

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
MECÂNICA**

FERNANDO DE SOUZA PEREIRA

**TORNEAMENTO EM ALTA VELOCIDADE DO FERRO
FUNDIDO CINZENTO FC 250 COM FERRAMENTA DE
NITRETO DE SILÍCIO**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação da Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Lourival Boehs

Coorientador: Prof. Dr. Wilson Luiz Guesser

Florianópolis
2012

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Pereira, Fernando de Souza
Torneamento em alta velocidade do ferro fundido
cinzento FC 250 com ferramenta de nitreto de silício
[dissertação] / Fernando de Souza Pereira ; orientador,
Lourival Boehs ; co-orientador, Wilson Luiz Guesser. -
Florianópolis, SC, 2012.
147 p. ; 21cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica.

Inclui referências

1. Engenharia Mecânica. 2. Ferro fundido cinzento. 3.
Textura e integridade. 4. Ferramenta de nitreto de silício.
5. Usinagem em alta velocidade. I. Boehs, Lourival. II.
Guesser, Wilson Luiz. III. Universidade Federal de Santa
Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
IV. Título.

Fernando de Souza Pereira

**TORNEAMENTO EM ALTA VELOCIDADE DO FERRO
FUNDIDO CINZENTO FC 250 COM FERRAMENTA DE
NITRETO DE SILÍCIO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica e aprovada, em sua forma final, pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

Prof. Júlio Cesar Passos, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Lourival Boehs, Dr. Eng.
Orientador

Prof. Wilson Luiz Guessser, Dr. Eng.
Coorientador

Prof. João Carlos Espíndola Ferreira, Ph.D.

Prof. Antonio Pedro Novaes de Oliveira, Dr. Ing.

Prof. Rolf Bertrand Schroeter, Dr. Eng.

Dedico este trabalho a todos os que colaboraram com a minha formação acadêmica, desde o meu primeiro professor, *meu pai*.

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Lourival Boehs, que, em meio às suas inúmeras atribuições na UFSC, dedicou-se à orientação e revisão do texto apresentado nesta dissertação.

Ao Professor Wilson Luiz Guesser e à Empresa *Tupy Fundições*, pela oportunidade da realização deste trabalho.

À Adriana Ana Pereira, por sua colaboração na interpretação dos resultados e na correção de partes deste trabalho.

À Deise Rebelo Consoni do Laboratório Central de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal de Santa Catarina, pelas medições e imagens obtidas no microscópio eletrônico de varredura.

Ao aluno Anderson Schelbauer, pela ajuda na elaboração e revisão das figuras exibidas neste trabalho.

Finalmente, meu agradecimento à minha esposa Miriam Vieira de Córdova Pereira e ao meu filho Caio de Córdova Pereira, pela motivação e apoio a este trabalho.

RESUMO

O presente trabalho se propõe a pesquisar um determinado comportamento atípico observado na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250, qual seja: a diminuição do desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade de corte, quando submetido à usinagem em altas velocidades com ferramentas de nitreto de silício (Si_3N_4). Os experimentos, de usinagem por processo de torneamento externo longitudinal, de curta e longa duração, em corpos de prova produzidos em ferro fundido cinzento FC 250 em condições de fabricação comercial, foram realizados em um torno CNC com potência nominal de 75 kW, barramento inclinado e muito robusto. Os experimentos foram desenvolvidos com diferentes velocidades de corte situadas entre 400 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, com o objetivo de determinar o comportamento do desgaste da ferramenta para crescentes velocidades de corte. A análise dos resultados, especialmente no que tange ao desgaste das ferramentas, foi realizada com microscopia óptica e eletrônica, procurando, desta forma, caracterizar os tipos e mecanismos responsáveis pelo desgaste das ferramentas. A textura e integridade da superfície dos corpos de prova foram analisadas em função da rugosidade da superfície, microdureza e também a microestrutura da camada adjacente à superfície usinada. A análise dos resultados comprovou o comportamento atípico, ou seja, mostrou que o desgaste da ferramenta diminuiu no intervalo de 400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a 700 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ e no intervalo de 700 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ a 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ o desgaste é constante. No que se refere à rugosidade na superfície usinada, constatou-se uma diminuição desta para crescentes velocidades de corte. Quanto à integridade da superfície, não foram identificadas alterações significativas na camada adjacente à superfície usinada, isto em termos de deformações plásticas, alterações microestruturais e microdureza. Esses resultados, que serão detalhadamente discutidos ao longo do trabalho, são relevantes para aplicações industriais, pesquisas no campo dos materiais, ferramentas de usinagem e usinabilidade dos materiais das peças. Por fim, pode-se destacar que os objetivos traçados para a presente pesquisa foram alcançados com sucesso.

Palavras-chave: ferro fundido cinzento, textura e integridade, ferramenta de nitreto de silício, usinagem em alta velocidade.

ABSTRACT

This work proposes to investigate a particular atypical behavior observed in the machining of FC 250 gray cast iron, where the tool wear decreased with increasing cutting speed, when subjected to machining at high cutting speeds with tools based on Si_3N_4 . The short and long term experiments for machining external longitudinal turning process in specimens produced in FC 250 gray cast iron in commercial manufacturing conditions were performed on a very robust 75 kW CNC lathe, with inclined bed. The experiments were conducted with different cutting speeds, lying between 400 and 1400 m/min, in order to determine the behavior of the tool wear for increased cutting speeds. The analysis of the results, especially regarding the tool wear, was carried out with optical and electron microscopy, thereby attempting to characterize the types and mechanisms responsible for the tool wear. The texture and surface integrity analyses of the samples were performed in terms of surface roughness, hardness and analysis of the microstructure of the layer adjacent to the machined surface. The results demonstrated the atypical behavior, i.e., the tool wear reduced in the 400-700 m/min range, and in the 700-1400 m/min range the wear is constant. With respect to the machined surface roughness, it decreased with increasing cutting speeds. Regarding the integrity of the surface, significant changes in the layer adjacent to the machined surface were not identified, i.e. in terms of plastic deformation, microstructural changes and microhardness. These results, which will be discussed in detail throughout this text, are relevant for both industrial applications and for research on the field of tool materials for machining, and also for machinability of materials. Finally it can be stated that the objectives for this study were successfully achieved.

Keywords: gray cast iron, surface texture and integrity, silicon nitride cutting tool, high speed machining.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 - Faixas de velocidades de corte para diferentes materiais.	28
Figura 3.2 - Velocidades de corte convencional e HSC.....	29
Figura 3.3 - Temperatura de corte no fresamento para altas velocidades.	29
Figura 3.4 - Histórico dos ensaios de usinagem com altíssima velocidade.....	31
Figura 3.6 - Características do processo de usinagem em altas velocidades de corte (HSC).....	33
Figura 4.1 - Propriedades dos materiais das ferramentas de corte.	40
Figura 4.2 - Classificação dos materiais cerâmicos para ferramentas de usinagem.	42
Figura 4.3 - Desgaste no flanco da ferramenta	46
Figura 4.4 - Desgaste de cratera na face da ferramenta.	47
Figura 4.5 - Deformação plástica na região da quina da ferramenta.....	47
Figura 4.6 - Lascamento no flanco da ferramenta.....	48
Figura 4.7 - Trincas perpendiculares ao gume da ferramenta.	48
Figura 4.8 - Formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha.	49
Figura 4.9 - Principais fatores causadores de desgaste em ferramentas de corte. ...	52
Figura 5.1 - Representação dos tipos de defeitos que podem ocorrer numa superfície usinada.....	54
Figura 5.2 - Perfil geométrico, real e efetivo da superfície.....	55
Figura 5.3 - Como partículas de carboneto podem afetar a qualidade da superfície: (a) arrancamento de carboneto, (b) arrastamento de carboneto, (c) poros, (d) marcas de avanço distribuídas na superfície usinada do Inconel 718.....	58
Figura 6.1 - Microestrutura do ferro fundido cinzento FC250 formada por lamelas ou veios de grafita numa matriz perlítica, reagente nital 3%.....	64
Figura 6.2 - Exemplos típicos de peças em ferro fundido cinzento.	65
Figura 6.3 - Dependência da velocidade de corte v_c 60 e v_c 20 da microestrutura e da dureza do ferro fundido cinzento no torneamento.	68
Figura 6.4 - Desgastes de cratera e flanco das ferramentas de Si_3N_4 no torneamento dos ferros fundidos: FC 250, FC 250-CC e FCD 400, com velocidades de corte de 100 e 300 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f = 0,21 \text{ mm}$ e $a_p = 1 \text{ mm}$	69
Figura 6.5 - Influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta de Si_3N_4 no torneamento do ferro fundido FC 250 ($f = 0,21 \text{ mm}$; $a_p = 1 \text{ mm}$; $t = 10 \text{ min}$).	70
Figura 6.6 - (a) Desgaste da ferramenta de CBN X Volume de material removido (b) Desgaste da ferramenta de corte CBN4. CBN4 (ligante: TiC; 60-70%CBN); CBN6 (ligante: Co; 90%CBN).	71
Figura 6.7 - Influência do elemento alumínio no desgaste de flanco (V_B) da ferramenta de corte. (CBN; Fresamento; $a_p = 0,15 \text{ mm}$ e $f = 0,2\text{mm/dente}$).	72

Figura 6.8 - (a) Comprimentos de corte para diferentes velocidades (b) Formação da “camada protetora” no torneamento longitudinal do ferro fundido cinzento com ferramenta de PCBN ($a_p = 0,15$ mm e $f = 0,3$ mm).	73
Figura 6.9 - Desgaste de flanco em função da velocidade de corte. ($a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm, ferramenta de cerâmica de nitreto de silício Si_3N_4 , comprimento usinado de 1600 mm).	75
Figura 6.10 - Mapeamento dos elementos químicos (Fe, O, S, Mn e Si) por EDS nas superfícies da ferramenta empregada na usinagem do FC 250 a 300 m.min ⁻¹	76
Figura 6.11 - Mapeamento dos elementos químicos (Si, S, Mn, Fe, O, Al e C) por EDS nas superfícies da ferramenta empregada na usinagem do FC 250 a 700 m.min ⁻¹	77
Figura 6.12 - (a) o círculo indica a região selecionada para análise no TEM, (b) amostra de TEM, obtida da região indicada em (a), formada pela <i>trybolayer</i> aderida ao chanfro da ferramenta, empregada a 300 m.min ⁻¹	77
Figura 6.13 - O círculo indica a região selecionada no gume da pastilha empregada na usinagem a 700 m.min ⁻¹ , para a remoção da amostra a ser analisada no TEM.	78
Figura 7.1 - Torno CNC modelo Heynumat 10U do fabricante HEYLIGENSTAEDT utilizado nos experimentos de torneamento.	84
Figura 7.2 - A imagem obtida por microscopia óptica mostra a microestrutura do ferro fundido cinzento FC 250 formada por lamelas ou veios de grafita numa matriz perlítica e partículas de MnS, reagente nital.	87
Figura 7.3 - Histograma da distribuição do comprimento dos veios de grafita.	88
Figura 7.4 - Inclusão de sulfeto de manganês (MnS) tipos I e III presentes na matriz do ferro fundido cinzento FC 250, (a) amostra metalográfica sem ataque e (b) amostra metalográfica atacada com nital 3%. Os círculos pontilhados e vermelhos da figura indicam as inclusões de MnS.	88
Figura 7.5 - Forma e dimensões do corpo de prova de FC 250 resultante do processo de fundição.	89
Figura 7.6 - Forma e dimensões nominais do eixo fabricado para a fixação dos corpos de prova.	90
Figura 7.7 - Forma e dimensões nominais dos corpos de prova preparados para a usinagem.	90
Figura 7.8 - Fotografia do conjunto: corpo de prova, eixo de fixação, porca e contra porca.	91
Figura 7.9 - Fotografia do porta-ferramenta DSSNR 2525 M12-2 e ferramenta (pastilha) SNGA 12 04 08 T02520 utilizadas nos experimentos de usinagem.	92
Figura 7.10 - Fotografia do microscópio óptico de ferramentaria modelo measurescope do fabricante Nikon utilizado na medição do desgaste de flanco.	93

Figura 7.11 - Fotografias do MEV – Labmat modelo XL-30 do fabricante Philips e MEV – LCME modelo JSM 6390 LV do fabricante Jeol, respectivamente.....	95
Figura 7.12 - Fotografia do rugosímetro portátil modelo SJ 201P do fabricante Mitutoyo.....	96
Figura 7.13 - Medição da rugosidade ao longo da superfície do corpo de prova....	97
Figura 7.14 - Fotografia do microdurômetro modelo 100 AT do fabricante Leco dotado de um indentador de diamante com formato de pirâmide quadrada com 136° entre faces.	98
Figura 7.15 - Esquema representativo da obtenção da amostra para a avaliação da microestrutura dos corpos de prova utilizados nos experimentos de usinagem.	99
Figura 7.16 - Micrografia óptica da indentação produzida na superfície da amostra do corpo de prova para a medição de microdureza, ataque nital 3%.....	100
Figura 8.1 - Desgaste de flanco em função da velocidade de corte ($a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm, ferramentas de nitreto de silício, comprimento usinado de 1600 mm) para os ensaios 1 e 2.....	102
Figura 8.2 - Micrografias (MEV) do desgaste no flanco (V_B) das ferramentas utilizadas nas velocidades de corte de 700 a 1400 m.min ⁻¹ , mostrando a região correspondente ao chanfro, região do desgaste (medida do desgaste de flanco) e flanco da ferramenta utilizada nos experimentos (ensaio 1), aumento de 160x.....	103
Figura 8.3 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 700 m.min ⁻¹ , com aumento de 35x e 150x, respectivamente.....	105
Figura 8.4 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de curta duração à $v_c = 700$ m.min ⁻¹	106
Figura 8.5 - Espectro da composição química obtida na superfície da ferramenta utilizada na $v_c = 700$ m.min ⁻¹ , com destaque para os elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O).....	107
Figura 8.6 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 1200 m.min ⁻¹ , com aumento de 35x e 150x, respectivamente.....	107
Figura 8.7 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de curta duração à $v_c = 1200$ m.min ⁻¹	108
Figura 8.8 - Espectro da composição química obtida na superfície da ferramenta utilizada na $v_c = 1200$ m.min ⁻¹ , com destaque para os elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O).....	109

Figura 8.9 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 1400 m.min^{-1} , com aumento de 35x e 150x, respectivamente.	109
Figura 8.10 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício(Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de curta duração à $v_c = 1400 \text{ m.min}^{-1}$	110
Figura 8.11 - Espectro da composição química obtida na superfície da ferramenta utilizada na $v_c = 1400 \text{ m.min}^{-1}$, com destaque para os elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O).	110
Figura 8.12 - Curvas do desgaste de flanco em função do comprimento usinado, ($a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,2 \text{ mm}$, ferramentas de nitreto de silício).	112
Figura 8.13 - Valores de taxa de remoção de material da peça e desgaste de flanco em função da velocidade referente ao experimento de longa duração.....	113
Figura 8.14 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 400 m.min^{-1} , com aumento de 35x e 150x, respectivamente (ensaio de longa duração).....	114
Figura 8.15 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de longa duração à $v_c = 400 \text{ m.min}^{-1}$	114
Figura 8.16 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 1200 m.min^{-1} , com aumento de 35x e 150x, respectivamente (ensaio de longa duração).....	115
Figura 8.17 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de longa duração à $v_c = 1200 \text{ m.min}^{-1}$	116
Figura 8.18 - Valores de rugosidade, parâmetro R_a em função da velocidade de corte.	118
Figura 8.19 - Valores de rugosidade, parâmetro R_y em função da velocidade de corte.	118
Figura 8.20 - Valores de rugosidade, parâmetro R_z em função da velocidade de corte.	119
Figura 8.21 - Micrografia (MEV) da topografia da superfície do corpo de prova usinado à $v_c = 400 \text{ m.min}^{-1}$, mostrando: em (a) com ampliação de 50x detrito, marcas de avanço, em (b) com ampliação de 250x sobreposição de material e em (c) com ampliação de 1000x a presença de poros (<i>Open grain</i>) e marcas de avanço.	120
Figura 8.22 - Micrografia (MEV) da topografia da superfície do corpo de prova usinado à $v_c = 700 \text{ m.min}^{-1}$, mostrando em: (a) com ampliação de	

	50x marcas de avanço, (b) com ampliação de 250x sobreposição de material, marcas de arrancamento de carbonetos e (c) com ampliação de 1000x a presença de poros (<i>Open grain</i>), sobreposição de material e defeitos de fundição.	121
Figura 8.23	- Micrografia (MEV) da topografia da superfície do corpo de prova usinada à $v_c = 1200 \text{ m.min}^{-1}$, mostrando em: (a) com ampliação de 50x poro (<i>open grain</i>), detritos, (b) com ampliação de 250x sobreposição de material, poro (<i>open grain</i>) e (c) com ampliação de 1000x a presença de marcas de avanço e sobreposição de material.	122
Figura 8.24	- Micrografia (MEV) da topografia da superfície do corpo de prova usinada à $v_c = 1400 \text{ m.min}^{-1}$ mostrando em: (a) com ampliação de 50x detritos, (b) com ampliação de 250x poro (<i>open grain</i>) e (c) com ampliação de 1000x a presença de marcas de avanço e sobreposição de material.	123
Figura 8.25	- Micrografia (MEV) da seção longitudinal do corpo de prova mostrando a integridade da camada abaixo da superfície usinada a 400 m.min^{-1} . Em (a) com ampliação de 1000x observa-se a interface do baqueliti (material que envolve a amostra) com a superfície usinada além de grafita na forma de veios, ataque nital 3%; em (b) temos a imagem da matriz perlítica, ampliação 3000x.	126
Figura 8.26	- Micrografia (MEV) da seção longitudinal do corpo de prova mostrando a integridade da camada abaixo da superfície usinada a 700 m.min^{-1} . Em (a) com ampliação de 1000x observa-se a interface do baqueliti (material que envolve a amostra) com a superfície usinada, grafita na forma de veios e detritos; em (b) temos a imagem da matriz perlítica do material, ampliação 3000x..	127
Figura 8.27	- Micrografia (MEV) da seção longitudinal do corpo de prova mostrando a integridade da camada abaixo da superfície usinada a 1200 m.min^{-1} . Em (a) com ampliação de 1000x observa-se a interface do baqueliti (material que envolve a amostra) com a superfície usinada, grafita na forma de veios e partículas de MnS; em (b) temos a imagem da matriz perlítica do material, grafita e partícula de MnS, ampliação 3000x.	128
Figura 8.28	- Micrografia (MEV) da seção longitudinal do corpo de prova mostrando a integridade da camada abaixo da superfície usinada a 1200 m.min^{-1} . Em (a) com ampliação de 1000x observa-se a interface do baqueliti (material que envolve a amostra) com a superfície usinada, grafita na forma de veios, detritos e partículas de MnS; em (b) temos a imagem da matriz perlítica do material, ampliação 3000x.	129
Figura 8.29	- Resultados da microdureza em função da velocidade de corte e da profundidade em relação à superfície externa do corpo de prova. ...	131
Figura 8.30	- Microdureza Vickers do material a $50 \mu\text{m}$ da superfície externa em função das velocidades de corte.	132

LISTA DE TABELAS

Tabela 3-1 - Características, áreas e exemplos de aplicação da usinagem em alta velocidade de corte (HSM)	35
Tabela 5.1- Desvios de forma do perfil de uma superfície.	56
Tabela 7.1 - Composição química (% em peso) do ferro fundido FC 250.....	86
Tabela 7.2 - Área média e quantidade média de inclusões de MnS presentes na microestrutura do material FC 250.....	89

SIMBOLOGIA

a_p	[mm]	Profundidade de corte
CAD		Desenho assistido por computador
CAM		Fabricação assistida por computador
CBN		Nitreto boro cúbico
CNC		Comando numérico computadorizado
EDS		Espectroscopia de energia dispersiva
EELS		Espectroscopia por perda de energia de elétrons
EFTEM		Microscopia eletrônica de transmissão de energia filtrada
f	[mm]	Avanço
FIB		Feixe de íons focalizados
HRC		Dureza Rockwell
HRTEM		Microscópio eletrônico de transmissão de alta resolução
HSC		Alta velocidade de corte
HSM		Usinagem em alta velocidade
KT	[mm]	Profundidade de cratera
MEV		Microscópio eletrônico de varredura
PTW		O Instituto de Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramentas
R_a	[μm]	Rugosidade média aritmética
R_y	[μm]	Altura máxima do perfil
R_z	[μm]	Profundidade média de rugosidade
SAED		Difração de elétrons de área selecionada
STEM		Microscópio eletrônico de transmissão por varredura
TEM		Microscópio eletrônico de transmissão
V_B	[mm]	Largura média da marca de desgaste de flanco
V_c	[m.min ⁻¹]	Velocidade de Corte
V_f	[m.min ⁻¹]	Velocidade de avanço.

SUMÁRIO

RESUMO	
ABSTRACT	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE TABELAS	
SIMBOLOGIA	
1.INTRODUÇÃO	23
2.OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES	25
2.1.OBJETIVOS	25
2.1.1.Objetivo Geral	25
2.1.2.Objetivos Específicos	25
2.2.JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES	25
3.USINAGEM EM ALTA VELOCIDADE DE CORTE.....	27
3.1.Aplicações da HSM.....	35
3.2.Considerações finais sobre a usinagem em alta velocidade	36
4.MATERIAIS E DESGASTE DAS FERRAMENTAS PARA USINAGEM DE FERROS FUNDIDOS.....	39
4.1.Materiais cerâmicos de corte para ferramentas	41
4.2.Avarias, desgaste e mecanismos de desgaste das ferramentas de corte	45
4.2.1.Tipos de avarias e desgastes	46
4.2.2.Medição dos desgastes da ferramenta	49
4.2.3.Mecanismos de desgaste da ferramenta	50
5.ASPECTOS DA TEXTURA E DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA.....	53
5.1.Textura da superfície.....	54
5.2.Integridade da superfície.....	58
6.FERROS FUNDIDOS.....	63
6.1.Usinagem do ferro fundido cinzento	66
6.2.Formação de uma camada protetora de óxido	69
6.3.Formação de uma camada protetora de sulfeto de manganês	73
6.4.Formação de uma camada com alta concentração de alumínio.....	74
7.MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS	83

7.1.Máquina-ferramenta e experimentos de usinagem.....	84
7.2.Material dos corpos de prova para a usinagem	86
7.2.1.Composição química e propriedades mecânicas	86
7.2.2.Caracterização da microestrutura do material dos corpos de prova	87
7.2.3.Forma e dimensões dos corpos de prova.....	89
7.3.Ferramentas e porta-ferramenta.....	91
7.4.Microscopia óptica convencional para análise e medição do desgaste na ferramenta.....	92
7.5.Microscópio eletrônico de varredura (MEV)	94
7.6.Rugosímetro e medição da rugosidade	96
7.7.Microdurômetro	97
8.RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES	101
8.1.Experimentos de usinagem de curta duração do FC 250	101
8.2.Experimentos de usinagem de longa duração do FC 250	111
8.3.Avaliação da textura e da integridade da superfície usinada.....	117
8.3.1.Textura - rugosidade da superfície usinada.....	117
8.3.2.Avaliação da integridade da superfície usinada	124
8.3.2.1.Microdureza da subcamada da superfície usinada.....	130
9.CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	133
9.1.Conclusões	133
9.2.Sugestões para trabalhos futuros	134
REFERÊNCIAS.....	137
APÊNDICE A – Resultados da medição de rugosidade na superfície do corpo de prova (Cut-of = 0,8 mm)	145
APÊNDICE B – Resultados da medição de microdureza na camada abaixo da superfície usinada.	146
APÊNDICE C – Valores obtidos pela medição nas ferramentas do desgaste de flanco V_B.....	147

1. INTRODUÇÃO

O ferro fundido cinzento é um material amplamente utilizado na fabricação de componentes para a indústria, como: blocos de motores, cabeçotes, discos e tambores de freios, componentes e bases de máquinas-ferramenta, componentes hidráulicos, dentre muitos outros. É um material que proporciona facilidade de usinagem, mas devido à grande quantidade de peças e volume deste tipo de material que é usinado em nível mundial, tornar a sua usinagem cada vez mais fácil, rápida e econômica é um desafio permanente, tanto das empresas de fundição quanto dos fabricantes de ferramentas de corte e máquinas-ferramenta.

Sabe-se que a composição química e a microestrutura dos materiais exercem uma grande influência na usinabilidade. No entanto, cada material apresenta características específicas, e daí a razão da necessidade de pesquisas para estudar a ampla gama de combinações de composições e microestruturas que são utilizadas na indústria. No caso em questão, o foco do estudo será o torneamento em alta velocidade do citado ferro fundido com ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) a fim de verificar se o “comportamento atípico” se mantém em velocidades maiores que $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Segundo Abele, Sahm e Schulz (2002), uma característica atípica do ferro fundido cinzento durante a usinagem é o aumento na vida da ferramenta para crescentes velocidades de corte compreendidas entre $200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ e $800 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, utilizando ferramenta de CBN, sendo o sulfeto de manganês o responsável por este comportamento atípico. A obtenção de sulfeto de manganês no ferro fundido cinzento deve-se à adição proposital de manganês durante o seu processo de fusão, isto para evitar a combinação do enxofre com o ferro e, por consequência, a formação do sulfeto de ferro de baixo ponto de fusão.

Pereira (2010) estudou os fenômenos químicos – físicos - tribológicos, desenvolvidos na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramentas de corte de nitreto de silício (Si_3N_4), com o objetivo de entender os fatores responsáveis pelo aumento da vida da ferramenta (redução do desgaste) com o aumento da velocidade de corte.

Pereira (2010) sugere que a redução do desgaste da ferramenta de nitreto de silício na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 com o aumento da velocidade é resultado da formação de uma camada com alta concentração de alumínio fortemente aderida ao gume da ferramenta, da redução das componentes da força de usinagem e da transferência seletiva das inclusões de MnS presentes no material da peça para a superfície da ferramenta. Mas reforça que, embora a redução das componentes da força de usinagem contribua para a redução do desgaste da ferramenta, o fator determinante é a formação de uma camada fortemente aderida à superfície da ferramenta, composta principalmente por alumínio.

A pesquisa feita por Pereira (2010) representa uma importante contribuição para o avanço do conhecimento na área de fabricação por

processos de usinagem, tanto pelo aspecto dos resultados obtidos, quanto pela metodologia e combinações de técnicas que foram utilizadas. Mas devido à limitação de máquina utilizada em termos de valores de rotação disponível para os ensaios de usinagem, a referida pesquisadora não conseguiu utilizar velocidades superiores a 700 m.min^{-1} .

Diante dessa limitação de velocidade imposta pela máquina e com a aquisição por parte da UFSC de uma máquina com capacidade consideravelmente superior, surgiu a viabilidade de uma ampliação e aprofundamento da pesquisa realizada por Pereira (2010). Tal pesquisa tem o propósito de contribuir na solução de dúvidas que ainda persistem em relação à manutenção deste “comportamento atípico” reportado por Pereira (2010), Abele, Sahm e Schulz (2002), em altas velocidades de corte, superiores às reportadas na literatura até o presente momento. Em se confirmando tal comportamento atípico na usinagem do ferro fundido cinzento, isto em velocidades ainda maiores que aquelas praticadas por Pereira (2010), tem-se a possibilidade bastante concreta de trabalhar na redução dos custos de produção, no aumento da produtividade e, sob o ponto de vista ambiental, na diminuição do consumo de matéria-prima para a fabricação de ferramentas de usinagem.

Portanto, a presente pesquisa complementar utilizará velocidades de corte entre 400 e 1400 m.min^{-1} , com ferramentas de nitreto de silício, e corpos de prova da mesma corrida de fundição utilizados por Pereira (2010).

Nos capítulos subsequentes deste trabalho, serão apresentados: os objetivos, justificativas e contribuições; a fundamentação e referencial para a pesquisa; a metodologia, materiais e equipamentos; os resultados e a discussão correspondente; as conclusões e sugestões para trabalhos futuros; e, por último, as referências.

2. OBJETIVOS, JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

2.1. OBJETIVOS

2.1.1. Objetivo Geral

Pesquisar o “comportamento atípico”, qual seja: redução do desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 quando submetido ao torneamento em altas velocidades de corte com ferramentas de nitreto de silício (Si_3N_4).

2.1.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar os tipos e os mecanismos de desgaste que ocorrem nas ferramentas de cerâmica de nitreto de silício quando submetidas a altas velocidades de corte, na usinagem do ferro fundido cinzento;
- Buscar a identificação dos fatores responsáveis pela diminuição ou aumento do desgaste da ferramenta nas velocidades de corte entre 400 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$;
- Avaliar a textura da superfície dos corpos de prova submetidos à alta velocidade de corte, mediante análise de imagens da superfície e através da medição de parâmetros de rugosidade;
- Avaliar a integridade da superfície dos corpos de prova com base na medição de microdureza e avaliar a microestrutura abaixo da superfície.

2.2. JUSTIFICATIVAS E CONTRIBUIÇÕES

A Tupy – Fundições Ltda, localizada em Joinville-SC, desenvolve e manufatura componentes fundidos em ferro com elevado conteúdo tecnológico. Essa diversificação de tipos de produtos compõe a estrutura fundamental de sustentação, de segurança e de propulsão de veículos automotores, dentre outros.

Ao longo de mais de três décadas, isto é, desde 1976, o Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC mantém projetos de pesquisa cooperativos com a empresa Tupy, que tem proporcionado importantes contribuições no desenvolvimento e aprimoramento das

ligas de ferro fundido, desenvolvimento e otimização de processos de usinagem, gestão de ferramentas de usinagem e formação de profissionais com elevada qualificação (Mestres, Doutores e Engenheiros). Vários trabalhos a respeito da usinabilidade do ferro fundido cinzento foram realizados em cooperação com a Tupy e contribuíram para o desenvolvimento deste material tão importante para a indústria mecânica. Embora a usinagem de ferro fundido já tenha sido objeto de muitas pesquisas em nível mundial, ainda persiste uma série de questões importantes a serem resolvidas, especialmente no que concerne à influência dos microconstituintes desse material sobre os tipos e mecanismos de desgaste das ferramentas quando submetidas a elevadas velocidades de corte. Diante de tal panorama, a presente pesquisa almeja contribuir na solução de dúvidas que ainda se tem em relação à influência do percentual de enxofre e manganês no ferro fundido cinzento sobre os tipos e mecanismos de desgaste da ferramenta em processos de torneamento em altas velocidades. Pretende-se identificar em que faixa de velocidade acontece o comportamento atípico do desgaste das ferramentas de nitreto de silício, e deste modo, comprovar o comportamento reportado por Abele, Sahm e Schulz (2002), e mais recentemente por Pereira (2010). Em se confirmando tal comportamento atípico na usinagem do ferro fundido cinzento a elevadas velocidades de corte, existirá a possibilidade de reduzir o custo de produção, aumentar a produtividade e, sob o ponto de vista ambiental, diminuir o consumo de matéria-prima para a fabricação de ferramentas. Portanto, trata-se de um conjunto de fatores de grande expressão no contexto da engenharia de manufatura e na manufatura sustentável.

No capítulo a seguir, será abordada a questão usinagem em altas velocidades de corte, tendo como propósito situar o leitor neste contexto, bem como fundamentar a presente pesquisa.

3. USINAGEM EM ALTA VELOCIDADE DE CORTE

O conceito de “alta velocidade de corte” é relativo, pois depende de quais materiais, peças-ferramentas e processos de usinagem estão em pauta. Isto significa dizer que não há valores e limites claramente estabelecidos, e sim relações que dependem da tecnologia vigente em cada período de tempo.

As iniciativas para usinar em altas velocidades de corte já vêm de longa data e o próprio Taylor, “pai da usinagem científica”, sempre deve ser citado neste contexto, uma vez que coube a ele a primeira grande iniciativa com o aço rápido para ferramentas de usinagem.

Portanto, ao longo de mais de uma centena de anos, surgiram muitas contribuições para poder realizar a usinagem em velocidades cada vez maiores. Tais contribuições estão, principalmente, no campo dos materiais para as ferramentas e no campo das máquinas-ferramentas, assuntos que este autor pretende abordar a seguir mais detalhadamente.

A usinagem em alta velocidade de corte ou HSM (*High Speed Machining*) ou HSC (*High Speed Cutting*) é reconhecida como uma importante tecnologia de usinagem em desenvolvimento e implantação. Tem como principal vantagem a possibilidade de executar usinagem com velocidades de corte cinco a dez vezes maiores do que as normalmente utilizadas e com avanço e profundidade de corte menores do que os adotados na usinagem convencional. Embora possa ser utilizada em operações de desbaste, a sua aplicação é sobretudo indicada para semiacabamento e acabamento (OLIVEIRA, 2003).

Segundo Oliveira (2003), a velocidade que caracteriza a usinagem em altas velocidades ainda é discutida entre os pesquisadores porque depende diretamente do material a ser usinado e existem diferenças muito grandes nos valores, especialmente quando se trata da usinagem dos materiais pertencentes ao grupo de aços temperados e ligas termorresistentes.

Para Brandão e Coelho (2011), deve-se considerar que a usinagem a altas velocidades pode variar substancialmente de duas formas:

- A primeira variação depende do material a ser usinado, como no caso do fresamento ou torneamento de ligas de titânio, nos quais as velocidades de corte entre 100 e 500 m.min⁻¹ são consideradas altas. Por outro lado, para ligas de alumínio, essa

faixa de velocidade é considerada convencional, pois para este material a velocidade de corte pode atingir $10.000 \text{ m.min}^{-1}$.

- A segunda consideração a ser feita está direcionada ao processo de retificação, em que a faixa de velocidade de corte convencional varia de 1.200 a 3.600 m.min^{-1} . A alta velocidade, essa faixa aumenta significativamente e pode oscilar entre 12.000 e $36.000 \text{ m.min}^{-1}$.

Dessa forma, ainda existe a necessidade de uma definição precisa do marco divisório entre a velocidade convencional e altas velocidades de corte, já que para cada processo de usinagem há lacunas a serem preenchidas para adequações dentro de normalizações ou definições mais precisas (BRANDÃO; COELHO, 2011).

Embora o conceito de alta velocidade seja bastante relativo, segundo alguns pesquisadores, na Figura 3.1, são apresentadas as faixas de valores relativos a velocidades de corte convencional e alta velocidade em função do material a ser usinado.

