹.

⁹ Pela forma que é mostrado, o gráfico Médias Marginais não deve ser confundido com um gráfico de tendência da resposta analisada.

3 OBJETIVO

A integridade superficial é uma disciplina inserida dentro da ciência de engenharia das superfícies e foi criada no início da década de 1970, para o estudo da relação existente entre a metalurgia, a usinabilidade e os ensaios mecânicos; atendendo às crescentes exigências para a fabricação de componentes com superfícies com um alto nível de qualidade e desempenho funcional [Machinability Data Center, 1980; Griffiths, 2001]. Durante os últimos 40 anos, diversos trabalhos têm sido realizados para entender a integridade das superfícies obtidas mediante os diferentes processos de fabricação. Mesmo assim, os conceitos ainda não abordam o tópico em sua totalidade, por exemplo, em termos do efeito que a microestrutura do material pode ter sobre a qualidade das superfícies.

Nesta dissertação, objetiva-se avaliar a integridade superficial de um ferro fundido nodular com carboneto, quando submetido ao processo de torneamento. Juntamente com a importância tecnológica deste tipo de material, o mesmo apresenta uma microestrutura morfologicamente rica e, portanto, interessante desde o ponto de vista da sua influência na integridade superficial dos componentes usinados.

4 ENSAIOS PRELIMINARES

Foi feita uma série de ensaios de usinagem preliminares em corpos-de-prova cilíndricos de ferro fundido nodular com carboneto, na tentativa de determinar os níveis das variáveis independentes adequados para realizar os ensaios finais. Igualmente, foram avaliados alguns dos elementos que compõem o “*Conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície*” [ANS, 1986], apresentados na Tabela 5 do Item 2.

4.1 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1.1 Obtenção dos corpos-de-prova

Um corpo-de-prova de ferro fundido nodular com carboneto foi obtido a partir do sobre-metal do pescoço inferior de um cilindro para a laminação de aço; este cilindro foi elaborado mediante o processo de fundição convencional em molde de areia¹⁰. A temperatura de fundição foi de 1375 °C. A fusão foi realizada em forno elétrico de indução e, após o vazamento, foi feita nodulização¹¹ e inoculação¹². O resfriamento do conjunto material e coquilha foi efetuado ao ar, e não foi realizado tratamento térmico posterior. As dimensões do corpo-de-prova retirado do cilindro para laminação, após o resfriamento, estão ilustradas esquematicamente na Figura 15. A composição química nominal do corpo-de-prova foi obtida, e está apresentada na Tabela 7.

¹⁰ Os corpos-de-prova foram fornecidos pela usina Aços Villares – Sidenor, Unidade de Cilindros, Pindamonhangaba, SP.

¹¹ Nodulização: A nodulização dos ferros fundidos é o tratamento efetuado pela adição de elementos denominados nodulizantes (magnésio, cério e terra raras) na tentativa de modificar a forma de crescimento da grafita, promovendo a formação de grafita esferoidal [Souza e Castello Branco, 1989].

¹² Inoculação: Tratamento que tem por objetivo promover a formação de grafita na solidificação dos ferros fundidos; é efetuado pouco antes do vazamento pela adição de compostos de função grafitizante (geralmente contendo alto teor de silício) [Souza e Castello Branco, 1989].

Figura 15 - Representação esquemática das dimensões aproximadas do corpo-de-prova após processo de fundição

Tabela 7 - Composição Química do Corpo-de-prova

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Mg
3,35	1,65	0,47	0,075	0,015	0,78	2,86	0,43	0,050

4.1.2 Preparação do corpo-de-prova

Depois de retirar as amostras do cilindro de laminação, a superfície dos corpos-de-prova foi preparada mediante uma operação de torneamento de desbaste. O diâmetro foi reduzido para 140 mm e, mediante operação de faceamento, o comprimento foi reduzido a 100 mm. Mediante as operações anteriores, foram removidas da superfície do corpo-de-prova as imperfeições superficiais decorrentes do processo de fundição e corte. Finalmente, mediante uma nova operação de desbaste, o corpo-de-prova foi levado até as dimensões descritas na Figura 16; dimensões que são próximas da qual foram realizados os ensaios de usinagem preliminares.

Figura 16 - Representação esquemática das dimensões dos corpos-de-prova após pré-usinagem até as dimensões próximas dos ensaios¹³

¹³ Mesmo não representado nesta, foi feita a análise metalográfica em diâmetro de 50 mm.

4.1.3 Máquina ferramenta e ferramental de corte

O ferramental utilizado nos ensaios preliminares encontra-se disponível comercialmente¹⁴. As pastilhas selecionadas foram de metal-duro, sendo a classe utilizada (categoria ISO K30) recomendada para a usinagem de materiais ferrosos que geram cavacos curtos, como é o caso do ferro fundido. As pastilhas apresentaram revestimento de multicamadas de Al_2O_3 por cima de uma camada de TiCN, e uma camada externa de TiN. A geometria foi triangular negativa e possuía furo para a fixação da mesma no porta-ferramenta; trata-se da pastilha com código ISO TNMA 160412, com as dimensões descritas na Figura 17. Segundo informações do fabricante, o substrato da ferramenta suporta altas temperaturas sem se deformar, fazendo com que a classe proporcione bons resultados a altas velocidades, do acabamento ao desbaste de ferros fundidos. Foi utilizado um porta-ferramenta convencional para torneamento externo com ângulo de posição da aresta de corte de 91° , com fixação da pastilha por alavanca e de seção transversal de 25mm x 25 mm; trata-se de um modelo Coroturn RC para torneamento longitudinal com código ISO PTG NR 2525M16 - Kr91⁰. Os ensaios de usinagem foram feitos sem o uso de fluido de corte e utilizando um torno convencional da marca ROMI, modelo S-30¹⁵.

Figura 17 - Representação esquemática das dimensões da pastilha empregada nos ensaios de torneamento preliminares. ($R_e = 1,2$ mm; $M = 16$ mm; $S = 4$ mm)

¹⁴O ferramental empregado nos ensaios preliminares foi cedido pela empresa Sandvik do Brasil S/A.

¹⁵ As operações de torneamento para preparação dos corpos-de-prova e para os ensaios de usinagem, foram feitos com equipamentos do Dpto de Engenharia Mecatrônica e de Sistemas Mecânicos (PMR-EPUSP).

4.2 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

4.2.1 Ensaios de usinagem

Após a preparação do corpo-de-prova, as operações de torneamento foram executadas de acordo com as condições de usinagem mostradas na Tabela 8¹⁶ e usando, para todos os ensaios, uma profundidade de corte (a_p) de 0,3 mm. Foram feitos ensaios nos dois diâmetros diferentes na mesma peça, 140 mm e 90 mm, segundo o apresentado no Item 4.1.2. A usinagem em dois diâmetros foi justificada com base no fato de que a microestrutura dos corpos-de-prova variou significativamente em função do diâmetro.

Tabela 8 - Parâmetros de corte utilizados

Diâmetro usinado (mm)	Velocidade de corte, V_c (m/min)	Avanço, f (mm/rev)
90	80	0,1
	60	0,1
	80	0,2
140	80	0,1
	60	0,1
	80	0,2

4.2.2 Avaliação das propriedades do material usinado

4.2.2.1 Análise de dureza

Após os ensaios de usinagem, foram realizados cortes na seção transversal dos corpos-de-prova¹⁷ e foi levantado o perfil de durezas nos diâmetros de 50 mm, 90 mm e 140 mm, no durômetro universal para

¹⁶ Foi realizado um único ensaio para cada condição apresentada na Tabela 9. Os ensaios finais foram realizados baseados num planejamento estatístico mais completo

¹⁷ Os equipamentos utilizados para corte, embutimento, lixamento convencional, polimento convencional e obtenção das microfotografias estão localizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície – Dpto. de Engenharia Mecânica (LFS-PME-EPUSP).

durezas Brinell, Rockwell B/C, marca Panambra modelo Testor-Sussen¹⁸. Os valores de dureza representaram uma média de 20 determinações em cada condição ensaiada, realizando a avaliação da dureza usando penetrador esférico de 2,5 mm de diâmetro, com pré-carga de 10 Kg e força de teste de 1875 N. A microdureza dos microconstituintes foi determinada por meio de um microdurômetro convencional Vickers - Micromet 2103¹⁹, que dispõe de um conjunto de lentes que permite aumento de até 1000 vezes. Para a avaliação microdureza, a carga utilizada foi de 0,5 N.

4.2.2.2 Análise microestrutural

A microestrutura foi caracterizada qualitativamente por meio de microscopia óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV) e quantitativamente empregando analisador de imagens.

Após o corte das amostras, foi feita a preparação metalográfica por métodos convencionais; realizando o lixamento até a lixa com grana 1000 e o polimento em suspensão de diamante até 1 μm . Posteriormente, foi determinada a fração volumétrica da grafita, obtendo as imagens das amostras no microscópio óptico Olympus BX60M²⁰ com módulo de aquisição de imagens. Mediante o uso da metalografia quantitativa por análise de imagem digitalizada no programa QWIN do analisador de imagens LEICA, foi quantificada a fração volumétrica da grafita usando um aumento de 1000X e 50 campos para cada medição.

Para avaliar a fração volumétrica dos carbonetos, as amostras foram atacadas realizando imersões durante 50 segundos no reagente nital 3%, para revelar os carbonetos na microestrutura. Após a imersão no reagente, foram realizadas lavagens com água e álcool. As lavagens com álcool foram assistidas por ultrassom. Foi quantificada a fração volumétrica de carbonetos empregando um procedimento similar ao descrito anteriormente

¹⁸ Equipamento localizado no Laboratório de Caracterização Microestrutural – Dpto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (LCT-PMT-EPUSP).

¹⁹ Equipamento localizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície – Dpto. de Engenharia Mecânica (LFS-PME-EPUSP).

²⁰ Equipamento localizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície – Dpto. de Engenharia Mecânica (LFS-PME-EPUSP).

para a grafita, igualmente com aumento de 1000X e 50 campos para cada medição. Características qualitativas particulares da microestrutura foram avaliadas em Microscópio Eletrônico de Varredura modelo Philips XL – 30 e microsonda EDAX para análise espectrométrica de Raios X com detector de elementos leves²¹.

4.2.3 Análise da topografia da peça usinada

Após os ensaios de usinagem, as características qualitativas tridimensionais da topografia das superfícies dos corpos-de-prova foram observadas mediante a utilização do microscópio eletrônico de varredura, e de microscópio estereoscópio modelo SNV8000²² de fabricação Nikon, acoplado a um módulo de aquisição de imagens. Para cada condição usinada foram registradas imagens a 100X, 200X, 500X e 1000X de aumento, na tentativa de observar e identificar os mecanismos gerados na superfície usinada.

4.2.3.1 Textura da superfície

Nos ensaios preliminares, os elementos que descrevem a textura da superfície estão baseados no cálculo da rugosidade a partir do perfil efetivo bidimensional, obtido mediante rugosímetro por apalpador. Nessa avaliação não é considerado o perfil de ondulação²³ da superfície usinada, que é removido do perfil efetivo.

4.2.3.1.1 Rugosidade

As medidas de rugosidade foram feitas em rugosímetro Surfcomer SE1700a de fabricação Kosaka Lab²⁴, acoplado a um microcomputador mediante a interface de transmissão para coleta de dados RS232. Os parâmetros analisados foram a rugosidade média (Ra), a raiz média

²¹ Equipamento localizado no Laboratório de Microscopia Eletrônica e Microanálise – Dpto. de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (LAVMEV– PMT– EPUSP).

²² Equipamento localizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície – Dpto. de Engenharia Mecânica (LFS–PME–EPUSP).

²³ A ondulação não é avaliada, mas, lembra-se a importância de se avaliar nas aplicações onde o contato entre superfícies é fundamental [23] (Ver Item 2.1.1.1.2).