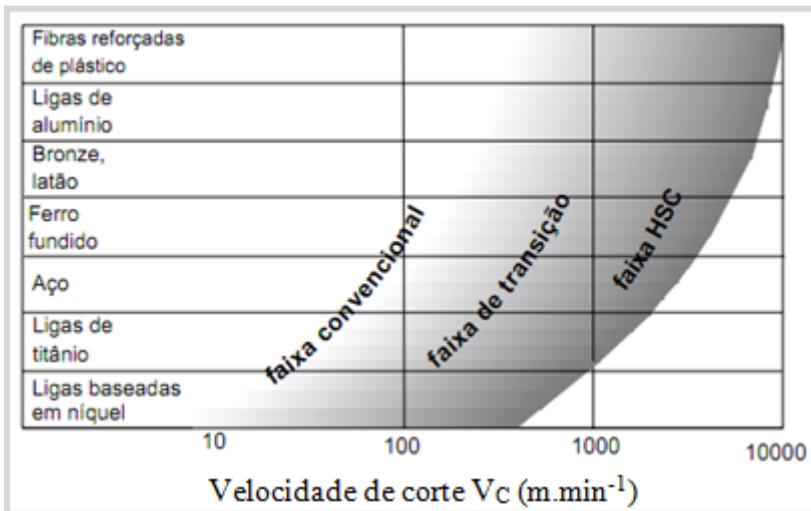


Figura 3.1 - Faixas de velocidades de corte para diferentes materiais.

Fonte: (SCHULZ,1996)

De acordo com Müller e Soto (1999), a faixa de velocidade de corte também está relacionada a cada aplicação específica, conforme mostra a Figura 3.2.

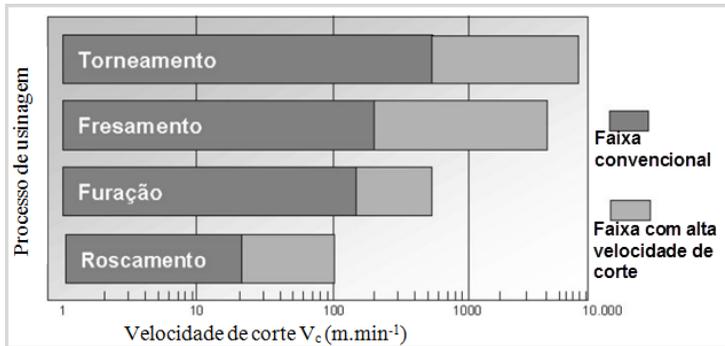


Figura 3.2 - Velocidades de corte convencional e HSC

Fonte: (MÜLLER; SOTO, 1999).

Há fontes que afirmam que pesquisas utilizando altas velocidades de corte na usinagem de metais tiveram início com Carl J. Salomon na Alemanha. Segundo Schützer e Schulz (2003), em 1931, os métodos desenvolvidos por Salomon foram patenteados pela empresa Friedrich Krupp AG. A Patente Alemã n.º 523594 foi baseada em uma série de curvas de velocidades de corte em função da temperatura. O resultado mais importante obtido na ocasião foi o fato de que, acima de uma determinada velocidade de corte, as temperaturas de corte começam a diminuir, como pode ser observado na Figura 3.3.

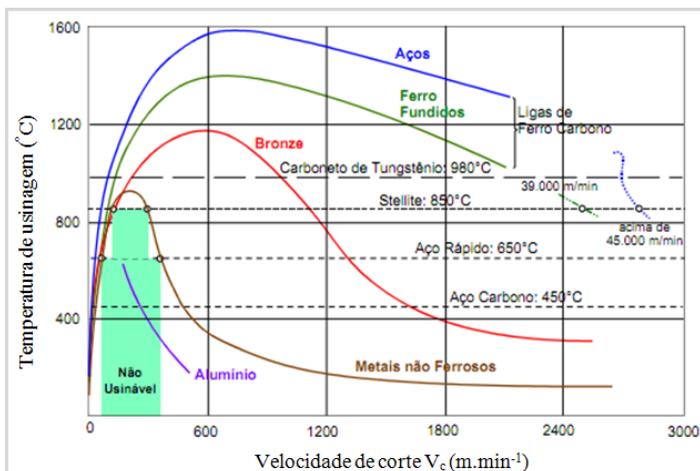


Figura 3.3 - Temperatura de corte no fresamento para altas velocidades.

Fonte: (SCHÜTZER;SCHULZ, 2003).

Para realizar seus experimentos, Salomon utilizou serras circulares de grande diâmetro porque na época não existiam equipamentos com rotação elevada que permitissem atingir as velocidades de corte necessárias. As velocidades utilizadas foram de 440 m.min⁻¹ para aço; 1.600 m.min⁻¹ para bronze; 2.840 m.min⁻¹ para cobre; e acima de 16.500 m.min⁻¹ para alumínio (SCHÜTZER;SCHULZ, 2003).

Na década de 50, as pesquisas iniciadas por Salomon foram retomadas mundialmente, visando ao uso de tecnologia de usinagem com altíssimas velocidades. Como naquela época ainda não existiam máquinas-ferramenta capazes de trabalhar com altas velocidades de corte, a opção foi pela realização dos ensaios por meios balísticos.

Segundo Schützer e Schulz (2003), os ensaios balísticos foram realizados de duas maneiras: a ferramenta era fixada em um foguete que se deslocava sobre um trilho e no percurso se submetia a ferramenta contra a peça a ser usinada que permanecia estacionária; ou utilizando-se de um projétil conformado como a peça a ser usinada, o qual era disparado de encontro à ferramenta que permanecia estacionária. A partir desses experimentos, foi constatado que:

- Em altas velocidades de corte, as condições e a formação do cavaco são diferentes das do processo convencional de usinagem;
- Foi estabelecida a formulação para o cálculo da pressão específica de corte e para as forças de corte dinâmicas (KRONENBERG, 1961 *apud* SCHÜTZER;SCHULZ, 2003);
- Pela primeira vez foi comprovado cientificamente que a força de corte cresce inicialmente com o aumento da velocidade de corte e a partir de um determinado ponto diminui significativamente com o aumento da velocidade para depois voltar a crescer novamente, e com o aumento da velocidade o cavaco, inicialmente contínuo, torna-se descontínuo (KRONENBERG, 1961 *apud* SCHÜTZER;SCHULZ, 2003);
- Utilizando um projétil como peça de ensaio, disparado contra uma ferramenta fixa, determinou-se que, para velocidades de corte extremamente elevadas, a faixa de comportamento plástico do material é ultrapassada e a formação do cavaco se processa por ruptura.

Durante um longo período a tecnologia balística foi utilizada para realizar experimentos de usinagem, como mostra a Figura 3.4.

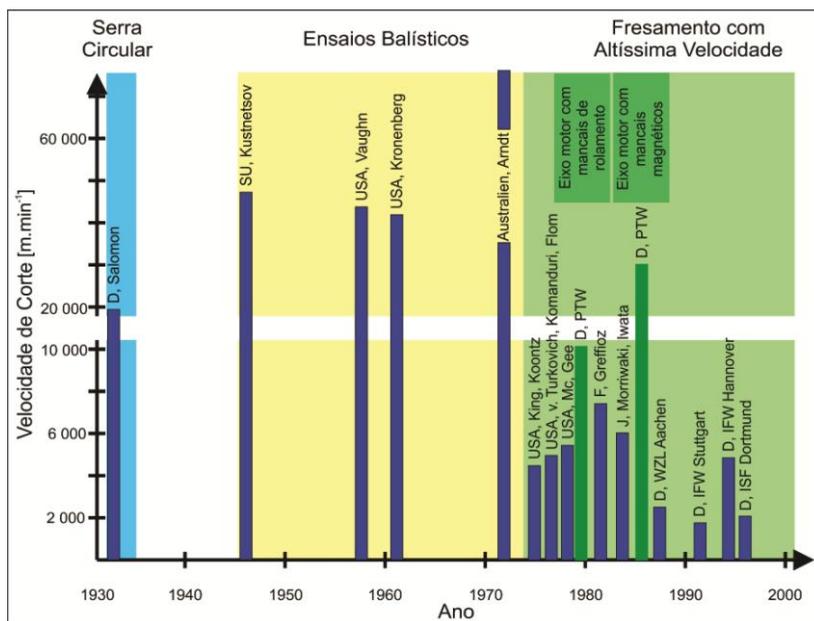


Figura 3.4 - Histórico dos ensaios de usinagem com altíssima velocidade.

Fonte: (SCHÜTZER;SCHULZ, 2003).

O Instituto de Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramentas (PTW), na Universidade Técnica de Darmstadt, Alemanha, foi o primeiro centro de pesquisa na Europa a iniciar, em 1979, um projeto de pesquisa compartilhado e focado no desenvolvimento de um eixo-árvore de alta velocidade com mancais magnéticos ativos, bem como testar em uma máquina-ferramenta.

Com o desenvolvimento desse eixo-árvore com mancais magnéticos ativos, o avanço decisivo na direção da aplicação das altíssimas velocidades de corte foi atingido com sucesso em 1980. Com isso foi confirmado o conhecimento fundamental obtido com os testes balísticos e novos conhecimentos foram adicionados, particularmente no que diz respeito ao desenvolvimento requerido para as ferramentas de corte e dos componentes da máquina-ferramenta (SCHÜTZER; SCHULZ, 2003).

Os fatores que contribuíram para o sucesso das pesquisas do PTW foram o desenvolvimento holístico do processo e das máquinas-ferramentas, no que tange à sua rápida aplicação industrial. Com a visão holística do processo, foi mantida próxima às ligações entre o processo tecnológico, o desenvolvimento das máquinas-ferramentas e de seus componentes, desenvolvimento dos materiais de corte e ferramentas, assim como a elaboração de novas estratégias de corte e da relação com sistemas CAD/CAM (Figura 3.5).

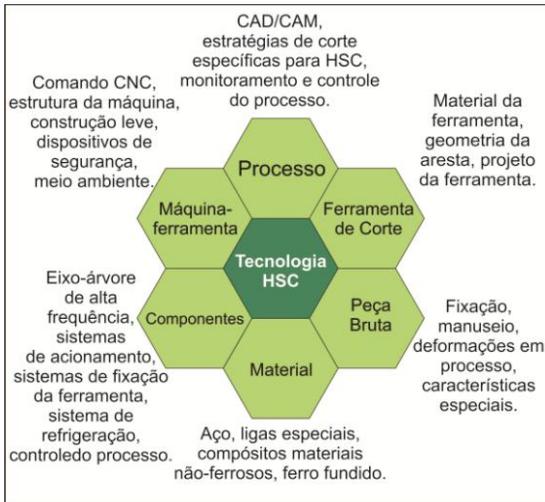


Figura 3.5 - Consideração holística da usinagem com altas velocidades.

Fonte: (SCHÜTZER;SCHULZ, 2003).

A Figura 3.5 apresenta a correlação entre as tecnologias que devem ser consideradas para a usinagem de maneira eficiente utilizando HSC, sendo que as principais envolvidas são descritas a seguir:

- **Máquina-ferramenta:** o conceito estrutural e o material utilizado na construção da base da máquina devem ser cuidadosamente estudados, com o objetivo de reduzir o peso dos componentes móveis visando atingir altas velocidades de avanço e taxas de acelerações com segurança, mantendo a precisão (CAPLA, 2006);
- **Ferramenta de corte:** a escolha do material da ferramenta de corte, revestimento e geometria da ferramenta para cada situação específica, a fim de que não ocorra de maneira prematura a redução na vida da ferramenta com o aumento da velocidade, e não torne o processo inviável. Deve-se escolher um sistema de fixação da

ferramenta adequado e com o balanceamento correto para evitar vibrações de todo o sistema (CAPLA, 2006);

- Comando CNC da máquina: deve possuir alta capacidade de processamento para trabalhar com altas velocidades de avanço e funções especiais que permita a análise de blocos subsequentes do programa NC, detectando alterações bruscas de trajetória de ferramenta e reduzindo a velocidade para não causar desvio de contorno (CAPLA, 2006);

Com a correlação entre as tecnologias envolvidas na usinagem HSC, foi possível a fabricação das primeiras máquinas-ferramentas qualificadas especificamente para aplicações em usinagem com altíssimas velocidades, a partir das interações do desenvolvimento conjunto do processo e da máquina-ferramenta.

A tecnologia de usinagem em alta velocidade, nas últimas décadas, sofreu um grande impulso em função dos avanços nos acionamentos, nas guias de elementos rolantes e na eletrônica de controle, em especial na capacidade de processar digitalmente e em alta velocidade o elevado volume de dados transferidos entre o sistema de medição e os acionamentos. Atualmente, sistemas de posicionamento linear de alta velocidade podem operar com avanços entre 10 e 300 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, sendo que a tecnologia para máquinas-ferramentas está limitada em torno de 60 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ (STOETERAU, 2004).

De um modo geral, a usinagem HSC se caracteriza por um aumento no volume de material removido, redução das forças de corte, melhor qualidade da superfície usinada e redução da vida útil da ferramenta de corte em decorrência do aumento da velocidade de corte, como pode ser observado esquematicamente na Figura 3.6 (SCHÜTZER; SCHULZ, 2003).

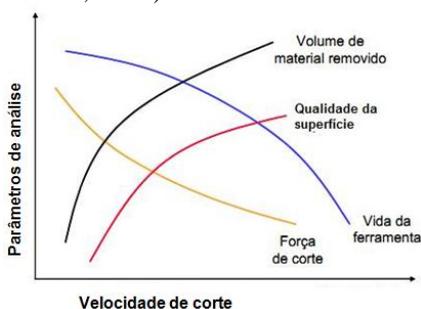


Figura 3.6 - Características do processo de usinagem em altas velocidades de corte (HSC)

Fonte: (SCHÜTZER; SCHULZ, 2003)

De acordo com Landi (2003), quando se fala em usinagem em altas velocidades, a maioria das pessoas tende a associar tal processo ao fresamento. A explicação é simples: o fresamento é de fato a operação em que a HSM/HSC ganhou maior destaque, mas não está restrito a essa operação. Altas velocidades de corte também são empregadas no torneamento de ferros fundidos, alumínio ou outros não ferrosos, superligas resistentes ao calor e em especial no torneamento de materiais endurecidos acima de 54 HRC. A HSM/HSC é utilizada sobretudo para a produção de componentes automotivos e componentes das indústrias de engenharia em geral e tem como vantagem principal a alta produtividade e, em algumas aplicações, o acabamento da superfície também aparece como fator extremamente positivo, como no caso do torneamento de materiais endurecidos.

A utilização do conceito de alta velocidade de corte tem exigido máquinas-ferramentas cada vez mais modernas para suportar exigências de rotação, avanço, controle dimensional e qualidade da superfície da peça. Esse avanço tecnológico vem requerendo novos materiais para ferramentas de corte, novas geometrias e revestimentos com elevada dureza e capacidade de lubrificação, capazes de resistirem aos esforços termomecânicos que o emprego de alta velocidade de corte exige. Além disso, as pressões econômicas sobre os sistemas de produção têm levado ao constante desenvolvimento de novas ferramentas e ao aperfeiçoamento destas para um aumento na produtividade, mediante a redução do tempo de usinagem nas linhas de produção (XAVIER; SCHRAMM, 2007).

Em altas velocidades, os ferros fundidos cinzentos e nodulares são torneados geralmente com ferramentas de cerâmica. As velocidades de corte recomendadas para os ferros fundidos cinzentos podem chegar até 800 m.min^{-1} para as cerâmicas, porém já existem casos de aplicação com velocidade de 1000 m.min^{-1} . Nos ferros fundidos nodulares, os valores de velocidades de corte são relativamente mais baixos, em função da usinabilidade desse material, que é inferior, se comparada à dos ferros fundidos cinzentos. Ferramentas de CBN também podem ser empregadas, em especial quando se buscam maior produtividade e maior vida útil do gume de corte com relação à cerâmica (LANDI, 2003).

Cabe salientar que, na presente pesquisa, os experimentos de usinagem em ferro fundido cinzento, com ferramentas de cerâmica, foram realizados numa ampla gama de valores de velocidades, situada no campo das altas velocidades, isto é, entre 700 e 1400 m.min^{-1} . A

metodologia, materiais e equipamentos, assim como os resultados, serão abordados nos capítulos 7 e 8.

3.1. Aplicações da HSM

As principais aplicações da usinagem com altas velocidades são: produção de moldes e matrizes; indústria aeroespacial; mecanismos óticos e de precisão; indústria automotiva e de eletrodomésticos, Tabela 3.1.

Tabela 3-1 - Características, áreas e exemplos de aplicação da usinagem em alta velocidade de corte (HSM)

Características	Áreas de Aplicação	Exemplos de Aplicação
Grande remoção de material	Ligas metálicas leves, aço e ferro fundido	Indústria aeroespacial, moldes e matrizes
Alta qualidade da superfície	Usinagem de precisão e peças especiais	Peças ópticas e mecânica fina compressores espirais
Baixas forças de corte	Peças de paredes finas	Indústria aeroespacial, indústria automotiva e equipamentos domésticos
Elevada frequência de excitação	Usinagem sem vibração de peças complexas	Peças de alta precisão na indústria óptica
Dissipação do calor através do cavaco	Usinagem sem empenamento	Peças de alta precisão
	Baixa temperatura de processo	Ligas de magnésio

Fonte: (SCHULZ, 1999)

Conforme Oliveira (2003), devido às características de precisão e qualidade das superfícies obtidas na HSM, aliadas à capacidade de usinar materiais temperados com dureza de até 63 HRC, essa tecnologia possibilita a eliminação de etapas do processo e/ou substituição de operações de retificação. Além disso, a HSM pode ainda melhorar as características mecânicas das superfícies usinadas se comparada à eletroerosão. Esta afirmação está baseada em testes realizados por indústrias automobilísticas da Europa, nos quais foi verificado que moldes e matrizes usinados pelo processo HSM têm uma vida maior do que os fabricados por eletroerosão.

3.2. Considerações finais sobre a usinagem em alta velocidade

Ao finalizar este capítulo, pode-se destacar as seguintes vantagens e desvantagens da usinagem em altas velocidades de corte:

- **Vantagens**

Segundo Schulz (1999), Novaski e Correa (1998), Kirschinik (1997) e Schulz e Wurz(1997), existem as seguintes vantagens:

- ✓ Aumento na qualidade da superfície diminuindo ou até eliminando trabalhos posteriores;
- ✓ Melhoria nos mecanismos de formação de cavaco;
- ✓ Melhoria da exatidão dimensional;
- ✓ Diminuição das forças de corte proporcional ao aumento das velocidades de corte;
- ✓ Melhoria na dissipação do calor do processo, pois a maior parte da energia térmica gerada se concentra no cavaco, proporcionando um menor aquecimento da peça;
- ✓ Altas taxas de remoção de material;
- ✓ Baixos tempos inativos.

- **Desvantagens**

Para Schulz (1999), Kirschinik (1997) e Schulz e Wurz(1997), as desvantagens que precisam ser consideradas são:

- ✓ Alto nível de desgaste da ferramenta de corte;
- ✓ Maior custo tanto para máquina-ferramenta quanto para a ferramenta de corte;
- ✓ Necessidade de alta precisão no balanceamento das ferramentas;

- ✓ Necessidade de árvore de alta velocidade, a qual é muito cara e possui baixa durabilidade, em torno de 5000 a 10000 horas na máxima velocidade de rotação;
- ✓ Necessidade de sistemas de controle especiais;
- ✓ Necessidade de otimização dos parâmetros tecnológicos, que ainda não são totalmente dominados.

É preciso enfatizar que tais desvantagens devem-se ao fato de que usinagem em alta velocidade é uma tecnologia ainda em desenvolvimento. Os estudos em andamento certamente permitirão novas evoluções desta tecnologia e muito provavelmente continuará o desenvolvimento nas décadas futuras.

Como foi possível constatar nas exposições feitas anteriormente, na usinagem com ferramentas de geometria definida, há dois fatores de grande relevância a considerar, quais sejam: os materiais aplicados na fabricação das ferramentas e o desgaste destas. Tais fatores têm um forte impacto sobre a qualidade da peça e sobre os custos de usinagem. Em decorrência desses fatos, o capítulo seguinte tratará mais detalhadamente dos aspectos, materiais e desgaste das ferramentas de usinagem.

4. MATERIAIS E DESGASTE DAS FERRAMENTAS PARA USINAGEM DE FERROS FUNDIDOS

A crescente necessidade de se reduzir os tempos principais de usinagem, através do incremento da velocidade de corte, do avanço e da profundidade de corte, tem levado não só à otimização dos materiais para ferramentas já existentes, mas também tem motivado a busca de novos materiais (BOEHS; BET, 1994).

Na usinagem de materiais ferrosos como o ferro fundido, as ferramentas devem ter:

- Alta resistência mecânica;
- Alta dureza à temperatura ambiente;
- Alta dureza a quente;
- Estabilidade química;
- Resistência à abrasão;
- Resistência de gume;
- Resistência à flexão e tenacidade.

Tais propriedades por muitas vezes não podem ser obtidas em um mesmo material da ferramenta, pois algumas são divergentes, por isto o balanço dessas propriedades nos materiais para ferramentas tem se tornado um grande desafio para os fabricantes. Dedicção em estudos e investimentos na pesquisa vem proporcionando bons resultados, visto que atualmente pode-se encontrar no mercado um grande número de ferramentas com invejáveis características simultâneas de tenacidade e dureza. A conciliação dessas propriedades tem sido conseguida com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, pequenos tamanhos de grãos e um controle maior sobre os processos de fabricação e tratamento térmico, o que lhes tem conferido uma excelente qualidade (MACHADO; SILVA, 2004).

Segundo Xavier (2003), na usinagem do ferro fundido cinzento, três tipos de materiais são largamente usados para fabricar ferramentas de corte. São eles: o metal-duro, a cerâmica e o CBN, havendo para esses materiais diferentes composições e, em razão disso, distintas características. Todos apresentam bons tempos de vida quando comparados com os outros tipos de materiais para ferramenta, mesmo utilizando maiores velocidades, avanços e profundidades de corte.

Na Figura 4.1 são mostradas as tendências dos materiais de ferramentas mais importantes quanto à dureza, resistência à flexão, vida da ferramenta e tenacidade (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

Em diversos tipos de materiais para ferramentas, a melhora de algumas características, como dureza e resistência ao desgaste, também são obtidas mediante a aplicação de revestimentos, resultando em melhor desempenho, vidas mais longas das ferramentas e maiores velocidades de corte.

Os revestimentos são depositados sobre o substrato da ferramenta, constituindo-se de uma ou múltiplas camadas. Os principais materiais empregados para revestimentos são nitreto de titânio (TiN), carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3), carbonitreto de titânio (TiCN), titânio-alumínio-nitreto (TiAlN), carbonitreto de zircônio (ZrCN), entre outros. (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

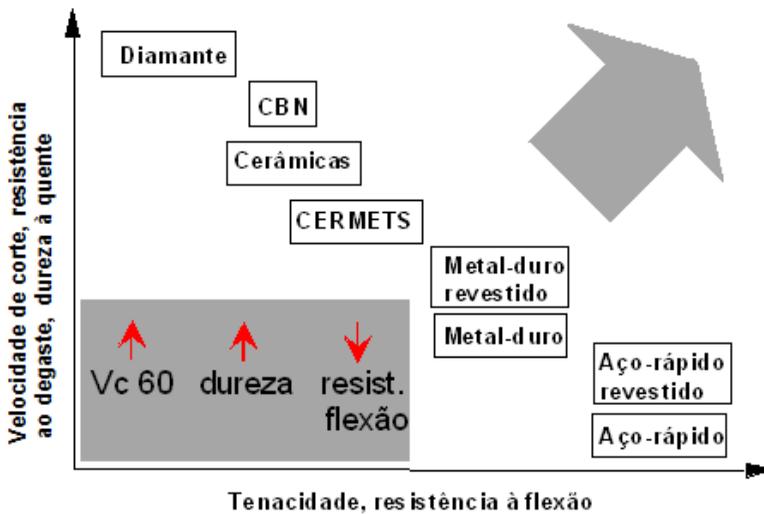


Figura 4.1 - Propriedades dos materiais das ferramentas de corte.

Fonte: (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

É sabido que atualmente existe um amplo leque de tipos ou grupos e subgrupos de materiais para ferramentas, cada qual com diferentes composições e propriedades, fato este que, associado à diversidade de tipos de revestimento, coloca os usuários diante de muitas dificuldades e incertezas por ocasião da escolha de um deles para a sua aplicação. Entretanto, tendo em vista que o objetivo deste trabalho é estudar o comportamento atípico, ou seja, a diminuição do desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade de corte por conta da

usinagem do ferro fundido cinzento FC 250, com a utilização de ferramentas à base de Si_3N_4 , serão descritas a seguir apenas as características e propriedades das cerâmicas que têm aplicações como materiais de corte na usinagem do citado ferro fundido.

4.1. Materiais cerâmicos de corte para ferramentas

“As cerâmicas são compostas de elementos metálicos e não metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos e nitretos, e existem em uma grande variedade de composição e forma. A maioria tem estrutura cristalina, mas, em contraste com os metais, as ligações entre os elementos são iônicas ou covalentes. A ausência de elétrons livres faz com que as cerâmicas sejam pobres condutoras de eletricidade, e que, em seções finas, sejam transparentes. Devido às fortes ligações primárias, a maioria das cerâmicas tem alto ponto de fusão” (MACHADO; SILVA, 2004).

As cerâmicas possuem as seguintes propriedades:

- Capacidade de suportar altas temperaturas (material refratário);
- Alta resistência ao desgaste;
- Alta dureza;
- Baixa condutividade térmica;
- Boa estabilidade química e térmica;
- Boa resistência à fluência;
- Alta resistência à compressão e baixa resistência à tração.

Uma pesquisa realizada no Instituto para Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas-ferramentas da Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha) sobre a utilização de ferramentas de corte de alta performance, não identificou uma preferência clara para a utilização de ferramentas de cerâmicas na usinagem de materiais metálicos. À exceção do óxido de alumínio sinterizado (Al_2O_3), não há grandes diferenças no percentual de uso do nitreto de silício (Si_3N_4) - 32%, nitreto de boro cúbico (CBN) - 29% e cerâmicas mistas - 25%.

No caso do emprego de cerâmica de corte, o quadro fica bem diferente. O material mais usinado por essas ferramentas é o ferro fundido cinzento (84%), seguido do aço temperado e dos ferros fundidos especiais. As cerâmicas também são aplicadas na usinagem do alumínio, metais não ferrosos e madeira (XAVIER; SCHRAMM, 2007).

Como mostra a Figura 4.2, as cerâmicas podem ser divididas em dois grandes grupos: cerâmicas à base de Al_2O_3 e cerâmicas à base de Si_3N_4 .

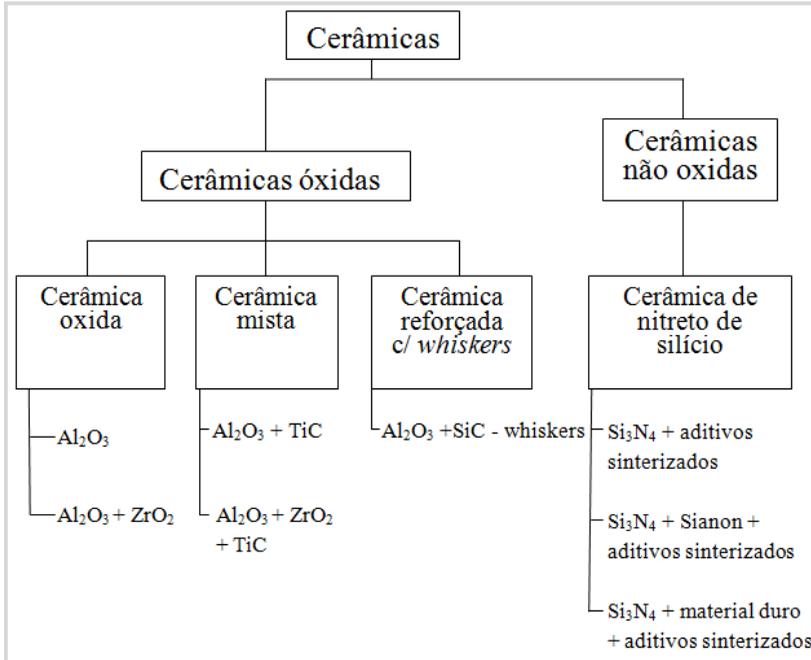


Figura 4.2 - Classificação dos materiais cerâmicos para ferramentas de usinagem.

Fonte: (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

a) Cerâmicas à base de óxido de alumínio (Al_2O_3 - alumina)

Os materiais cerâmicos à base de óxido de alumínio podem ser divididos em cerâmicas (brancas) quando prensadas a frio ou cinzas quando prensadas a quente, cerâmicas mistas e alumina reforçada com “whiskers”. As cerâmicas brancas são aquelas constituídas somente de óxidos. Podem ser a alumina, constituída basicamente de finos grãos de Al_2O_3 sinterizados, podendo ter também algum teor de MgO para inibir o crescimento de grão e óxido de cromo, titânio e níquel para aumentar a resistência mecânica, ou alumina com baixos percentuais de óxido de zircônio (ZrO_2), que aumenta a tenacidade do material. As cerâmicas

mistas contêm, além da alumina, carboneto de titânio (TiC) ou o nitreto de titânio (TiN). A alumina reforçada com *whiskers* é constituída por inclusões de monocristais de SiC, também conhecidos como “*whiskers*”, em uma matriz cerâmica (Al₂O₃) (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

b) Cerâmicas à base de nitreto de silício (Si₃N₄)

As cerâmicas à base de nitreto de silício são formadas por cristais de Si₃N₄ com uma fase intergranular de SiO₂ que são sinterizados na presença de alumina (sialon) e/ou óxido de ítrio (Y₂O₃) e magnésio (MgO).

Conforme Weingaertner e Schroeter (2002), nos últimos anos, as cerâmicas não óxidas, principalmente à base de Si₃N₄, alcançaram grande importância como materiais de corte para a usinagem com geometria definida. As cerâmicas de corte com Si₃N₄ apresentam uma maior tenacidade e uma melhor resistência a choques térmicos, isto quando comparadas às cerâmicas de corte óxidas. Além disso, possuem uma grande dureza a quente e resistência ao calor. Comparadas com as cerâmicas óxidas e mistas, possuem uma maior resistência à quebra em razão dos cristais Si₃N₄ hexagonais, ao invés dos grãos de Al₂O₃ em forma de agulhas.

Comparado ao óxido de alumínio, o nitreto de silício possui maior tenacidade e, conseqüentemente, maior resistência ao choque térmico. Experiências em chão-de-fábrica demonstraram que a substituição do Al₂O₃ por Si₃N₄ proporcionou uma drástica redução na frequência de quebra das pastilhas de corte (ABEL, 1992 *apud* XAVIER; SCHRAMM, 2007). Esse resultado trouxe um aumento significativo na vida das ferramentas.

As propriedades muito boas e positivas do Si₃N₄ fazem com que este material seja cada vez mais empregado na usinagem do ferro fundido, principalmente na manufatura de discos de freios, discos de embreagem e blocos de motores. Na indústria automobilística, as conclusões da pesquisa feita pelo PTW apontam que o Si₃N₄ é cada vez mais usado na usinagem de componentes dos motores, devido aos resultados econômicos obtidos (XAVIER; SCHRAMM, 2007).

Xavier (2009), através de experimentos de torneamento de longa duração utilizando ferramentas de nitreto de silício (Si₃N₄) na usinagem do ferro fundido cinzento e vermicular, e de experimentos de análise da interação química entre o material da ferramenta e do corpo de prova, encontrou como causa da grande diferença do comportamento

do desgaste da ferramenta de corte na usinagem dos referidos materiais os fenômenos térmicos, químicos e mecânicos que ocorrem na interface cavaco/ferramenta. Na usinagem do ferro fundido cinzento, constatou-se a formação de uma camada protetora de MnS sobre a ferramenta, camada esta que protege a ferramenta do contato direto com o cavaco, evitando a ocorrência de possíveis reações triboquímicas como as verificadas no ferro fundido vermicular. Por outro lado, na usinagem do ferro fundido vermicular, as ferramentas não apresentam a camada protetora. Com isto, a ferramenta fica exposta a elevadas temperaturas, reduzindo a sua dureza e tornando-se mais suscetível ao desgaste abrasivo e às reações químicas.

Apesar das reconhecidas melhorias, a aplicação da cerâmica de corte à base Si_3N_4 na usinagem de ferros fundidos nodular e vermicular e do aço ainda é reduzida. Tal fato ocorre porque, durante a usinagem a alta velocidade com ferramentas de corte de nitreto de silício (Si_3N_4) surgem problemas relacionados ao estado da estrutura e dos elementos de liga do material a ser usinado. É considerado bastante crítico o percentual de ferrita que, com as temperaturas mais elevadas do processo, reage espontaneamente em contato com o Si_3N_4 , o que leva à destruição do gume da ferramenta (ABEL, 1992; RICHTER, 2004 *apud* XAVIER; SCHRAMM, 2007).

A explicação para o bom desempenho da cerâmica à base de nitreto de silício na usinagem do ferro fundido cinzento foi reportada por: REUTER, 1992 ; COHEN, 2000 *apud* XAVIER; SCHAMM, 2007.

Reuter (1992) conseguiu mostrar que, na usinagem do ferro fundido cinzento CI 25 (0,086 %S) com velocidade de corte de 400 a 800 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, forma-se um depósito de sulfeto de manganês (MnS) na superfície de corte. Com o aumento da velocidade de corte, diminui o desgaste pela redução do coeficiente de atrito e da temperatura de corte. O mecanismo é fomentado pelo elemento de liga enxofre que, no ferro fundido cinzento, aparece na faixa de 0,08 a 0,12%. Em comparação ao ferro fundido vermicular, o percentual de enxofre é de 0,005 a 0,025%.

Resultados semelhantes aos reportados por Reuter (1992) e Cohen (2000) também foram obtidos por Pereira (2010) na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) e velocidades de corte entre 300 e 700 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Pereira aponta que a redução do desgaste da ferramenta à base de Si_3N_4 com o aumento da velocidade de corte é resultante da formação sobre a ferramenta de usinagem de uma camada fortemente aderida com alta concentração de alumínio, redução das forças de usinagem e da transferência seletiva

para a superfície da ferramenta de inclusões de MnS presentes no material da peça.

Cabe destacar que é dentro desta linha de investigação de Reuter e Pereira que se situa a presente pesquisa, porém, utilizando velocidades de corte ainda maiores do que aquelas praticadas pelos citados pesquisadores.

Outro aspecto importante a considerar na parte de ferramentas para usinagem dos materiais é o desgaste destas, assunto que será abordado a seguir.

4.2. Avarias, desgaste e mecanismos de desgaste das ferramentas de corte

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, sempre ocorrerá um processo de destruição da ferramenta, que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. O estudo e o entendimento desse processo de destruição das ferramentas de corte são fundamentais, pois permitem ações coerentes e efetivas para amenizar a taxa de destruição, prolongando a vida da ferramenta. Além disso, o conhecimento do processo de destruição das ferramentas fornecerá subsídios para que ocorra a evolução dos materiais das ferramentas, tornando-as mais resistentes aos fenômenos negativos que ocorrem durante o processo de usinagem (MACHADO; SILVA, 2004).

Os fenômenos que causam a destruição da ferramenta de corte na usinagem são descritos a seguir:

- a) **Avaria** é um processo de destruição que ocorre de maneira repentina e inesperada causando: quebra, lasca e trinca.
- b) **Desgaste** é a “mudança de sua forma original durante o corte, resultante da perda gradual de material” (Norma ISO 3685, 1977). No desgaste, a perda de material acontece de maneira contínua e progressiva, e em proporções pequenas, às vezes em nível atômico, às vezes em nível granular. Pode ocorrer segundo vários mecanismos e a deformação plástica pode fazer parte dos mesmos. Neste processo, a temperatura desenvolvida durante o corte tem um papel decisivo, e atinge ferramentas de corte de qualquer material (MACHADO; SILVA, 2004).

- c) **Deformação plástica** é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ela se dá por cisalhamento devido às altas tensões aplicadas nas superfícies das ferramentas de corte. É comum o tratamento da deformação plástica como desgaste, o que é aceitável, já que ambos promovem a mudança da geometria da ferramenta, podendo culminar em destruição total do gume de corte (TRENT; WRIGHT, 2000).

4.2.1. Tipos de avarias e desgastes

De acordo com Diniz, Marcondes e Coppini (2003), existem diversos tipos de avarias e desgastes que acontecem em uma ferramenta de usinagem. Dentre eles, os principais são:

- a) **Desgaste de flanco:** é o tipo de desgaste mais comum, incentivado pelo aumento da velocidade de corte. Ocorre no flanco da ferramenta causado pelo contato entre ferramenta e peça, conforme pode ser visto na Figura 4.3. Ocasionalmente deterioração do acabamento da superfície da peça, pode modificar totalmente a forma do gume de corte original e faz com que a peça saia de sua faixa de tolerância.



Figura 4.3 - Desgaste no flanco da ferramenta .

Fonte: (SANDVIK, 2010).

- b) **Desgaste de cratera:** é a concavidade que se forma na face (superfície de saída) da ferramenta, em virtude do atrito da

mesma com o cavaco. A cratera é caracterizada pela sua profundidade KT e pela distância KM do centro da cratera ao gume. O colapso da ferramenta pode dar-se pela cratera, pelo desgaste de flanco ou pelo efeito combinado. (Figura 4.4).



Figura 4.4 - Desgaste de cratera na face da ferramenta.

Fonte: (SANDVIK, 2010).

- c) **Deformação plástica do gume de corte:** acontece quando a pressão aplicada à quina da ferramenta, somada à alta temperatura, gera deformação plástica do gume de corte, que toma uma forma bem típica, conforme mostrado na Figura 4.5.



Figura 4.5 - Deformação plástica na região da quina da ferramenta.

Fonte: (SANDVIK, 2010).

- d) **Lascamento:** ocorre quando partículas maiores são retiradas de uma só vez. Acontece principalmente em ferramentas com material frágil e/ou quando o gume de corte é pouco resistente, Figura 4.6. O lascamento prejudica o acabamento da superfície da peça e, se continuar crescendo, provoca a quebra da ferramenta.



Figura 4.6 - Lascamento no flanco da ferramenta.
Fonte: (SANDVIK, 2010).

- e) **Trincas:** são causadas pela variação da temperatura e/ou pela variação dos esforços mecânicos. Quando as trincas têm origem térmica (variação da temperatura), elas ocorrem perpendicularmente ao gume de corte, e quando têm origem mecânica, são paralelas ao gume (Figura 4.7).

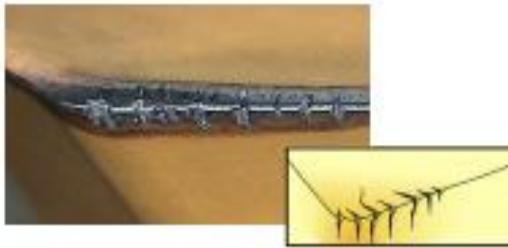


Figura 4.7 - Trincas perpendiculares ao gume da ferramenta.
Fonte: (SANDVIK, 2010).

- f) **Quebra:** todos os desgastes e avarias da ferramenta, ao crescerem, podem gerar a sua quebra. Algumas vezes, a quebra pode ocorrer inesperadamente, em consequência de: material da ferramenta muito duro e frágil, carga excessiva sobre a ferramenta, parada instantânea do movimento de corte, entupimento de canais de alojamento de cavacos, entre outros.

Portanto, há diferentes tipos de desgaste e avarias, cada qual com sua importância para a vida da ferramenta. Para determinar a vida da ferramenta, é frequente se utilizar valores de desgaste no flanco e ou

na face como critérios para determiná-la. Tendo em vista este fato, a seção seguinte mostrará aspectos importantes relacionados à medição dos referidos desgastes.

4.2.2. Medição dos desgastes da ferramenta

Segundo Weingaertner e Schroeter (2002), durante a usinagem, a ferramenta é submetida a desgaste que depende da forma da solicitação e tempo de utilização da ferramenta. A Figura 4.8 destaca as formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha da ferramenta.

Dependendo das solicitações de corte e do conjunto “material a ser usinado/material da ferramenta de corte”, o desgaste de flanco pode ter seu máximo na periferia da zona de contato da ferramenta com a superfície transitória da peça. Esse desgaste surge através de solicitações térmicas e mecânicas, do caráter abrasivo e do contato direto com a atmosfera. O desgaste da ferramenta é relativamente rápido devido às solicitações térmicas e mecânicas elevadas, principalmente quando as condições do processo de usinagem são muito severas (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

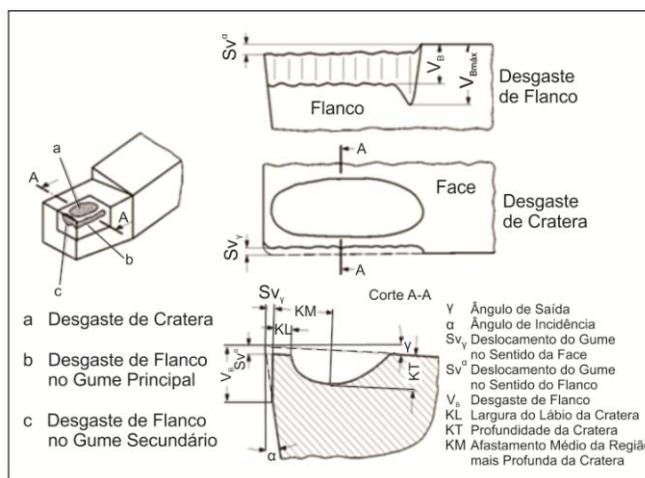


Figura 4.8 - Formas de desgaste e grandezas a serem medidas na cunha.

Fonte: (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

O desgaste é medido no plano ortogonal da ferramenta, na superfície de saída têm-se os desgastes (Figura 4.8): profundidade de cratera (KT), largura de cratera (KB) e distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco (V_B), que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco ($V_{Bmáx}$).

Ainda quanto ao desgaste das ferramentas, é importante entender quais são os mecanismos responsáveis por esse desgaste, como será descrito na seção seguinte.

4.2.3. Mecanismos de desgaste da ferramenta

O desgaste de ferramentas de corte pode envolver os seguintes mecanismos (VIEREGGE, 1970 *apud* MACHADO; SILVA, 2004):

- a) **Abrasão:** é uma das principais causas de desgaste da ferramenta. Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera podem ser gerados por abrasão. É proveniente do atrito entre a peça e a ferramenta, provocando arrancamento de partículas. É frequentemente causado pelas partículas duras do material da peça, sendo influenciado também pela temperatura, que reduz a dureza da ferramenta. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior será sua resistência ao desgaste por abrasão.
- b) **Adesão:** ocorre quando da ruptura de microcaldeamentos na superfície da ferramenta de corte, os quais surgem devido à temperatura e pressão na zona de corte. O que contribui para a adesão é o fato da superfície inferior do cavaco, recém-retirado, estar livre de camadas protetoras de óxido, apresentando-se, portanto, muito ativa quimicamente. As partículas microcaldeadas representam barreiras que dificultam o escoamento e o deslizamento do cavaco sobre a ferramenta. Este fato provoca arrancamento das partículas soldadas, levando consigo, muitas vezes, pequenas porções do material da ferramenta de corte, causando o fim de vida da ferramenta. A utilização adequada de fluido de corte, principalmente com efeito lubrificante, bem como o revestimento da ferramenta, tem grande influência na diminuição do desgaste causado por tal mecanismo.
- c) **Gume postiço:** é causado pelo caldeamento do material da peça sobre o gume da ferramenta, essa camada de cavaco já presa à ferramenta se deforma e se encrua, aumentando a sua

resistência mecânica e fazendo às vezes de gume de corte. O gume postiço de corte tende a crescer gradualmente, até que, em certo momento, rompe-se bruscamente, causando uma perturbação dinâmica. Partículas do gume postiço podem se desprender e deslizar entre o flanco e a superfície de corte. Isto conduz a um desgaste excessivo do flanco por abrasão e a piora no acabamento da superfície usinada da peça.

- d) **Difusão:** é um mecanismo fortemente dependente da alta temperatura e combinação de materiais presentes na zona de corte. As propriedades químicas do material da ferramenta e sua afinidade com o material da peça são determinantes para o surgimento deste mecanismo.
- e) **Oxidação:** ocorre a altas temperaturas e na presença de ar, com a formação típica de carepas. Metal-duro já inicia sua oxidação na faixa de temperatura de 700 a 800°C, onde os metais duros apenas compostos de carboneto de tungstênio e cobalto oxidam mais facilmente do que aquelas ferramentas com adição de óxido de titânio e outros carbonetos.

O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta em função do acesso de ar nesta região, sendo esta uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe.

A Figura 4.9 apresenta a ocorrência de cada um destes mecanismos, que depende fortemente da temperatura e dos parâmetros de usinagem, sendo a velocidade de corte o mais importante, seguida pelo avanço e pela profundidade.

Dentre os principais mecanismos de desgaste encontrados na usinagem de ferro fundido cinzento, encontra-se a abrasão, a adesão e a difusão, fato este também comum em outros materiais metálicos. No caso do já citado ferro fundido, os carbonetos de ferro encontram-se entre os principais responsáveis pelo desgaste por abrasão. Já o desgaste por difusão se deve à transição de elementos entre o par tribológico (cavaco-ferramenta) e ocorre sobretudo em altas velocidades de corte e temperatura. Para baixas velocidades de corte na usinagem do ferro fundido cinzento, as ferramentas são mais propensas à formação de gume postiço e mais suscetíveis ao desgaste de flanco (SRIVASTAVA, 2003).

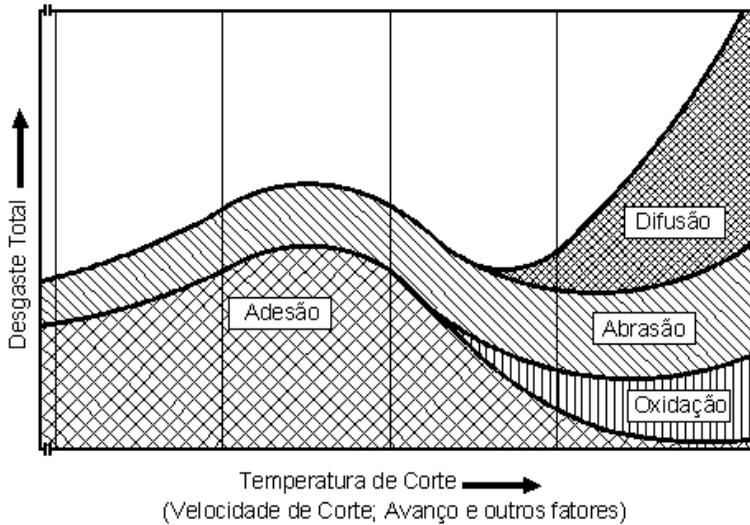


Figura 4.9 - Principais fatores causadores de desgaste em ferramentas de corte.
 Fonte: (VIEREGGE, 1970 *apud* MACHADO; SILVA, 2004).

Assim, no presente capítulo, o autor se preocupou com a exposição de um conjunto de conceitos importantes em relação aos materiais para ferramentas de corte e mecanismos de desgastes que ocorrem nas ferramentas de usinagem, com o propósito de trazer ao leitor os fundamentos necessários para melhor entender o tema desta pesquisa.

Com propósito semelhante, busca-se discutir, no capítulo seguinte, alguns fatores importantes relacionados com a qualidade da superfície usinada.

5. ASPECTOS DA TEXTURA E DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE USINADA

O atendimento das crescentes exigências para a fabricação de componentes com superfícies com alto grau de qualidade, confiabilidade e alto desempenho funcional mostra a necessidade e a importância da compreensão dos efeitos causados pelos processos de fabricação na superfície e subsuperfície dos componentes.

Tradicionalmente, a textura ou topografia da superfície tem sido aceita como critério que controla a qualidade de uma superfície (FIELD; KAHLES; CAMMET, 1972). É aceito que existe um forte relacionamento entre a rugosidade e a resistência à fadiga, capacidade de carga relativa, coeficiente de transmissão de calor e resistência ao desgaste. Entretanto, a topografia de um componente é apenas parte da consideração. As alterações que ocorrem abaixo da superfície também possuem uma grande influência sobre o desempenho dos componentes usinados (BOEHS, 1999).

Portanto, pode-se dizer que a tecnologia de superfície é a atividade que descreve, detalha e avalia a condição tanto da superfície como das camadas logo abaixo da superfície externa dos componentes fabricados. A ênfase histórica sobre a textura de superfície (rugosidade, ondulação e marcas de ferramentas) foi estendida para incluir a avaliação de efeitos logo abaixo da superfície, isto é, a integridade da superfície (FIELD; KAHLES; CAMMET, 1972; BOEHS, 1999).

Para Ulutan e Ozel (2011), a qualidade e o desempenho de um produto estão diretamente relacionados à integridade da superfície obtida pela usinagem. Integridade de superfície inclui as propriedades mecânicas (tensão residual, dureza), estados metalúrgicos (transformação de fase, microestrutura e variações de propriedades relacionadas) do material de trabalho durante o processamento da topografia (acabamento e outras características topográficas da superfície).

A Figura 5.1 apresenta uma ampliação parcial, simplificada e esquemática, de uma seção de uma peça cuja superfície foi obtida por usinagem.

O conceito de superfície implica no reconhecimento de duas regiões. A primeira, denominada de superfície externa, é a região que limita a peça ou corpo técnico com o meio circundante e com ela se relacionam as propriedades da textura, a qual pode ser entendida como sendo o arranjo das características da superfície vista a olho nu (DIN

1978). A segunda região compreende as camadas logo abaixo da superfície externa, e neste caso são relacionadas às propriedades de integridade da superfície (SME, 1987) citadas por (BET, 1999).

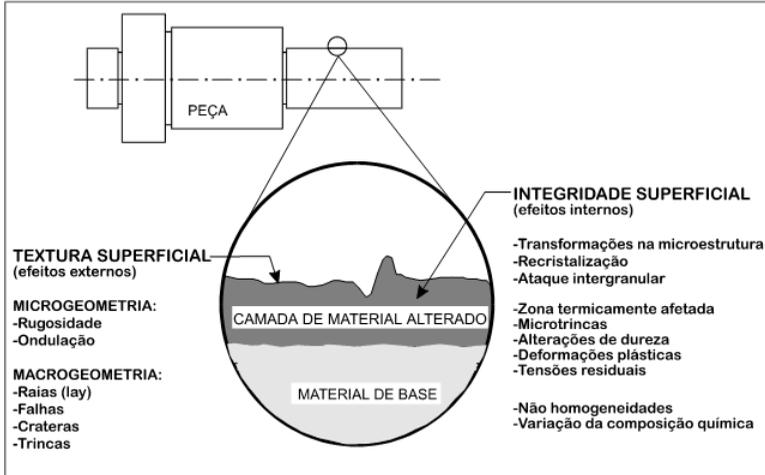


Figura 5.1 - Representação dos tipos de defeitos que podem ocorrer numa superfície usinada.

Fonte: (SME 1987)

Nas seções subsequentes, faz-se uma descrição mais detalhada da superfície sob os dois pontos de vista: textura e integridade.

5.1. Textura da superfície

As superfícies produzidas por usinagem são geralmente irregulares e complexas (BOEHS, 1999). Ou seja, mostram irregularidades na superfície que têm origem durante o processo de fabricação e estão associadas ao processo de formação do cavaco e às deformações ocorridas devido à ação da ferramenta sobre a peça.

A textura da superfície é formada por desvios repetitivos ou aleatórios que formam a topografia tridimensional de uma superfície. Uma variedade de dispositivos mecânicos, eletrônicos e ópticos existe para medir estes desvios, a partir de amostragens do perfil da peça de trabalho (BOEHS, 1999).

Segundo Bet (1999), os instrumentos de medição não conseguem detectar todas as características e irregularidades da superfície real, apresentando como resultado do processo de medição o que se denomina de superfície efetiva. Na Figura 5.2 estão representados os três tipos de perfis: o geométrico (teórico), o real e o efetivo.

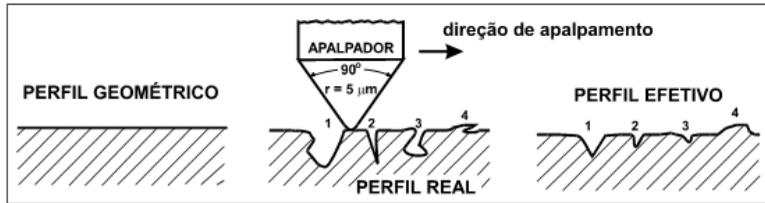


Figura 5.2 - Perfil geométrico, real e efetivo da superfície.

Fonte: (SANDER, 1989 *apud*. BET, 1999).

A figura mostra, portanto, que não se consegue captar o perfil real de uma peça; o que se obtém de fato é o perfil efetivo. No perfil real de um componente obtido pelo processo de usinagem, são encontrados três tipos principais de desvios:

- a) **Forma** (desvio de 1ª ordem): desvios que apresentam maior espaço entre si e são perceptíveis ao longo da superfície da peça;
- b) **Ondulação** (desvio de 2ª ordem): inclui todas as irregularidades cujo espaçamento é maior do que o comprimento de amostragem de rugosidade. Podem ser causados por vibrações e/ou deflexões da ferramenta e/ou peça, devido às forças de corte, temperatura de corte ou erro de fixação da peça ou ferramenta;
- c) **Rugosidade** (desvio de 3ª a 5ª ordem): consiste das irregularidades mais finas que geralmente resultam da ação inerente ao processo de produção da superfície, como marcas de avanço, gume posição, desgaste da ferramenta, etc.

Na Tabela 5.1 são apresentados os diferentes tipos de desvios, bem como as suas principais fontes geradoras conforme norma DIN 4760. Estes desvios, embora com características distintas, não se encontram nitidamente separados, sendo que eles se sobrepõem formando o perfil completo.

A rugosidade da superfície usinada é resultante de vários fatores como: material e geometria da ferramenta de corte, material e geometria da peça, condições de corte e rigidez da máquina-ferramenta.

Normalmente, uma superfície usinada é examinada depois ou durante a operação de corte, com o propósito de averiguar se ela atende às tolerâncias dimensionais e à rugosidade especificada no projeto da peça. Os erros dimensionais geralmente são mais fáceis de medir e controlar e dependem principalmente do processo e da rigidez da máquina-ferramenta utilizada. A rugosidade, por sua vez, pode ser avaliada por um grande número de parâmetros e diferentes tipos de instrumentos e técnicas de medição (MACHADO; SILVA, 2004).

Tabela 5.1- Desvios de forma do perfil de uma superfície.

DESVIOS DE FORMA (representados em uma seção do perfil)	EXEMPLOS DE TIPOS DE DESVIOS	EXEMPLOS DAS CAUSAS GERADORAS DOS DESVIOS DE FORMA
 1ª Ordem	FORMA Planicidade Cilindricidade Retilicidade	Defeitos nas guias da máquina ferramenta, deformação por flexão da máquina ou da peça, fixação errada da peça, deformações devido ao tratamento térmico, desgaste nas guias da peça
 2ª Ordem	ONDULAÇÃO Ondas	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa, fixação excêntrica da peça, vibrações da máquina ferramenta, da ferramenta ou da peça, deflexão da peça ou da máquina durante a usinagem, tratamento térmico, tensões residuais de fundição ou forjamento.
 3ª Ordem	RUGOSIDADE	Ranhuras ou Raios
 4ª Ordem		Estrias Escamas Protuberâncias
5ª Ordem Não mais representável na forma gráfica	Microestrutura do material	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço), deformação do material com jato de areia, formação de crateras e de protuberâncias após tratamento galvânico.
6ª Ordem Não mais representável na forma gráfica	Reticulado cristalino do material	Processos físicos e químicos da estrutura da matéria, tensões de deslizeamento na estrutura reticular do material.
 Superposição dos desvios de primeira a quarta ordem		

Fonte: Norma DIN 4760.

A rugosidade da superfície pode ser expressa pela determinação de parâmetros bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D), obtidos a

partir do perfil da superfície. Estes parâmetros podem ser classificados em:

Parâmetros de Amplitudes: são determinados por alturas dos picos, profundidade dos vales ou ambos.

Parâmetros de Espaço: são determinados pelo espaçamento do desvio do perfil ao longo da superfície.

Parâmetros Híbridos: são determinados pela combinação dos parâmetros de amplitude e espaço. Entre os parâmetros de amplitude, o mais utilizado é a rugosidade média (R_a), que é definida como sendo o valor médio aritmético de todos os desvios do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro de um comprimento de medição l (ISO 4287/1, DIN 4768). Tal valor é obtido medindo-se os desvios dos picos e vales em relação a uma linha média. Esta linha média é tal que o somatório das áreas abaixo dela é igual ao somatório das áreas acima dela.

R_a é um parâmetro que pode ser utilizado para controlar o processo de usinagem, isto é, analisar como o desgaste gradual da ferramenta pode influir na rugosidade da superfície usinada. Ele é um parâmetro muito utilizado pela indústria e está disponível nos instrumentos mais simples e mais baratos de todos os fabricantes. Entretanto, o parâmetro R_a isoladamente não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície, pois superfícies com geometrias diferentes podem ter o mesmo valor de R_a .

Em alguns casos, é desejável ou necessário especificar a altura máxima da rugosidade, ou seja, a distância entre pico e vales do perfil. Neste caso, outro parâmetro, também comum em usinagem, é o R_t , que é igual à distância vertical máxima entre o pico mais elevado e o vale mais profundo no comprimento de amostragem. Este é um parâmetro que pode ser influenciado por sujeira ou irregularidades na superfície. Outro parâmetro similar ao R_t é o parâmetro R_z , que é a média aritmética entre cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos no comprimento de amostragem. Este parâmetro é mais estável que R_t por ser um valor médio (MACHADO; SILVA, 2004).

Muitos outros parâmetros 2D e 3D já foram definidos para medir a rugosidade, no entanto, a escolha do parâmetro a ser utilizado depende da aplicação da superfície, isto é, depende da função que o componente desempenhará. Todavia, a rugosidade não pode ser o único critério para avaliar a qualidade de uma superfície usinada, tampouco ser o único critério para a seleção das condições de corte. É necessário também levar em consideração os efeitos que podem ser produzidos pela usinagem na integridade da superfície, ou seja, nas camadas abaixo da

superfície externa da peça, assunto este que será abordado na seção seguinte.

5.2. Integridade da superfície

O estudo da integridade da superfície trata os efeitos resultantes dos processos de fabricação, efeitos esses decorrentes de possíveis transformações na microestrutura que podem ocorrer nas camadas abaixo da superfície visível, superfície externa, constituindo assim a zona de material alterado (AMZ – *Altered Material Zones*). Tais transformações, de acordo com *Machining Data Handbook* (MDC, 1980) podem ser causadas por: energia química, térmica, elétrica e mecânica ou pela combinação destas.

Na Figura 5.3 observa-se como partículas de carbonetos presentes no material da peça podem afetar a qualidade da superfície durante a usinagem de ligas de titânio e níquel.

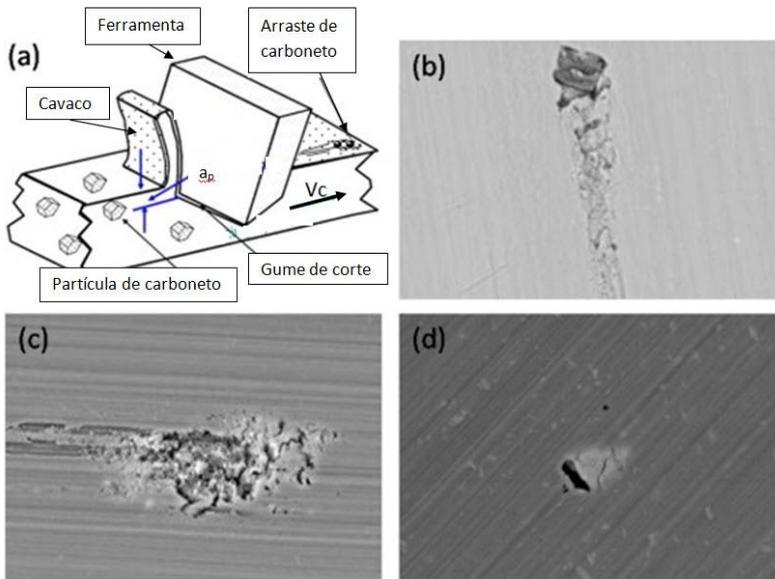


Figura 5.3 - Como partículas de carboneto podem afetar a qualidade da superfície: (a) arrancamento de carboneto, (b) arrastamento de carboneto, (c) poros, (d) marcas de avanço distribuídas na superfície usinada do Inconel 718.

Fonte: (ULUTAN;OZEL, 2011).

A identificação das alterações na superfície e logo abaixo dela é de suma importância, principalmente para componentes que serão submetidos a tensões alternadas (tração e compressão), para componentes que irão trabalhar em altas temperaturas e em atmosferas corrosivas, porque a resistência à fluência e outras propriedades mecânicas podem ser afetadas por alterações nas camadas logo abaixo da superfície.

Segundo Field, Kahles e Cammet (1972), Griffiths (2001) e Whitehouse (2004), as principais alterações nas camadas abaixo da superfície externa, decorrentes do processo de usinagem, são: camada branca, martensita revenida e não revenida, deformação plástica, dobramentos e trincas, microtrincas, ataque seletivo, ataque intergranular, entre outras. As principais alterações causadas pela usinagem são:

Deformação plástica: alteração bastante comum na usinagem pesada, que pode ser facilmente identificada pelas estruturas metalúrgicas alongadas na direção do fluxo de deformação.

Dureza: pode aumentar pela formação de martensita não revenida ou pela deformação abaixo da temperatura de recristalização. Também diminuir pelo super revenimento da martensita.

Trincas: micro ou macrotrincas podem ocorrer durante a usinagem com mais frequência em materiais frágeis e prejudicam a resistência à fadiga e à corrosão sob tensão.

Tensões residuais: podem ser de tração ou compressão, de alto ou baixo valor, rasas ou situadas em camadas mais profundas. A tensão de compressão geralmente é menos prejudicial. A tensão residual introduzida por usinagem é fortemente influenciada pelo desgaste da ferramenta.

Recristalização: qualquer metal cujas superfícies são deformadas plasticamente durante a operação de usinagem pode sofrer recristalização quando aquecido a temperaturas superiores à temperatura de recristalização.

Transformações de fases: as altas temperaturas desenvolvidas durante a usinagem podem promover a transformação de fase na superfície dos

componentes usinados. Na usinagem dos aços, pode ocorrer a formação de martensita frágil e não revenida.

Os materiais mais favoráveis a sofrerem alterações nas camadas subsuperficiais são os aços endurecidos, aços inoxidáveis e ligas de titânio e níquel. A camada branca é uma alteração comum na usinagem de aços endurecidos e recebe esse nome em função de não reagir com substâncias utilizadas em ataques para revelação da microestrutura (BECKER; SANTOS; SALES, 2005).

Em muitos casos, as peças resultantes dos processos de usinagem apresentam um elevado nível de comprometimento no que tange à integridade das superfícies, comprometimento este resultante de um ou mais fatores anteriormente reportados. Quando tal nível de comprometimento atinge valores intoleráveis, os processos de usinagem precisam ser reavaliados e corrigidos para evitar o descarte das peças nessas condições.

Nos últimos anos, tem havido avanços importantes no campo da textura e da integridade das superfícies usinadas e a série de publicações a seguir é uma comprovação disto, assim como serve para aprofundar os conhecimentos nesta área:

Chiffre *et al.* (2003) abordaram o papel das superfícies em escalas micro e nanométricas de comprimento. Nesse artigo, os autores revisaram aplicações, comportamento funcional e questões de fabricação referentes ao estado da arte e produtos em desenvolvimento usando alta precisão tecnológica. Para os autores, o referido artigo fornece uma visão esquemática de aplicações, comportamento funcional e tecnologias de fabricação que mostram claramente que as propriedades de superfícies são de importância decisiva para um número crescente de produtos modernos. Avanços têm sido feitos visando a uma melhor caracterização de superfície em micrometros e subníveis e compreensão dos mecanismos que envolvem a geometria da superfície, juntamente com as propriedades físicas e químicas dos materiais. À medida que a escala é reduzida, o papel de diferentes mecanismos é afetado e em vários mecanismos de natureza diferente em conexão com superfícies em escalas micrométricas e nanométricas é fortemente enfatizada.

Bewilogua *et al.* (2009) estudaram os aspectos mais importantes das tecnologias de superfície para engenharia automotiva. Nesse artigo foram discutidos os temas: revestimentos tribológicos em ferramentas usadas nos processos de fabricação; filmes de carbono diamante utilizados em bicos de injeção de alta performance a fim de reduzir o consumo de combustível; envidraçamento do carro com

propriedades ópticas e térmicas favoráveis ao conforto do motorista e, adicionalmente, melhor funcionalidade para o vidro através do revestimento da superfície do mesmo com material adequado; melhorar a proteção contra corrosão de tiras de aço utilizadas para o corpo do carro. Com esse estudo, concluíram que as tecnologias de fabricação de superfícies são uma das chaves para adicionar mais segurança e conforto para os automóveis do futuro.

Jawahir *et al.* (2011) publicaram resultados de três anos de estudo sobre integridade de superfície e desempenho funcional de componentes e relataram os progressos recentes em investigações experimentais e teóricas sobre a integridade de superfície em processo de remoção de material. Nesse estudo, mostram as técnicas experimentais para medir vários parâmetros de textura e integridade de superfície, através do uso de técnicas de difração de raios-X, métodos micromagnéticos, espectroscopia de Raman, métodos acústicos, métodos de avaliação da deformação plástica através de técnicas de recristalização e outros.

Navas *et al.* (2012) estudaram o efeito dos parâmetros: velocidade de corte, avanço, raio de quina da ferramenta, geometria do quebra cavaco e revestimento, nas tensões residuais geradas na superfície, através do torneamento do aço AISI 4340. A partir dos resultados obtidos, concluíram que: com o aumento do avanço, as tensões tendem a ser de tração devido ao aumento da temperatura de corte e ocorre o aumento da rugosidade da superfície; com o aumento da velocidade de corte, ocorre o aumento das tensões residuais; para altas velocidades, ocorre o aparecimento de deformações plásticas; um aumento do raio de quina da ferramenta resulta em temperaturas mais elevadas devido ao atrito, levando a tensões residuais de tração na superfície, além de melhor a rugosidade com a utilização de ferramentas revestidas. Além disto, as tensões residuais tendem a ser trativas, pois o revestimento atua como uma barreira térmica.

Neste capítulo não houve a intenção de esgotar o tema textura e integridade das superfícies usinadas, e sim trazer alguns conceitos e fatos relevantes para mostrar a importância do tema e que os mesmos possam servir de base para aplicação na presente pesquisa.

O capítulo seguinte exibirá alguns aspectos importantes relacionados com o ferro fundido cinzento, tais como suas propriedades: físicas, mecânicas e usabilidade, dando destaque para o tipo de ferro fundido em discussão nesta dissertação.

6. FERROS FUNDIDOS

Os ferros fundidos têm uma enorme relevância e aplicação em nível mundial. Há uma grande variedade de tipos e composições de ligas Fe-C-Si, além de Mn, S, P e adicionalmente apresentar elementos de liga diversos.

Os ferros fundidos são classificados em diferentes famílias, principalmente de acordo com a forma da grafita. O nome de cada família às vezes reflete a forma da grafita (nodular, vermicular), outras vezes tem relação com o aspecto da fratura (cinzento, branco) ou com alguma propriedade mecânica relevante (maleável). Os ferros fundidos brancos não contêm grafita, sendo que todo o carbono está na forma de carbonetos (GUESSER, 2009).

Segundo Chiaverini (2002), a composição química é um dos fatores mais importantes para determinar a microestrutura dos ferros fundidos. Nesse caso, os elementos de liga têm o seguinte efeito:

- Carbono: é um elemento base que determina a quantidade de grafita a se formar;
- Silício: é um elemento grafitizante da cementita e, além disso, é dessulfurante;
- Fósforo: formador de um composto de natureza eutética – carboneto de ferro e fosfeto de ferro, de aparência branca e perfurado chamado steadita;
- Enxofre: combina-se com o manganês, formando sulfeto de manganês (MnS).

A estrutura dos ferros fundidos é constituída de: ferrita, perlita e cementita com maior ou menor quantidade de grafita, dependendo da composição química e das condições de resfriamento. Outro fator que pode afetar a grafita nos ferros fundidos é a inoculação, que consiste na adição de um material (por exemplo, o silício) no metal quando ainda está no estado líquido, no próprio forno. A sua adição se faz no sentido de aumentar a tendência à grafitização, melhorando a tendência à formação de microestruturas mais refinadas e uniformes, possibilitando obter um ferro fundido de melhores propriedades mecânicas.

Os tipos de ferros fundidos mais importantes são o cinzento, nodular, nodular bainítico, vermicular e branco. O ferro fundido cinzento apresenta a grafita em forma de veios ou lamelas (Figura 6.1) e matriz de ferrita + perlita, em quantidades que podem variar de 0 a 100%, obtendo-se assim as diversas classes de ferro fundido cinzento com diferentes propriedades (Tabela 6.1). Uma das classes mais

empregadas é o FC 250 (matriz perlítica) como, por exemplo, em blocos de motores (MACHADO; BOEHS; SANTOS; GUESSER, 2004).

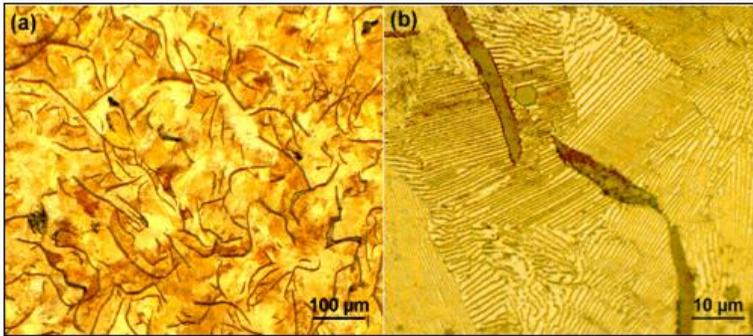


Figura 6.1 - Microestrutura do ferro fundido cinzento FC250 formada por lamelas ou veios de grafita numa matriz perlítica, reagente nital 3%.