²⁴ Equipamento localizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície – Dpto. de Engenharia Mecânica (LFS–PME–EPUSP).

quadrática da rugosidade (R_q) e a altura de vale mais profundo do perfil (R_v). O comprimento total de avaliação da rugosidade (l_m) corresponde a 5 vezes o comprimento de amostragem da rugosidade “Cut-off” (λ_c), segundo o recomendado pela norma ASME B46.1-1996 [1996]. Por essa norma, a distância percorrida pelo apalpador deverá ser igual a 5 vezes o “Cut-off” (λ_c) mais as distâncias (l_v e l_m) para atingir a velocidade de medição e para a parada do apalpador, respectivamente. Na Tabela 9 é apresentada a relação entre o comprimento de medição (l_m) e o comprimento de amostragem “Cut-off”.

Tabela 9 - Relação entre o “Cut-off” e comprimento de medição [ASME, 1996]

“Cut-off” (λ_c)	Comprimento de medição (l_m)
(mm)	(mm)
0,08	0,48
0,25	1,50
0,8	4,80
2,50	15,00
8,0	48,00

Os valores da rugosidade foram obtidos calculando-se o valor médio de cinco medições feitas na direção de avanço da ferramenta de corte, como indicado na Figura 18.

Figura 18 - Esquema representativo da direção de avaliação da rugosidade, feita na direção de avanço da ferramenta de corte

4.2.4 Análise da sub-superfície da peça usinada.

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 19.

Figura 19 - Esquema representativo do plano de avaliação da metalografia da seção transversal

Para retirar as amostras para a análise da peça usinada, empregou-se um disco diamantado acoplado a uma cortadora de precisão ISOMET²⁵, 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, a foi realizada a preparação metalográfica.

Uma vez efetuada a preparação metalográfica, a microestrutura foi revelada mediante ataque leve com reagente nital 1%, realizando a imersão da amostra durante um tempo de 3 segundos. As imagens da sub-superfície das amostras foram registradas no microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura. No microscópio eletrônico de varredura utilizou-se tanto a técnica de elétrons retro-espalhados, como elétrons secundários.

²⁵ Equipamento localizado no Laboratório de Fenômenos de Superfície – Dpto. de Engenharia Mecânica (LFS-PME-EPUSP).

4.3 Resultados e discussão

4.3.1 Avaliação das propriedades do material usado

4.3.1.1 Caracterização microestrutural qualitativa

Na Figura 20, apresenta-se a microestrutura do ferro fundido nodular com carbonetos, obtida no microscópio eletrônico de varredura. A microestrutura dessa liga é composta basicamente de uma matriz perlítica, grafita nodular e carbonetos eutéticos. A seguir, será apresentada a série de resultados obtidos de maneira preliminar antes de realizar a série de ensaios definitivos.

Figura 20 - MEV do ferro fundido mesclado com grafita nodular. Nota-se os diferentes microconstituintes (grafita nodular, carbonetos eutéticos e matriz perlítica). Aumento de 100X. Análise de elétrons retro-espalhados. Sem ataque

4.3.1.2 Caracterização microestrutural quantitativa e análise da dureza do material

Devido às diferenças nas taxas de resfriamento nos diâmetros das peças fundidas, a nucleação e crescimento dos micro-constituintes foram também diferentes. Na Figura 21, apresenta-se a dureza medida nos diferentes diâmetros, juntamente com a fração volumétrica dos micro-constituintes. Ensaio de microdureza foram realizados na matriz metálica, e a dureza média correspondeu a $309 \pm 15 \text{ HV}_{50\text{gf}}$. Devido à pouca variação

na dureza da matriz quando avaliada em diferentes diâmetros, a mesma foi considerada constante em toda a peça.

Pode-se observar na Figura 21 que as propriedades do ferro fundido nodular com carbonetos, e mais especificamente a dureza avaliada com penetrador Brinell, não são constantes em toda a peça. Além disso, como previsto, há uma dependência entre diâmetro e a fração volumétrica de grafita e carbonetos.

Figura 21 - Variação da dureza e da fração volumétrica dos microconstituintes em diferentes diâmetros da peça²⁶. Para as condições estudadas, a macrodureza apresentou uma dependência lineal com a fração volumétrica dos microconstituintes

A maior diferença na dureza da peça encontra-se entre os diâmetros 90 mm e 140 mm. Sendo assim, as superfícies serão estudadas nesses diâmetros nos ensaios preliminares. As diferenças na fração volumétrica dos microconstituintes podem ter influência na qualidade superficial, o que será mostrado mais à frente, quando será apresentada uma comparação da rugosidade e imagens das diferentes superfícies usinadas.

²⁶ Empregou-se penetrador esférico para o ensaio da dureza Brinell segundo procedimento apresentado no Item 4.2.21.

4.3.2 Análise da topografia e da textura da superfície.

Um conjunto de imagens das superfícies usinadas é apresentado nas Figura 22 a Figura 27, nas quais podem-se observar os diferentes aspectos da superfície. Observa-se que as marcas da ferramenta das superfícies apresentam padrões unidirecionais de orientação perpendicular ao plano de vista, padrão característico do processo de torneamento [Ver Figura 7]. As falhas da superfície topográfica das imagens obtidas por microscópio estereoscópio são destacadas mediante o emprego de círculos brancos nas figuras respectivas.

Figura 22 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 80$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot.

Figura 23 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot.

Figura 24 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 80$ m/min e $f = 0,2$ mm/rot.

Figura 25 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 80$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot.

Figura 26 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min e $f = 0,1$ mm/rot.

Figura 27 - Imagem da superfície usinada obtida por microscópio estereoscópio acoplada ao módulo de aquisição de imagem LEICA no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 80$ m/min e $f = 0,2$ mm/rot.

As Figura 22, Figura 23 e Figura 24 apresentam as imagens das superfícies geradas no diâmetro de 90 mm com as diferentes condições de usinagem apresentadas na Tabela 10, na qual igualmente mostram-se os valores médios dos parâmetros R_a , R_q e R_v das superfícies, para cada uma das diferentes condições de corte estudadas durante os ensaios preliminares. Nas Figura 22 a Figura 24, observam-se repetidas falhas e danos na superfície²⁷ (crateras, trincas, sulcos e deformação plástica, entre outros), conforme indicado pelos círculos. Nas condições apresentadas na Figura 23 se tem a superfície mais prejudicada pela usinagem e com o pior acabamento, fato que é ratificado com maiores valores de R_a e R_v . Na Figura 24 é apresentada a imagem da superfície menos deteriorada, que corresponde ao menor R_v , porém com valores maiores de R_a e R_q em relação à Figura 22. Estes resultados estão condizentes com a teoria, ou seja, maiores avanços geram maiores rugosidades médias [Shaw, 1984]. Na Figura 22 apresenta-se a condição da superfície onde se têm os menores valores de R_a e R_q , mas isso não implica que seja esta a superfície menos deteriorada.

²⁷ Os defeitos apresentados na superfície topográfica tridimensional das peças usinadas serão melhor detalhados mais adiante neste item; abordagem que se baseará na análise de imagens obtidas por microscopia eletrônica de varredura.

Tabela 10 - Valores dos parâmetros de rugosidade das amostras, obtidos pela média de cinco medições para cada condição

Diâmetro (mm)	Vc (m/min)	f (mm/rot)	Ra (μm)	Rq (μm)	Rv (μm)
90	80	0,1	$0,90 \pm 0,066$	$1,37 \pm 0,016$	$8,27 \pm 1,570$
	60	0,1	$2,19 \pm 0,155$	$2,73 \pm 0,195$	$12 \pm 1,080$
	80	0,2	$1,67 \pm 0,064$	$2,06 \pm 0,093$	$6,77 \pm 0,872$
140	80	0,1	$1,29 \pm 0,132$	$1,78 \pm 0,248$	$8,86 \pm 2,043$
	60	0,1	$1,48 \pm 0,099$	$1,98 \pm 0,148$	$8,56 \pm 1,120$
	80	0,2	$1,28 \pm 0,070$	$1,80 \pm 0,131$	$8,75 \pm 1,488$

Nas Figura 28 a Figura 30, apresentam-se os perfis de rugosidade para as condições ensaiadas no diâmetro de 90 mm.

Figura 28 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte (V_c) de 80 m/min, e avanço (f) de 0,1 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 22

Figura 29 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 60 m/min, e avanço f de 0,1 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 23.

Figura 30 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 80 m/min, e avanço f de 0,2 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 24.

Observa-se que as alturas dos picos e profundidade dos vales apresentados no perfil da Figura 28 são os menores do conjunto de perfis de rugosidade para as superfícies usinadas no diâmetro de 90 mm (Figura 28 a Figura 30). Igualmente, segundo apresentado na Tabela 10, é para

essa condição (Figura 22) que tem o menor valor de R_a para o conjunto de topografias apresentadas. O perfil de rugosidade mostrado na Figura 29 corresponde à topografia da superfície apresentada na Figura 23. Para esta condição, tem-se a maior combinação de dano e rugosidade de todas as condições ensaiadas, e pode-se observar que o tamanho das crateras é o maior com relação às outras superfícies. Se a profundidade [de 12 μm a 15 μm ²⁸] e comprimento (de 200 μm a 250 μm ²⁹] dos vales observados no perfil de rugosidade apresentado na Figura 29 forem associados às dimensões das crateras observadas na superfície da Figura 23³⁰, é possível que a presença destas crateras também possuam alguma relação com tamanho dos microconstituintes do material; o que poderá ser observado ao se realizar as análises da sub-superfície no Item 4.3.4. Contudo, o perfil de rugosidade para esta condição é o que mais tende a descrever uma senoidal simples, o que fica explicado pelo mais baixo valor da relação R_q/R_a , indicativo de valor de R_q mais próximo de R_a . No perfil de rugosidade apresentado na Figura 30 observam-se vales de menor profundidade e menor rugosidade do que os apresentados no perfil da Figura 29, mas observa-se maior rugosidade do que na Figura 28.

Retomando as Figura 25, Figura 26 e Figura 27, e lembrando que estas apresentam o resultado da análise das superfícies usinadas no diâmetro de 140 mm, observa-se que a qualidade das superfícies neste diâmetro não apresentam muita diferença. Isto pode ser conferido ao observar os valores médios de rugosidade contidos na Tabela 10, que são quase os mesmos para as três condições estudadas.

Os perfis de rugosidade para as condições de usinagem são apresentados nas Figura 31 a Figura 33 e seria de esperar que os mesmos não apresentassem muitas diferenças.

²⁸ Ver o valor do R_v na Figura 29.

²⁹ Ver os valor aproximado do comprimento dos vales na superfície da Figura 29, ressaltadas no perfil pelas linhas tracejadas.

³⁰ Ver a dimensão aproximada das crateras na topografia apresentada na Figura 23, ressaltadas da superfície pelos círculos brancos.

Figura 31 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 80 m/min, e avanço f de 0,1 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 25

Figura 32 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 60 m/min, e avanço f de 0,1 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 26

Figura 33 - Perfil de rugosidade da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com velocidade de corte V_c de 80 m/min, e avanço f de 0,2 mm/rot. A topografia da superfície é apresentada na Figura 27

Em termos gerais, para os três perfis de rugosidade apresentados nas Figura 31 a Figura 33 a profundidade dos vales mais profundos (R_v) oscilam na faixa entre 9,8 μm e 10 μm . Igualmente, nas figuras mencionadas acima observa-se que a altura do pico mais alto (R_p) nos perfis de rugosidade apresenta pouca variação. Porém, a distância entre o pico mais alto e o vale mais profundo (R_t)³¹ permanece constante no diâmetro de 140 mm, para os diferentes parâmetros de corte. O aspecto do perfil de rugosidade quanto à altura de picos e profundidade de vales apresenta pouca diferença de uma condição para outra, o que corrobora o observado na topografia das superfícies estudadas acima.

Ao avaliar a rugosidade da peça após ser usinada com os mesmos parâmetros de corte, mas considerando-se as variações devidas às diferenças nas propriedades do material ao longo do diâmetro (Figura 34 (a), (b) e (c)), pode-se observar que a rugosidade apresenta mudanças na maioria dos casos, o que reforça ainda mais a hipótese de que as diferenças microestruturais nos diferentes diâmetros da peça afetam a rugosidade e o acabamento do material. Este fato, evidenciado nos testes preliminares,

³¹ As definições dos parâmetros de rugosidade R_t , R_p e R_v são abordados no Anexo 2

será abordado no Item 4.3.3. Igualmente, o efeito que a microestrutura produz na topografia da superfície será melhor investigado nos ensaios finais, realizando um número maior de repetições e reforçando a análise mediante técnicas estatísticas.