Fonte: (PEREIRA, 2010).

Os ferros fundidos cinzentos possuem limites de resistência mecânica à tração de 100 a 400 MPa, sendo mais comum na faixa de 150 a 300 MPa, com alongamento muito pequeno. A grafita em forma de veios fornece bons valores de condutividade térmica, o que torna este material uma excelente escolha para a fabricação de componentes sujeitos à fadiga térmica (tambores, discos de freios e cabeçote de motor). Outra propriedade de destaque dos ferros fundidos cinzentos é a capacidade de amortecimento de vibrações, importantes para bases de máquinas e aplicações com restrições de ruídos (blocos de motor, carcaças e discos de freios), como mostra a Figura 6.2. A Tabela 6.1 apresenta uma visão geral sobre as principais propriedades dos ferros fundidos cinzentos (citados pelas classes da Norma ABNT), (GUESSER, 2009).

Portanto, pode-se observar que, para diferentes classes de ferros fundidos, há algumas propriedades que melhoram, enquanto outras têm um comportamento oposto, isto é, pioram. Em grande parte, isto é decorrente da sua microestrutura e composição química.

Neste contexto, pode-se destacar que os melhores resultados de usinabilidade entre os ferros fundidos são obtidos com os ferros fundidos cinzentos, devido à presença da grafita em forma de veios, que atua como lubrificante, facilitando a ruptura do cavaco (MARWANGA *et al.*, 2000., KLOCKER; KLÖPPER, 2003 *apud* GUESSER, 2009).



Figura 6.2 - Exemplos típicos de peças em ferro fundido cinzento.
Fonte: (GUESSER, 2009).

Tabela 6.1 - Comportamento das propriedades para as diferentes classes de ferros fundidos cinzentos.

FC 100	FC 150	FC 200	FC 250	FC 300	FC 350	FC 400
Resistência mecânica →						
Módulo de elasticidade →						
← Capacidade de amortecimento de vibrações						
Resistência a altas temperaturas →						
← Resistência ao choque térmico						
Dureza →						
Resistência ao desgaste →						
← Usinabilidade						
Acabamento em superfícies usinadas →						
← Fundibilidade						
Custo →						

Fonte: (GOODRICH, 2003 *apud* GUESSER, 2009).

6.1. Usinagem do ferro fundido cinzento

Como já posto anteriormente, os ferros fundidos têm uma grande aplicação na fabricação de muitos tipos de peças, dentre as quais umas muito simples e outras muito complexas. Isto significa que essas peças muitas vezes são submetidas a um ou mais processos de usinagem.

A usinagem do ferro fundido com o carbono na forma de grafita sempre foi considerada fácil comparativamente aos aços de similar resistência mecânica. Esta maior facilidade de se usinar é expressa por meio de várias características como (MACHADO; BOEHS; SANTOS; GUESSER, 2004):

- Menor força de usinagem e, conseqüentemente, menor energia consumida para realizar o corte;
- Menor calor gerado durante o corte e, conseqüentemente, menor temperatura de usinagem;
- Menor taxa de desgaste das ferramentas de corte e, conseqüentemente, maior vida dessas ferramentas e excelente controle dos cavacos, sobretudo nos ferros fundidos cinzentos, pois eles são totalmente descontínuos. Assim, apresentam-se na forma de pequenas lascas ou fragmentos.

A usinabilidade é uma propriedade resultante de um conjunto de fatores de um material que tem influência sobre o processo de usinagem. O estudo da usinabilidade, como propriedade tecnológica do material, tem um enorme significado econômico e também sobre a qualidade da superfície usinada, pois se relaciona não só com o custo da ferramenta de corte, mas também com a produtividade de toda uma linha de usinagem, usualmente de investimento bastante alto (GUESSER, 2009).

Conforme Weingaertner e Schroeter (2002), para caracterizar a usinabilidade, geralmente são usados quatro critérios:

- Vida da ferramenta;
- Força de usinagem;
- Qualidade da superfície da peça;
- Formação de cavacos, com forma e tamanho dos cavacos.

Segundo Guesser (2009), a microestrutura é um fator que pode afetar significativamente a usinabilidade, de diversas maneiras:

- **Abrasividade:** o desgaste por abrasão da ferramenta de corte é promovido por partículas duras contidas na microestrutura. Essas partículas também são responsáveis pelo aumento da força de corte.
- **Lubrificação na interface ferramenta/cavaco:** ação lubrificante resulta da grafita e de partículas de sulfeto de manganês presentes no material da peça.
- **Quebra do cavaco:** o sulfeto de manganês e a grafita, particularmente a lamelar, favorecem a quebra do cavaco, diminuindo o tamanho da região de contato e também o tempo de contato cavaco/ferramenta.

A dureza do ferro fundido é uma consequência da sua composição química e dos componentes da microestrutura, razão pela qual ela é um fator relevante na escolha da velocidade de corte na usinagem, assim como de outros materiais. O ferro fundido com grafita lamelar que, após um tratamento térmico de recozimento apenas apresenta um teor baixo de perlita na estrutura (aproximadamente 10%), pode ser usinado com velocidade de corte três vezes maior que um ferro fundido com perlita (aproximadamente 90%), para uma mesma vida da ferramenta. Outros componentes duros, como, por exemplo, o eutético de fósforo, bem como a cementita e a perlita, contribuem para o desgaste da ferramenta, forçando a redução da velocidade de corte, Figura 6.3 (WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

De um modo geral, ocorre um decréscimo na usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos à medida que se caminha para classes de maior resistência mecânica, devido ao aumento da quantidade de perlita na matriz (aumentando a abrasividade) e diminuição da quantidade de grafita (diminuição da ação lubrificante e da facilidade de quebra do cavaco) (GUESSER, 2009).

Outro aspecto importante é a presença de sulfeto de manganês (cerca de até 2% em volume), partículas que atuam como lubrificante na interface ferramenta/cavaco, e que estão presentes nos ferros fundidos cinzentos e nos ferros fundidos maleáveis (PEREIRA, 2005; BOEHS, 1979).

O sulfeto de manganês sofre intensa deformação plástica no processo de formação do cavaco (Pereira *et. al.*, 2006) e em operações de torneamento em altas velocidades, deposita-se sobre a ferramenta de corte, formando um filme lubrificante que é renovado pelo fornecimento contínuo de novas inclusões de sulfeto de manganês do material da peça

que está sendo usinada (ERICKSON;HARDY, 1976; REUTER *et al.*1999; KLOSE, 1994 *apud* GUESSER, 2009). Considera-se que esse filme de MnS pode atuar também como barreira à difusão, diminuindo o desgaste pela ocorrência de tal mecanismo (PEREIRA, 2005).

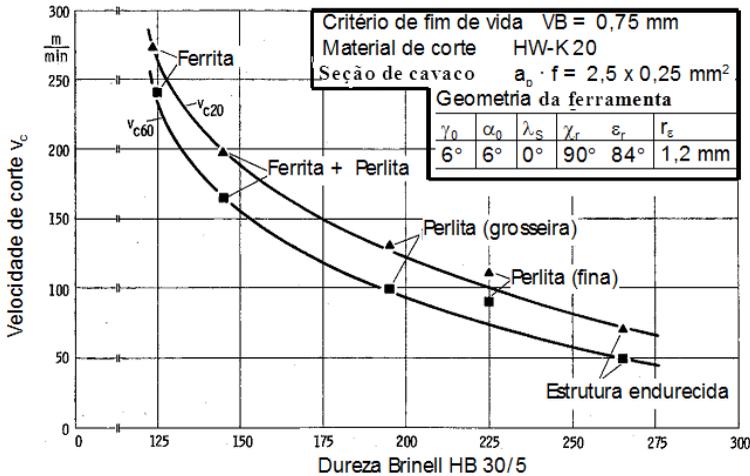


Figura 6.3 - Dependência da velocidade de corte v_{c60} e v_{c20} da microestrutura e da dureza do ferro fundido cinzento no torneamento.

Fonte: (Metals Handbook *apud* WEINGAERTNER; SCHROETER, 2002).

Recentemente algumas pesquisas têm mostrado uma característica atípica do ferro fundido cinzento durante a usinagem, ou seja, nesse material ocorre um aumento na vida da ferramenta para crescentes velocidades de corte, compreendidas entre 200 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ e 800 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, utilizando ferramenta de CBN. De acordo com Abele, Sahn e Schulz (2002), o sulfeto de manganês é o responsável por esse comportamento atípico. Esse comportamento observado na usinagem do ferro fundido cinzento vem recebendo atenção em virtude da possibilidade de redução do custo de produção e aumento de produtividade simultaneamente (PEREIRA, 2010).

As pesquisas encontradas na literatura que mostram esse comportamento que ocorre na usinagem do ferro fundido cinzento são:

- Formação no gume da ferramenta de uma camada protetora de óxido (Al, Mn, Fe), sugerida por Yamane (1990) e Liu (2002);

- Formação no gume da ferramenta de uma camada protetora de sulfeto de manganês (MnS), proposta por Reuter, Schulz e Mc Donald (1999) e Abele, Sahm e Schulz (2002).
- Formação de uma camada com alta concentração de alumínio (Al) e fortemente aderida ao gume da ferramenta, explicação dada por Pereira (2010).

6.2. Formação de uma camada protetora de óxido

A formação de uma camada protetora de óxido na usinagem de aços resulfurados e ferros fundidos foi estudada por Yamane *et al.* (1987,1990). Nos experimentos de torneamento com ferramentas de nitreto de silício realizados por Yamane *et al.*, 1990, foram testados os seguintes ferros fundidos: ferro fundido cinzento (FC 250), ferro fundido cinzento obtido por fundição contínua (FC 250-CC) e ferro fundido nodular (FCD 400). Os resultados obtidos são mostrados na Figura 6.4. Nota-se que, neste caso, o desgaste da ferramenta de Si_3N_4 foi maior no torneamento do FC 250-CC e do FCD 400, enquanto no torneamento do FC 250 o desgaste da ferramenta foi menor, sendo que uma grande quantidade de alumínio foi encontrada na face da ferramenta.

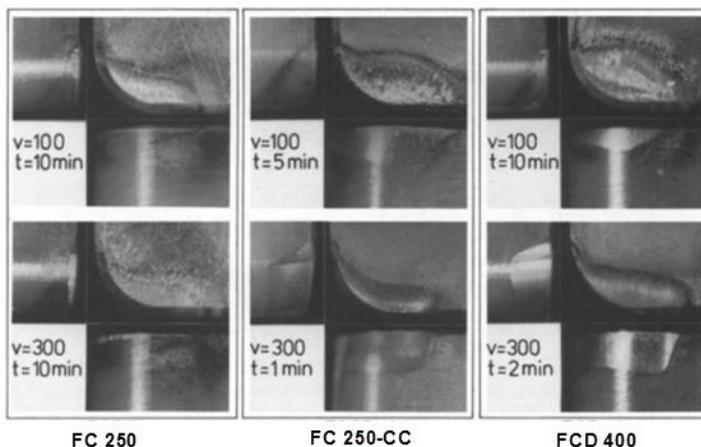


Figura 6.4 - Desgastes de cratera e flanco das ferramentas de Si_3N_4 no torneamento dos ferros fundidos: FC 250, FC 250-CC e FCD 400, com velocidades de corte de 100 e 300 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, $f = 0,21 \text{ mm}$ e $a_p = 1 \text{ mm}$.

Fonte: (YAMANE *et al.* 1990).

A Figura 6.5 mostra a influência da velocidade de corte no desgaste de flanco (V_B) e de cratera (KT) da ferramenta de nitreto de silício no torneamento do ferro fundido cinzento FC 250. Normalmente, o desgaste da ferramenta aumenta com o aumento da velocidade de corte, mas os resultados das pesquisas realizadas por Yamane *et al.* (1990) indicam uma redução no desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade de corte.

A análise química feita na superfície da ferramenta de corte, após a usinagem do ferro fundido cinzento FC 250, apontou também a presença de uma camada protetora composta pelos seguintes elementos: alumínio, manganês e ferro, aderidos provavelmente na forma de óxidos Al-Mn-Fe (YAMANE *et al.* 1990).

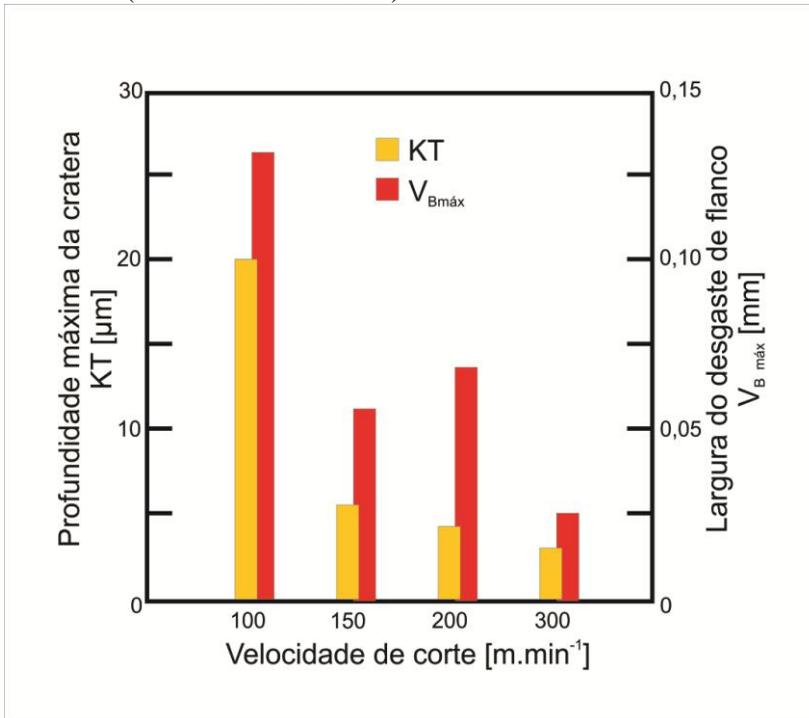


Figura 6.5 - Influência da velocidade de corte no desgaste da ferramenta de Si_3N_4 no torneamento do ferro fundido FC 250 ($f = 0,21$ mm; $a_p = 1$ mm; $t = 10$ min).

Fonte: (YAMANE *et al.* 1990).

Ao estudar o efeito do oxigênio na usinagem do ferro fundido cinzento com ferramenta de Si_3N_4 , Yamane *et al.* (1987) verificaram que o desgaste da ferramenta e a aderência do elemento ferro na superfície da ferramenta aumentavam num ambiente com baixo teor de oxigênio. Desse modo, Yamane *et al.* (1990) concluíram que sobre a ferramenta de Si_3N_4 se deposita, seja por transferência seletiva, ou por reação química, uma camada de óxido que protege a ferramenta de corte durante a usinagem do ferro fundido cinzento FC 250. Com uma quantidade de alumínio no material da peça e num ambiente com elevado teor de oxigênio, essa camada protetora de óxido pode se formar sobre a superfície da ferramenta de corte em virtude de inclusões de óxidos presentes no material da peça, ou em razão da oxidação da superfície da ferramenta durante o processo de usinagem.

Liu *et al.* (2002) justificam da seguinte forma o comportamento atípico (diminuição do desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade de corte) que ocorre na usinagem por fresamento do ferro fundido cinzento com ferramentas de CBN, Figura 6.6 (a) e (b): devido à redução da resistência do material da peça na região de corte, em razão da geração de altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, e à formação da camada protetora de óxido sobre a ferramenta de corte. O elemento alumínio do material da peça assume um papel importante em decorrência da formação da camada de óxido de alumínio de elevada dureza e resistência, sobre a superfície da ferramenta, contribuindo assim para a diminuição do desgaste por abrasão.

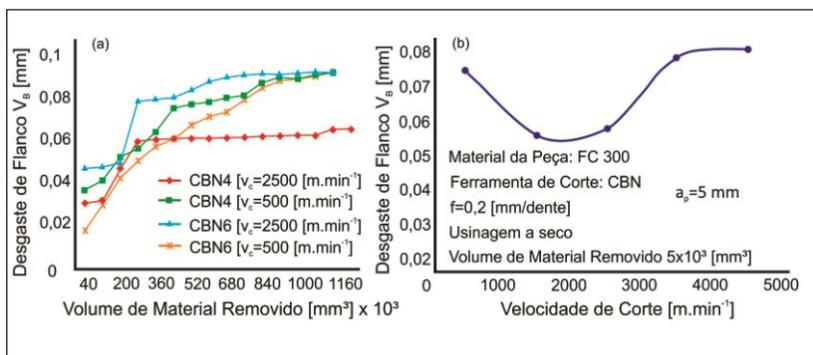


Figura 6.6 - (a) Desgaste da ferramenta de CBN X Volume de material removido (b) Desgaste da ferramenta de corte CBN4. CBN4 (ligante: TiC; 60-70% CBN); CBN6 (ligante: Co; 90% CBN).

Fonte: (Adaptado de LIU *et al.* 2002).

O filme de óxido gerado sobre a superfície da ferramenta está relacionado com a temperatura desenvolvida na interface cavaco-ferramenta. A temperatura, na usinagem, é influenciada principalmente pela velocidade de corte. Consequentemente, deve haver um intervalo de velocidade no qual o filme de óxido é uniformemente gerado. A relação entre a velocidade de corte e o desgaste de flanco pode ser visualizada na Figura 6.6(b). Esta figura mostra que o desgaste de flanco da ferramenta (V_B) é menor no intervalo compreendido entre 1500 e 2500 $m.min^{-1}$, dentro de uma faixa de trabalho compreendida entre 500 e 4500 $m.min^{-1}$ (LIU *et al.* 2002).

Quando o alumínio é adicionado ao ferro fundido cinzento perlítico, referido como FC 300Al, a usinabilidade de tal material é melhorada, Figura 6.7. A adição de alumínio no material da peça resulta num aumento da quantidade desse elemento sobre a superfície da ferramenta de corte. Segundo Liu *et al.* (2002), o elemento alumínio pode existir sobre a ferramenta na forma de Al_2O_3 , que é um constituinte duro e resistente ao desgaste, contribuindo para a redução do desgaste por abrasão da ferramenta. Considera-se essa uma das razões pelas quais o desgaste da ferramenta na usinagem do material FC 300Al a 2500 $m.min^{-1}$ é menor do que na usinagem do material FC 300, na mesma velocidade de corte. Portanto, fica evidenciado que a adição do elemento alumínio no material da peça melhora a usinabilidade de ferro fundido cinzento perlítico (LIU *et al.* 2002).

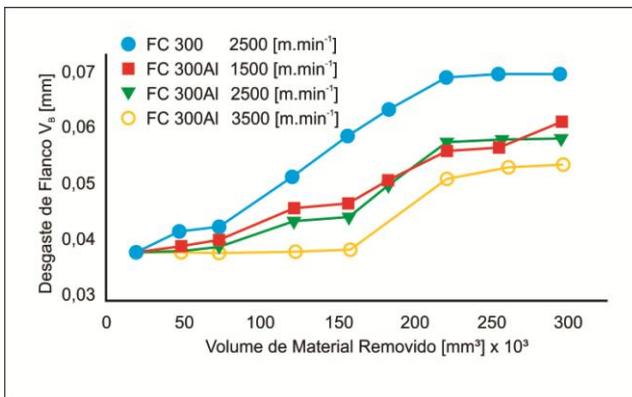


Figura 6.7 - Influência do elemento alumínio no desgaste de flanco (V_B) da ferramenta de corte. (CBN; Fresamento; $a_p = 0,15$ mm e $f = 0,2$ mm/dente).

Fonte: (Adaptado de LIU *et al.* 2002).

6.3. Formação de uma camada protetora de sulfeto de manganês

Pesquisas realizadas no PTW – O Instituto para Gerenciamento da Produção, Tecnologia e Máquinas-Ferramentas da Universidade Técnica de Darmstadt (Alemanha), em cooperação com fundições, fabricantes e pesquisadores de materiais, mostram que, em altas velocidades de corte, entre 200 e 800 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, os elementos enxofre e manganês, presentes no ferro fundido cinzento (CI) na forma de inclusão, formam uma camada protetora de sulfeto de manganês sobre a superfície da ferramenta de corte, camada esta que a protege contra o desgaste por abrasão, Figura 6.8 (a). Por sua vez, na usinagem do ferro fundido vermicular (CGI), não há a formação da camada de MnS porque o magnésio é um forte formador de sulfeto. Inclusões de sulfeto de magnésio (MgS) são formados preferencialmente ao sulfeto de manganês (MnS) (SAHM *et al.* 2002).

Com a formação da camada ou o depósito das inclusões de sulfeto de manganês sobre a superfície da ferramenta, como exibido na Figura 6.8 (b), o comportamento da vida dessa ferramenta de nitreto de boro policristalino (PCBN), usado na usinagem do ferro fundido cinzento, muda em função da velocidade, Figura 6.8 (a). Isto é, neste caso, a vida da ferramenta, ao contrário do que é normalmente esperado, aumenta com o aumento da velocidade de corte, e dependendo das condições de corte, poderá não haver a formação de uma “camada protetora” de MnS (REUTER;SCHULZ; MCDONALD, 2003).

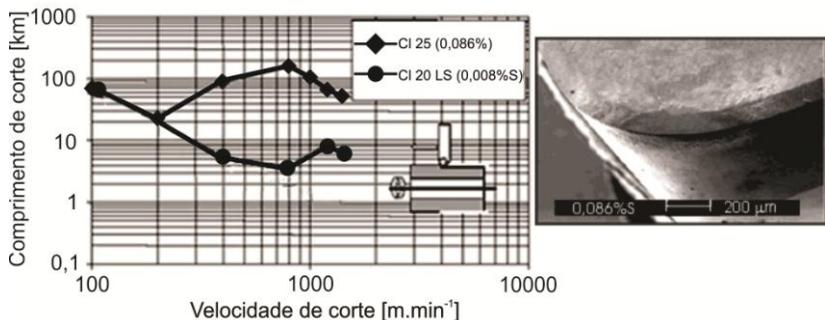


Figura 6.8 - (a) Comprimentos de corte para diferentes velocidades (b) Formação da “camada protetora” no torneamento longitudinal do ferro fundido cinzento com ferramenta de PCBN ($a_p = 0,15 \text{ mm}$ e $f = 0,3 \text{ mm}$), critério de fim de vida adotado $V_B = 300 \mu\text{m}$.

Fonte: (Adaptado de SAHM *et al.* 2002).

Nos aços, as inclusões de MnS são obtidas propositalmente para melhorar a usinabilidade do material. Nos ferros fundidos cinzentos, estas inclusões aparecem como resultado do processo de fabricação em fornos cubilô. Para que o enxofre presente no coque e na sucata não combine com o ferro formando inclusões de sulfeto de ferro com baixo ponto de fusão, o manganês é adicionado para formar inclusões de sulfetos de manganês, que são mais estáveis (PEREIRA, 2005).

Sahm *et al.* (2002) afirmam que as inclusões de sulfeto de manganês geram resultados animadores em termos de custos e produtividade, motivando o constante estudo e interesse em relação à influência dessas inclusões na usinabilidade do material. Segundo os citados autores, a presença das inclusões de MnS pode reduzir o coeficiente de atrito na interface cavaco-ferramenta em até cinco vezes e, conseqüentemente, aumentar a vida da ferramenta de corte.

De acordo com Pereira (2010), diferentemente do que está exposto na literatura, apenas a formação de uma camada de MnS na superfície da ferramenta não favorece o desenvolvimento do “comportamento atípico” do desgaste. A localização desta camada é determinante na manutenção do gume e na diminuição do desgaste da ferramenta a elevadas velocidades de corte. Quanto à localização dos elementos enxofre e manganês, três fatores merecem destaque: formação de uma camada com alta concentração de alumínio e fortemente aderida ao gume da ferramenta, redução das componentes da força de usinagem com o aumento da velocidade de corte e alteração do mecanismo de formação do cavaco.

6.4. Formação de uma camada com alta concentração de alumínio

Pereira (2010) estudou os fenômenos químicos, físicos e tribológicos, desenvolvidos na interface cavaco-ferramenta durante a usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramentas de nitreto de silício, a fim de entender os fatores responsáveis pelo aumento da vida da ferramenta (redução do desgaste) com o aumento da velocidade de corte.

Os experimentos de Pereira (2010) foram realizados em processo de torneamento externo longitudinal com ferramentas de nitreto de silício nas velocidades de corte de 300, 400, 500 e 700 m.min⁻¹, mantendo fixos $f = 0,2$ mm e $a_p = 2$ mm e o comprimento usinado de 1600 mm. A pesquisadora utilizou um microscópio eletrônico de

varredura para fazer a medição do desgaste no flanco das ferramentas utilizadas. Os resultados exibidos na Figura 6.9 mostram que o desgaste no flanco (V_B) das ferramentas diminuiu com o aumento da velocidade de corte. Tal resultado está em concordância com os obtidos por Yamane *et al.* (1987, 1990), Liu *et al.* (2002) e Sahn *et al.* (2002).

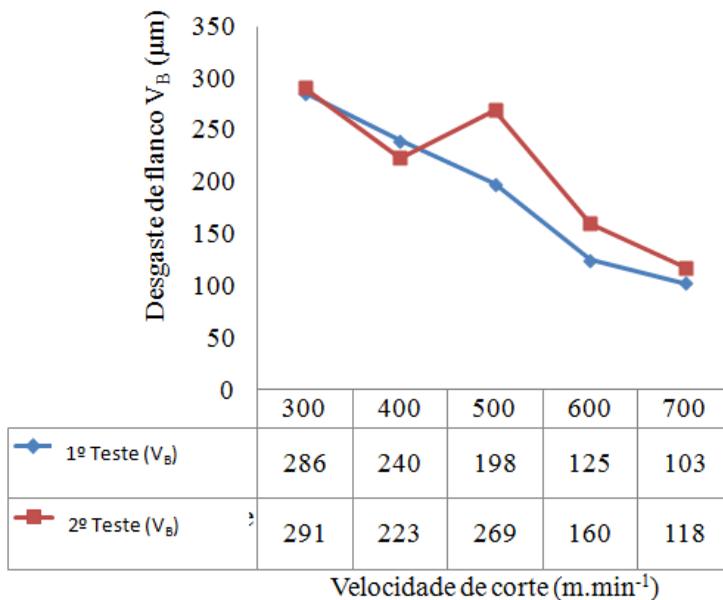


Figura 6.9 - Desgaste de flanco em função da velocidade de corte. ($a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm, ferramenta de cerâmica de nitreto de silício Si_3N_4 , comprimento usinado de 1600 mm).

Fonte: (PEREIRA, 2010).

Deve-se salientar que, na ocasião (PEREIRA, 2010), não dispunha de equipamentos para trabalhar com velocidades acima de 700 $m.min^{-1}$.

Nas ferramentas utilizadas nos experimentos a 300 e 700 $m.min^{-1}$, foi realizado o mapeamento dos elementos químicos por EDS (espectroscopia de energia dispersiva), simultaneamente na face, no flanco e no chanfro das ferramentas, respectivamente, Figuras 6.10 e 6.11, isto com o objetivo de verificar em qual região da ferramenta havia uma maior concentração de S e Mn. Dessa região foi retirada uma

amostra para ser analisada no TEM (microscópio eletrônico de transmissão).

Na Figura 6.12, é mostrada a região localizada no chanfro da ferramenta empregada na usinagem a 300 m.min^{-1} , região essa com maior concentração de S e Mn da qual foi retirada uma amostra para ser analisada no TEM (microscópio eletrônico de transmissão).

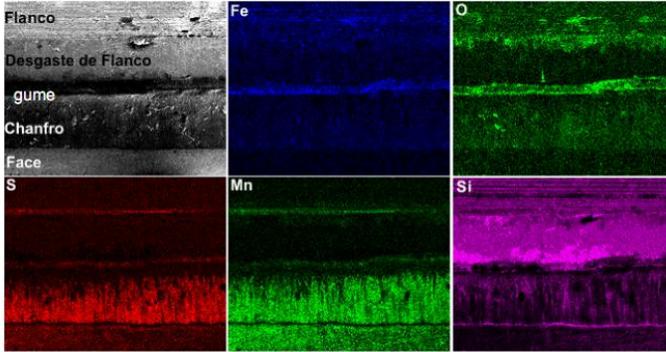


Figura 6.10 - Mapeamento dos elementos químicos (Fe, O, S, Mn e Si) por EDS nas superfícies da ferramenta empregada na usinagem do FC 250 a 300 m.min^{-1} .

Fonte: (PEREIRA, 2010).

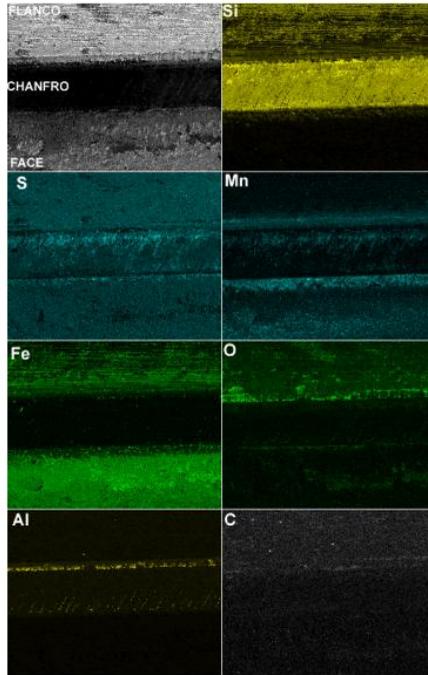


Figura 6.11 - Mapeamento dos elementos químicos (Si, S, Mn, Fe, O, Al e C) por EDS nas superfícies da ferramenta empregada na usinagem do FC 250 a $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Fonte: (PEREIRA, 2010).

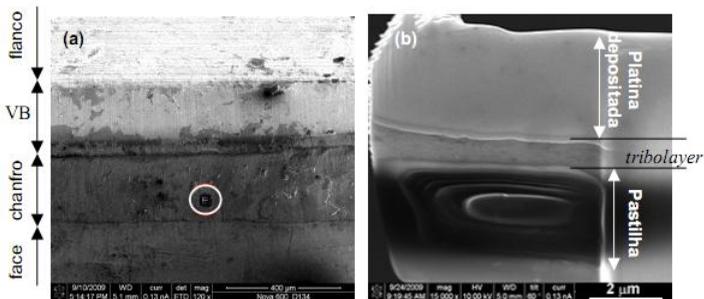


Figura 6.12 - (a) o círculo indica a região selecionada para análise no TEM, (b) amostra de TEM, obtida da região indicada em (a), formada pela *tribolayer* aderida ao chanfro da ferramenta, empregada a $300 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Fonte: (PEREIRA 2010).

Na ferramenta utilizada a 700 m.min^{-1} , Figura 6.11, a maior concentração de S e Mn está localizada no gume da ferramenta da qual foi retirada uma amostra, Figura 6.13, que foi preparada por FIB e examinada no TEM.

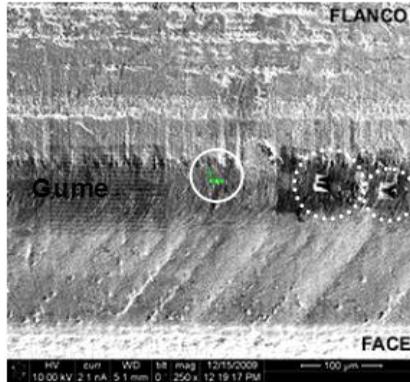


Figura 6.13 - O círculo indica a região selecionada no gume da pastilha empregada na usinagem a 700 m.min^{-1} , para a remoção da amostra a ser analisada no TEM.

Fonte: (PEREIRA, 2010).

No mapeamento dos elementos químicos apresentados na Figura 6.11, foi observada uma alta concentração de alumínio no gume, reportado na literatura por Liu *et al.* (2002). Dessa mesma região foi obtida uma amostra de seção transversal para análise no TEM. A análise da referida amostra confirmou a presença de uma camada com alta concentração de alumínio e oxigênio no gume da ferramenta (PEREIRA, 2010).

Empregando em sua pesquisa técnicas avançadas e de alta resolução, Pereira (2010) conseguiu compreender melhor os mecanismos envolvidos na redução do desgaste das ferramentas com o aumento da velocidade de corte. A alta resolução das imagens e das microanálises químicas fornecidas pelas técnicas empregadas viabilizou uma caracterização detalhada e considerada bastante segura, em escala nanométrica, da microestrutura da tribocamada e também da ferramenta. Os resultados da pesquisa realizada por Pereira (2010) são expostos mais detalhadamente a seguir.

A microscopia eletrônica revelou por meio da análise química que, na usinagem a 300 m.min^{-1} , a região com alta concentração dos

elementos S e Mn fica localizada no final do desgaste de flanco e na face, após a região de contato cavaco-ferramenta. Isto significa que as inclusões de MnS, seletivamente transferidas da peça pelo flanco, são transportadas pela ação da superfície transitória da peça. Quando seletivamente transferidas pela face, as referidas inclusões são levadas pela superfície inferior do cavaco até o final da região de contato cavaco-ferramenta. Na usinagem a $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, a região com alta concentração de S e Mn, juntamente com o Al, está localizada sobre o gume da ferramenta.

Sendo a concentração de S e Mn maior na ferramenta empregada a $300 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, a sua localização não contribui significativamente para diminuir a interação dos pares peça-ferramenta e ferramenta-cavaco. Já a localização da região com alta concentração de S e Mn, sobre o gume da ferramenta na usinagem a $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, mostrou-se eficiente para a redução do desgaste da ferramenta à base de Si_3N_4 .

Com o auxílio da microscopia eletrônica de transmissão, foi identificada pelo EDS uma camada com alta concentração de alumínio na região de transição tribocamada-ferramenta, isto nas amostras de seção transversal do gume da ferramenta empregada na usinagem a $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Na usinagem a $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, o óxido de alumínio combina-se com o óxido de silício formando, entre a ferramenta de corte e a tribocamada, uma nanocamada com alta concentração de alumínio com espessura da ordem de 10 nm, corresponsável pelo “comportamento atípico”. Primeiro, porque favorece a manutenção das inclusões de MnS sobre o gume da ferramenta e, segundo, porque inibe a oxidação do Si_3N_4 .

Pereira (2010) também comenta em suas conclusões que, embora, na literatura, a oxidação do nitreto de silício seja citada como algo danoso para a ferramenta por ser considerado um mecanismo de desgaste, os resultados apresentados na sua pesquisa demonstram que, dependendo das condições desenvolvidas na “interface cavaco-ferramenta”, a oxidação da superfície pode ser benéfica. Sob certas condições de temperatura e pressão, não quantificadas, o óxido de silício reage com o óxido alumínio formando uma camada que protege a superfície da ferramenta e favorece a adesão e a manutenção das inclusões de MnS sobre o gume dessa ferramenta.

Através da utilização do TEM (microscópio eletrônico de transmissão), STEM (microscópio eletrônico de transmissão por varredura), HRTEM (microscópio eletrônico de transmissão de alta

resolução), SAED (difração de elétrons de área selecionada), EELS (espectroscopia por perda de energia de elétrons) e EFTEM (microscopia eletrônica de transmissão de energia filtrada) no estudo da microestrutura e da composição química da *tribolayer*, foi possível constatar que a mesma não é formada apenas por inclusões de MnS. Mas, segundo Pereira (2010), também é constituída por fragmentos de SiO₂, Si₃N₄ e por MnS recristalizado dinamicamente. A referida autora observou também que, quando as inclusões de MnS são seletivamente transferidas e aderidas sobre o SiO₂ (resultante da oxidação do Si₃N₄) na superfície da ferramenta, o MnS é facilmente removido do gume e transportado pelo cavaco até o final do contato cavaco-ferramenta na face da ferramenta. Somente quando há sobre o gume a formação da camada com alta concentração de alumínio haverá condição para a manutenção da inclusão de MnS (PEREIRA, 2010).

Com a utilização do TEM, na análise da *tribolayer*, foi possível verificar que, na velocidade de 300 m.min⁻¹, as inclusões de MnS aderidas ao SiO₂, quando submetidas a tensões cisalhantes pela superfície inferior do cavaco, são facilmente removidas do gume devido à diferente densidade do SiO₂ e do Si₃N₄. Por sua vez, na usinagem a 700 m.min⁻¹, como resultado das condições desenvolvidas na interface cavaco-ferramenta, há a formação de uma camada fortemente aderida ao gume da ferramenta, composta principalmente por Al, sobre a qual se encontram aderidas as inclusões de MnS e assim permanecerão sobre esse gume.

Fundamentando-se nos resultados obtidos e nos argumentos apresentados, Pereira (2010) sugere que, na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250, a redução do desgaste da ferramenta de nitreto de silício (Si₃N₄) com o aumento da velocidade resultam dos seguintes fatos: da formação de uma camada com alta concentração de alumínio fortemente aderida ao gume da ferramenta; da redução das componentes da força de usinagem; e da transferência seletiva das inclusões de MnS presentes no material da peça para a superfície da ferramenta. A pesquisadora ressalta que, embora a redução das componentes da força de usinagem contribua para a redução do desgaste da ferramenta, o fator determinante é a formação de uma camada fortemente aderida à superfície da ferramenta, composta sobretudo por alumínio.

A pesquisa feita por Pereira (2010) representa uma importante contribuição para o avanço do conhecimento na área de fabricação por processos de usinagem, tanto pelo aspecto dos resultados obtidos, quanto pela metodologia e combinações de técnicas que foram utilizadas. Mas devido à limitação técnica da máquina-ferramenta

utilizada pela pesquisadora, isto em termos de valores de rotação disponíveis no eixo árvore, ela não teve condições de utilizar velocidades superiores a 700 m.min⁻¹.

Diante dessa limitação de velocidade imposta pela máquina e com a aquisição por parte da UFSC de uma máquina com capacidade consideravelmente superior, surgiu a possibilidade de uma ampliação e aprofundamento da pesquisa realizada por Pereira (2010). Essa pesquisa tem o propósito de contribuir na solução de dúvidas que ainda persistem em relação à manutenção deste “comportamento atípico” reportado por Pereira (2010), Abele, Sahm e Schulz (2002), em altas velocidades de corte, superiores às reportadas na literatura até o presente momento. Em se confirmando tal comportamento atípico na usinagem do ferro fundido cinzento, isto em velocidades ainda maiores que aquelas praticadas por Pereira (2010), têm-se a possibilidade concreta em buscar a redução dos custos de produção, o aumento da produtividade e, sob o ponto de vista ambiental, a diminuição do consumo de matéria-prima para a fabricação de ferramentas de usinagem.

Uma vez construído o referencial para a presente pesquisa, os capítulos seguintes deste trabalho tratarão: dos materiais, métodos e equipamentos; da apresentação e discussão dos resultados; das conclusões e das referências.

7. MÉTODOS, MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

Conforme já exposto no capítulo 2, o presente trabalho tem por objetivo pesquisar o comportamento atípico (diminuição do desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade) quando o ferro fundido cinzento FC 250 é submetido à usinagem em altas velocidades de corte, utilizando ferramentas de nitreto de silício (Si_3N_4). Assim, neste capítulo, serão descritos os materiais, os equipamentos e os métodos utilizados para atingir esse objetivo.

Como esta pesquisa é uma extensão do trabalho realizado por Pereira (2010), porém com uma aplicação das variáveis do processo de usinagem e do foco da investigação, procurou-se, na medida do possível, adotar os mesmos métodos, materiais e técnicas para a análise dos resultados. Em termos de equipamentos, a principal diferença está na máquina-ferramenta empregada nos experimentos de usinagem, sendo a da presente pesquisa substancialmente mais robusta, com maior potência instalada e, por tais motivos, permite trabalhar com velocidades de até 100% maiores em comparação as utilizadas por Pereira (2010).

Quanto à comprovação do comportamento atípico do desgaste da ferramenta na usinagem do ferro fundido cinzento, esta foi realizada com base nos tipos e mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício, utilizadas em experimentos de torneamento externo longitudinal de curta e longa duração, com diferentes velocidades de corte, situadas entre 400 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, mantendo-se fixos o avanço de 0,2 mm e a profundidade de corte em 2 mm. Os experimentos foram efetuados com duas réplicas e os parâmetros de corte referentes ao avanço e à profundidade foram mantidos os mesmos utilizados por Pereira (2010).

A análise dos resultados, especialmente no que toca ao desgaste das ferramentas, foi realizada com microscopia óptica e eletrônica, procurando-se caracterizar os tipos e mecanismos responsáveis pelo desgaste das ferramentas.

A seguir serão detalhados os demais aspectos relacionados com o presente capítulo. Outro aspecto muito importante a destacar é que a presente pesquisa utilizará amostras (corpos de prova) do mesmo ferro fundido que também já havia sido preparado para a pesquisa anterior (Pereira, 2010). Desta forma, praticamente se elimina a influência sobre os resultados da pesquisa de uma das principais variáveis, o material da peça.

Diante deste fato, considerou-se desnecessário realizar um novo investimento em termos de tempo e recursos para fazer uma nova caracterização do material em questão. Destaca-se ainda que Pereira (2010) fez tal caracterização de forma muito cuidadosa e meticulosa, inclusive com o apoio da empresa fornecedora do material, no caso a TUPY Fundições Ltda. Portanto, neste quesito, assumem-se os resultados da pesquisa anterior.

7.1. Máquina-ferramenta e experimentos de usinagem

Para a realização dos experimentos, foi utilizado um torno modelo Heynumat 10U de fabricação alemã, com potência nominal no eixo árvore de 75 kW, rotação máxima de 4500 rpm e equipado com comando CNC Siemens 802D. Tal equipamento está disponível no USICON (Laboratório de Usinagem e Comando Numérico) da Universidade Federal de Santa Catarina e é mostrado na Figura 7.1. Esse equipamento tem uma estrutura robusta, é dotado de barramento inclinado, placa de três castanhas com fechamento hidráulico e ambiente de usinagem enclausurado com blindagem que permite uma maior segurança durante a usinagem em alta velocidade de corte. Tais características da máquina proporcionam um diferencial altamente positivo para a presente pesquisa, isto em relação à de Pereira (2010).



Figura 7.1 - Torno CNC modelo Heynumat 10U do fabricante HEYLIGENSTAEDT utilizado nos experimentos de torneamento.

Como já reportado anteriormente, a comprovação do comportamento atípico do desgaste da ferramenta na usinagem do ferro fundido cinzento foi pesquisada com base nos tipos e mecanismos de desgaste em ferramentas à base de nitreto de silício, utilizadas em experimentos de torneamento externo longitudinal de curta e longa duração. Foram utilizadas quatro velocidades de corte distintas, situadas entre 400 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, mantendo-se inalterados o avanço em 0,2 mm e a profundidade em 2 mm. Os experimentos foram efetuados com uma réplica, isto em razão da disponibilidade de material e os parâmetros de corte referentes ao avanço e à profundidade foram iguais aos utilizados por Pereira (2010).

Após a elaboração da programação CNC para a realização dos ensaios, foi feita primeiramente uma pré-usinagem dos corpos de prova, sendo removida uma camada com cerca de 3 mm de espessura ao longo da superfície externa, procurando, com isto, evitar que possíveis falhas de fundição e resíduos de areia de fundição na superfície dos corpos de prova afetassem o desgaste das ferramentas de nitreto de silício durante os experimentos.

A realização dos experimentos ocorreu no Laboratório USICON da UFSC com a seguinte ordem:

- Ensaios de usinagem por torneamento com velocidades de corte de: 700, 800, 900, 1000, 1200 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ para o avanço e profundidade já informados anteriormente. Para cada velocidade a ferramenta foi retirada da máquina uma vez e levada ao microscópio óptico para observar e medir o desgaste no flanco e na face, isto é, após a ferramenta completar uma trajetória percorrida de comprimento usinado de 1600 mm. Para aumentar a confiabilidade dos resultados dos ensaios, foi realizada uma nova série de ensaios, em que foi utilizado um segundo gume de cada ferramenta de corte, para cada uma das condições especificadas. No final de cada um dos experimentos, isto é, ao completar a trajetória dos 1600 mm, as ferramentas eram analisadas em microscopia eletrônica de varredura com o propósito de analisar o desgaste no flanco e na face, bem como verificar a adesão de material nessas regiões da ferramenta.
- Ensaios de usinagem de longa duração por torneamento em velocidades de 400 e 1200 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Devido à quantidade de material disponível para a velocidade de 400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, o

comprimento usinado foi de 4800 mm e, para a velocidade de 1200 m.min⁻¹, o comprimento usinado foi de 9600 mm.

Nessa série de ensaio, para cada dois passes de usinagem no corpo de prova (400 mm de comprimento usinado), a ferramenta era retirada do suporte e se realizava o procedimento de medição do seu desgaste no flanco com auxílio do microscópio óptico. Após cada medição, o assento da pastilha no suporte era limpo e a pastilha era recolocada no suporte para a realização do passe de usinagem seguinte, até completar cada um dos referidos experimentos. Depois dos experimentos concluídos, todas as ferramentas foram analisadas com o objetivo de avaliar os mecanismos de desgaste ocorridos na usinagem ferro do fundido cinzento FC 250 e, para isso, foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura.

A seguir serão descritos os corpos de prova e as ferramentas utilizadas na pesquisa.

7.2. Material dos corpos de prova para a usinagem

7.2.1. Composição química e propriedades mecânicas

Os corpos de prova de ferro fundido cinzento FC 250 para esta pesquisa foram produzidos em condições de fabricação comercial pela empresa Tupy Fundições utilizando um forno de indução de média frequência. Como já mencionado anteriormente, esses corpos de prova pertencem à mesma corrida de fundição daqueles utilizados por Pereira (2010).

A composição química nominal dos corpos de prova fornecidos para a pesquisa é mostrada na Tabela 7.1.

Tabela 7.1 - Composição química (% em peso) do ferro fundido FC 250.

S	Mn	P	Cu	Sn	Ti	C	Si	Cr
0,10	0,39	0,028	0,89	0,085	0,011	3,38	1,91	0,288

Fonte: Pereira (2010).

Os valores referentes às propriedades mecânicas do material dos corpos de prova como: limite de resistência à tração e à dureza são de 275 MPa e 239 HB, respectivamente (PEREIRA, 2010).

A seguir será apresentada a caracterização da microestrutura do material dos corpos de prova realizada por Pereira (2010) em sua tese de doutorado.

7.2.2. Caracterização da microestrutura do material dos corpos de prova

A microestrutura do material dos corpos de prova é formada, predominantemente por grafita tipo A, grafita dos tipos C e E (interdendrítica), que estão randomicamente distribuídas e orientadas na matriz perlítica, Figura 7.2. A quantidade de células eutéticas por centímetro quadrado é de 134 ± 50 .

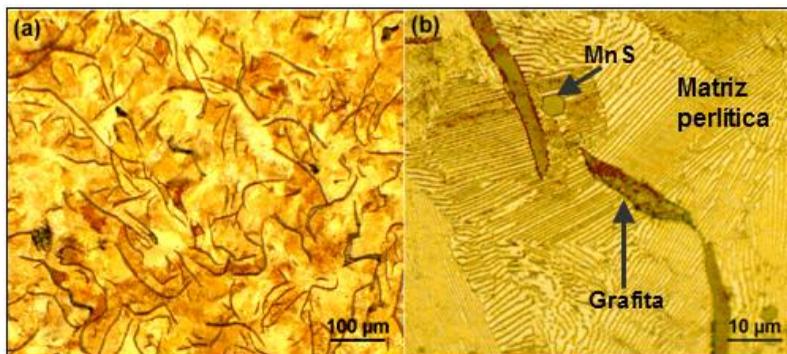


Figura 7.2 - A imagem obtida por microscopia óptica mostra a microestrutura do ferro fundido cinzento FC 250 formada por lamelas ou veios de grafita numa matriz perlítica e partículas de MnS, reagente nital.

Fonte: (PEREIRA, 2010)

O ferro fundido cinzento FC 250 usado neste trabalho de pesquisa tem 333 ± 86 grafitas/mm² e a distribuição do tamanho, isto é, do comprimento destes veios de grafita ocorre conforme mostra a Figura 7.3.

Pereira, 2010 observou no microscópio óptico e eletrônico de transmissão as inclusões de sulfeto de manganês no ferro fundido cinzento em pauta e constatou que essas inclusões presentes no material empregado neste trabalho de pesquisa, são dos tipos I e III (globular e angular respectivamente), como são exibidas na figura 7.4. Algumas inclusões do tipo TiC, Ti (C, N), também foram observadas, mas não foram investigadas mais detalhadamente.

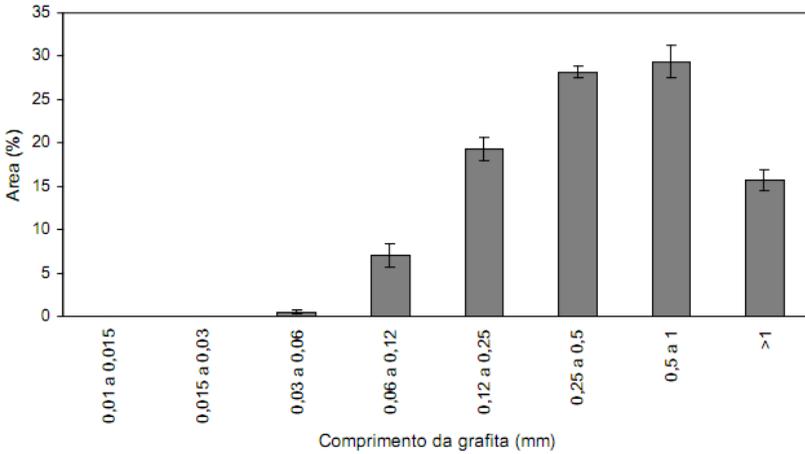


Figura 7.3 - Histograma da distribuição do comprimento dos veios de grafita.
Fonte: (PEREIRA, 2010)

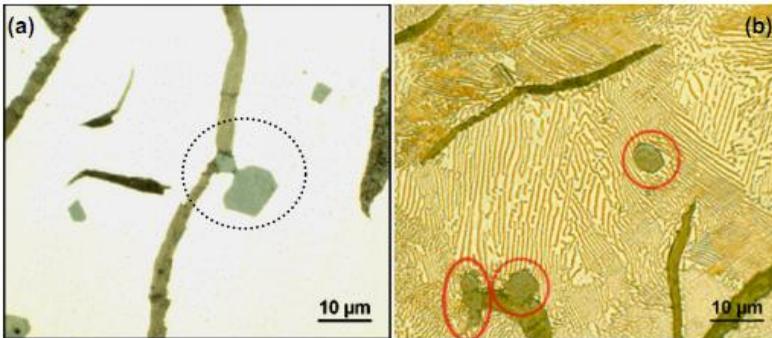


Figura 7.4 - Inclusão de sulfeto de manganês (MnS) tipos I e III presentes na matriz do ferro fundido cinzento FC 250, (a) amostra metalográfica sem ataque e (b) amostra metalográfica atacada com nital 3%. Os círculos pontilhados e vermelhos da figura indicam as inclusões de MnS.

Fonte: (PEREIRA, 2010).

Um EDS (espectrômetro de energia dispersiva) foi usado para identificar as inclusões de MnS. Os resultados da área das inclusões de MnS e a quantidade média de inclusões por milímetro quadrado encontrados por Pereira (2010) na amostra do corpo de prova são mostrados na tabela 7.2.

Tabela 7.2 - Área média e quantidade média de inclusões de MnS presentes na microestrutura do material FC 250.

	Amostra		
	1°	2°	3°
	Área média das inclusões de MnS (μmm^2)		
média	12.1	9.18	8.48
Desvio padrão	6.24	2.04	0.93
	Quantidade média de inclusões de MnS por milímetro quadrado		
média	13.5	18	11
Desvio padrão	5.07	6.06	2.16

7.2.3. Forma e dimensões dos corpos de prova

Os corpos de prova têm a forma cilíndrica com um furo passante, e uma espessura de parede de 27 mm. Com esta forma procura-se assegurar a homogeneidade microestrutural ao longo da sua seção transversal. Quanto à forma e dimensões dos corpos de prova, estas também são iguais àquelas utilizadas por Pereira (2010) e mostradas na Figura 7.5.

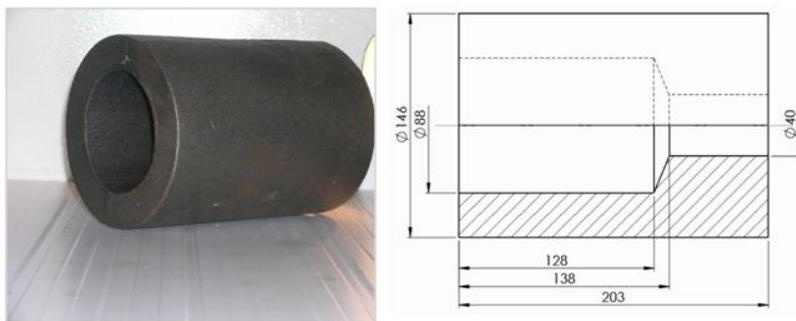


Figura 7.5 - Forma e dimensões do corpo de prova de FC 250 resultante do processo de fundição.

Devido à dificuldade de fixação do corpo de prova na máquina-ferramenta, foi necessária a construção de um componente auxiliar - um eixo (Figura 7.6) com uma parede externa em formato cônico e com porca e contraporca para fixação. Além disto, a montagem é feita com

interferência entre o corpo de prova e o eixo, tornando mais segura a fixação na máquina e a realização dos experimentos de usinagem com altas velocidades de corte.

A construção do componente auxiliar – eixo exigiu a usinagem cônica interna dos corpos de prova para um perfeito acoplamento entre ambos, e a retirada por usinagem, de 3 mm de espessura da superfície externa dos corpos de prova, para eliminar possíveis resíduos de areia de fundição, resultando na forma e dimensões nominais representadas na Figura 7.7.

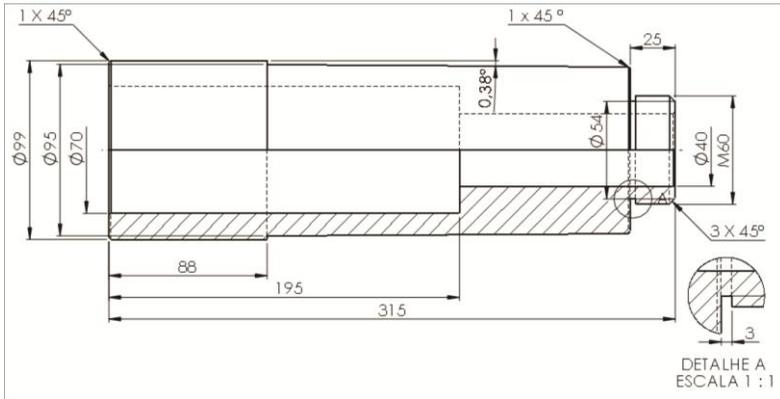


Figura 7.6 - Forma e dimensões nominais do eixo fabricado para a fixação dos corpos de prova.

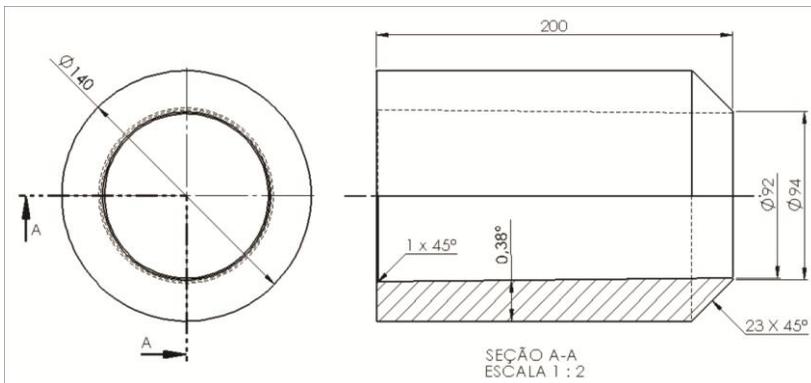


Figura 7.7 - Forma e dimensões nominais dos corpos de prova preparados para a usinagem.

Com essas adaptações realizadas, o conjunto contendo o eixo cônico, porca, contraporca e corpo de prova é mostrado na Figura 7.8. A fixação do conjunto contendo o corpo de prova na máquina de usinagem é realizada com o auxílio de uma placa do tipo universal com três castanhas, acionadas por um sistema hidráulico. A outra extremidade do conjunto permanece em balanço. Após cada passagem da ferramenta pela superfície da peça, isto é, após cada passe, a ferramenta é retirada da máquina e levada ao microscópio óptico para avaliar e medir o seu desgaste. Tal procedimento se repete até completar uma trajetória de deslocamento de 1600 mm.



Figura 7.8 - Fotografia do conjunto: corpo de prova, eixo de fixação, porca e contra porca.

7.3. Ferramentas e porta-ferramenta

Os experimentos de usinagem foram realizados com ferramentas de nitreto de silício (Si_3N_4) sem cobertura, classe 6090 com forma e dimensões especificadas pelo código SNGA 120408 T02520, na forma de insertos reversíveis fixados no porta-ferramenta DSSNR 2525 M12-2. Tanto as ferramentas de corte quanto o porta-ferramenta foram fabricados pela Empresa Sandvik Coromant. O porta-ferramenta e a ferramenta (inserto ou pastilha) utilizados nesta pesquisa são exibidos na Figura 7.9.

Os insertos utilizados na presente pesquisa não pertencem ao mesmo lote que os utilizados por Pereira (2010). Quanto ao suporte, pode-se afirmar que este tem características semelhantes ao da citada pesquisadora, sendo a sua robustez um dos pontos de destaque.



Figura 7.9 - Fotografia do porta-ferramenta DSSNR 2525 M12-2 e ferramenta (pastilha) SNGA 12 04 08 T02520 utilizadas nos experimentos de usinagem.

Nas seções seguintes deste capítulo são apresentados os equipamentos e procedimentos utilizados na análise dos resultados tanto no que tange ao desgaste das ferramentas quanto à análise da superfície usinada.

7.4. Microscopia óptica convencional para análise e medição do desgaste na ferramenta

Diferentes tipos e tecnologias de microscopia foram empregados, alguns simples e outros complexos, na investigação do desgaste das ferramentas de usinagem, isto para suprir as diferentes demandas necessárias para explicar o “possível” comportamento atípico do desgaste nessas ferramentas de usinagem.

Para observar e medir o desgaste no flanco e também a evolução do desgaste na face da ferramenta, foi utilizado um

microscópio óptico de ferramentaria do fabricante Nikon, modelo Measurescope, com resolução de 0,001 mm no deslocamento em dois eixos da mesa porta-peça. Como referência para a medição do desgaste na ferramenta foi adotada a posição original do gume principal da ferramenta de corte, ou seja, do gume sem desgaste. Esse equipamento encontra-se no laboratório do USICON-UFSC e pode ser visto na Figura 7.10.

Como já salientado anteriormente, após cada intervalo de 1600 mm de trajetória de deslocamento da ferramenta em processo de usinagem, esta era retirada cuidadosamente do torno Heynumat 10U e levada ao referido microscópio para analisar a evolução do seu desgaste na face e no flanco, assim como para efetuar a medição do desgaste no flanco. Ao completar este ciclo no citado microscópio óptico, passou-se para análises e medições no microscópio eletrônico de varredura.



Figura 7.10 - Fotografia do microscópio óptico de ferramentaria modelo measurescope do fabricante Nikon utilizado na medição do desgaste de flanco.

7.5. Microscópio eletrônico de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura foi utilizada para efetuar as análises mais avançadas e com maior resolução tanto para observar e medir os desgastes nas ferramentas quanto para observar os mecanismos responsáveis e a deposição de micro ou nanocamadas de materiais sobre as ferramentas de usinagem. Foram utilizados dois equipamentos MEV distintos, sendo um do fabricante Philips modelo XL-30 disponível no LABMAT – Laboratório de Materiais e o outro do fabricante Jeol modelo JSM 6390 LV do LCME – Laboratório Central de Microscopia e Eletrônica, ambos da Universidade Federal de Santa Catarina, Figura 7.11.

No MEV, um feixe fino de elétrons de alta energia incide na superfície da amostra, onde, ocorrendo uma interação, parte do feixe é refletido e coletado por um detector que converte esse sinal em imagem. Com o auxílio da sonda EDX que proporciona emissão de raios X, é possível obter a análise semi-qualitativa da composição química dos elementos presentes em uma região da superfície (MALISKA, 2006).

Devido à necessidade de interação do feixe eletrônico com a amostra, alguns elétrons são absorvidos pela amostra que deve conduzi-lo para o fio terra, por isso é preciso que as amostras sejam condutoras. Como no caso em questão as amostras (ferramentas de cerâmica) não são condutoras de eletricidade, para torná-las condutoras, foi necessário o recobrimento das mesmas através da deposição de íons metálicos de ouro (Au), realizado com a utilização de uma máquina metalizadora. Com esses recursos, há condições de aprofundar as investigações para caracterizar o mecanismo causador do desgaste nas ferramentas de nitreto de silício, bem como na de outros materiais.

As amostras recobertas com ouro foram colocadas na câmara de amostra do MEV e, após a formação de vácuo, foram iniciadas a observação e a medição do desgaste de flanco das ferramentas utilizadas nas velocidades de: 700, 800, 900, 1000, 1200 e 1400 m.min⁻¹.

Através do espectrômetro por energia dispersiva acoplado ao MEV foi possível realizar a microanálise química na região formada pela face, chanfro e gume das ferramentas de corte, obtendo-se assim o mapeamento dos elementos químicos desta região.

É conhecido que todas as superfícies usinadas apresentam algum tipo e “grau” de defeito, isto em relação à superfície geométrica ou “ideal”. Tais defeitos podem ser expressos pela rugosidade e/ou pela integridade da superfície usinada, como já discutido no capítulo 5. Em razão do exposto, procurou-se caracterizar esses possíveis defeitos

mediante a utilização de um rugosímetro, microdurômetro e também com a microscopia eletrônica, já descrita anteriormente. As seções seguintes tratam dos dois primeiros tipos de instrumentos e dos respectivos procedimentos de análises.



Figura 7.11 - Fotografias do MEV – Labmat modelo XL-30 do fabricante Philips e MEV – LCME modelo JSM 6390 LV do fabricante Jeol, respectivamente.

7.6. Rugosímetro e medição da rugosidade

A rugosidade existente na superfície dos corpos de prova, isto após serem submetidos ao processo de torneamento com ferramentas de nitreto de Sílício, foi determinada com um rugosímetro do tipo portátil fabricado pela Mitutoyo modelo surfstest SJ 201P, Figura 7.12, pertencente ao IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina. Este equipamento utiliza um apalpador de diamante com um raio de $5\mu\text{m}$.

Nas medições, utilizou-se um cut-off de 0,8 mm, filtro digital do tipo Gauss e foram obtidos os parâmetros R_a , R_z , e R_y . Este equipamento não permite obter o perfil de rugosidade da superfície, somente a leitura dos valores diretamente no indicador digital do equipamento.



Figura 7.12 - Fotografia do rugosímetro portátil modelo SJ 201P do fabricante Mitutoyo.

A medição da rugosidade foi realizada sobre as superfícies usinadas dos corpos de prova obtidos nas velocidades de 400, 700, 1200 e $1400\text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, na região correspondente a 100 mm da extremidade do corpo de prova, Figura 7.13. Para cada velocidade foram efetuadas sete medições, cada qual num ponto distinto em torno do diâmetro do cilindro, com o objetivo de tornar mínima a incerteza de medição.

Os corpos de prova foram apoiados em um suporte apropriado para poder fazer o giro de aproximadamente 52 graus e realizar a nova medição de um total de sete por corpo de prova, e após as medições se calcularam a média aritmética e o desvio padrão dos resultados obtidos.



Figura 7.13 - Medição da rugosidade ao longo da superfície do corpo de prova.

7.7. Microdurômetro

Após os ensaios de usinagem por torneamento, foram realizados cortes nas seções transversais dos corpos de prova e retiradas amostras para serem submetidas à medição de microdureza. O microdurômetro

modelo 100AT fabricado pela LECO, Figura 7.14, pertencente ao Laboratório de Materiais da UFSC, é dotado de um software que permite fazer um planejamento das posições nas quais serão feitas as indentações e medição da dureza.



Figura 7.14 - Fotografia do microdurômetro modelo 100 AT do fabricante Leco dotado de um indentador de diamante com formato de pirâmide quadrada com 136° entre faces.

Assim, a primeira iniciativa para a caracterização da camada interna da superfície usinada, isto com o propósito de identificar eventuais danos resultantes do processo de usinagem, foi feita com o auxílio do referido microdurômetro. Neste caso, foram utilizados corpos de prova usinados nas velocidades de 400, 700, 1200 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Desses corpos de prova as amostras foram obtidas conforme Figura 7.15, mediante o uso de uma serra manual e tomando todo o cuidado para que não ocorresse o aquecimento e a deformação da amostra, que poderiam ocasionar uma alteração nas propriedades da camada em questão e, por consequência, um erro de avaliação no que tange à integridade dessa subcamada.

Uma vez efetuada a preparação das amostras metalográficas, isto por processo de lixamento e polimento, a microestrutura foi revelada mediante a aplicação de um ataque químico pouco agressivo com reagente nital a 3%, imersão das amostras durante um tempo de aproximadamente 3 segundos. As imagens da subsuperfície das amostras foram registradas com o auxílio do microscópio óptico da

marca Nikon, que possui um sistema digital de aquisição de imagens acoplado. Com as imagens obtidas, foi possível fazer uma análise da subsuperfície do material dos corpos de prova e concluir sobre a integridade das superfícies em questão.

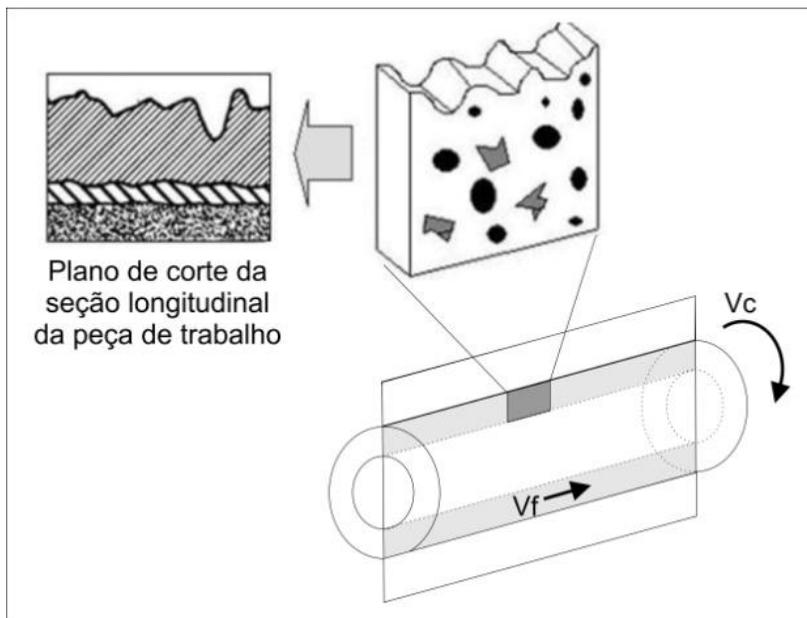


Figura 7.15 - Esquema representativo da obtenção da amostra para a avaliação da microestrutura dos corpos de prova utilizados nos experimentos de usinagem.

As já referidas amostras metalográficas foram utilizadas na medição de microdureza Vickers das camadas logo abaixo da superfície, realizada através de indentações feitas na amostra com um indentador de diamante com formato de pirâmide quadrada que tem 136° entre faces e utiliza uma carga de 300 g.

A Figura 7.16 mostra, a título de exemplo, a indentação resultante do citado penetrador e a sua respectiva forma quadrada de deformação na base da pirâmide. Os tamanhos das diagonais dessa base são utilizados para obter a dureza Vickers.

Em cada amostra foram realizadas sete medições de dureza ao longo de sua espessura, iniciando a $50\ \mu\text{m}$ da superfície externa (nível zero) e prosseguindo para os níveis de 100 , $150\ \mu\text{m}$ e assim como no centro da amostra. Durante as medições, foi tomado o cuidado para que

o indentador não atingisse os veios de grafita, o que poderia acarretar um resultado incorreto da dureza.

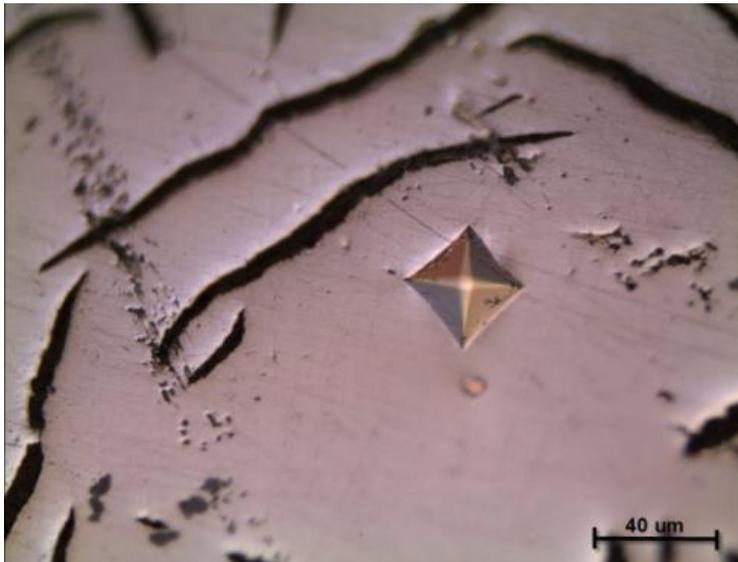


Figura 7.16 - Micrografia óptica da indentação produzida na superfície da amostra do corpo de prova para a medição de microdureza, ataque nital 3%.