Figura 34 - Influência do diâmetro da peça usinada na rugosidade

4.3.3 Influência dos parâmetros de operação e níveis do processo

Foi estudada a influência dos parâmetros de corte na topografia da superfície para tentar isolar o efeito que produz a heterogeneidade microestrutural do material na superfície da peça usinada.

4.3.3.1 Influência do avanço na rugosidade

Segundo a literatura, a rugosidade média teórica (R_{th}) varia de forma diretamente proporcional ao quadrado do avanço (f) e inversamente proporcional ao raio de ponta da ferramenta (R_e) [Shaw, 1984]. Segundo Shaw (1984), quando o raio de ponta da ferramenta é grande com relação ao avanço, a superfície é gerada somente pelo raio de ponta, e o cálculo da rugosidade teórica pode ser realizado como apresentado na Equação 2:

$$R_{th} = \frac{f^2}{8 Re} \quad \text{Equação 2}$$

O cálculo da rugosidade teórica para as superfícies geradas com os parâmetros de corte apresentados na Tabela 10 pode ser realizado baseado na equação apresentada por Shaw [1984]³², e os valores são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 - Valores da rugosidade média teórica das amostras para o caso em que o raio de ponta da ferramenta é grande com relação o avanço [Shaw, 1984].

Raio de ponta, Re (mm)	Avanço, f (mm/rev)	Rugosidade média teórica, Rth (μm)
1,2	0,1	1,041
	0,2	4,166

No intervalo investigado, as influências do avanço no Ra, Rq e Rv não foram muito significativas quando a peça foi usinada no diâmetro de 140 mm. Por outro lado, no diâmetro de 90 mm observou-se uma variação considerável, como consequência das mudanças dos parâmetros, especialmente no Rv, quando se variou o avanço. Os parâmetros de rugosidade [Ra e Rq] avaliados no diâmetro de 90 mm acompanham o aumento da rugosidade teórica [Rth] quando aumentado o avanço e mantendo constantes os demais parâmetros de corte. Já para o diâmetro de 140 mm, o comportamento dos parâmetros de rugosidade [Ra, Rq e Rv] quando aumentado o avanço, não acompanharam o observado para o diâmetro de 90 mm, quando comparados com a rugosidade média teórica [Rth]. Este comportamento pode sugerir que existe influência da microestrutura na rugosidade quando avaliada no diâmetro de 140 mm .

Na Figura 35 (a) (diâmetro de 90 mm) pode-se observar que quando o avanço é aumentado, os parâmetros de rugosidade Ra, Rq aumentam, enquanto o Rv diminui. Na Figura 35 (b) (diâmetro de 140 mm) a variação nos parâmetros é pequena de uma condição para a outra. Isso mostra que a

³² Lembra-se que o raio de ponta da pastilha empregado é grande (1,2 mm) quando comparado com os avanços utilizados [0,1 mm/rot e 0,2 mm/rot]

microestrutura do material da peça teve uma influência tão grande ou maior do que o avanço, na rugosidade. Nota-se na Figura 35 (a) e (b) que os valores de R_a e R_q apresentam-se muito parecidos para os dois diâmetros, mas o parâmetro R_v mostrou-se maior quando o maior avanço foi utilizado. Maiores avanços implicam em condições mais severas de corte, que provavelmente removem carbonetos inteiros da peça e/ou destacam os nódulos de grafita.

Figura 35 - Influencia do avanço na rugosidade

4.3.3.2 Influencia da velocidade de corte na rugosidade

Em geral, espera-se que um aumento na velocidade de corte leve a uma diminuição da rugosidade [Shaw, 1984]. No intervalo estudado, a Figura 36 mostra que, para o diâmetro de 90 mm, o aumento da velocidade de corte gerou uma queda considerável na rugosidade. Cabe lembrar que esse diâmetro apresenta uma maior quantidade de grafita e menor de carbonetos. No diâmetro de 140 mm os parâmetros permaneceram praticamente inalterados.

Figura 36 - Influencia da velocidade de corte na rugosidade Influencia da velocidade de corte na rugosidade

4.3.4 Análise da Sub-superfície

4.3.4.1 Análise do nível de usinagem severo na qualidade da superfície, e os seus efeitos na sub-superfície

A combinação de parâmetros apresentados na Tabela 10 gerou diferentes efeitos na superfície usinada, especialmente quando usinou-se no diâmetro de 90 mm. A condição na qual a superfície ficou mais prejudicada pela usinagem é aquela onde se geraram mais danos, e corresponde à condição apresentada na Figura 23. Segundo Griffiths [2001], os processos de fabricação podem produzir mudanças nas propriedades da sub-superfície do material, as quais geralmente acompanham os padrões de textura e topografia na superfície. Levando em conta a consideração anterior, poderia-se esperar que na peça que apresenta a superfície mais prejudicada pela usinagem aconteçam algumas alterações sub-superficiais. Porém, antes de proceder uma análise mais detalha da sub-superfície, será feita uma melhor descrição dos fenômenos que aconteceram na superfície usinada.

A Figura 37 apresenta uma imagem obtida no MEV, na qual se mostram alguns aspectos da superfície, que não foram possíveis de se observar na Figura 23; imagem obtida no microscópio estereoscópio acoplado ao módulo de aquisição de imagens.

Figura 37 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se crateras, dobramentos, rebarbas e outras irregularidades. Aumento de 50X. Análise de elétrons secundários

Na Figura 37, observa-se que a superfície usinada em geral apresenta diversas irregularidades, que basicamente se resumem em crateras, dobramentos e amassamentos de material. Para a geração da superfície apresentada na Figura 37 foi empregada uma baixa combinação de avanço [0,1 mm/rot] e velocidade de corte [60 m/min] e, lembrando que a ferramenta de corte possui um elevado raio de ponta que favorece o aumento das forças efetivas de corte na superfície usinada, considera-se possível o surgimento de aresta postiça de corte (APC) [Shaw, 1984]. Um outro mecanismo presente nas superfícies, favorecido pela combinação de baixo raio de ponta e baixa velocidade de corte, é o denominado fluxo lateral [*“side flow”*] (Shaw, 1984; Kishawy e Elbestawy, 1998]. Durante o corte com uma ferramenta tendo um raio de ponta grande, uma grande parcela do cavaco pode conter uma espessura menor do que a espessura mínima de cavaco. Adicionalmente, como mencionado acima, aumentando o raio de ponta da ferramenta tem-se um efeito direto nas forças de corte, o qual leva a um significativo aumento no efeito de sulcamento na região de corte. Aumentando o efeito de sulcamento se induz mais fluxo de material nas bordas na superfície usinada. A área ressaltada pelo círculo preto será melhor detalhada na sequência de imagens das Figura 38 a Figura 39.

Figura 38 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Além das irregularidades identificadas na Figura 37, observa-se trincamento em diferentes regiões. Aumento de 250X. Análise de elétrons retro-espalhados

Figura 39 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se grafita exposta no interior da cratera de maior tamanho. Aumento de 500X. Análise de elétrons secundários

Observa-se na Figura 38 que ao usar-se elétrons retro-espalhados é possível observar algumas trincas superficiais, as quais podem surgir pelas elevadas taxas de deformação plástica do material usinado. Na Figura 39, a área ressaltada com um círculo preto de menor tamanho contém superposição de material deformado plasticamente durante a usinagem. O círculo maior apresenta uma região onde material deformado plasticamente recobre uma cratera na superfície, deixada possivelmente pelo destacamento de parte de um nódulo de grafita³³, o qual é parcialmente observado no fundo da cratera.

Espera-se que as propriedades das regiões sub-superficiais apresentem características internas, ou “Zonas de material afetadas - ZAMs” [Griffiths, 2001], que acompanhem os fenômenos observados na superfície do material. A seguir será apresentada uma série de imagens (da Figura 40 até a Figura 45) da seção transversal da sub-superfície da peça usinada nas condições expostas na Figura 23, que, como observado na análise da topografia, foi a condição na qual a qualidade superficial ficou mais comprometida.

³³ Realizou-se análise química qualitativa mediante emprego de EDS.

Figura 40 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se carboneto eutético na borda da superfície usinada, trincado como resultado da usinagem. Aumento de 1000X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com nital 3%

Figura 41 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se carboneto eutético na borda da superfície usinada, trincado como resultado da usinagem. Aumento de 3500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

Na Figura 40, observa-se que, para as condições de ensaio utilizadas, ocorreu trincamento na superfície da peça usinada; trincamento localizado no carboneto eutético. Este fenômeno encontra-se presente igualmente ao longo dos carbonetos na sub-superfície, a uma profundidade aproximada de 125 μ m. Na Figura 41, observa-se detalhamento do aspecto superficial e

sub-superficial do carboneto trincado. Trata-se da área assinalada pelo círculo branco da Figura 40. O trincamento de carbonetos durante a usinagem é um aspecto característico dos ferros fundidos brancos, o qual compromete a sua usinabilidade [Shaw, 1984]. 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.

A seguir apresenta-se uma seqüência de imagens (Figura 42 a Figura 45) onde se observam as particularidades da superfície e sub-superfície associadas à presença da grafita na microestrutura e da matriz metálica.

Figura 42 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se nódulo de grafita na borda da superfície usinada, recoberto pela matriz metálica como resultado da usinagem. Aumento de 800X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

Na Figura 42, observa-se um nódulo de grafita recoberto por uma camada de matriz metálica, a qual foi deformada plasticamente pelo processo de corte. Uma trinca sub-superficial na dobra de matriz metálica, e que recobre o nódulo de grafita, é ressaltada pelo círculo preto na Figura 42. A Figura 43 apresenta um nódulo de grafita destacado da superfície da peça usinada, como resultado do processo de usinagem. A grafita nodular, segundo o exposto na literatura, produz interrupções na matriz metálica, o que tem efeito de quebra-cavaco durante a usinagem [Griffiths, 2001],

facilitando, assim, o processo de corte do material da matriz metálica e o desprendimento de cavacos curtos na região de corte.

Figura 43 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se nódulo de grafita destacado na borda da superfície usinada, como resultado da usinagem. Aumento de 1500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

Devido à elevada intensidade do nível de energia termo-mecânica envolvida no processo de remoção de material na condição estudada acima (Figura 23), foram induzidas algumas alterações microestruturais na matriz metálica. Essas alterações serão apresentadas e discutidas nas Figura 44 e Figura 45.

Na Figura 44, observa-se que ocorrem mudanças microestruturais na borda da superfície usinada; mudanças que ficaram definidas pelas diferenças de cor ao ser realizado o ataque com reagente nital 3%. Similarmente, a técnica de MEV por elétrons retro-espalhados permite identificar as regiões com diferente composição química num material. Segundo o exposto na literatura [Griffiths, 2001], é possível que a ZAM na sub-superfície possa ser relacionada à geração de “camada branca”, como resultado da severidade do processo de corte. Na Figura 45, observa-se uma possível “camada branca” da ordem de $5\text{ }\mu\text{m}$, que, segundo a literatura [Machinability Data Center, 1980; Chou e Evans, 1999; Griffiths, 2001; Bosheh e Mativenga, 2005], ocorre com frequência nos processos de remoção de material. Ainda na Figura 45, a intensidade do processo gerou

deformação plástica na sub-superfície na direção da velocidade efetiva de avanço, a qual ficou evidenciada pela orientação dos grãos da matriz metálica na direção de avanço da ferramenta, a uma profundidade de aproximadamente 10 μm . A formação de deformação plástica na direção da velocidade de corte deve ser bem maior que a observada para a direção de avanço [de 200 μm a 250 μm] [Griffiths, 2001].

Figura 44 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se que ocorreu alteração microestrutural da borda da superfície usinada, como resultado da usinagem. Aumento de 2500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

Figura 45 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 90 mm após o ensaio de usinagem com $V_c = 60$ m/min, $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se mudanças microestruturais na borda da peça, acompanhada de grãos de perlita deformados plasticamente na sub-superfície, como resultado da usinagem. Aumento de 6500X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

4.4 Considerações sobre os ensaios preliminares

Através da análise dos resultados dos ensaios preliminares, pode-se considerar que:

- Segundo o previsto, as superfícies da peça de ferro fundido nodular com carboneto tiveram diferentes características quando usinadas com os mesmos parâmetros de corte, mas em diferentes diâmetros. Isto é decorrente das diferenças microestruturais no material, e justifica-se um estudo mais detalhado para os ensaios definitivos.
- Para o diâmetro de 90 mm, a melhor combinação dos parâmetros de corte foi obtida utilizando-se uma profundidade de corte de 0,3 mm, uma velocidade de corte de 80 m/min, e um avanço de 0,1 mm/rot. Com esses parâmetros obteve-se a rugosidade Ra mais baixa, combinada com pouco dano superficial e Rv menor.
- Para o diâmetro de 140 mm, a combinação de velocidade de corte de 80 m/min com avanço de 0,1 ou 0,2 mm/rot pode ser utilizada. Esta informação indica que a variação do avanço não apresentou muita influência quando usinou-se esse diâmetro.
- O acabamento superficial foi muito influenciado pela variação da velocidade de corte. Com uma diminuição na mesma, a superfície fica com pior acabamento, o que foi refletido por Ra maior. A qualidade da superfície ficou mais comprometida com a diminuição na velocidade de corte quando usinou-se o diâmetro de 90 mm. Esse resultado pode sugerir, novamente, uma dependência da qualidade de superfície com as heterogeneidades microestruturais do material (Vide Figura 21). Porém, uma melhor avaliação das heterogeneidades microestruturais (forma, tamanho e distribuição) será realizada nos ensaios definitivos.
- Os parâmetros Ra e Rq apresentaram o mesmo comportamento nas superfícies estudadas e conservaram uma certa proporcionalidade. Esses resultados indicam que os perfis apresentam uma forma de onda próxima de um senoidal simples. O Rv reflete o dano nas superfícies usinadas. Adicionalmente, mesmo o Ra permitindo ter uma idéia da qualidade da superfície (acabamento superficial), e contrário ao requerido nos critérios de avaliação da integridade da superfície (Item 2.2), o uso de parâmetros de rugosidade mais específicos são necessários para uma avaliação mais rigorosa dos mecanismos de dano na superfície. Os ensaios definitivos prosseguirão com a análise de parâmetros de rugosidade não convencionais.
- No ferro fundido nodular com carboneto, o acabamento superficial é influenciado tanto pela microestrutura quanto pelos parâmetros

de usinagem e a obtenção de um melhor acabamento passa pela obtenção de uma microestrutura adequada, juntamente com escolhas apropriadas das condições de usinagem. Portanto, as variáveis escolhidas e testadas nos ensaios preliminares, além de satisfazer as duas condições mínimas exigidas pelo critério mínimo de avaliação da integridade superficial, permitem observar diferenças de comportamento das superfícies estudadas. Estas diferenças sugerem diferenças na integridade da superfície. Finalmente, mostrou-se que os parâmetros utilizados na realização dos ensaios preliminares poderiam ser utilizados nos ensaios finais; o que foi feito com um planejamento experimental mais rigoroso.

5 ENSAIOS FINAIS

Considerando os resultados apresentados no Item 4, foi definida uma série ensaios de usinagem definitivos. Porém, diferentemente do capítulo anterior, estes ensaios foram realizados empregando um planejamento estatístico fatorial fracionado [Box, 1978], com 3 repetições para cada condição ensaiada. Igualmente, foram avaliados os elementos que compõem o “Conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície” [Griffiths, 2001], apresentados na Tabela 5 do Item 2.

5.1 Materiais e métodos

5.1.1 Corpos-de-prova

5.1.1.1 Obtenção dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova de ferro fundido nodular com carboneto, necessários para a realização da totalidade de ensaios do planejamento experimental, foram obtidos do sobre-metal do pescoço inferior de quatro cilindros para a laminação de aço, os quais possuíam as mesmas dimensões e geometria, foram fundidos na mesma corrida e apresentaram a mesma composição química nominal (Tabela 12). O processo de obtenção das amostras foi igual ao detalhado no Item 4.1.1.

Tabela 12 - Valor médio da composição química nominal dos corpos-de-prova

%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Mo	%Mg
3,415± 0,014	0,9975± 0,03	0,425± 0,014	0,685± 0,005	0,0095± 0,00028	0,727±5 0,044	2,8025± 0,0075	0,41	0,05± 0,004

5.1.1.2 Preparação dos corpos-de-prova

O procedimento para preparar as amostras foi igual ao empregado na realização dos ensaios preliminares (Item 4.1.2.). As dimensões dos corpos-de-prova para a realização dos ensaios finais estão apresentadas na Figura 46.

Figura 46 - Representação esquemática das dimensões dos corpos-de-prova após pré-usinagem até as dimensões próximas dos ensaios finais

5.2 Procedimento experimental

5.2.1 Ensaios de usinagem

Após a preparação dos corpos-de-prova de ferro fundido nodular com carboneto até as dimensões descritas no Item 5.1.1.2, os ensaios de torneamento foram feitos em corpos-de-prova cilíndricos, em dois diâmetros diferentes na mesma peça, 140 mm e 80 mm. Nos ensaios finais foi usado outro tipo de pastilha com geometria diferente da geometria das pastilhas empregadas nos ensaios preliminares. Nos ensaios finais, foram usadas pastilhas de metal-duro (categoria ISO K15) com revestimento multicamadas de Al_2O_3 e TiN, com geometria triangular ISO TPUN 160312³⁴. As dimensões das pastilhas estão apresentadas na Figura 47. 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 - Kr90°. Os ensaios foram feitos sem o uso de fluido de corte e utilizando um torno convencional da marca ROMI, modelo S-30.

³⁴ As ferramentas de corte para os ensaios finais foram cedidas pela empresa Kennametal do Brasil.

Figura 47 - Representação esquemática das dimensões da pastilha empregada nos ensaios de torneamento finais. ($R_e = 1,2 \text{ mm}$; $M = 16 \text{ mm}$; $S = 3 \text{ mm}$)

Os ensaios foram realizados seguindo um planejamento fatorial fracionário 2^{n-1} [Box, 1978] com 3 repetições, onde os níveis pré-estabelecidos dos fatores estão apresentados na Tabela 12.

Tabela 13 - Matriz do planejamento experimental dos ensaios

Variáveis Independente (Fator)	Nível inferior	Nível superior
Diâmetros($\emptyset$)	80 mm	140 mm
Avanços (f)	0,1 mm/rev	0,3 mm/rev
Velocidade de corte (V_c)	60 m/min	180 m/min
Prof. De corte (a_p)	0,2 mm	0,3 mm

Com os dados contidos na Tabela 13, a matriz dos 8 ensaios (4 níveis, 2 condições por cada nível) ficou definida e está apresentada na Tabela 14. Três repetições foram feitas para cada uma das condições, totalizando 24 ensaios.

Tabela 14 - Matriz do planejamento experimental dos ensaios

Ensaio	Ø (mm)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	a_p (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

5.2.2 Avaliação das propriedades do material usinado

5.2.2.1 Análise de dureza

Após os ensaios de usinagem, e mediante o corte das peças com o uso de disco abrasivo³⁵, foram obtidas amostras em cortes transversais ao longo dos diâmetros dos corpos-de-prova a 80 mm e 140 mm. Nesses diâmetros, durezas foram medidas utilizando o procedimento documentado no Item 4.2.2.1.

5.2.2.2 Análise microestrutural

A microestrutura foi caracterizada qualitativamente por meio de microestrutura óptica (MO) e eletrônica de varredura (MEV); e quantitativamente empregando analisador de imagens.

A preparação das amostras para análise por microscopia óptica foi realizada mediante preparação metalográfica com carga controlada³⁶. Foi realizado um lixamento grosseiro com carbetto de silício (SiC) de

³⁵ Os equipamentos utilizados para corte, embutimento, lixamento convencional, polimento convencional e obtenção das microfotografias estão localizados no Laboratório de Fenômenos de Superfície – Dpto. de Engenharia Mecânica (LFS-PME-EPUSP)

³⁶ Os equipamentos utilizados para o lixamento e polimento de amostras com carga controlada estão localizados na empresa Sultrade, São Paulo, SP.

granulometria 320, e operações posteriores até lixamento fino com solução diamantada de 9 μm . Posteriormente, foi realizada uma etapa de polimento com solução diamantada de 3 μm , e polimento final com sílica coloidal de 0,25 μm . As características gerais da microestrutura foram reveladas mediante ataque químico com reativo de Nital 3%.

O procedimento para contagem da fração volumétrica dos microconstituintes foi igual ao adotado para os ensaios preliminares. Juntamente com a caracterização dos microconstituintes, pela contagem de fração volumétrica, foi avaliada a morfologia e tamanho da grafita e dos carbonetos³⁷. Como método de avaliação da morfologia dos microconstituintes foi usado o fator de forma (F)³⁸, o qual é diretamente proporcional ao quociente entre o comprimento (C) e a largura (L) do microconstituente, como apresentado na Equação 2.

$$F \propto \frac{C}{L} \quad \text{Equação 3}$$

O diâmetro equivalente (ϕ_{eq}) foi a ferramenta utilizada 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.

$$\phi_{\text{eq}} \propto S \quad \text{Equação 4}$$

5.2.3 Análise da topografia da peça usinada

Após os ensaios de usinagem, as características qualitativas tridimensionais da topografia das superfícies dos corpos-de-prova usinados foram observadas mediante a utilização de microscópio eletrônico de varredura. Para cada condição usinada foram obtidas imagens a 100X, 200X e 500X de aumento, na tentativa de observar e identificar os mecanismos gerados na superfície usinada.

³⁷ Esta metodologia foi adotada por Da Silva e Bocallini [2003] e Bernardes e Sinatora [2005] na caracterização de carbonetos em ferros fundidos brancos multicomponentes.

³⁸ O fator de forma (F) e o diâmetro equivalente são ferramentas disponíveis no software do analisador de imagem, LEICA-QWIN.

5.2.3.1 Textura da superfície

Nos ensaios finais 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. Assim como nos ensaios preliminares, nesta avaliação não foi considerado o perfil de ondulação³⁹ da superfície usinada.

5.2.3.1.1 Rugosidade

As medições de rugosidade foram realizadas em todas as superfícies usinadas, incluindo as repetições. Como recomendado nos ensaios preliminares, a análise da rugosidade foi baseada na medição de outros parâmetros de rugosidade, além do Ra, Rq, Rp ou Rv. Esses outros parâmetros de rugosidade avaliados são o Rz, Rt, Rsk, e o Rku⁴⁰. O procedimento de medição foi igual ao adotado para a avaliação da rugosidade nos ensaios preliminares, detalhado no Item 4.2.3.1.1.

5.2.4 Análise da sub-superfície da peça usinada

Como apresentado nos ensaios preliminares, os fenômenos que ocorreram na superfície da peça usinada geraram modificações na sub-superfície do material. Para os ensaios finais foi feita a caracterização das mudanças na sub-superfície para cada condição ensaiada, baseada no procedimento exposto no Item 4.2.4.

5.3 Resultados e discussão

5.3.1 Avaliação das propriedades do material usado

5.3.1.1 Caracterização microestrutural qualitativa

Em termos gerais, os microconstituintes que compõem a microestrutura dos corpos-de-prova utilizados para a realização dos ensaios finais apresentam as mesmas características que os utilizados durante os ensaios preliminares; microestrutura apresentada na Figura 14, Item 4. A

³⁹ A ondulação não é avaliada, mas, lembra-se a importância de se avaliar nas aplicações onde o contato entre superfícies é fundamental [23] (Ver Item 2.1.1.1.2).

⁴⁰ Os parâmetros de rugosidade Rz, Rt, Rsk, e o Rku são definidos no Anexo 2.

microestrutura apresentou heterogeneidades quanto ao tamanho e distribuição de microconstituintes e era composta de uma matriz perlítica, grafita nodular e carbonetos eutéticos (M_3C).

5.3.1.2 Caracterização microestrutural quantitativa e análise da dureza do material

Os resultados apresentados no Item 4 - *Ensaaios preliminares* mostraram que a heterogeneidade da microestrutura afetou a dureza do material e, conseqüentemente, foram induzidos efeitos na integridade da superfície e da sub-superfície usinada. A Figura 48 apresenta as mudanças de dureza e fração volumétrica dos microconstituintes das peças ensaiadas em função do diâmetro dos corpos-de-prova.