Depois de realizadas todas as indentações (27 por amostra), o equipamento, que tem um microscópio acoplado, faz todas as medições das diagonais das marcas de indentações e, com o auxílio de um software, determina os valores da microdureza Vickers, fornecendo a média e o desvio padrão referentes a esses valores.

Portanto, ao finalizar a apresentação dos equipamentos, materiais e métodos utilizados e considerando que estes foram apropriadamente detalhados, para o bom entendimento por parte do leitor, o capítulo seguinte se ocupa com a apresentação e discussão dos resultados desta pesquisa. Com tais resultados, pretende-se caracterizar os tipos de desgastes nas ferramentas e a evolução destes com o tempo de usinagem, como também identificar os fatores responsáveis e eventual aderência de material da peça na face e ou no flanco da ferramenta. Tais resultados deverão contribuir para confirmar ou negar o comportamento “atípico” do desgaste das ferramentas de usinagem, como já reportado no capítulo 6, itens 6.2, 6.3 e 6.4.

8. RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão inicialmente exibidos e discutidos os resultados obtidos em relação aos ensaios de usinagem, de curta e longa duração, pelo processo de torneamento externo longitudinal do ferro fundido cinzento FC 250 com ferramentas de cerâmicas à base de Si_3N_4 em velocidades de corte entre 400 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Na parte final e complementando esses primeiros grupos de resultados, serão apresentados e comentados resultados pertinentes à textura e integridade das superfícies usinadas nessa ampla gama de velocidades de corte. No que concerne à textura, buscar-se-á caracterizá-la mediante a utilização de parâmetros verticais de rugosidade como R_a , R_y e R_z . Por sua vez, a integridade da subsuperfície (camada interna) será analisada com base na alteração da microdureza, da deformação plástica e/ou eventuais alterações de outra natureza.

8.1. Experimentos de usinagem de curta duração do FC 250

Uma vez feitos estes esclarecimentos preliminares, na sequência passa-se a apresentar e discutir os respectivos resultados. Inicialmente, a Figura 8.1 mostra o comportamento do desgaste das ferramentas de usinagem, isto no que se refere aos resultados da presente pesquisa e quanto àqueles obtidos por Pereira (2010), lembrando que foram realizados dois ensaios para cada velocidade de corte que estão indicados com os número 1 e 2.

Conforme já mencionado na introdução, este trabalho é uma extensão da pesquisa realizada por Pereira (2010). Dessa maneira, os resultados referentes ao intervalo compreendido pelas velocidades de corte de 300 a 700 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, apresentados na Figura 8.1, foram obtidos no trabalho da referida pesquisadora. Tanto na pesquisa realizada por Pereira (2010) quanto nesta dissertação, os valores do avanço e da profundidade de corte foram mantidos constantes em 0,2 mm e 2 mm, respectivamente. Também foi utilizado o mesmo critério de 1600 mm de comprimento usinado, isto é, a trajetória percorrida pela ferramenta, para finalizar cada um dos experimentos nas velocidades de 700, 800, 900, 1000, 1200 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Nessa série de experimentos de curta duração, procurou-se tomar os cuidados necessários para seguir com rigor os mesmos procedimentos, métodos e materiais adotados por Pereira (2010), excetuando-se a questão da máquina-ferramenta, que, no caso desta

pesquisa, é mais robusta, possui maior potência e, em decorrência disto, permitiu usar com velocidades muito superiores àquelas utilizadas por Pereira (2010).

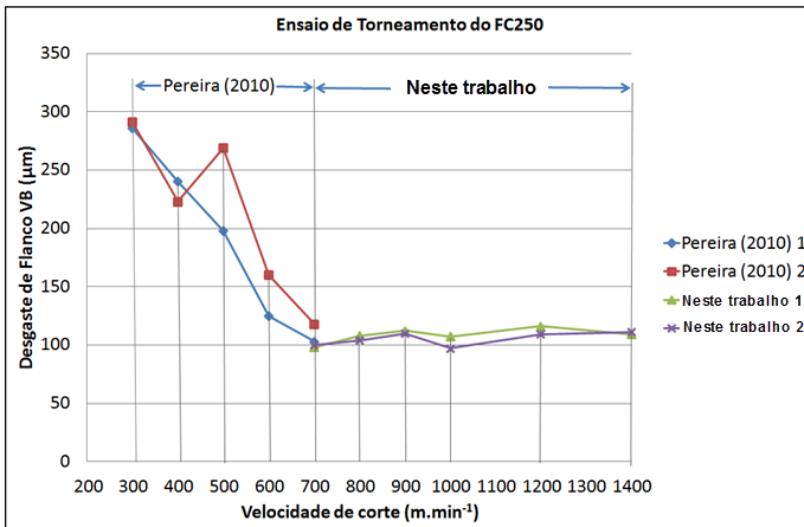


Figura 8.1 - Desgaste de flanco em função da velocidade de corte ($a_p = 2$ mm, $f = 0,2$ mm, ferramentas de nitreto de silício, comprimento usinado de 1600 mm) para os ensaios 1 e 2.

Considera-se que tais cuidados são essenciais tanto para comprovar os resultados da pesquisa anterior quanto para obter confiabilidade nos resultados em condições de trabalho ainda mais severas, como na presente pesquisa.

O conjunto de imagens que compoem a Figura 8.2 tem a finalidade de ratificar os valores de desgastes nos flancos das ferramentas, utilizados para construir o gráfico da Figura 8.1, bem como mostrar a uniformidade desses pequenos desgastes e também a presença de resíduos do material da peça e do cavaco, isto imediatamente abaixo à marca do desgaste de flanco.

Duas regiões, com comportamento bem distinto em termos de desgaste das ferramentas, são observadas na Figura 8.1, quais sejam:

- Redução do desgaste das ferramentas com o aumento da velocidade de corte, no intervalo compreendido entre 300 e 700

m.min⁻¹, conforme obtido, apresentado e discutido no trabalho de Pereira (2010);

- Variação, isto é, aumento não significativo do desgaste de flanco com o aumento da velocidade de corte, no intervalo compreendido entre 700 e 1400 m.min⁻¹, resultados estes obtidos na presente pesquisa.

A redução do desgaste de flanco da ferramenta com o aumento da velocidade de corte, resultado apresentado e discutido por Pereira (2010), de certo modo também já havia sido reportado na literatura, conforme mostrado nos itens 6.2, 6.3 e 6.4 da revisão bibliográfica deste trabalho.

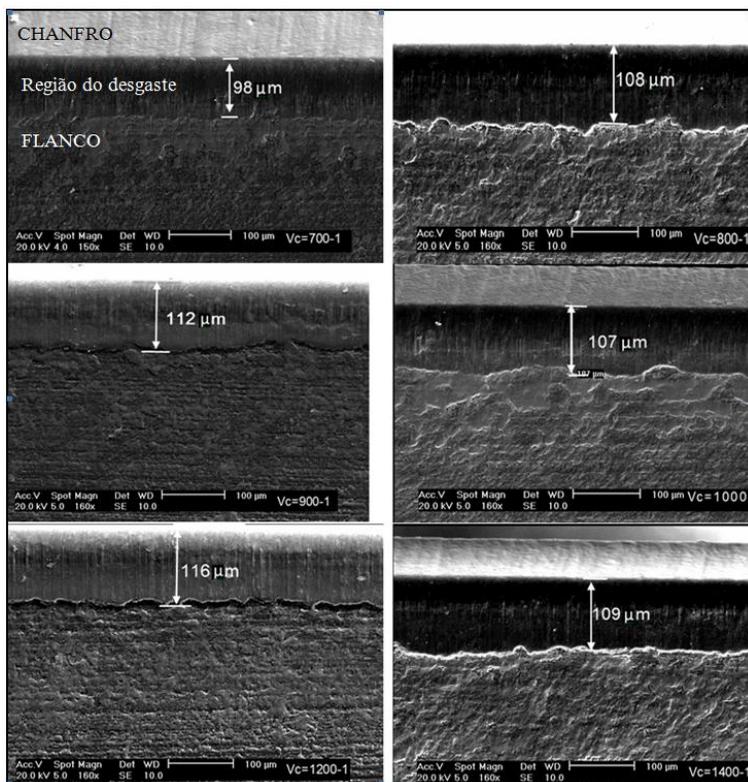


Figura 8.2 - Micrografias (MEV) do desgaste no flanco (V_B) das ferramentas utilizadas nas velocidades de corte de 700 a 1400 m.min⁻¹, mostrando a região correspondente ao chanfro, região do desgaste (medida do desgaste de flanco) e flanco da ferramenta utilizada nos experimentos (ensaio 1), aumento de 160x.

Portanto, considera-se uma contribuição muito valiosa a constatação nesta pesquisa da insignificante alteração do desgaste das ferramentas no intervalo entre 700 e 1400 m.min⁻¹, isto baseado em resultados de experimentos realizados duas vezes criteriosamente nas mesmas condições. Entende-se que tal fato é mais uma evidência da efetiva existência do “comportamento atípico” do desgaste das ferramentas de usinagem, como também já reportado por outros pesquisadores (YAMANE, 1990; REUTER, SCHULZ, MACDONALD, 1999; PEREIRA, 2010), quando da usinagem do ferro fundido cinzento com significativa quantidade de sulfetos de manganês.

Em experimentos de usinagem semelhante aos desta pesquisa realizados por Sahn *et. al.* (2002), Figura 6.8, os pesquisadores obtiveram uma inflexão na curva que representa os resultados, isto a 800 m.min⁻¹, velocidade esta que corresponde ao menor comprimento usinado para o critério de interrupção dos experimentos que foi utilizado por aqueles pesquisadores. Para velocidades maiores, eles encontraram um aumento e também diminuição desse comprimento usinado, isto para o mesmo critério de parada dos experimentos.

Com o propósito de encontrar justificativas para tal “comportamento atípico”, procurou-se aprofundar a análise do desgaste das ferramentas, desta feita mediante a utilização da microscopia eletrônica de varredura e da sonda EDS para identificar a presença ou não, na face ou no flanco das ferramentas, de micro ou nanocamadas de materiais e respectivos elementos químicos que possam contribuir para explicar tal comportamento. Assim, as Figuras 8.3 a 8.11 tratam dessa análise nas ferramentas, isto para as velocidades de 700, 1200 e 1400 m.min⁻¹. Nessa análise, considerou-se suficientemente representativo utilizar apenas as três velocidades referidas, sendo uma do limite inferior, uma intermediária, e uma do limite superior do campo de trabalho. Com isto também houve uma redução de custos com os experimentos sem comprometer a validade dos resultados. Outro fato relevante a destacar para aumentar a confiabilidade e facilitar a comparação dos resultados é a escolha das posições nas ferramentas em que foram gerados os mapas de composição química, ou seja, na face, no chanfro existente entre o flanco e a face, bem como no próprio flanco. Estas também foram as escolhas feitas por Pereira (2010).

A Figura 8.3 aponta tais regiões na ferramenta, por sua vez, a Figura 8.4 mostra os mapas com as distribuições dos elementos químicos nas citadas regiões obtidas por MEV e a Figura 8.5, o respectivo espectro dessa composição química feita por EDS, isto para velocidades de corte de 700 m.min⁻¹. Análises semelhantes foram

realizadas para as velocidades de corte de $1200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, Figuras 8.6, 8.7 e 8.8 e para $1400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ nas Figuras 8.9, 8.10 e 8.11. Tais resultados serão discutidos a seguir.

Primeiro, cabe auxiliar o leitor na interpretação dos mapas com a distribuição dos elementos químicos presentes nas superfícies das ferramentas, Figuras 8.4, 8.7 e 8.10.

Em tais mapas, é possível observar os elementos químicos presentes e a concentração destes elementos em uma determinada região escolhida. No caso em questão, a região escolhida é a região formada pelo flanco, gume e face da ferramenta de corte. Os elementos presentes nesses mapas são: Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O, representados por uma determinada cor, exemplo na Figura 8.4.

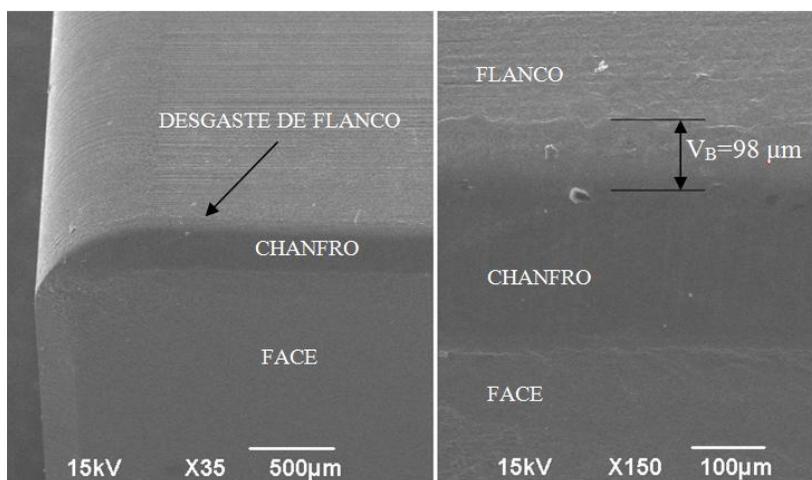


Figura 8.3 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, com aumento de 35x e 150x, respectivamente.

Portanto, na superfície da ferramenta que foi empregada na usinagem a $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, verifica-se um expressivo acúmulo de enxofre e manganês na região do gume da ferramenta (região entre o flanco e a face), indicando fortemente que as inclusões de MnS , presentes no material da peça, aderiram à ferramenta de corte na citada região. Nesta mesma região, observa-se também uma alta concentração de alumínio e de oxigênio, como aponta o espectro mostrado na Figura 8.5, evidenciando os elementos Si, N, O e Al que são considerados oriundos

do material da ferramenta de corte. Embora exista um erro associado à quantificação do elemento oxigênio pelo EDS, pode-se sugerir que o alumínio encontra-se presente no gume da ferramenta na forma de Al_2O_3 . Portanto, esta constatação descrita é de grande relevância e é convergente com os resultados apresentados por Pereira (2010) para usinagem do ferro fundido cinzento a $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Assim, tais resultados da presente pesquisa colaboram com a proposta de que o alumínio no material da ferramenta de corte ocupa um papel de destaque na manutenção das inclusões de MnS no gume da ferramenta, reduzindo assim o desgaste da ferramenta.

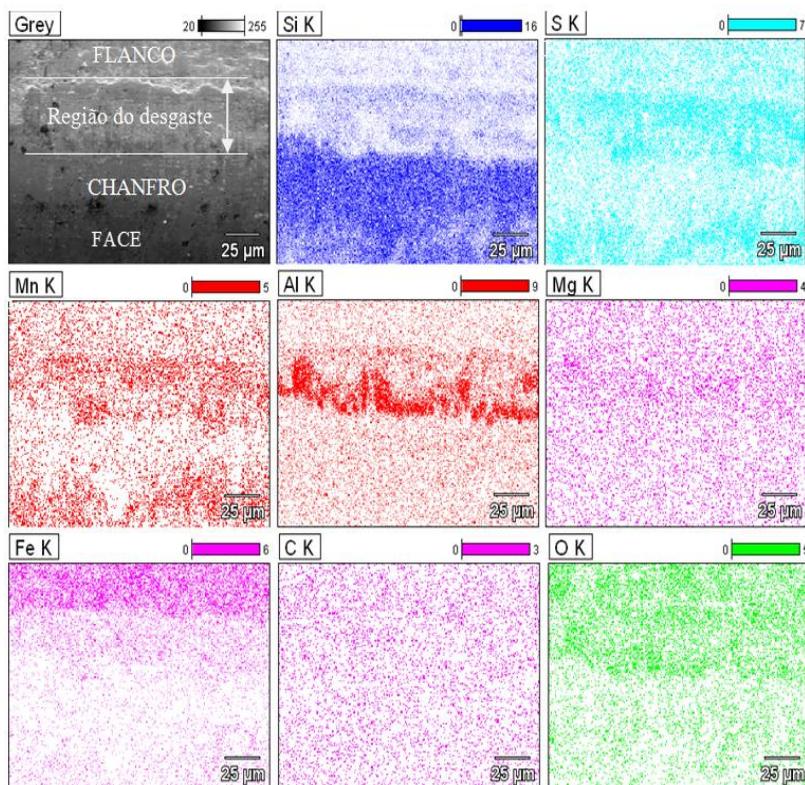


Figura 8.4 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de curta duração à $v_c = 700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

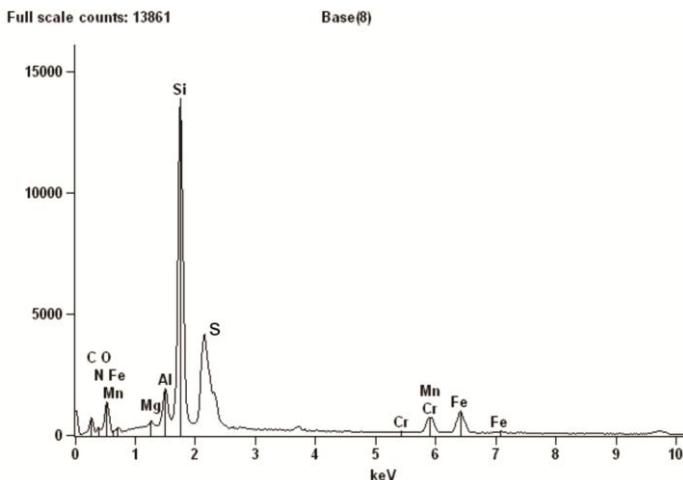


Figura 8.5 - Espectro da composição química obtida na superfície da ferramenta utilizada na $v_c = 700 \text{ m.min}^{-1}$, com destaque para os elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O).

Na usinagem a 1200 m.min^{-1} , a distribuição dos elementos químicos na superfície da ferramenta, Figura 8.7, é semelhante ao observado nos mapas de composição da ferramenta empregada na usinagem a 700 m.min^{-1} , Figura 8.4, as marcas do desgaste das ferramentas são praticamente as mesmas da Figura 8.6 e o espectro da composição mostrado na Figura 8.8 é semelhante ao mostrado na Figura 8.5.

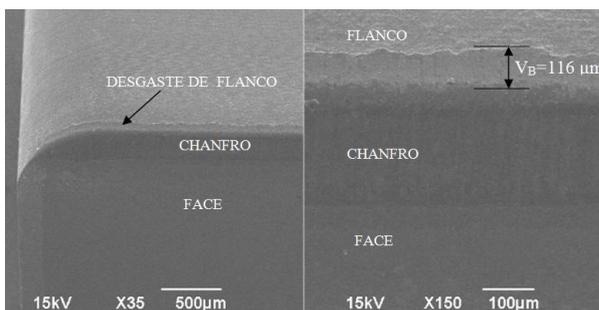


Figura 8.6 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 1200 m.min^{-1} , com aumento de 35x e 150x, respectivamente.

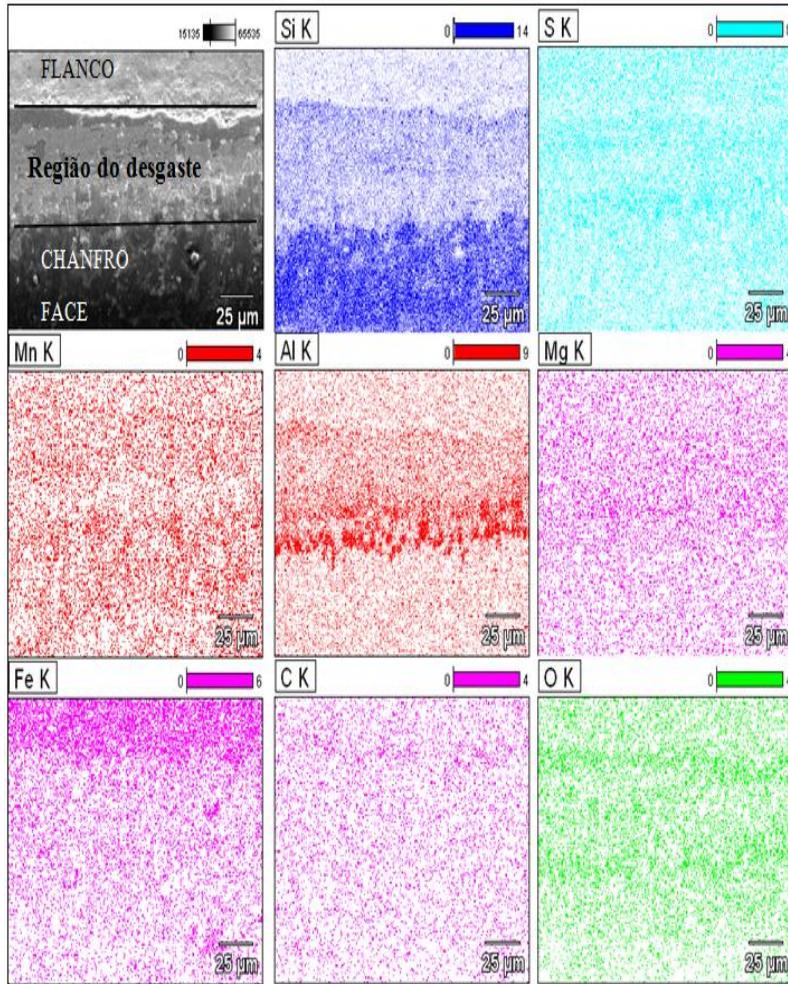


Figura 8.7 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de curta duração à $v_c = 1200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

A distribuição dos elementos químicos na superfície da ferramenta empregada na usinagem a $1400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ (Figura 8.10) é semelhante ao apresentado na superfície das ferramentas usadas na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 a 700 e $1200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, Figuras 8.4 e 8.7, respectivamente, também são semelhantes à marca do

desgaste de flanco e o espectro da composição química obtida no flanco da ferramenta utilizada a 1400 m.min^{-1} , como podem ser vistos nas Figuras 8.9 e 8.11, respectivamente.

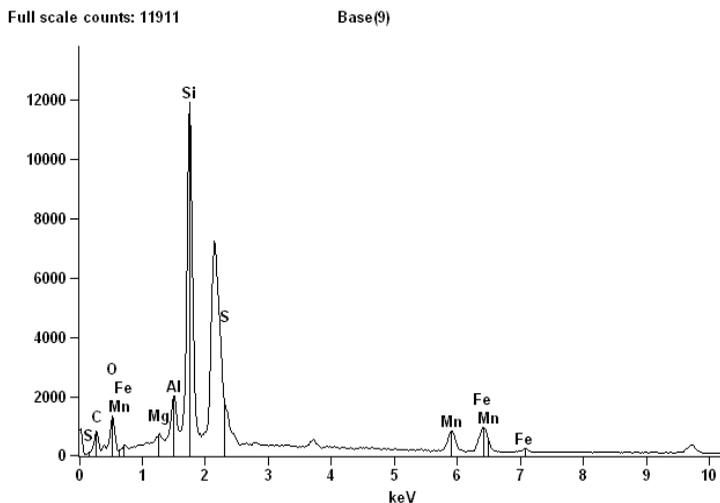


Figura 8.8 - Espectro da composição química obtida na superfície da ferramenta utilizada na $v_c = 1200 \text{ m.min}^{-1}$, com destaque para os elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O).

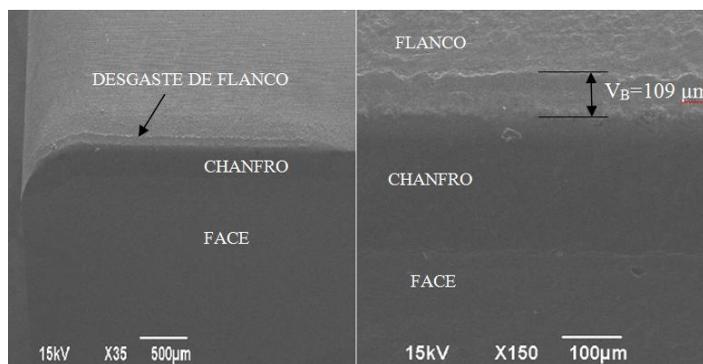


Figura 8.9 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 1400 m.min^{-1} , com aumento de 35x e 150x, respectivamente.

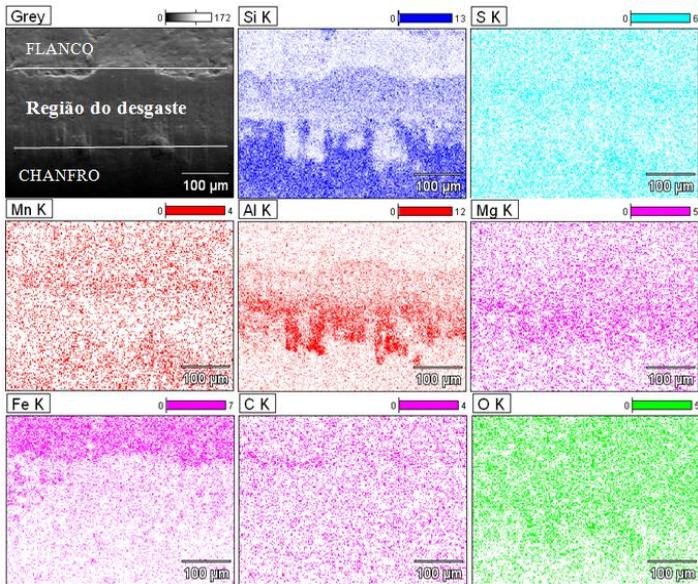


Figura 8.10 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício(Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de curta duração à $v_c = 1400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

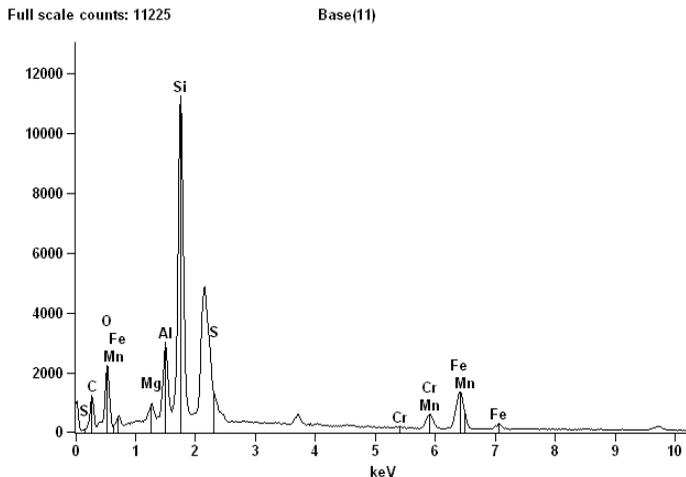


Figura 8.11 - Espectro da composição química obtida na superfície da ferramenta utilizada na $v_c = 1400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, com destaque para os elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O).

Constatou-se, na usinagem a 700, 1200 e 1400 m.min⁻¹, que os mapas de composição são muito semelhantes. Há um acúmulo de enxofre e manganês no gume da ferramenta indicando que a inclusão de MnS, presente no material da peça, aderiu à ferramenta de corte. Nesta mesma região é observada uma alta concentração de alumínio e de oxigênio. Apesar do erro associado à quantificação do elemento oxigênio pelo EDS, pode-se sugerir que o alumínio se encontra no gume da ferramenta na forma de Al₂O₃. Estes resultados são convergentes com os valores obtidos para o desgaste de flanco nas velocidades mencionadas, vistos nas imagens mostradas na Figura 8.2.

No trabalho desenvolvido por Pereira (2010), foi verificado que a manutenção das inclusões de MnS no gume da ferramenta dependia, necessariamente, da presença do alumínio (proveniente do elemento de sinterização usado na fabricação da ferramenta) na mesma região. Demonstrou-se, no referido trabalho, que, na baixa velocidade de corte, não havia acúmulo de MnS no gume, pois não havia alta concentração de alumínio nesta região.

Os experimentos de curta duração citados anteriormente, realizados com velocidades de corte de 700, 800, 900, 1000, 1200 e 1400 m.min⁻¹, foram complementados com experimentos de usinagem de longa duração com a mesma ferramenta e velocidades de corte de 400 e 1200 m.min⁻¹. O objetivo de tais experimentos de longa duração foi constatar se, em tempos longos de usinagem do ferro fundido cinzento com ferramentas de nitreto de silício, estas também apresentam um menor desgaste na medida em que se aumenta a velocidade de corte. Os resultados dos referidos experimentos são a seguir apresentados e discutidos.

8.2. Experimentos de usinagem de longa duração do FC 250

Na Figura 8.12, são mostrados os resultados dos experimentos. Tais experimentos de usinagem considerados de longa duração foram realizados a velocidades de 400 e 1200 m.min⁻¹, mantendo-se constantes o avanço e a profundidade de corte de 0,2 mm e 2 mm, respectivamente. Portanto, neste caso, aumentou-se o tempo de contato da ferramenta com o material da peça e procurou-se determinar o comportamento do desgaste da ferramenta nessa condição. Devido à limitação na quantidade de material, foi adotado como critério de vida da ferramenta um desgaste da ordem de 240 μm no flanco. Os resultados desses experimentos são exibidos na Figura 8.12.

Ao serem observadas as curvas de evolução do desgaste no flanco das ferramentas de corte (Figura 8.12), constata-se que, na velocidade de $400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, o mencionado critério de vida foi atingido com um comprimento usinado de 4800 mm, enquanto que, para a velocidade de $1200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, o desgaste no flanco da ferramenta era de apenas $130 \mu\text{m}$, para um comprimento usinado de 9600 mm, ou seja, o dobro do comprimento usinado e aproximadamente a metade do desgaste de flanco obtido com a velocidade de $400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Portanto, também nestes experimentos de longa duração se confirma o importante fato de que, para a combinação de materiais peça-ferramenta em questão, obtém-se uma maior taxa de desgaste no flanco, isto é, uma maior intensidade do desgaste da ferramenta para menores velocidades de corte.

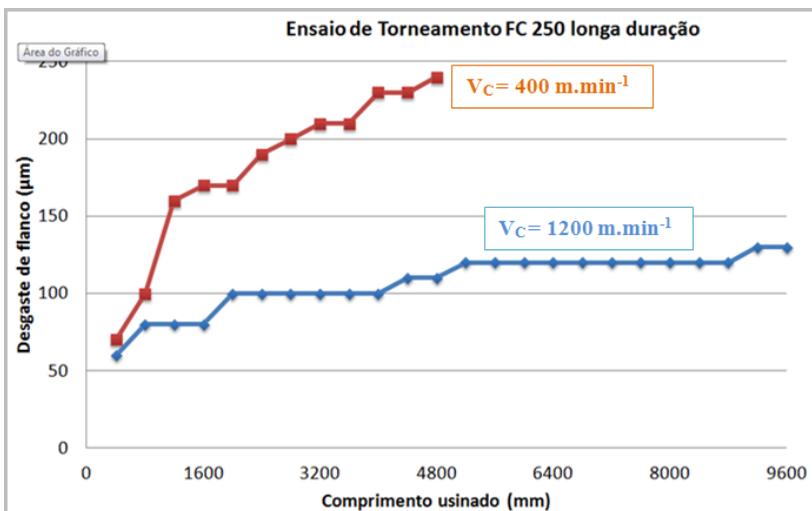


Figura 8.12 - Curvas do desgaste de flanco em função do comprimento usinado, ($a_p = 2 \text{ mm}$, $f = 0,2 \text{ mm}$, ferramentas de nitreto de silício).

Assim, considerando que a taxa de remoção de material da peça na velocidade de corte a $400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ é de $160 \text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ e a taxa de remoção a $1200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ é de $480 \text{ cm}^3\cdot\text{min}^{-1}$, em um comprimento usinado de 4800 mm, ter-se-á uma remoção de material três vezes maior com um desgaste de flanco da ferramenta 50 % menor, como mostra a Figura 8.13.

Da análise das imagens das ferramentas e dos mapas de distribuição dos elementos químicos obtidos com o microscópio eletrônico de varredura (MEV), pode-se dizer que o mecanismo de desgaste predominante nas ferramentas é o de abrasão. A seguir são mostradas essas imagens de MEV das ferramentas e os mapas de distribuição dos elementos químicos.

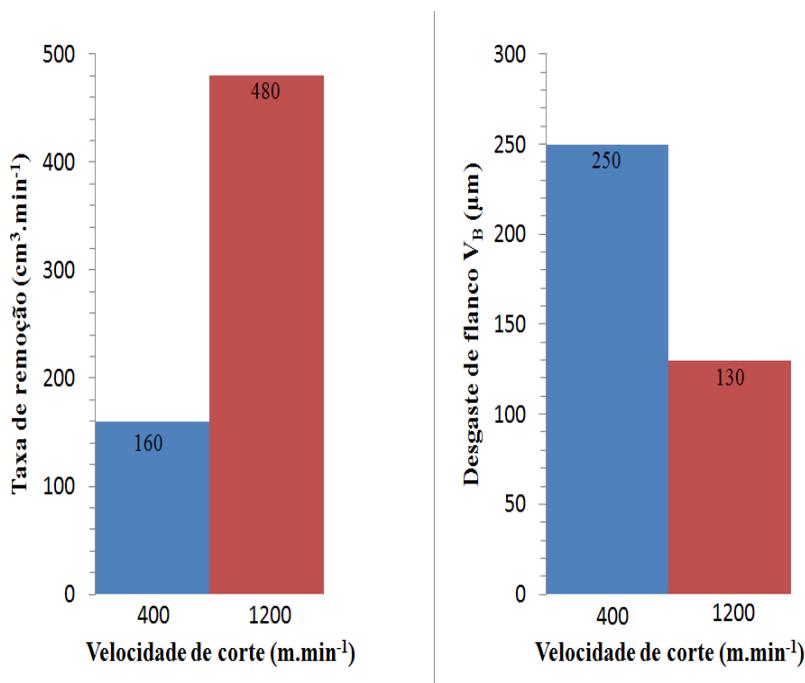


Figura 8.13 - Valores de taxa de remoção de material da peça e desgaste de flanco em função da velocidade referente ao experimento de longa duração.

Na Figura 8.14, pode-se notar que o mecanismo de desgaste por abrasão proporcionou um desgaste de flanco mais acentuado a 400 m.min⁻¹ do que a 1200 m.min⁻¹ (Figura 8.16) e não uniforme, ou seja, à medida que se aproxima do raio de quina da ferramenta, esse desgaste de flanco se torna maior, tendo o seu tamanho máximo sobre o raio de quina da ferramenta. Com a observação do mapa da distribuição dos elementos químicos da Figura 8.15, pode-se sugerir que tal comportamento é devido à pequena camada de alumínio e manganês formada na região em questão.

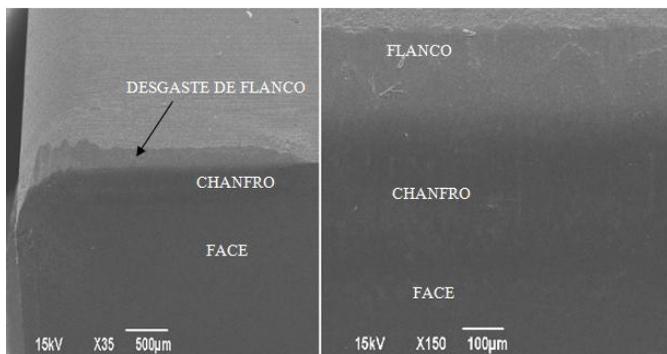


Figura 8.14 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 400 m.min⁻¹, com aumento de 35x e 150x, respectivamente (ensaio de longa duração).