Figura 48 - Variação da dureza e da fração volumétrica dos microconstituintes em diferentes diâmetros da peça⁴¹. Para as condições estudadas, a dureza brinell apresentou pouca variação em função da microestrutura

Segundo o observado na Figura 48, o valor médio da dureza aumentou em função do diâmetro da peça. A peça possui a dureza mais baixa no diâmetro de 80 mm; o que contrasta com o fato de ser nesse diâmetro onde se tem a maior fração volumétrica de carbonetos. A fração volumétrica de grafita apresentou pouca mudança de um diâmetro para outro. Alvarez e colaboradores [2005] observaram que: (i) a dureza de um

⁴¹ Empregou-se penetrador esférico para o ensaio da dureza Brinell segundo procedimento apresentado no Item 4.2.2.1.

ferro fundido nodular com carbonetos mudou quando avaliada nos diferentes diâmetros da peça fundida em função da microestrutura e (ii) a avaliação da fração volumétrica de carbonetos não é suficiente para entender o efeito que as heterogeneidades dos microconstituintes desempenham na dureza do material. As colocações de Alvarez e colaboradores [2005] foram igualmente evidenciadas nos ensaios preliminares e, portanto, o tamanho e a morfologia dos microconstituintes foram avaliados em função do diâmetro da peça usinada, na tentativa de estimar o efeito que produzem na dureza dos corpos-de-prova. A Figura 49 apresenta as mudanças de tamanho e morfologia dos microconstituintes em função do diâmetro do material.

Figura 49 - Variação do valor médio do tamanho e da morfologia dos microconstituintes em diferentes diâmetros da peça⁴²

Na Figura 49, observa-se que o diâmetro equivalente dos microconstituintes aumentou em função do diâmetro da peça, principalmente para o caso da grafita. Souza e Castello Branco [1989] afirmaram que as flutuações do tamanho da grafita no diâmetro da peça estão associadas à ocorrência de áreas com teor de carbono mais elevado na

⁴² Empregou-se penetrador esférico para o ensaio da dureza Brinell segundo procedimento apresentado no Item 4.2.2.1.

peça fundida e, com mais freqüência, junto às paredes da mesma. Além disso, essas diferenças na concentração de carbono podem ter promovido o crescimento preferencial dos nódulos de grafita na superfície dos corpos-de-prova. Souza e Castello Branco [1989] apontaram também que, no estudo da fabricação de peças espessas fabricadas em ferro fundido nodular, ocorre falta de reprodutibilidade da microestrutura e das propriedades mecânicas. Conseqüentemente, as diferenças no tamanho dos microconstituintes podem ter influenciando a dureza do material nos diferentes diâmetros. Contudo, o efeito que o diâmetro da peça fundida induz na microestrutura e na dureza dos corpos-de-prova utilizados neste trabalho não ficou bem claro mediante a análise gráfica apresentada na Figura 48 e na Figura 49. Como observado por Farias e Tanaka [2004], uma técnica estatística que permite exprimir quantitativamente o efeito que os fatores (variáveis independentes) produzem numa determinada resposta, e as suas interações, é a análise de fatores de um “planejamento fatorial”. Segundo Farias e Tanaka [2004] citando Box [1978], *“ao se aplicar esta técnica, é possível concluir se a influência de um fator sobre uma resposta depende ou não do nível do outro”*. Os planejamentos fatoriais permitem a determinação do “efeito principal” e do “efeito das interações” das variáveis contidas na análise do fenômeno estudado.

A seguir, no Item 5.3.1.2.1 será determinado o “efeito principal” do diâmetro na fração volumétrica, no tamanho e na morfologia dos microconstituintes. Posteriormente, no Item 5.3.1.2.2 a mesma análise será realizada para a dureza.

5.3.1.2.1 Efeito do diâmetro na microestrutura

No Item 5.3.1.2.1.1 serão apresentados somente os efeitos significativos do diâmetro relacionados com os resultados obtidos mediante metalografia quantitativa dos carbonetos⁴³. Posteriormente, no Item 5.3.1.2.1.2, serão apresentados os efeitos do diâmetro relacionados com os resultados obtidos mediante metalografia quantitativa de grafita.

⁴³ Os efeitos não significativos contidos nas Tabelas foram calculados, mas, por motivos da sua irrelevância na discussão não serão apresentados.

Conseqüentemente, como variável independente nas análises estatísticas somente será considerado o efeito do diâmetro.

5.3.1.2.1.1 - Efeito do diâmetro nos carbonetos

Inicialmente será realizado o cálculo do efeito do diâmetro nas características da fração volumétrica de carbonetos. Para a determinação do efeito do fator “diâmetro” na resposta “microestrutura”, foram realizados os experimentos da matriz codificada mostrada na Tabela 15. Nessa matriz, os códigos +1 e -1 representam os níveis superior e inferior de cada fator a ser estudado.

Tabela 15 - Matriz de experimentos codificada e resultados obtidos para a fração volumétrica de carbonetos. As colunas FV_1 , FV_2 e FV_3, informam o valor médio da fração volumétrica de carbonetos avaliada para cada repetição de ensaio⁴⁴

Variável Independente Codificada		Fração Volumétrica		
Ensaio	Ø (mm)	FV_1 (%)	FV_2 (%)	FV_3 (%)
1	-1	9,8	9,923	11,0325
2	+1	11,008	14,52	10,56
3	-1	9,381	10,381	9,104
4	+1	13,321	13,0231	9,354
5	-1	8,35	9,403	8,802
6	+1	13,83	12,035	14,264
7	-1	6,834	11,053	8,351
8	+1	8,561	16,1513	13,321

No Item 2.6 foi apresentada uma breve revisão de métodos existentes para obter os efeitos dos fatores e avaliar a significância estatística dos efeitos principais e de interação de variáveis. Na Tabela 16, apresenta-se a estimativa dos efeitos do diâmetro na fração volumétrica de carboneto, considerando os níveis codificados desses fatores (Tabela 15).

⁴⁴ Lembra-se que, segundo o planejamento experimental adotado, foram realizadas 3 repetições para cada combinação de fatores.

Tabela 16 - Estimativa dos efeitos e do erro padrão da fração volumétrica de carbonetos para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

EFEITO	VALOR	ERRO PADRÃO ERRO PURO	t(16)	p	LIMITE DE CONFIANÇA	
					-95%	+95%
Média	10,9318*	0,40474	27,0095	0,00000	10,0738	11,7898
ϕ	3,1278*	0,80948	3,8640	0,00137	1,4118	4,8438

Como indicado no Item 2.6, a Tabela 16 foi gerada utilizando o programa STATÍSTICA. 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 (α , 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 α se aceita a hipótese nula, ou seja, o efeito é não significativo. Da análise dos resultados contidos na Tabela 16, pode-se inferir que o efeito principal do diâmetro na fração volumétrica de carbonetos é significativo, 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 (ϕ) (3,1278) indica que houve um aumento da fração volumétrica de carbonetos conforme o aumento do diâmetro da peça.

O mesmo procedimento de análise realizado para o Item 5.3.1.2.1.1 foi aplicado para obter os efeitos do diâmetro do corpo-de-prova e avaliar a significância estatística dos efeitos principais no arredondamento, na relação de aspecto e no diâmetro equivalente dos carbonetos. Os efeitos que o diâmetro tem nos aspectos microestruturais dos carbonetos são resumidos na Tabela 17.

Tabela 17 - Efeito principal das respostas microestruturais do carboneto 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	Variável Independente (ϕ)	
	VALOR	p
Respostas		
F volumétrica	3,1278*	0,00137
Arredondamento	0,2968	0,3868
Fator de forma	0,1483	0,3371
ϕ equivalente	2,1249	0,5154

Na Tabela 17 informou-se o valor calculado para cada efeito e o estimador p do teste de hipótese para as respostas microestruturais. Dessa Tabela concluiu-se que os efeitos do diâmetro quanto ao arredondamento (p 0,3868 > 0,05); fator de forma (p 0,3371 > 0,05); e diâmetro equivalente de carbonetos (p 0,5154 > 0,05) não foram estatisticamente significativos.

5.3.1.2.1.2 - Efeito do diâmetro na grafita

O procedimento de cálculo do efeito do diâmetro nas características da grafita foi o mesmo adotado para o Item 5.3.1.2.1.1. Inicialmente, foi realizado o cálculo do efeito do diâmetro na fração volumétrica de grafita. Portanto, foram realizados os experimentos da matriz codificada mostrada na Tabela 18.

Tabela 18 - Matriz de experimentos codificada e resultados obtidos para a fração volumétrica de grafita. As colunas FV_1 , FV_2 e FV_3, informam o valor médio da fração volumétrica de grafita avaliada para cada repetição de ensaio

Variável Independente Codificada		Fração Volumétrica		
Ensaio	Ø (mm)	FV_1 (%)	FV_2 (%)	FV_3 (%)
1	-1	8,235	12,568	12,365
2	+1	8,023	11,837	7,198
3	-1	11,337	16,337	9,354
4	+1	11,114	10,913	11,601
5	-1	9,916	8,089	10,062
6	+1	8,484	8,015	8,863
7	-1	8,959	8,023	14,695
8	+1	17,015	9,818	12,542

Na Tabela 19, apresenta-se a estimativa dos efeitos do diâmetro na fração volumétrica de grafita, considerando-se os níveis codificados desses fatores, apresentados na Tabela 18.

Tabela 19 - Estimativa do efeito e do erro padrão da fração volumétrica de grafita para o planejamento fatorial fracionário 2^{4+1} . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

EFEITO	VALOR	ERRO PADRÃO ERRO PURO	t(16)	p	LIMITE DE CONFIANÇA	
					-95%	+95%
Média	10,640*	0,5245	20,286	0,0000	9,528	11,752
ϕ	-0,376	1,0490	-0,359	0,7244	-2,600	1,847

Da análise dos resultados contidos na Tabela 19, pode-se inferir que o efeito principal do diâmetro na fração volumétrica da grafita não é significativo ($p = 0,724 > 0,05$).

Os efeitos que o diâmetro tem nos aspectos microestruturais da grafita são apresentados na Tabela 20.

Tabela 20 - Efeito principal das respostas microestruturais da grafita 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	Variável Independente (ϕ)	
Respostas	VALOR	p
F volumétrica	-0,376	0,7244
Arredondamento	-0,311	0,2207
Fator de forma	-0,1480	0,1445
ϕ equivalente	6,535*	0,0404

Da Tabela 20 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. Igualmente, da Tabela 20 pôde-se inferir que o efeito principal do diâmetro da peça no diâmetro equivalente da grafita foi significativo ($p = 0,0404 < 0,05$). O valor positivo do efeito principal (ϕ) indica que houve um aumento do diâmetro equivalente de grafita conforme o aumento do diâmetro da peça.

5.3.1.2.2 Efeito do diâmetro na dureza

Para a determinação do efeito do diâmetro na dureza, foram realizados os experimentos da matriz codificada mostrada na Tabela 21.

Na Tabela 22, apresenta-se a estimativa dos efeitos do diâmetro na dureza Brinell, considerando-se os níveis codificados desses fatores, apresentados na Tabela 21.

Da análise dos resultados contidos na Tabela 22, pode-se inferir que o efeito principal do diâmetro na dureza é significativo ($p = 0,00013 < 0,05$); e o valor positivo do efeito principal (ϕ) (5,9000) indica que houve um aumento da dureza Brinell conforme o aumento do diâmetro da peça.

Tabela 21 - Matriz de experimentos codificada e resultados obtidos para a dureza do material. As colunas Hardn_1 , Hardn_2 e Hardn_3, informam o valor médio da dureza Brinell avaliada para cada repetição de ensaio

Variável Independente Codificada		Dureza Brinell		
Ensaio	Ø (mm)	Hardn_1 (HB)	Hardn_2 (HB)	Hardn_3 (HB)
1	-1	270,6	271,5	270,6
2	+1	271,5	267	271,5
3	-1	267	268,5	267
4	+1	279	273	273
5	-1	268,5	267	268,5
6	+1	279	279	279
7	-1	267	267	267
8	+1	273	273	273

Tabela 22 - Estimativa dos efeitos e do erro padrão da dureza para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

EFEITO	VALOR	ERRO PADRÃO ERRO PURO	t(16)	p	LIMITE DE CONFIANÇA	
					-95%	+95%
Média	271,3000	0,326917	829,8732	0,00000	270,6070	271,9930
ϕ	5,9000*	0,653835	9,0237	0,00013	4,5139	7,2861

5.3.2 Análise da topografia da peça usinada

A Figura 50 contém um conjunto de imagens da topografia das superfícies dos corpos-de-prova usinados, obtido mediante a utilização de microscópio eletrônico de varredura, com aumento de 100X, 200X, 500X, para uma das repetições das condições testadas.

f 0,1 mm/rev – a_p 0,2 mm

ϕ 80 mm, V_c 60 m/min

(a)

(b)

(c)

ϕ 140 mm, V_c 180 m/min

(d)

(e)

(f)

Figura 50 - MEV da superfície no diâmetro de 80 mm, V_c 60 m/min, f 0,1 mm/rev, a_p 0,2 mm. com aumento de a) 100x, b) 200x e c) 500x. E no diâmetro de 140 mm, V_c 180 m/min, f 0,1 mm/rev, a_p 0,2 mm com aumento de d) 100x, e) 200x e e) 500x. Análise de elétrons secundários

Na Figura 50 (a), (b) e (c), observa-se que a matriz metálica apresentou maior deformação plástica e maior descontinuidade dos sulcos criados pelo avanço da ferramenta de corte, quando comparados às

superfícies apresentadas nas Figura 50 (d), (e) e (f). 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; fato que será corroborado mais adiante. Aparentemente, mediante a observação da topografia das superfícies, é na condição com menor velocidade de corte e diâmetro de 80 mm que a grafita destacada da matriz deixou crateras de maior tamanho e profundidade. Já para a superfície torneada com velocidade de corte maior, a quantidade de defeitos superficiais foram maiores em número e as crateras foram de menor tamanho e profundidade. Lembrando que as análises estatísticas para avaliar as respostas microestruturais indicaram influência estatística significativa da variação do diâmetro na fração volumétrica dos carbonetos e no tamanho de grafita, poderia inferir-se que os aspectos microestruturais se somam ao efeito da redução da velocidade de corte, para prejudicar ainda mais o acabamento das superfícies, durante o torneamento do ferro fundido nodular com carboneto estudado neste trabalho.

f 0,3 mm/rev – a_p 0,2 mm

ϕ 80 mm, V_c 180 m/min

ϕ 140 mm, V_c 60 m/min

(a)

(d)

(b)

(e)

(c)

(f)

Figura 51 - MEV da superfície no diâmetro de 80 mm, V_c 180 m/min, f 0,3 mm/rev, a_p 0,2 mm. com aumento de (a) 100x, (b) 200x e (c) 500x. E no diâmetro de 140 mm, V_c 60 m/min, f 0,3 mm/rev, a_p 0,2 mm com aumento de (d) 100x, (e) 200x e (f) 500x. Análise de elétrons secundários

Nas superfícies usinadas apresentadas na Figura 51 (a), (b) e (c), observa-se uma combinação de bom acabamento e pouca deformação plástica, quando comparada com a superfície da Figura 51 (d), (e) e (f). As

superfícies apresentadas na Figura 51 (a) a (c) correspondem ao diâmetro de 80 mm, torneado com velocidade de corte maior (180 m/min). Observa-se que para estas condições de usinagem, a matriz metálica que recobre os nódulos de grafita é arrancada como resultado do fluxo plástico do material na superfície e, posteriormente, é re-depositada na superfície no sentido da velocidade efetiva de corte da ferramenta de corte. Este mesmo fenômeno foi observado por Griffiths [2001] durante a retificação de um ferro fundido nodular, onde a camada de matriz ferrítica que envolve o nódulo foi arrancada e depositada novamente no material, como consequência do próprio processo de usinagem. Uma possível explicação do mecanismo descrito acima é fornecida pelo Machinability Data Center [1980], que aponta que o material re-depositado nos processos usinagem é removido da superfície num estado fundido e, depois da solidificação, fica re-aderido formando uma nova camada na superfície. Por outro lado, para o diâmetro de 80 mm, nas condições de usinagem apresentadas acima, foi observado que, mesmo predominando grafita exposta na superfície do material, não ocorreu formação excessiva de crateras associadas ao arrancamento da mesma. A superfície apresentada na Figura 51 (d) a (f) foi usinada no diâmetro de 140 mm e com uma velocidade de corte de 60 m/min. A diminuição na velocidade de corte acarretou deterioração no acabamento superficial, com conseqüente aumento no valor da rugosidade. Para esta última superfície, a quantidade de deformação plástica à borda dos sulcos e a deformação no sentido de avanço da ferramenta é maior e, contrariamente ao observado para a primeira condição analisada, a presença de crateras associadas ao arrancamento da grafita foi maior. Segundo o apresentado nos ensaios preliminares, espera-se que o parâmetro de rugosidade R_v , seja sensível a estas variações.

Vc 180 m/min – a_p 0,3 mm

ϕ 80 mm, f 0,1 mm/rev

ϕ 140 mm, f 0,3 mm/rev

(a)

(d)

(b)

(e)

(c)

(f)

Figura 52 - MEV da superfície no diâmetro de 80 mm, Vc 180 m/min, f 0,1 mm/rev, a_p 0,3 mm. com aumento de (a) 100x, (b) 200x e (c) 500x. E no diâmetro de 140 mm, Vc 180 m/min, f 0,3 mm/rev, a_p 0,3 mm com aumento de (d) 100x, (e) 200x e (f) 500x. Análise de elétrons secundários

Nas superfícies usinadas apresentadas na Figura 52 (a), (b) e (c), observa-se que aumentando o avanço durante a usinagem em diâmetros diferentes, e mantendo a mesma velocidade de corte (180 m/min), ocorre uma diminuição na qualidade da superfície, quando comparada com a

superfície da Figura 52 (d), (e) e (f). Este resultado condiz como o expressado na literatura [Shaw, 1984], 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 52 corresponde ao diâmetro de 80 mm e ao menor avanço empregado (0,1 mm/rev), obtendo-se uma superfície com melhor acabamento e menor número de crateras. O caso contrário ocorre para o diâmetro de 140 mm, onde o maior avanço, combinado com uma microestrutura contendo grafita maior e mais arredondada, facilita o destacamento da mesma, favorecendo a presença de crateras. Para as condições estudadas, o aumento de fração volumétrica e tamanho de grafita sugere ampliação do efeito que o aumento do avanço produz na superfície.

5.3.2.1 Rugosidade

Segundo as recomendações apresentadas no Item 4, nos ensaios finais a avaliação da rugosidade foi baseada na medição de parâmetros adicionais aos parâmetros de altura utilizados nos ensaios preliminares (R_a , R_q , R_p , R_v). Foi inserida a avaliação do parâmetro de amplitude (R_z) e parâmetros de distribuição de alturas (R_{sk} , e R_{ku}), definidos no anexo 2.

A seguir será determinado o “efeito principal”, e o “efeito da interação” dos fatores do processo de usinagem e do diâmetro para os parâmetros de rugosidade considerados na análise. O procedimento para calcular os efeitos e avaliar a significância estatística dos fatores nas respostas em rugosidade foi similar ao utilizado para estudar os efeitos da microestrutura no Item 5.3.1.2.1.

Para a determinação do efeito dos fatores principais “diâmetro, velocidade de corte, avanço e profundidade de corte” na resposta “rugosidade média, R_a ”, foram realizados os experimentos da matriz codificada mostrada na Tabela 23. Nessa matriz, os códigos +1 e -1 apresentam os níveis superior e inferior de cada fator a ser estudado (Tabela 14).

Tabela 23 - Matriz de experimentos codificada e resultados obtidos para a rugosidade média (Ra). Nas colunas Ra_1 , Ra_2 e Ra_3, informam o valor médio da rugosidade media avaliada para cada repetição de ensaio

Ensaio	Variáveis Independentes				Rugosidade média		
	Ø (mm)	f (mm/rev)	Vc (m/min)	a_p (mm)	Ra_1 (%)	Ra_2 (%)	Ra_3 (%)
1	-1	-1	-1	-1	2,0475	2,6674	2,798
2	+1	-1	-1	+1	2,7328	2,3496	1,0974
3	-1	+1	-1	+1	2,0676	4,5166	1,3276
4	+1	+1	-1	-1	3,4332	2,9818	2,8178
5	-1	-1	+1	+1	1,0598	1,1492	1,0474
6	+1	-1	+1	-1	0,6784	0,665	0,8756
7	-1	+1	+1	-1	2,7328	2,2932	2,9792
8	+1	+1	+1	+1	2,8178	2,2024	2,0338

Da análise dos resultados contidos na Tabela 24, pode-se inferir que o efeito principal do avanço (f) no parâmetro de rugosidade Ra é significativo ($p = 0,0019 < 0,05$); e que o valor positivo do efeito principal (f) (1,0863) indica que houve um aumento da rugosidade conforme o aumento do avanço. Na Tabela 24, percebe-se um segundo efeito principal no Ra; trata-se da velocidade de corte (Vc), que tem efeito significativo ($p = 0,0096 < 0,05$). Além disso, o valor negativo do efeito (Vc) (-0,8586) indica que houve uma diminuição da rugosidade conforme o aumento da velocidade de corte.

Tabela 24 - Estimativa dos efeitos e do erro padrão da rugosidade média Ra para o planejamento fatorial fracionário 2^{4-1} . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

EFEITO	VALOR	ERRO PADRÃO ERRO PURO	t(16)	p	LIMITE DE CONFIANÇA	
					-95%	+95%
Média	2,1405	0,1459	14,670	0,0000	1,831	2,4498
ϕ	-0,1667	0,2918	-0,571	0,5757	-0,785	0,4519
f	1,0863	0,2918	3,722	0,0019 *	0,468	1,7049
Vc	-0,8586	0,2918	-2,942	0,0096 *	-1,477	-0,2399
a_p	-0,2140	0,2918	-0,733	0,4740	-0,833	0,4046
$\phi \times f$	0,2284	0,2918	0,783	0,4453	-0,390	0,8470
$\phi \times Vc$	-0,1647	0,2918	-0,564	0,5803	-0,783	0,4539
$\phi \times a_p$	0,5110	0,2918	1,751	0,0991	-0,108	1,1296

A mesma metodologia de análise foi empregada no estudo do efeito dos fatores para os outros parâmetros de rugosidade. Na Tabela 25 serão apresentados os efeitos dos fatores principais na resposta dos parâmetros de rugosidade avaliados.

Da Tabela 25 pode-se observar que o efeito principal do diâmetro (e portanto da microestrutura) na maior parte do conjunto de parâmetros de rugosidade avaliados não foi significativo. Somente observou-se um efeito de interação de segunda ordem significativo, $\phi \times a_p$ ($p = 0,017963 < 0,05$) na variação do parâmetro de rugosidade Rt. A Figura 53 apresenta os valores de Rt medidos para as diferentes combinações de diâmetro e profundidade de corte. A significância estatística dos efeitos das interações da profundidade de corte e do diâmetro no parâmetro de rugosidade Rt pode estar associada com as particularidades microestruturais da grafita e dos carbonetos, discutidas no Item 5.3.1.2.