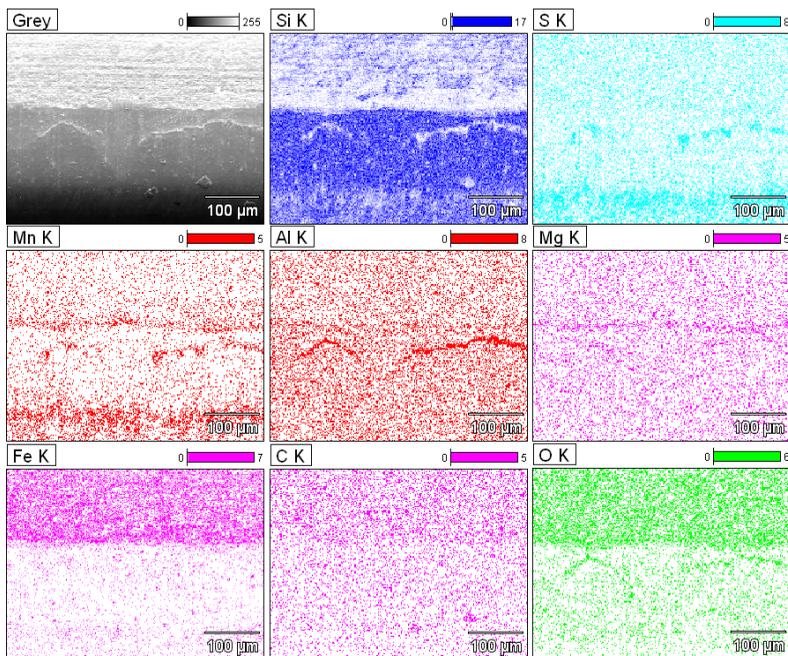


Figura 8.15 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de longa duração à $v_c = 400$ m.min⁻¹.

Por sua vez, na Figura 8.17, constata-se que há uma maior concentração de alumínio e manganês na região do gume da ferramenta de nitreto de silício, tornando a marca do desgaste no flanco da ferramenta utilizada a 1200 m.min^{-1} (Figura 8.16) aproximadamente 50% menor comparada com o desgaste no flanco da ferramenta utilizada à velocidade de 400 m.min^{-1} (Figura 8.14). Além disso, na ferramenta utilizada à velocidade de 1200 m.min^{-1} , a marca de desgaste é mais uniforme em toda a extensão da região de desgaste da ferramenta, inclusive no raio de quina.

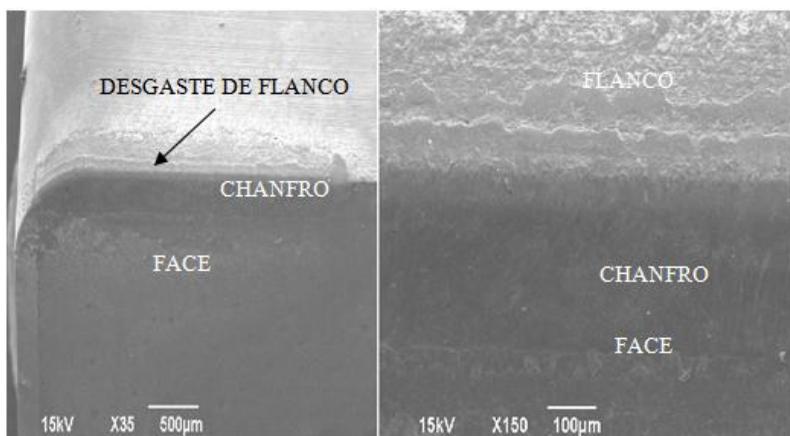


Figura 8.16 - Micrografia (MEV) mostrando as regiões correspondentes ao desgaste no flanco (V_B), chanfro e face da ferramenta utilizada à velocidade de 1200 m.min^{-1} , com aumento de 35x e 150x, respectivamente (ensaio de longa duração).

Portanto, destaca-se que os resultados obtidos nesta pesquisa com a usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 utilizando ferramentas de nitreto de silício, em velocidades de 400 a 700 m.min^{-1} , estão de acordo com aqueles resultados obtidos por Pereira (2010), ou seja, com o aumento da velocidade de corte na usinagem do referido ferro fundido cinzento, ocorre uma diminuição do desgaste no flanco da ferramenta. Nas velocidades de corte acima de 700 m.min^{-1} , esse desgaste constante no flanco das ferramentas tem-se mostrado praticamente constante.

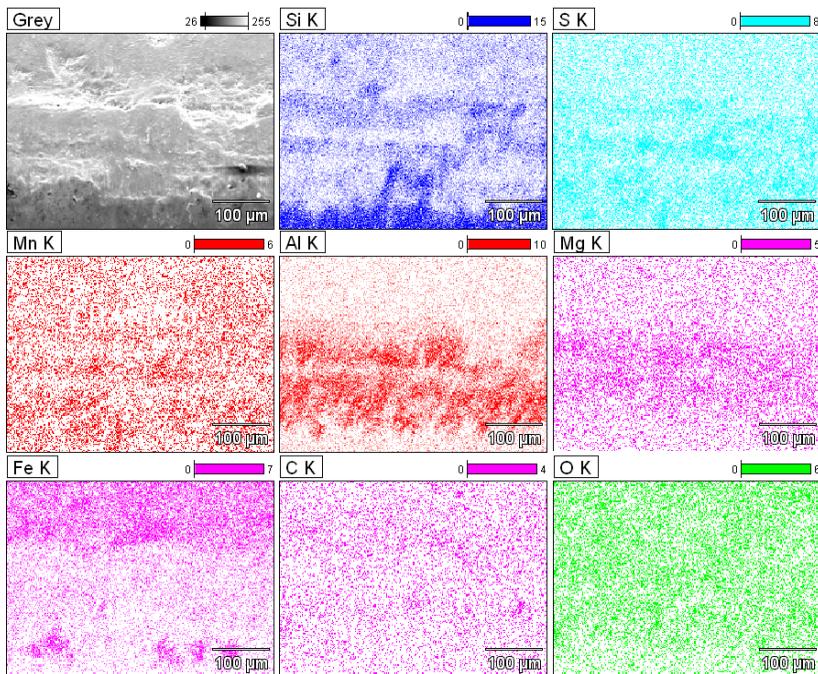


Figura 8.17 - Distribuição dos elementos químicos (Si, S, Mn, Al, Mg, Fe, C e O) nas superfícies da ferramenta de nitreto de silício (Si_3N_4) usada na usinagem do ferro fundido FC 250 em ensaio de longa duração à $v_c = 1200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

Além da questão desgaste da ferramenta, há outros fatores importantes a considerar na usinagem dos materiais, dentre os quais a qualidade da superfície usinada, especialmente no que diz respeito à textura e a sua integridade. Como no processo de torneamento existe uma forte ação mecânica, química e térmica na superfície resultante (superfície usinada), há um risco de que a superfície da peça possa estar com a sua qualidade comprometida e assim o seu desempenho e durabilidade ficarem aquém do desejado. Em razão disto, entende-se que nesta pesquisa a preocupação com tais aspectos relacionados com a qualidade da superfície usinada deve ser ainda maior, tendo em vista a utilização das altas velocidades de corte e também a pouca informação disponível a respeito desse relevante tema. Assim, as próximas seções deste capítulo tratam da análise da textura e da integridade das superfícies usinadas presentes nos corpos de prova obtidos nas diferentes velocidades de corte, entre 400 e $1400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$.

8.3. Avaliação da textura e da integridade da superfície usinada

Para analisar a textura e a integridade da superfície usinada, serão utilizados diferentes tipos de equipamentos e métodos, como: avaliação metalográfica em microscopia óptica e eletrônica de varredura, medição de microdureza Vickers nas camadas da subsuperfície e medições da rugosidade com auxílio de um rugosímetro com apalpador tipo estilete de diamante, como já reportado no capítulo 4. A seguir serão apresentados os resultados referentes à textura, isto é, a rugosidade da superfície.

8.3.1. Textura - rugosidade da superfície usinada

Como é conhecido, existe um conjunto de fatores que tem influência sobre a textura e a integridade da superfície de uma peça usinada: o processo de fabricação; a geometria da ferramenta, especialmente o seu raio de quina; a microestrutura e a composição química do material da peça; o desgaste da ferramenta de corte; os parâmetros de corte, com destaque para o avanço e a velocidade de corte e a instabilidade da máquina-ferramenta.

As medições de rugosidades foram realizadas em laboratório utilizando temperatura controlada. Nesta pesquisa foram medidos os parâmetros: R_a , R_y e R_z . Os resultados de rugosidade para cada velocidade de corte estão exibidos nas Figuras 8.18, 8.19 e 8.20. No apêndice A, estão listados os resultados das medições na íntegra juntamente com os valores médios das medições e seus respectivos desvios padrões.

Os valores principais das rugosidades dos corpos de prova obtidos na usinagem do ferro fundido cinzento FC250, com ferramentas de nitreto de silício (Si_3N_4) e raio de quina de 0,8 mm em velocidades de 400, 700, 1200 e 1400 $m.min^{-1}$, mantendo-se constantes o avanço e a profundidade em 0,2 mm e 2 mm respectivamente e um comprimento usinado de 1600 mm, são apresentados nas Figuras 8.18, 8.19 e 8.20.

Os valores de cada parâmetro de rugosidade apontados nas Figuras 8.18, 8.19 e 8.20 mostram uma diminuição da rugosidade para crescentes velocidades de corte, sendo que esse comportamento é o mesmo para todos os parâmetros de rugosidades analisados. Tal comportamento da rugosidade está de acordo com a literatura e já foi demonstrado por vários pesquisadores que a rugosidade da superfície está diretamente relacionada com o raio de quina da ferramenta de corte

e com o avanço desta (BOEHS, 1999; MACHADO; SILVA, 2004; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

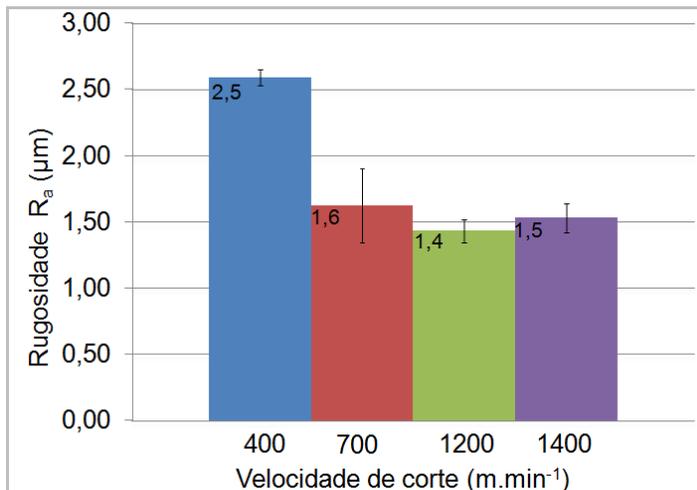


Figura 8.18 - Valores de rugosidade, parâmetro R_a em função da velocidade de corte.

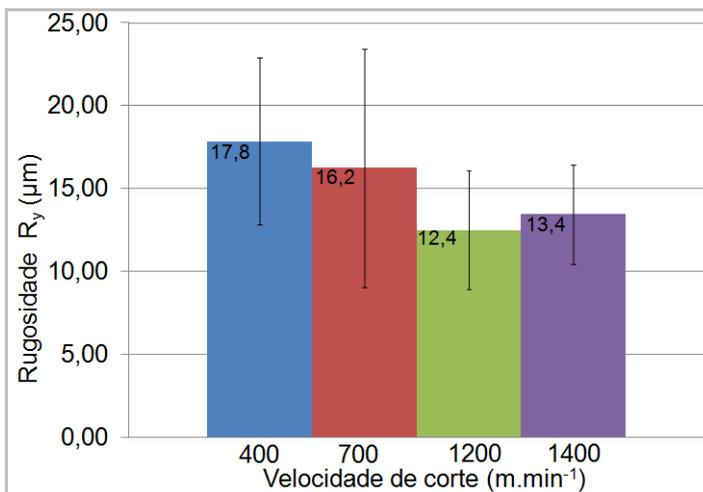


Figura 8.19 - Valores de rugosidade, parâmetro R_y em função da velocidade de corte.

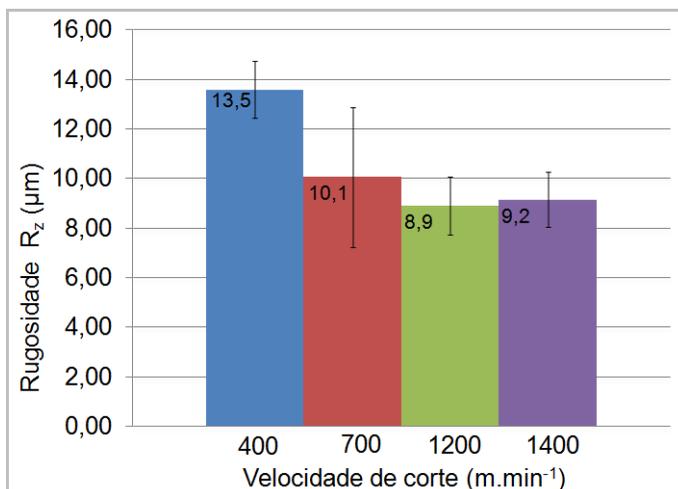


Figura 8.20 - Valores de rugosidade, parâmetro R_z em função da velocidade de corte.

Voltando a observar as Figuras 8.18, 8.19 e 8.20, nota-se que, na velocidade de 1400 m.min^{-1} , ocorreu uma pequena variação das rugosidades para maior, contrariando o que aconteceu em velocidades menores. Tal oscilação para mais surge devido à ocorrência de vibração do corpo de prova, consequência do dispositivo de fixação do mesmo não ser o adequado para esse valor de velocidade de corte. A fixação não foi adequada em virtude de problemas de ordem técnica com o contraponto da máquina impedindo o uso do mesmo na fixação dos corpos de prova.

Segundo Diniz, Marcondes e Coppini (2003), o fenômeno que pode explicar a oscilação da rugosidade com o aumento da velocidade de corte é a resposta que o sistema máquina-peça-ferramenta-dispositivo de fixação proporciona, em termos de vibrações com o aumento da velocidade de corte.

Assim, se outro sistema de fixação mais adequado para a peça tivesse sido utilizado, fato este que, por razões técnicas, não foi possível na ocasião, possivelmente as vibrações no momento da utilização da velocidade de 1400 m.min^{-1} não teriam ocorrido e, por consequência, teria também a rugosidade seguido a mesma tendência de queda como ocorreu na faixa de velocidades de corte entre 400 e 1200 m.min^{-1} .

Mediante o uso de microscopia eletrônica de varredura, foram obtidas imagens com ampliação de 50X, 250X e 1000X da textura da

superfície usinada nos ensaios de curta duração em velocidades de 400 a 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, imagens essas que estão dispostas a seguir nas Figuras 8.21 a 8.24, nas quais se pode verificar os diferentes aspectos da superfície.

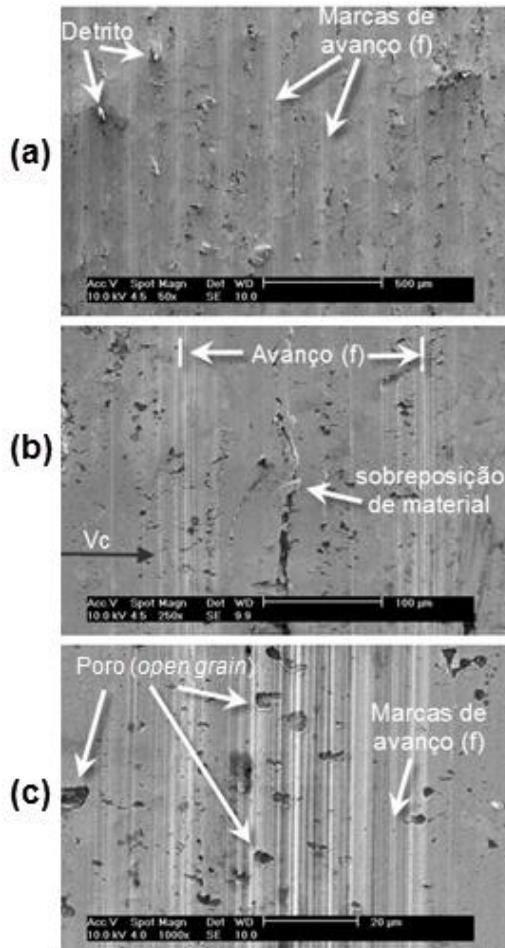


Figura 8.21 - Micrografia (MEV) da topografia da superfície do corpo de prova usinada à $v_c = 400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, mostrando: em (a) com ampliação de 50x detrito, marcas de avanço, em (b) com ampliação de 250x sobreposição de material e em (c) com ampliação de 1000x a presença de poros (*Open grain*) e marcas de avanço.

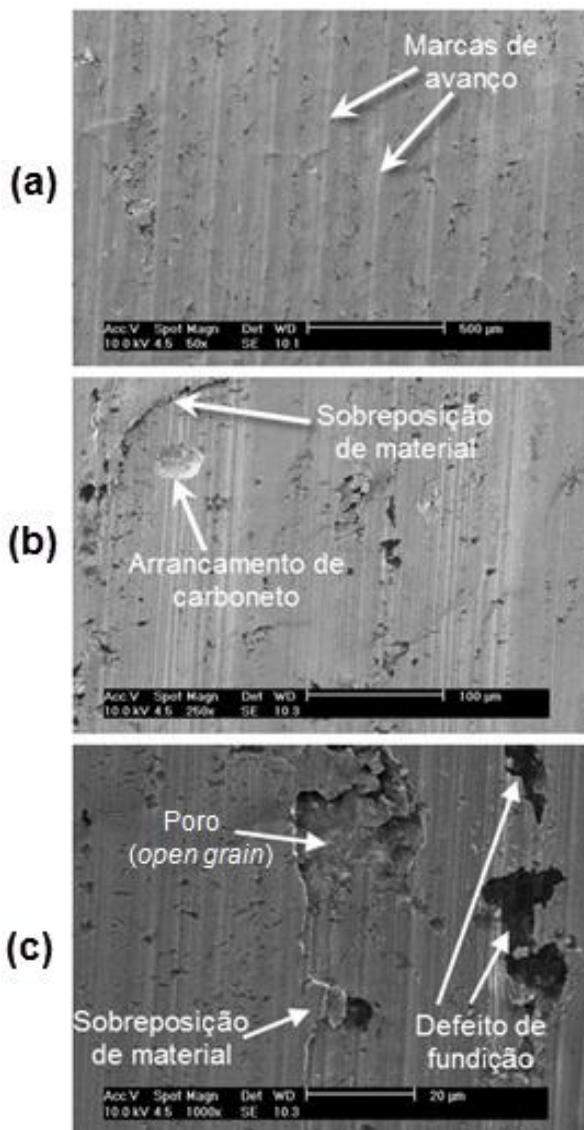


Figura 8.22 - Micrografia (MEV) da topografia da superfície do corpo de prova usinada à $v_c = 700 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$, mostrando em: (a) com ampliação de 50x marcas de avanço, (b) com ampliação de 250x sobreposição de material, marcas de arrancamento de carbonetos e (c) com ampliação de 1000x a presença de poros (*Open grain*), sobreposição de material e defeitos de fundição.

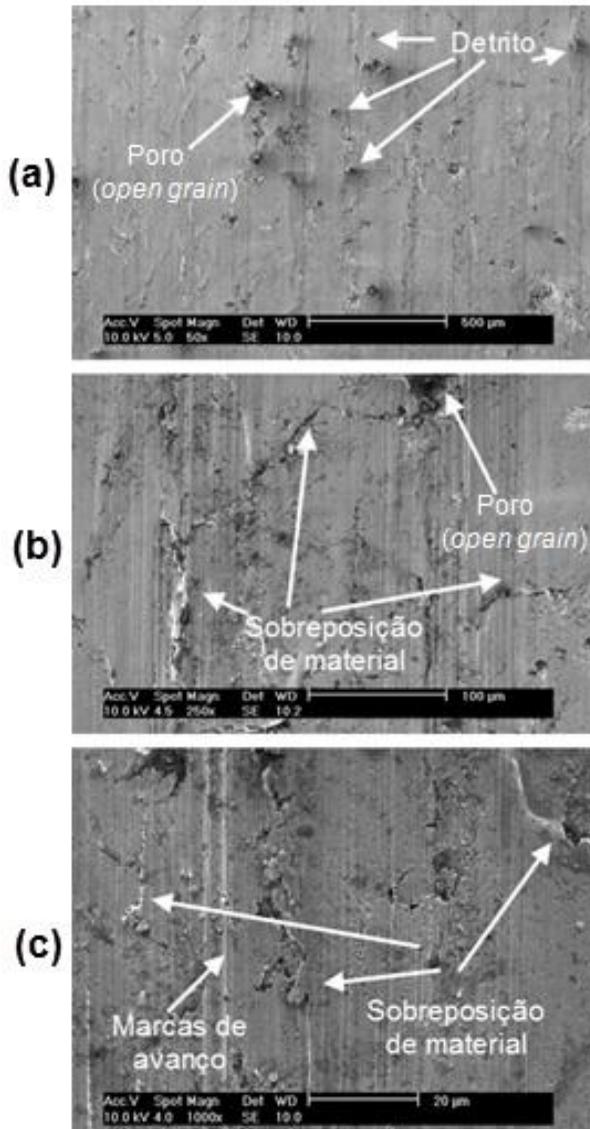


Figura 8.23 - Micrografia (MEV) da topografia da superfície do corpo de prova usinada à $v_c = 1200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, mostrando em: (a) com ampliação de 50x poro (*open grain*), detritos, (b) com ampliação de 250x sobreposição de material, poro (*open grain*) e (c) com ampliação de 1000x a presença de marcas de avanço e sobreposição de material.

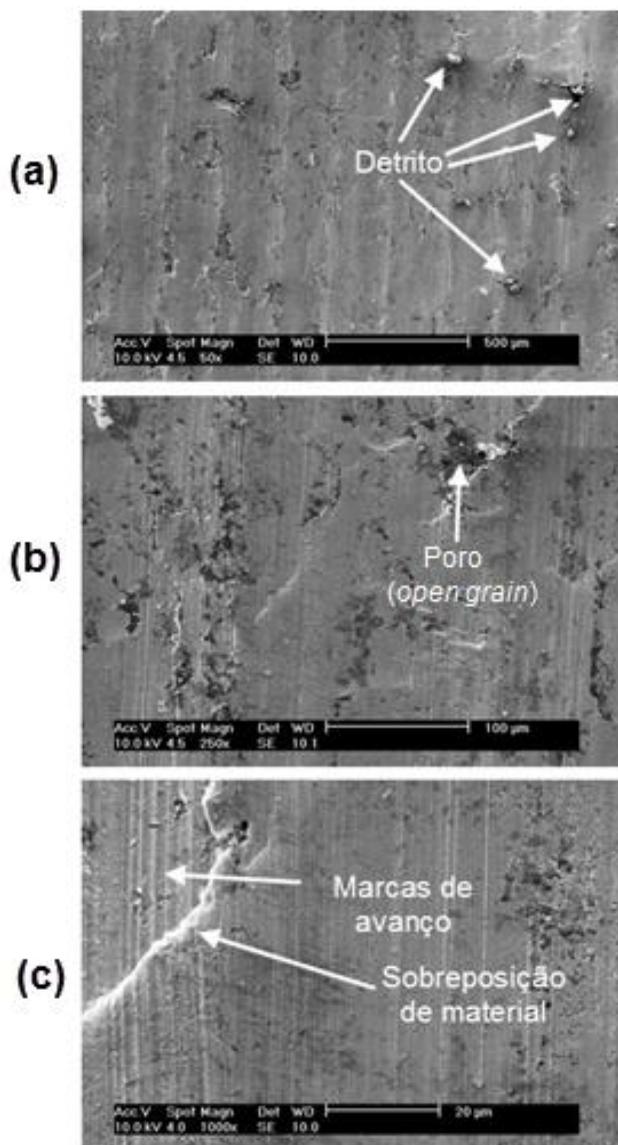


Figura 8.24 - Micrografia (MEV) da topografia da superfície do corpo de prova usinada à $v_c = 1400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ mostrando em: (a) com ampliação de 50x detritos, (b) com ampliação de 250x poro (*open grain*) e (c) com ampliação de 1000x a presença de marcas de avanço e sobreposição de material.

Nas Figuras 8.21, 8.22, 8.23 e 8.24, nota-se que as marcas de avanço na superfície da peça provocadas pela ferramenta de corte apresentam padrões unidirecionais de orientação perpendicular ao plano de vista, padrão característico do processo de torneamento. Na superfície da peça, repetidas falhas e danos são destacadas, como: marcas de avanço provocadas pela quina da ferramenta de corte; deformações plásticas caracterizadas pela sobreposição de material; presença de poros ou vazios também conhecidos na literatura como “*open grain*” que podem ser resultantes de fatores tais como: arrancamentos do material adjacente aos veios de grafita; arrancamentos de carbonetos; detritos devido a falhas na limpeza ou preparação das amostras.

O termo “*open grain*” descreve uma superfície que foi submetida a alguma operação de usinagem e nela aparecem pequenas cavidades distribuídas uniformemente, afetando a qualidade do acabamento. Estas cavidades são ocasionadas pelo arrancamento da grafita e do próprio metal durante a usinagem. Tal fenômeno está fortemente ligado à percentagem de carbono presente no material, ou seja, aumentando-se a quantidade de carbono, aumenta-se também a possibilidade de ocorrer “*open grain*” (SOUTO, 2003).

Portanto, vários defeitos indesejáveis estão presentes nas amostras dos corpos de prova usinados exibidas nas Figuras 8.21, 8.22, 8.23 e 8.24, defeitos esses que podem ser amenizados através da diminuição da profundidade de corte utilizada no desbaste juntamente com operações de acabamento.

8.3.2. Avaliação da integridade da superfície usinada

As avaliações da integridade da superfície usinada foram feitas com base nas amostras metalográficas obtidas dos corpos de prova submetidos aos ensaios de usinagem de curta duração em velocidades de corte de 400, 700, 1200, 1400 m.min⁻¹. A forma de obtenção das referidas amostras está descrita no capítulo 7, Figura 7.12.

O objetivo desta avaliação metalográfica sobre uma seção dos corpos de prova, isto com auxílio da microscopia eletrônica de varredura, é constatar possíveis alterações metalúrgicas que podem ocorrer nas proximidades da superfície externa pela ação de esforços mecânicos e das elevadas temperaturas resultantes do processo de usinagem. Estas alterações podem provocar distorções na peça e reduzir a sua resistência à fadiga.

Na usinagem com ferramentas de geometria definida, como é o caso do torneamento utilizado nesta pesquisa, a deformação e o cisalhamento do material da peça durante a formação do cavaco, assim como o atrito nas interfaces peça-ferramenta-cavaco, são as fontes de intenso calor responsáveis pelo aquecimento do sistema. É importante saber que, com o aumento da velocidade de corte, a distribuição de calor entre peça, cavaco, ferramenta e meio ambiente é alterada. Quanto maior a velocidade de corte, maior a quantidade de calor que vai para o cavaco e para o meio ambiente e menor a quantidade de calor que vai para a peça e ferramenta. Isso ocorre porque, com a aceleração do processo, maior é a transferência de calor por convecção com o meio ambiente e o tempo para transferência do calor gerado no cisalhamento do material nos planos primário e secundário é diminuído. Logo, o cavaco é o grande responsável pelo transporte da maior quantidade do calor gerado no processo para fora da região onde efetivamente ocorre a usinagem (MACHADO; SILVA, 2003).

As Figuras 8.25 a 8.28 obtidas através de microscopia óptica mostram a microestrutura das amostras do material submetido ao torneamento de curta duração a velocidades de corte de 400, 700, 1200 e 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, avanço e profundidade de 0,2 mm e 2 mm, respectivamente, para um comprimento usinado de 1600 mm. Nestas figuras, não se observam alterações significativas na região logo abaixo da superfície externa das amostras, tais como: deformação plástica, trincas, ou mesmo uma camada com efeito térmico significativo.

O não aparecimento de trincas e deformações plásticas na camada logo abaixo da superfície externa das amostras (corpo de prova) é um aspecto muito importante e positivo para a resistência da peça usinada nestas altas velocidades de corte. Há vários fatores que podem estar contribuindo positivamente para este resultado, a saber: pouco tempo de usinagem à qual os corpos de prova foram submetidos; as características da microestrutura do material usinado que é composta por veios de grafita que facilitam a usinagem e a formação do cavaco, diminuindo os efeitos negativos sobre a integridade da superfície.

No caso do ferro fundido cinzento, segundo Marwanga *et al.* (2000), o que domina o processo de formação do cavaco são eventos de fratura, e não a deformação plástica. A fratura ocorre ao longo dos veios de grafita, formando cavacos descontínuos. Quanto maiores as partículas de grafita, maiores são as distâncias de fratura na frente e abaixo da ferramenta.

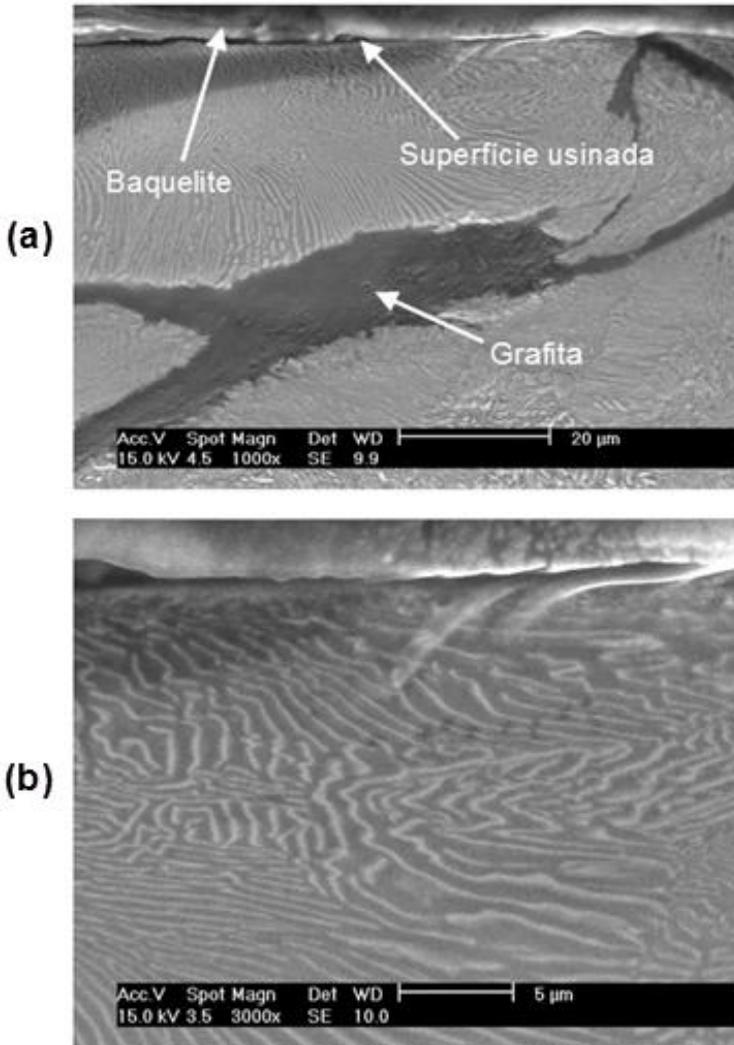


Figura 8.25 - Micrografia (MEV) da seção longitudinal do corpo de prova mostrando a integridade da camada abaixo da superfície usinada a $400 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$. Em (a) com ampliação de 1000x observa-se a interface do baqueliti (material que envolve a amostra) com a superfície usinada além de grafita na forma de veios, ataque nital 3%; em (b) temos a imagem da matriz perlítica, ampliação 3000x.

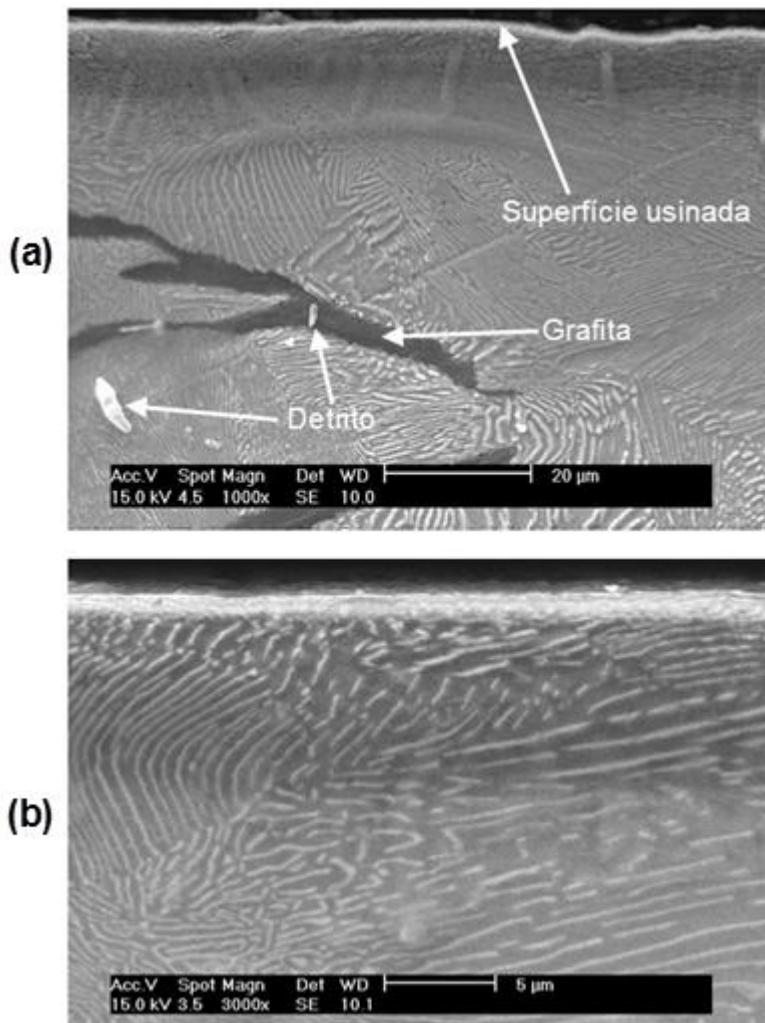


Figura 8.26 - Micrografia (MEV) da seção longitudinal do corpo de prova mostrando a integridade da camada abaixo da superfície usinada a $700 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Em (a) com ampliação de 1000x observa-se a interface do baqueliti (material que envolve a amostra) com a superfície usinada, grafita na forma de veios e detritos; em (b) temos a imagem da matriz perlítica do material, ampliação 3000x.