Tabela 25 - Efeitos principais das respostas em rugosidade para os fatores do experimento. Para as variáveis significativas apresenta-se a probabilidade do nível p-level e o valor do efeito. “NS” indica não significância na resposta do nível abordado

		Efeitos Principais				Efeitos da Interação
Resposta		ϕ	f	Vc	a_p	$\phi \times a_p$
Ra	p	NS	0,00185	0,00957	NS	NS
	Efeito	-	1,086308	-0,858558	-	-
Rq	p	NS	0,001083	0,006624	NS	NS
	Efeito	-	1,36892	-1,07322	-	-
Rt	p	NS	0,001515	0,02977	NS	0,017963
	Efeito	-	7,04917	-4,40417	-	4,86767
Rp	p	NS	0,015281	0,026085	NS	NS
	Efeito	-	2,68428	-2,42355	-	-
Rv	p	NS	0,013183	0,000712	NS	NS
	Efeito	-	3,16873	-2,11453	-	-
Rz	p	NS	0,002155	0,012051	NS	NS
	Efeito	-	5,85297	-4,53820	-	-
Rsk	p	NS	NS	NS	NS	NS
	Efeito	-	-	-	-	-
Rku	p	NS	NS	NS	NS	NS
	Efeito	-	-	-	-	-

Da análise microestrutural cabe lembrar que ocorre um aumento da fração volumétrica dos carbonetos e do tamanho da grafita (maior diâmetro equivalente) conforme aumento do diâmetro da peça. Na Figura 53, observa-se que quando mudou-se a profundidade de corte, a resposta do parâmetro de rugosidade Rt, em função dos diâmetros estudados, foi diferente. Contudo, a combinação de menor quantidade de carbonetos e grafita de menor tamanho, com a escolha de uma profundidade de corte

maior, prejudicou o acabamento da superfície, associado ao aumento do parâmetro de rugosidade R_t . Por outro lado, a utilização de uma menor profundidade de corte, em combinação com menor quantidade de carbonetos e grafita de menor tamanho, acarretou diminuição no parâmetro de rugosidade R_t , favorecendo a qualidade da superfície usinada. Segundo o observado nos ensaios preliminares, acredita-se que a remoção e destacamento da grafita contribuem em maior parcela para o aumento dos valores do parâmetro de rugosidade R_t , do que o trincamento e destacamento dos carbonetos na superfície. Esta hipótese será abordada em maior detalhe durante a análise da sub-superfície usinada, no Item 5.3.3.

Figura 53 - Efeito da interação do diâmetro e da profundidade de corte na altura do pico mais alto ao vale mais profundo do perfil de rugosidade R_t . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

Da Tabela 25 pode-se igualmente observar que o efeito principal do avanço na maior parte do conjunto de parâmetros de rugosidade avaliados é significativo, dentro dos quais se inclui R_a , R_q , R_t , R_p , R_v e R_z . Para os parâmetros R_{sk} e R_{ku} não se observou nenhum efeito significativo. O valor positivo do efeito principal indica que houve aumento da rugosidade da superfície usinada conforme aumento no avanço, como apresentado na

Figura 54 a Figura 58. Esses resultados correspondem ao apresentado na literatura [Shaw, 1984], onde a diminuição do avanço acarreta em menores valores de rugosidade.

Figura 54 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na rugosidade média central Ra. Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

Da Tabela 25 pode-se observar, ainda, que o efeito principal da velocidade de corte é similar ao efeito principal do avanço na rugosidade. O efeito principal da velocidade é significativo para: Ra, Rq, Rt, Rp, Rv e Rz. O valor negativo do efeito principal para todos os fatores indica que houve diminuição da rugosidade da superfície usinada conforme aumento na velocidade de corte, como apresentado na Figura 54 a Figura 58. Esses resultados igualmente correspondem ao mencionado na literatura [Shaw, 1984], onde o aumento na velocidade de corte resulta em menores valores de rugosidade.

Finalmente, da Tabela 25 pode-se observar que o efeito principal da profundidade de corte na rugosidade não é significativo. Somente existe um efeito de interação de segunda ordem significativo do diâmetro da peça na profundidade de corte, como abordado ao início deste Item 5.3.2.1.

Figura 55 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na rugosidade média quadrática (RMS) R_q . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

Figura 56 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na altura do pico mais alto do perfil de rugosidade R_p . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

Figura 57 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na profundidade do vale mais profundo do perfil de rugosidade R_v . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

Figura 58 - Efeito da velocidade de corte e do avanço na altura pico-vale da altura de rugosidade no comprimento de medição. Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

Figura 59 - Efeito do diâmetro e da profundidade de corte no R_t . Intervalo de confiança com nível de significância de 5%

5.3.3 Análise da sub-superfície

Segundo Griffiths [2001] e Whitehouse [2004], os processos de fabricação podem produzir mudanças nas propriedades da sub-superfície do material, as quais geralmente acompanham os padrões da topografia na superfície em função da intensidade dos níveis de energia termo-mecânica atuantes durante o processo de remoção de material. Os ensaios preliminares mostraram que alguns dos fenômenos gerados na topografia das peças usinadas induziram alterações na sub-superfície do material. De acordo com os requisitos estabelecidos pela Norma B211.1-1986 [ANS, 1986], referentes ao conjunto mínimo de dados para avaliar a integridade da superfície (Tabela 5 do Item 2.2), foram selecionados dois níveis de intensidade do processo para avaliar os seus efeitos na integridade da superfície e sub-superfície. Será abordado o efeito que os dois níveis do processo têm na grafita, nos carbonetos e na matriz metálica.

5.3.3.1 Análise do nível de usinagem moderado na qualidade da superfície, e os seus efeitos na sub-superfície

O primeiro nível (considerado como moderado) corresponde aos níveis mais baixos dos fatores escolhidos para as análises, e corresponde a:

Velocidade de corte (V_c) = 60 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,2 mm; avanço f = 0,1 mm/rot; e diâmetro de 80 mm. A Figura 60 apresenta uma imagem obtida no MEV, na qual são mostrados alguns aspectos da superfície obtida com essas condições.

Figura 60 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 80 mm após o ensaio de usinagem com (V_c) = 60 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,2 mm; avanço f = 0,1 mm/rot. Observa-se crateras, dobramentos, rebarbas e outras irregularidades. Aumento de 500X. Análise de elétrons secundários

Na Figura 60, observa-se que a superfície usinada apresenta diversas irregularidades, que basicamente se resumem em crateras, dobramentos e amassamentos de material. A Figura 61 apresenta uma imagem da seção transversal da peça, detalhando os aspectos microestruturais para a grafita na sub-superfície.

Figura 61 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 80 mm após o ensaio de usinagem com (V_c) = 60 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,2 mm; avanço f = 0,1 mm/rot. Observa-se a distribuição dos nódulos de grafita na sub-superfície, e um nódulo de grafita sendo recoberto pela matriz metálica na superfície como resultado da usinagem. Aumento de 350X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

Na Figura 61 observa-se 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 na superfície pela matriz metálica.

Na Figura 62, 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 exposto na superfície apresenta arredondamento bem definido. A matriz metálica que recobria o nódulo apresentado na Figura 62, foi removida completamente 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 [Griffiths, 2001], facilitando, assim, o processo de corte do material da matriz metálica e o desprendimento de cavacos curtos na região de corte.

Figura 62 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 80 mm após o ensaio de usinagem com $(V_c) = 60$ m/min; profundidade de corte $(a_p) = 0,2$ mm; avanço $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se um nódulo de grafita sendo exposto na superfície como resultado da usinagem. Aumento de 1000X. Análise de elétrons secundários. Ataque com Nital 3%

Figura 63 - MEV da seção transversal do corpo-de-prova no diâmetro de 80 mm após o ensaio de usinagem com $(V_c) = 60$ m/min; profundidade de corte $(a_p) = 0,2$ mm; avanço $f = 0,1$ mm/rot. Observa-se carboneto eutético na borda da superfície usinada, trincado como resultado da usinagem. Aumento de 2000X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

Na Figura 63, observa-se que, para as condições de ensaio utilizadas, ocorreu trincamento na superfície da peça usinada; trincamento localizado

no carboneto eutético. Este fenômeno encontra-se presente igualmente ao longo dos carbonetos na sub-superfície. Como exposto durante os ensaios preliminares, o trincamento de carbonetos durante a usinagem é um aspecto característico dos ferros fundidos brancos, o qual compromete a sua usinabilidade [Shaw, 1984]. 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.

5.3.3.2 Análise do nível de usinagem severo na qualidade da superfície e os seus efeitos na sub-superfície

O segundo nível (considerado como severo) corresponde aos níveis mais altos dos fatores escolhidos para as análises, e corresponde a: Velocidade de corte (V_c) = 180 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,3 mm; avanço f = 0,3 mm/rot; e diâmetro de 140 mm. Na Figura 64, apresenta-se uma imagem obtida no MEV, na qual se mostram alguns aspectos da superfície usinada nessas condições.

Na Figura 64, observa-se que a superfície usinada em geral apresenta diversas irregularidades, que basicamente se resumem em crateras, dobramentos e amassamentos de material. A Figura 65 apresenta uma imagem da seção transversal da peça, detalhando os aspectos microestruturais para a grafita na sub-superfície.

Figura 64 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com (V_c) = 180 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,3 mm; avanço f = 0,3 mm/rot. Observa-se crateras, dobramentos, rebarbas e outras irregularidades. Aumento de 500X. Análise de elétrons secundários

Figura 65 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com (V_c) = 180 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,3 mm; avanço f = 0,3 mm/rot. Observa-se a distribuição dos nódulos de grafita na sub-superfície, e um nódulo de grafita sendo exposto na superfície como resultado da usinagem. Aumento de 350X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

Na Figura 65 observa-se que com o mesmo nível de intensidade do processo de corte, a sub-superfície apresentou dois tipos de resposta

diferente associados à microestrutura; propagação de trincas nos carbonetos perto da borda, e recobrimento da grafita na superfície pela matriz metálica.

Na Figura 66, observa-se o destacamento total do nódulo de grafita, o qual foi observado tanto nos ensaios preliminares (Item 4.3.4.1) quanto nos ensaios realizados para o nível de usinagem moderado (Item 5.3.3.1).

Na Figura 67, observa-se a formação de uma trinca, que se propagou ao longo do carboneto como consequência da usinagem severa.

Figura 66 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com (V_c) = 180 m/min; profundidade de corte (a_p) = 0,3 mm; avanço f = 0,3 mm/rot. Observa-se um nódulo de grafita sendo exposto na superfície como resultado da usinagem. Aumento de 1000X. Análise de elétrons secundários. Ataque com Nital 3%

Figura 67 - MEV da superfície do corpo-de-prova no diâmetro de 140 mm após o ensaio de usinagem com $(V_c) = 180$ m/min; profundidade de corte $(a_p) = 0,3$ mm; avanço $f = 0,3$ mm/rot. Observa-se carboneto eutético trincado na sub-superfície como resultado da usinagem. Aumento de 1000X. Análise de elétrons retro-espalhados. Ataque com Nital 3%

6 CONCLUSÕES

Sobre o efeito da microestrutura:

- Uma mesma peça fundida em ferro fundido nodular com carboneto pode apresentar diferenças microestruturais estatisticamente significativas, em função da fração volumétrica de carbonetos e tamanho da grafita.
- O aumento de fração volumétrica de carbonetos e tamanho da grafita pode gerar aumentos estatisticamente significativos na dureza do ferro fundido nodular com carboneto.

Sobre os parâmetros de corte.

- A interação dos parâmetros de corte com as características microestruturais, acarretam efeitos na textura da superfície durante o torneamento do ferro fundido nodular com carboneto.

Sobre a integridade da superfície.

- A grafita compromete a integridade da superfície quanto aos efeitos na topografia.
- Os carbonetos comprometem a integridade da superfície quanto aos efeitos na sub-superfície.

7 RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Realizar experimentos correspondentes ao planejamento de fatorial completo com o objetivo de correlacionar a microestrutura (tamanho, fração volumétrica e morfologia de carbonetos) do ferro fundido nodular com carbonetos e os parâmetros de usinagem (velocidade de corte, força de corte, profundidade de corte e avanço) com a textura das superfícies usinadas (rugosidade e ondulação).
- Completar o conjunto padrão de dados para avaliar a integridade superficial mediante análises de tensão residual e ensaios de fadiga de alto ciclo.
- Avaliar a influência da microestrutura do ferro fundido nodular e do ferro fundido branco na integridade superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, J.F.; DE SOUZA, R.M.; HASSUI, A. **Efeito dos parâmetros de torneamento no acabamento superficial do ferro fundido mesclado com grafita nodular**. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação – COBEF, 3., Joinville, 2005.

ANS B211.1. **American National Standard for Surface Integrity**. 1986.

ANSI B.46.1-1978. **“Surface Texture”**. 1978.

ASME., American Society of Mechanical Engineers. B46.1. **Surface Texture (Surface roughness, Waviness, and Lay)**. 1996

BERNARDES, F.G.; SINATORA, A. **Desgaste abrasivo de um ferro fundido branco multi componente**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2005.

BOOTHROYD, G.; KNIGHT, W.A. **Fundamentals of machining and machine tools**, New York: Marcel Dekker, 1989.

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. p.1 – 9. 2005.

BOX, G.E.P. **Statistics for experimenters : introduction to design, data analysis and model building**. New York : John Wiley, 1978.

CAPELLO, E.. **Residual stresses in turning**. Part I: Influence of process parameters. Journal of Material Processing Technology. v.160, p. 221 –228. 2005.

CHE-HARON, C.H. **Tool life and surface integrity in turning titanium alloy**. Journal of Material Processing Technology. v.118, p. 231 – 237. 2001.

CHOU, K.Y.; EVANS, C.J. **White layers and thermal modeling of hard turned surfaces**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. v. 39, p. 1863 – 1881. 1999.

CORREA, M.. et al. **Factores que afectan el acabado superficial en los procesos de mecanizado: Técnicas de análisis y modelos**. XXV Jornadas de Automática Industrial CEA-IFAC. Internacional. España 2004.. p. 75-82.

DA SILVA, C.R.S.; BOCCALINI JR, M. **Fadiga térmica de ferros fundidos brancos multicomponentes**. Dissertação (mestrado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2003.

DE DEUS, J.R. **A indústria da fundição no Brasil e suas perspectivas**. ABIFA, Associação Brasileira de Fundição, 2004. Disponível em www.abmbrasil.com.br/cim/download/Joao_de_Deus.pps . Acesso em: 4 de Set. 2005.

FARIAS, M.C.; TANAKA, D.K. **Influência da velocidade de deslizamento, da carga normal e da transformação martensítica induzida por deformação plástica na resistência ao desgaste por deslizamento de aços inoxidáveis austeníticos**. Tese (doutorado). Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo. 2004.

FIELD, M. e colaboradores. **A review of measuring methods for surface integrity**, Annals of the CIRP, v. 21/2, p. 219-238, 1972.

FIELD, M. e colaboradores. **Surface finish and surface integrity**. In: ASM Handbook. Machining. v.16. p. 19-36, 1989.

FIELD, M.; KALES, J.F. **Review of surface integrity of machined components**, Annals of the CIRP, v. 20/2, p. 153 – 163, 1971.

FUNDAÇÃO E SERVIÇOS. São Paulo: Aranda Editora. Ano 15, n.51. Mensal, 2005.

GADELMAWLA, E.S. et al. **Roughness parameters**. Journal of Materials Processing Technology, 123., p.133-145, 2002.

GOCH, G. e colaboradores. **Review of non-destructive measuring methods for the assessment surface integrity: a survey of new measuring methods for coatings, layered structures and processed surfaces**. Precision Engineering. v.23, p. 9 –33, 1999.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing surface technology: Surface integrity & functional performance**. London: Penton Press, 237p, 2001.

GRIFFITHS, B.J. **Manufacturing surface design and monitoring for performance**. Surface topography, v.1, p.61, 1998.

GRUM, J.; KISIN, M. **Influence of microstructure on surface integrity in turning – part I: the influence of the size of the soft phase in a microstructure on surface-roughness formation**. International journal & machine tools & manufacture, v.43, p. 1535 –1543, 2003.

HUANG, Q.; JING, X.J. **Surface integrity and its effects on the fatigue life of the nickel-based superalloy GH33A**. International journal fatigue, v.13, p. 322 –326, 1991.

ISO. **Indication of surface texture in technical product documentation**, 2001.

KISHAWY, H.A.; ELBESTAWY, M.A. **Effects of process parameters on material side flow during hard turning**. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.39, p. 1017 –1030, 1999.

KOSTER, W.P. e colaboradores. **Manufacturing methods for surface integrity of machined structural components**. U.S. Air Force Technical Report AFML-TR-71-258, Metcut Research Associates Inc., Cincinnati, OH, 1976.

LEE, K.Y. e colaboradores. **Simulation of surface roughness and profile in high speed end milling**, Journal of materials processing technology, v.113, Issues 1-3, p. 410 – 415, 2001.

LESKOVAR, P.; KOVAC, M. **Surface integrity as a quality criterion for fabrication processes**, Robotics and computer-integrated manufacturing, v. 4, No. 1/2, p. 253 – 257, 1988.

MACHINABILITY DATA CENTER. Machining data handbook, **Machining data center**, v. 2, p. 18-39/18-136, 1980.

MANTLE, A.L.; ANSPINWALL, D.K. **Surface integrity and fatigue life of turned gamma titanium aluminide**. Journal of Material Processing Technology. v.72, p. 413 –420, 1997.

MONTGOMERY, DOUGLAS C. **Diseño y análisis de experimentos**. Edição original em inglês traduzida por Jaime Delgado Saldivar ed. John Wiley and Sons, 1991.

MORTON, R.K. **Topography of surfaces**. In: ASM Handbook. Surface engineering. v.5. p. 136-138, 1991.

NOVOVIC, A. e colaboradores. **The effect of machined topography and integrity on fatigue life**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. v.440, p. 125 –134, 2004.

NUNES, R.C. e colaboradores. **Estudo do efeito das variáveis de processo na dureza do ferro fundido nodular com auxilio do planejamento de experimentos**. 57o Congresso Anual Internacional da ABM Julho, São Paulo – SP – Brasil, 2002

RABINOWICZ, E. **Friction and wear of materials**. John Wiley and Sons, 1966

RECH, J.; MOISAN, A. **Surface integrity in finish hard turning of case-hardened steels**. International Journal of Machine Tools & Manufacture. v.43, p. 543 –550. 2003.

SCHLESINGER, G. **Surface finish**, Institute of production engineers, London, 1942.

SCHWACH, D.W.; GUO, Y.B. **Feasibility of producing optimal surface integrity by process design in hard turning**. Material Science and Engineering. v.A, n.395, p.116 – 123, 2005

SHARMAN, A.R.C. e colaboradores. **Workpiece surface integrity considerations when finish turning gamma titanium aluminide**. Wear. v.249, p. 473 –481, 2001.

SHAW. **Metal Cutting Principles**. Clarendon, Great Britain. 590 p., 1984.

SILVA, A.P. e colaboradores. **Influência da velocidade de resfriamento em propriedades do ferro fundido nodular austemperado (ADI)**. Congresso Anual Internacional da ABM , 57., São Paulo, 2002.

SONG, J.F.; VORBURGER, T.V. **Surface texture**. In: ASM Handbook. Friction, lubrication and wear technology. v.18. p. 184-190, 1992.

SOUZA, A.B.; CASTELLO BRANCO, C.H.; **Metalurgia dos ferros fundidos cinzentos e nodulares**. São Paulo: Instituto de Pesquisas Tecnológicas - IPT,.205 p., 1989.

SUH, N.P. **Tribophysics**. Prentice-Hall, 1986.

TABOR, D. **The hardness and strength of metals**. J. Inst. Metals. v.79, p. 1–18, 1954.

TONSHOFF, H.K.; BRINKSMEIER, E. **Determination of the mechanical and thermal influences on machined surfaces by micro-hardness and residual stress analysis**. Annals of the CIRP, v.29, n.2, p.519–530, 1980.

TRICARD, M. **Residual effects of finishing methods**. In: ASM Handbook. Surface engineering. v.5. p. 144-151, 1994

WHITEHOUSE, D.J. **Surfaces and their measurement**. Hermes Penton Science, London. 394 p., 2004.

WHITEHOUSE, D.J. **Surface texture**. In: Handbook of surface metrology. v.18. p. 184-190, 1994.

ANEXO 1

Superfície: é a fronteira que separa um objeto de outro objeto, substancia ou espaço.

Superfície geométrica: É a superfície ideal prescrita no projeto, na qual não existem erros de forma e acabamento. Na realidade, este tipo de superfície não existe, mas é empregada como uma referência.

Superfície Geométrica

Superfície real: Superfície que limita o corpo e o separa do meio que o envolve. É a superfície que resulta do método empregado na sua produção.

Superfície real

Superfície efetiva: Superfície avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada de superfície real de uma peça. É a superfície apresentada e analisada pelo aparelho de medição.

Perfil geométrico: Interseção da superfície geométrica com um plano perpendicular. Por exemplo: uma superfície plana perfeita, cortada por um plano perpendicular, originará um perfil geométrico que será uma linha reta.

Perfil real: Interseção da superfície real com um plano perpendicular. Neste caso, o plano perpendicular (imaginário) cortará a superfície que resultou do método de usinagem que originará uma linha irregular.

Perfil efetivo: Imagem aproximada do perfil real, obtido por um meio de avaliação ou medição. Por exemplo: o perfil apresentado por um registro gráfico e sem qualquer filtragem.

Perfil de rugosidade: Obtido a partir do perfil efetivo, por um instrumento de avaliação, após filtragem. É o perfil apresentado por um registro gráfico, depois de uma filtragem para eliminar a ondulação à qual se sobrepõe geralmente a rugosidade.

ANEXO 2

Parâmetros de altura (z): “é um termo geral usado para descrever a medição do perfil, tomado na direção normal do perfil efetivo”. Os parâmetros de altura são expressados em micrômetros (μm). Entre eles podem ser encontrados a rugosidade média (R_a), a raiz média quadrática da rugosidade (R_q), a altura do pico mais alto do perfil (R_p), a altura do vale mais profundo do perfil (R_v), entre outros.

- *Rugosidade média (R_a):* É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição (l_m).

- *Rugosidade média quadrática (R_q):* Descreve a altura estatística, o r.m.s. (ou variância) da topografia superficial, em relação a um plano médio. O valor r.m.s dá um peso a picos e vales extremos. Este parâmetro, em determinações instrumentadas, apresenta maior simplicidade porque os efeitos de fase nos filtros elétricos são comparativamente pouco importantes e podem ser negligenciados, ao passo que seu efeito sobre a média aritmética é

maior e não pode ser negligenciado. Em trabalhos estatísticos, r.m.s. tem maior significado.

- ❑ *Rugosidade máxima (Ry)*: Está definido como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m). Por exemplo: na figura a seguir, o maior valor parcial é o Z_3 , que está localizado no 3º cut off, e que corresponde à rugosidade R_t .

- ❑ *Rugosidade total (Rt)*: Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto (R_p) e o vale mais profundo (R_v) no comprimento de avaliação (l_m), independentemente dos valores de rugosidade parcial (Z_i). Na figura abaixo, pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo Z_1 , e que o vale mais fundo encontra-se no retângulo Z_3 . Ambos configuram a profundidade total da rugosidade R_t . O parâmetro R_t tem o mesmo emprego do R_y , mas com maior rigidez, pois considera o comprimento de amostra igual ao comprimento de avaliação.

- *Altura de dez-pontos (Rz)*: Este parâmetro é calculado para revelar os valores de altura extrema da superfície. É determinado pela seguinte fórmula:

$$y_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 |\eta_{si}| + \sum_{i=1}^5 |\eta_{vi}| \right)$$

na qual, n_{si} e n_{vi} ($i=1,2,\dots,5$) são os cinco picos mais altos e vales mais fundos, respectivamente. Como um único pico máximo e um único vale mais fundo não têm nenhum significado funcional em termos de desgaste superficial e de muitas outras aplicações funcionais, uma média dos cinco ápices maiores e cinco vales mais fundos é usada para descrever as propriedades extremas da topografia superficial.

Parâmetros de espaçamento: São usados para se referir à distancia que caracteriza os espaçamentos laterais entre as asperezas do perfil, e dentro dessa classificação encontrasse o espaçamento médio das irregularidades do perfil (S_m).

Parâmetros de forma e funções: dentro desta categoria encontrasse a função densidade de amplitude ($ADF(z)$ ou $p(z)$). A função densidade de amplitude é normalmente calculada como um histograma dos pontos digitalizados no perfil. Também outros parâmetros como o Skewness (R_{sk}) que avalia a assimetria do perfil com relação à linha média; e a Kurtosis (R_{ku}) que é uma medição da agudeza do perfil com relação à linha media.

Parâmetros híbridos: Como o seu nome o indica, este tipo de parâmetros são obtidos usualmente mediante a combinação dos parâmetros de espaçamento e amplitude.