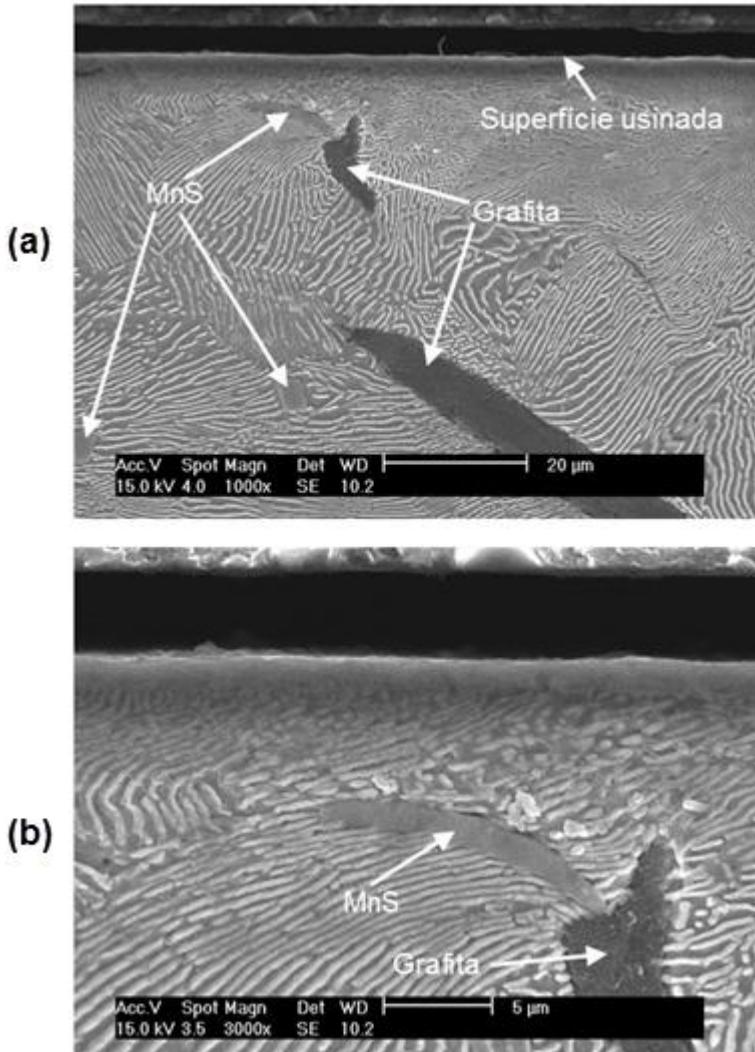


Figura 8.27 - Micrografia (MEV) da seção longitudinal do corpo de prova mostrando a integridade da camada abaixo da superfície usinada a 1200 m.min^{-1} . Em (a) com ampliação de 1000x observa-se a interface do baqueliti (material que envolve a amostra) com a superfície usinada, grafita na forma de veios e partículas de MnS; em (b) temos a imagem da matriz perlítica do material, grafita e partícula de MnS, ampliação 3000x.

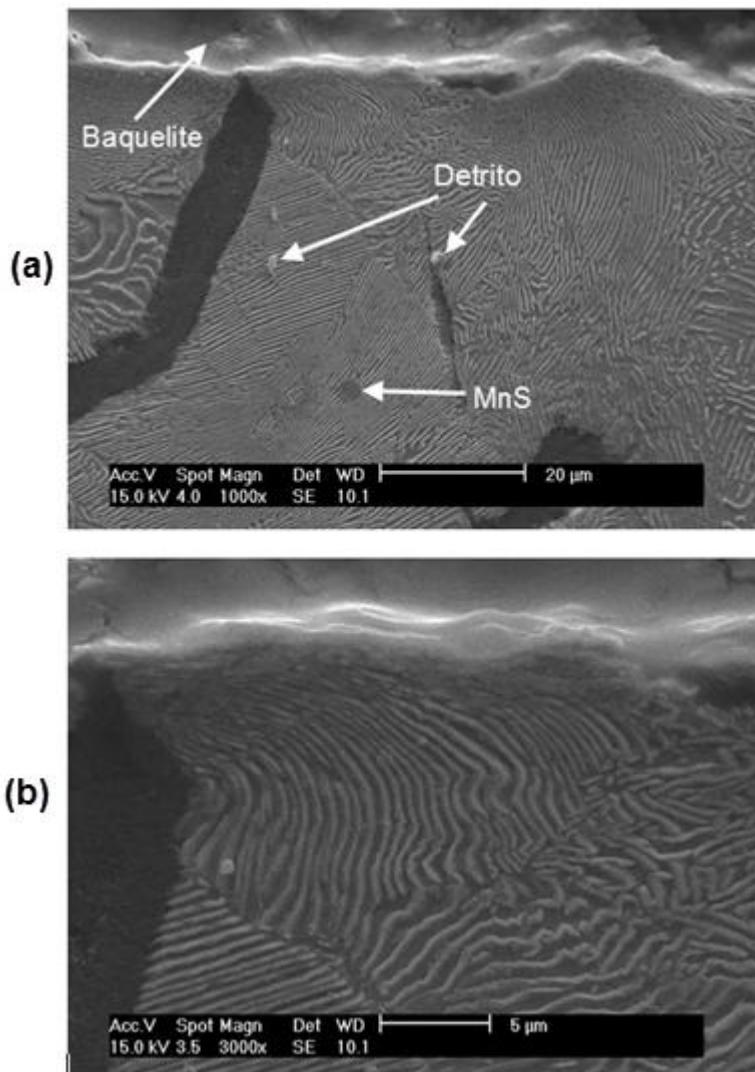


Figura 8.28 - Micrografia (MEV) da seção longitudinal do corpo de prova mostrando a integridade da camada abaixo da superfície usinada a $1200 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$. Em (a) com ampliação de 1000x observa-se a interface do baqueliti (material que envolve a amostra) com a superfície usinada, grafita na forma de veios, detritos e partículas de MnS; em (b) temos a imagem da matriz perlítica do material, ampliação 3000x.

Outro recurso que pode ser utilizado para analisar a integridade da peça, ou seja, a presença ou não de alterações nas subcamadas da superfície usinada, é a medição da dureza em tais camadas. Significativas mudanças na dureza dessas camadas, isto em relação ao material distante da região que foi submetida à ação da ferramenta de usinagem, são fortes indicativos de que o processo de usinagem produziu efetivamente algum efeito sobre a superfície usinada. No entanto, tal fato isolado e quando de pequena monta não necessariamente significa que a peça está irremediavelmente comprometida ou que terá de ser descartada. Assim, este pesquisador lançou mão deste importante recurso de medição da dureza, para complementar a análise da integridade das superfícies dos corpos de prova feitos por microscopia, como anteriormente descrito.

8.3.2.1. Microdureza da subcamada da superfície usinada

De acordo com Boehs (1999), os estudos de microdureza são importantes para a identificação dos defeitos que podem estar presentes nas zonas afetadas pelo calor causado por operações de remoção de material. Exemplos de efeitos na superfície afetada, que podem ser identificados pela variação da microdureza, são os seguintes:

- Áreas de martensita destemperada ou super temperada;
- Amolecimento a partir da austenita resolucionada;
- Amolecimento químico;
- Zonas termicamente afetadas;
- Deformação plástica ou zonas endurecidas pelo trabalho.

Para correlacionar e validar as observações feitas anteriormente relativas à microestrutura e constatar se as condições de usinagem comprometem a integridade na camada logo abaixo da superfície, foram feitas medições de dureza a fim de se estabelecer um perfil dos valores de dureza a 50, 100, 150 mm e também no centro da amostra, Figura 8.29.

Com base nos resultados exibidos na figura 8.29 pode-se observar que não houve uma variação expressiva da dureza nas diversas profundidades avaliadas. Essa constatação está de acordo com as imagens da microestrutura, Figuras 8.25 a 8.28, nas quais também não se verificaram alterações provocadas pelas condições de corte utilizadas no decorrer dos ensaios de usinagem com velocidades de corte entre 400 e 1400 m.min⁻¹.

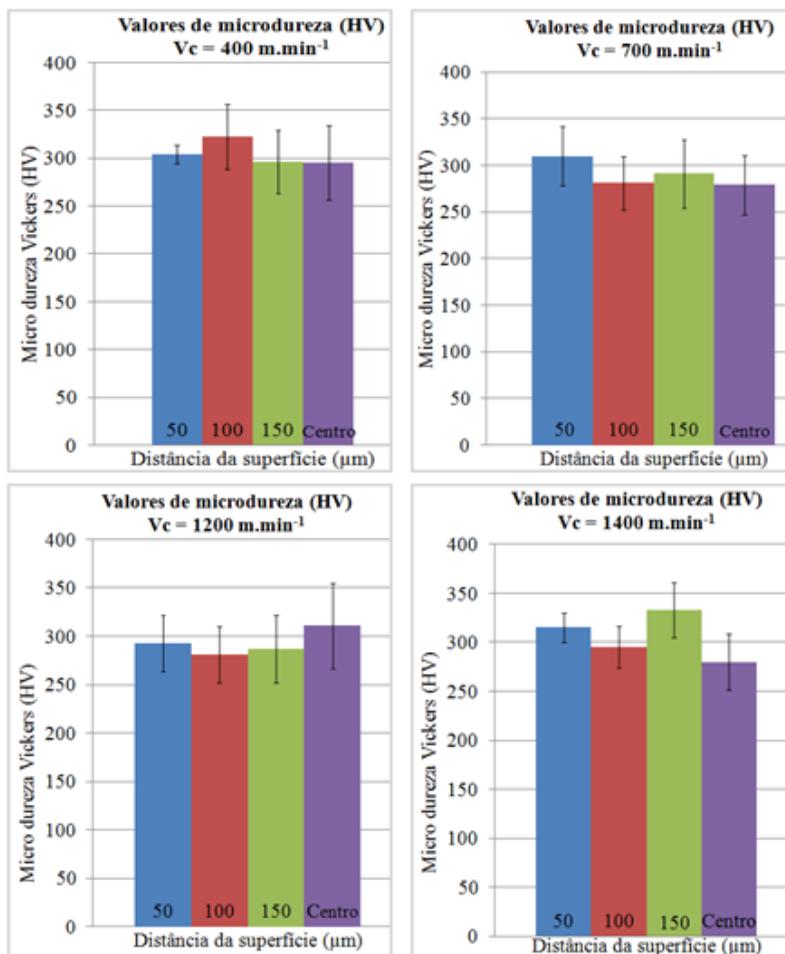


Figura 8.29 - Resultados da microdureza em função da velocidade de corte e da profundidade em relação à superfície externa do corpo de prova.

Para que o leitor tenha uma visão geral desses resultados, decidiu-se por apresentá-los de forma resumida na Figura 8.30, isto apenas para uma distância de profundidade de 50 μm a partir da superfície externa dos corpos de prova. Consta-se que, na menor velocidade 400 m.min⁻¹, tem-se uma microdureza nessa camada a 50 μm da superfície na ordem de 304 ± 10 HV e para 1400 m.min o valor é de

315 ± 16 HV, ou seja, tais valores se equivalem considerando os valores do desvio padrão.

A não alteração significativa de dureza das camadas logo abaixo da superfície externa pode estar relacionada ao baixo efeito de encruamento resultante da ação da ferramenta e ao maior percentual de calor transportado pelo cavaco nos processos envolvendo altas velocidades, diminuindo a transferência de calor para a peça de trabalho.

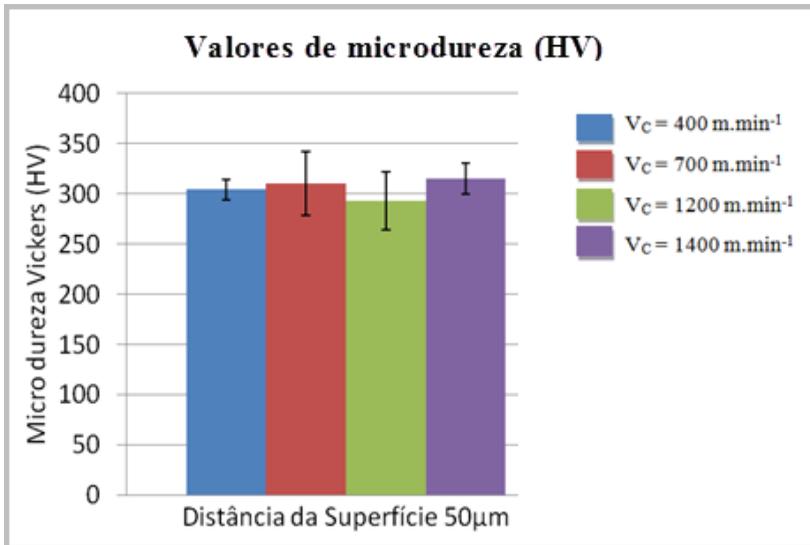


Figura 8.30 - Microdureza Vickers do material a 50 μm da superfície externa em função das velocidades de corte.

Este resultado complementar em relação à integridade da superfície usinada é importante e colabora com os resultados descritos anteriormente neste trabalho. Portanto, nas condições em que foi realizada a presente pesquisa, não foram constatadas alterações expressivas na textura e na integridade da superfície usinada.

Finalmente, dentro deste quadro de resultados, alcançados com o desenvolvimento deste trabalho de pesquisa, são exibidas no próximo capítulo as conclusões e sugestões para futuros trabalhos.

9. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Depois de concluídos os experimentos de usinagem e realizadas as devidas análises, foi possível tirar algumas conclusões a respeito da usinagem em altas velocidades de corte do ferro fundido cinzento com ferramentas de nitreto de silício (Si_3N_4), que serão mostradas a seguir. Junto com as conclusões serão mostradas sugestões para trabalhos futuros oriundas de questionamentos surgidos durante a pesquisa.

9.1. Conclusões

Com base nos resultados obtidos e nos conhecimentos adquiridos no transcorrer desta pesquisa, destacam-se as seguintes conclusões:

- Com ensaios de torneamento de curta e longa duração, foi possível constatar o comportamento atípico (diminuição do desgaste da ferramenta com o aumento da velocidade de corte) do ferro fundido cinzento FC 250 quando submetido à usinagem em altas velocidades de corte com ferramentas à base de Si_3N_4 .
- Nas velocidades de 700 a 1400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, ocorre uma estabilização do desgaste da ferramenta de corte, tornando esse desgaste praticamente constante em função do aumento da velocidade. Nessas velocidades, foi possível observar, através dos mapas de composição química, um acúmulo de enxofre e manganês no gume da ferramenta, indicando que a inclusão de MnS , presente no material da peça, aderiu à ferramenta de corte. Nesta mesma região também é observada uma alta concentração de alumínio e oxigênio. Apesar do erro associado à quantificação do elemento oxigênio pelo EDS, pode-se sugerir que o alumínio se encontra no gume na forma de Al_2O_3 . Este resultado é semelhante ao apresentado por Pereira (2010) para usinagem a 700 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$. Portanto, confirma-se, neste trabalho, que o alumínio no material da ferramenta de corte ocupa um papel de destaque na manutenção das inclusões de MnS no gume da ferramenta, reduzindo assim o desgaste da ferramenta.
- O mecanismo de desgaste por abrasão foi predominante na usinagem do ferro fundido FC250, provocando um desgaste de flanco de maior tamanho na velocidade de 400 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$ nos ensaios de longa duração, devido à não formação no gume da ferramenta da camada de MnS .
- No ensaio de longa duração a 1200 $\text{m}\cdot\text{min}^{-1}$, não foi possível chegar ao critério de fim de vida adotado devido à limitação na quantidade

de material disponível, pois o material utilizado era o remanescente do trabalho de Pereira (2010). Entretanto, foi usinado um comprimento de 9600 mm correspondente ao dobro do usinado à velocidade de $400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, com um desgaste de flanco da ferramenta 50 % menor e com uma taxa de remoção de material três vezes maior.

- Na velocidade de corte de $1400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$, foi possível observar, durante os ensaios, uma pequena vibração no início da usinagem. Essa vibração tem sua origem no sistema de fixação da peça, já que, devido a problemas técnicos da máquina-ferramenta, não foi possível a utilização do contraponto da mesma.
- A análise dos valores de rugosidade mostra uma diminuição da rugosidade para crescentes velocidades de corte. Tal comportamento foi o mesmo para todos os parâmetros de rugosidades analisados, R_a , R_y e R_z .
- A análise dos resultados relativos à integridade da superfície não mostrou, de maneira inequívoca, alterações nas camadas logo abaixo da superfície em termos de deformações plásticas, alterações microestruturais e microdureza. Esse fato pode estar relacionado ao pequeno comprimento usinado nos ensaios de curta duração.
- A pesquisa realizada por Pereira (2010) e complementada por este trabalho de pesquisa vem contribuir para a possível implementação de velocidades superiores às usadas até o momento na usinagem do ferro fundido cinzento com ferramentas à base de Si_3N_4 nas indústrias, aumentando a taxa de remoção de material, a produtividade e, conseqüentemente, a redução de custos com ferramentas de corte.
- Por fim, cabe salientar que, diante do exposto, pode-se afirmar que os objetivos da presente pesquisa foram alcançados.

9.2. Sugestões para trabalhos futuros

- Realizar ensaios em velocidades de corte maiores que $1400 \text{ m}\cdot\text{min}^{-1}$ a fim de verificar se a redução do desgaste de flanco da ferramenta se mantém com o aumento da velocidade de corte;
- Realizar ensaios de usinagem de longa duração nas velocidades empregadas nesta pesquisa utilizando ferramentas de: Si_3N_4 , PCBN e CBN, a fim de comparar custo de usinagem em função do material da ferramenta de corte, para um possível emprego destas velocidades na indústria;

- Realizar ensaios de longa duração em velocidades de corte maiores que 1400 m.min a fim de verificar possíveis danos na textura e integridade da superfície das peças usinadas.

REFERÊNCIAS

ABEL, R. **Kostenoptimale Bearbeitung von prismatischen Werkstücken mit Siliziumnitridkeramik**. DIMA – Die Maschine, nº 5, p. 23-26, 1992.

ABELE, E., SAHM, A., SCHULZ, H. **Wear Mechanism when Machining Compacted Graphite Iron**. CIRP, p.53-56, vol. 51/1/2002.

ANDRADE, C. L. F. **Análise da furação do ferro fundido vermicular com brocas de metal duro com canais retos revestidas com TiN e TiAlN**. Dissertação (mestrado) Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2005.

BECKER, M.; SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Integridade Superficial em Usinagem**. In: Instituto Fábrica do Milênio. (Org.). Tecnologias Avançadas de Manufatura - IFM. 1 ed. São Carlos - SP: Instituto Fábrica do Milênio, 2005, v. 1, p. 101-110.

BET, L. **Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor**. 350f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1999.

BEWILOGUA, K.; BRAÜER, G.; DIETZ, A.; GABLER, J.; GOCH, G.; KARPUSCHEWSKI, B.; SZYSZKA, B. **Surface technology for automotive engineering**. CIRP Annals – Manufacturing Technology 58 pag. 608-607, 2009.

BOEHS, L. **Análise de superfície usinada**, Apostila do curso de Pós-graduação em Engenharia Mecânica. Florianópolis, SC, 1999.

BOEHS, L.; BET, L.; M.F. **Usinagem do Aço SAE 1045 Utilizando Materiais Cerâmicos**. In: VI CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 1994, SANTIAGO. -. SANTIAGO : ANAIS DO CONGRESSO, 1994. p. 359-364.

BOEHS, L. **Influência do Sulfeto de Manganês na Usinabilidade do Ferro Fundido Maleável Preto Ferrítico**. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 1979.

BRANDÃO, L. C.; COELHO, R. T. **Resultados e perspectivas de um projeto temático**. Revista máquinas e metais, nº 542, março de 2011.

CAPLA, R. L. **Estudo da influência do sobremetal excedente de desbaste na operação de acabamento aplicando usinagem com altas velocidades**. 121p. Dissertação – Universidade de São Paulo-USP – São Carlos, 2006.

CHIFFRE, L.; KUNZMANN, H.; PEGGS, G. N.; LUCCA, D. A. **Surface in precision engineering, microengineering and nanotechnology**. CIRP Annals – Manufacturing Technology, volume 52 pag. 561-577, 2003

DIN 4760, Gestaltabweichungen; Begriffe Ordnungssystem; (Form deviation; Concepts; Classification system). Berlin, Juni 1982.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**, 4º edição, Janeiro de 2003 , ARTLIBER EDITORA LTDA.

FIELD, M.; KAHLES, J.F.; CAMMET, J.T. **A Review of Measuring Methods for Surface Integrity**, Annals of the CIRP, Vol 21, 1972, pp. 219-238.

GOODRICH, G. M. **Iron castings engineering handbook**. AFS, 2003.

GRIFFITHS, B. **Manufacturing surface technology – Surface integrity & functional performance**. Editora Taylor & Francis, 241p. New York, 2001.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos** 1º edição, Editora Blucher, Rio de Janeiro, 2009

JAWAHIR, I.S.; BRINKSMEIER, E.; SAOUBI, R.M.; ASPINWALL, D.K., OUTEIRO, J.C.; MEYER, D.; UMBRELLO D.; JAYAL, A.D. **Surface Integrity in Material Removal Process: Recent Advances**. Annals of the CIRP, Vol 60, 2011, pp. 603-626.

KIRSCHNIK, G. M. **Características técnicas de comando numérico computadorizado para HSC**. Seminário internacional de alta tecnologia – Usinagem com altíssimas velocidades de corte e alta precisão, 02., UNIMEP, 1997.

KRONENBERG, M. **Gedanken zur Theorie und Praxis der Ultra schnellzerspanung**. TZ f. Prakt. Metallbearb., 55. Jg. 1961, heft 8, S. 443-446, 55. Jg. 1961, Heft 12, S. 659-664, 56. Jg 1962, Heft 9, S. 505-510.

LANDI, D. C. **Torneamento com altas velocidades de corte**. Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSN/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica – São Paulo, 2ª edição, 2003.

LIU *et al.* **Machinability of pearlitic cast iron with cubic boron nitride (CBN) cutting tools**. Transactions of the ASME, vol. 124, nov. 2002, p. 820-832.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais** – LEPU – Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem –UFU – Uberlândia, 8ª versão, 2004.

MACHADO, A. R.; SILVA, M. B. **Fluidos de corte para HSM** – Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSN/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica – São Paulo, 2ª edição, 2003.

MACHADO, A. R.; BOEHS, L.; SANTOS, M. T.; GUESSER, W. L. **Usinagem de ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular**. IFM – Instituto Fabrica do Milênio, 2004.

MALISKA, A.M. **Microscopia eletrônica de varredura**, apostila do Laboratório de Materiais da Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

MARWANGA, R. O.; VOIGT, R. C.; COHEN, P. H. **Influence of graphite morphology, matrix structure on gray iron machining.** Modern Casting, v. 90, n.5, p.53-57, 2000.

MDC (Machinability Data Center). Machining Data Handbook - Section 18 - **Surface Technology**. 3. ed. Cincinnati : 1980.

MÜLLER, P.; SOTO, M. **Usinagem sem refrigeração de furos e roscas.** Anais do seminário internacional de alta tecnologia – Usinagem com altíssimas velocidades de corte, Santa Bárbara do Oeste, 1999.

NAVAS, V. G.; GONZALO, O.; BENGOTXEA, I. **Effect of cutting parameter in the surface residual stresses generated by turning in AISI 4340 STEEL.** International journal of machine tools & manufacture vol 61 pag. 48-57, 2012.

NEUGEBAUER, R.; BOUZAKIS, K. D.; KLOCKE, F.; STERZING, A.; TEKKAYA, A. E.; WERTHEIM, R. **Velocity effects in metal forming and machining processes.** CIRP Annals - Manufacturing Technology, 2011.

NORMA SAE J1887/2002. **Automotive Compacted Graphite Iron Castings.** 2002.

NOVALSKI, O.; CORRÊA, M. A **HSC como vantagem competitiva.** Revista máquinas e metais, nº 394, novembro de 1998.

OLIVEIRA, F. G. **HSM - Conceito e Aplicações.** In: SANDVIK. Usinagem em altíssimas velocidades. São Paulo. 2003; Editora Érica Ltda. Cap.01, p. 29-35.

PEREIRA, A. A. **Influência do teor de enxofre na microestrutura, nas propriedades mecânicas e na usinabilidade do ferro fundido cinzento FC 250.** 138 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2005.

PEREIRA, A. A. **Análise do desgaste da ferramenta à base de β -Si₃N₄ na usinagem do ferro fundido cinzento FC 250 utilizando técnicas avançadas e de alta resolução.** 226 p. Tese (Doutorado) -

Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2010.

REUTER, U.; SCHULZ, H.; Mc DONALD, M. **Compact and bijou – The problems associated with compacted graphite iron manufacturing can be overcome.** Engine Technology International, 4/1999, p.58-60.

RICHTER, V.: *Bearbeitung V. Gusseisen mit hohen Schnittgeschwindigkeiten.* VDI – Fachausschuss Schneidstoffanwendung, Köln, 2004.

SAHM *et al.* **State of the art in CGI-machining.** In: *Compacted Graphite Iron, 2002, Darmstadt. Machining workshop.* 2002.

SANDVIK. **Tecnologia da usinagem de metais.** Manual Técnico, 2010.

SCHULZ, Herbert. **High speed milling machines.** Anais do seminário internacional de alta tecnologia – Usinagem com altíssimas velocidades de corte, Santa Bárbara do Oeste, 1999.

SCHULZ, H.; SCHÜTZER, K. **Tendências futuras para a usinagem de alta velocidade.** Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSN/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica – São paulo, 2º edição, 2003.

SCHULZ, H.; WURZ, T. **O projeto de máquinas-ferramentas tem de atender aos requisitos do HSC.** Máquinas e Metais n. 375, abril 1997.

SCHÜTZER, K.; SCHULZ, H. **Histórico da usinagem com altíssima velocidade até os dias atuais.** Usinagem em altíssimas velocidades: como os conceitos HSN/HSC podem revolucionar a indústria metal mecânica – São Paulo, 2º edição, 2003.

SME. **Tool and Manufacturing Engineers Handbook.** 4. ed. Dearborn/Michigan: SME, v. IV Quality control and Assembly, cap. 5. Surface Technology - Surface Texture, 1987a.

SOTO, U. B. **Avaliação da topografia da superfície e do fenômeno open grain no torneamento de discos de freio de ferro fundido cinzento.** Dissertação (mestrado), Departamento de Engenharia Mecânica – PUC. Belo Horizonte, 2003.

SOUZA, A. J. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte em Torneamento.** Florianópolis, 2004. Tese Departamento de Engenharia Mecânica-UFSC.

SRIVASTAVA, A. K., FINN, M. E. **Machinability of Cast Iron.** Techsolve – The Manufacturing Solutions Center, Cincinnati, Ohio, 2003.

STOTERAU, R. L. **Introdução ao projeto de máquinas-ferramentas modernas.** Apostila, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**, 4^o Edition, imprint Butterworths- Heinemann, 446 pags. 2000.

ULUTAN, D.; OZEL, T. **Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review.** International journal of machine tools and manufacture, volume 51, issue 3, pages 250-280, 2011.

XAVIER, F. A. **Estudo dos mecanismos de desgaste em ferramentas de nitreto de silício aplicadas no torneamento dos ferros fundidos vermicular e cinzento.** 267f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2009.

XAVIER, F. A.; SCHRAMM, B. **Materiais cerâmicos de corte** – Revista máquinas e metais, n^o 493, fevereiro de 2007.

XAVIER, F. A. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal-Duro, Cerâmica e CBN.** Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Florianópolis, 2003.

WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia da usinagem com ferramentas de corte de geometria definida – Parte I.** Tradução do livro “Fertigungsverfahren – Drehen, Bohren, Fräsen” de Wilfried König e Fritz Klocke, Florianópolis, 2002.

YAMANE, Y. *et al.* **The formation of protective oxide layer in machining resulphurized free-cutting steels and cast irons.** *Wear*, n° 139, p. 195-208, 1990.

APÊNDICE A – Resultados da medição de rugosidade na superfície do corpo de prova (Cut-of = 0,8 mm)

					Ensaio 1					
					Vc=400					
Medição	Ra	Ry	Rz	Rt		Medição	Ra	Ry	Rz	Rt
1	2,65	25,39	15,00	25,39		1	2,17	22,10	13,68	22,25
2	2,59	18,12	13,78	18,66		2	1,48	9,21	7,39	9,28
3	2,54	14,68	13,29	15,12		3	1,72	9,57	7,49	10,01
4	2,53	13,53	12,37	13,53		4	1,99	24,50	15,44	24,71
5	2,52	17,04	13,23	17,04		5	1,67	14,06	10,60	14,06
6	2,61	14,49	12,48	15,15		6	1,93	27,52	11,76	27,57
7	2,55	16,65	13,32	16,65		7	1,34	9,09	7,39	10,13
Média	2,57	17,13	13,35	17,36		Média	1,76	16,58	10,54	16,86
Desvio	0,05	3,99	0,88	3,90		Desvio	0,29	7,95	3,28	7,78
					Vc=1200					
Medição	Ra	Ry	Rz	Rt		Medição	Ra	Ry	Rz	Rt
1	1,49	12,26	10,26	14,49		1	1,60	17,98	9,56	17,98
2	1,43	18,03	9,38	18,03		2	1,56	11,92	9,52	13,63
3	1,53	10,94	8,52	11,67		3	1,65	16,92	11,18	17,99
4	1,37	10,11	8,00	10,11		4	1,31	10,13	7,77	10,13
5	1,44	11,32	8,34	11,71		5	1,46	13,35	9,10	14,54
6	1,51	13,06	9,07	13,06		6	1,43	12,89	9,12	12,89
7	1,37	9,54	7,43	9,78		7	1,53	12,80	8,83	12,80
Média	1,45	12,18	8,71	12,69		Média	1,51	13,71	9,30	14,28
Desvio	0,06	2,84	0,94	2,86		Desvio	0,12	2,77	1,02	2,87
					Ensaio 2					
					Vc=400					
Medição	Ra	Ry	Rz	Rt		Medição	Ra	Ry	Rz	Rt
1	2,66	25,41	15,07	25,41		1	1,58	27,98	12,45	28,99
2	2,55	14,60	13,19	15,00		2	1,36	8,17	7,11	8,67
3	2,56	14,94	13,12	14,94		3	1,84	18,83	13,27	20,05
4	2,54	12,64	12,01	12,98		4	1,31	8,31	7,58	8,99
5	2,68	14,17	13,03	14,55		5	1,53	17,34	9,80	17,86
6	2,67	28,14	16,12	28,74		6	1,40	18,13	9,11	18,13
7	2,66	20,19	14,31	20,19		7	1,32	12,37	7,68	12,37
Média	2,62	18,58	13,84	18,83		Média	1,48	15,88	9,57	16,44
Desvio	0,06	6,12	1,41	6,13		Desvio	0,19	6,97	2,44	7,16
					Vc=1200					
Medição	Ra	Ry	Rz	Rt		Medição	Ra	Ry	Rz	Rt
1	1,45	14,10	11,02	17,14		1	1,52	9,33	7,42	9,92
2	1,23	8,14	7,23	8,88		2	1,57	9,85	8,19	9,87
3	1,53	21,42	10,62	21,42		3	1,74	19,23	11,31	19,23
4	1,31	8,46	7,75	9,11		4	1,52	13,53	9,00	14,48
5	1,52	13,47	9,64	17,24		5	1,39	13,91	8,47	15,02
6	1,37	11,93	8,74	11,93		6	1,58	15,03	9,58	16,49
7	1,49	12,08	8,66	12,08		7	1,53	11,36	9,02	12,38
Média	1,41	12,80	9,09	13,97		Média	1,55	13,18	9,00	13,91
Desvio	0,11	4,44	1,41	4,72		Desvio	0,10	3,41	1,23	3,44

Obs: os valores dos parâmetros R_a , R_y , R_z e R_t em mm e os valores de velocidade de corte (V_c) estão em $m \cdot min^{-1}$.

APÊNDICE B – Resultados da medição de microdureza na camada abaixo da superfície usinada.

VC 400 Borda				
	Comprimento Médio	Dureza	HV	HRC
1	44.4	282	282	27.4
2	43.5	295	295	29.1
3	42.3	310	310	31.0
4	42.1	314	314	31.5
5	43.4	295	295	29.1
6	41.8	318	318	32.0
7	Média	302		
8	Max	318		
9	Min	282		

VC 400 Borda1				
	Comprimento Médio	Dureza	HV	HRC
1	44.8	277	277	26.7
2	42.0	316	316	31.7
3	45.6	268	268	25.3
4	42.6	307	307	30.6
5	35.7	437	437	44.2
6	39.9	350	350	35.5
7	39.1	363	363	37.0
8	Média	331		
9	Max	437		
10	Min	268		

VC 400 Borda2				
	Comprimento Médio	Dureza	HV	HRC
1	42.1	314	314	31.5
2	47.1	251	251	22.4
3	47.3	249	249	22.1
4	45.0	275	275	26.4
5	40.9	333	333	33.7
6	42.5	309	309	30.8
7	37.3	400	400	40.8
8	Média	304		
9	Max	400		
10	Min	249		

VC 400 Centro				
	Comprimento Médio	Dureza	HV	HRC
1	32.8	516	516	50.2
2	42.0	316	316	31.7
3	41.6	321	321	32.4
4	45.4	270	270	25.6
5	60.3	153	153	0.00
6	41.0	331	331	33.5
7	48.3	239	239	20.2
8	Média	306		
9	Max	516		
10	Min	153		

VC 700 Borda				
	Comprimento Médio	Dureza	HV	HRC
1	44.4	282	282	27.4
2	36.5	417	417	42.4
3	41.3	325	325	32.8
4	44.6	280	280	27.2
5	40.0	348	348	35.3
6	44.2	285	285	27.8
7	Média	323		
8	Max	417		
9	Min	280		

VC 700 Borda1				
	Comprimento Médio	Dureza	HV	HRC
1	50.1	221	221	0.00
2	43.1	300	300	29.7
3	42.0	316	316	31.7
4	44.3	283	283	27.6
5	48.0	241	241	20.6
6	45.8	265	265	24.9
7	41.2	327	327	33.0
8	Média	279		
9	Max	327		
10	Min	221		

VC 700 Borda2				
	Comprimento Médio	Dureza	HV	HRC
1	47.3	249	249	22.1
2	46.9	253	253	22.8
3	42.7	305	305	30.4
4	43.9	288	288	28.3
5	39.7	352	352	35.8
6	45.9	264	264	24.6
7	40.1	346	346	35.1
8	Média	294		
9	Max	352		
10	Min	249		

VC 700 Centro				
	Comprimento Médio	Dureza	HV	HRC
1	52.4	202	202	0.00
2	40.6	337	337	34.1
3	46.0	262	262	24.4
4	48.6	235	235	0.00
5	42.6	307	307	30.6
6	42.3	310	310	31.0
7	44.7	279	279	27.0
8	Média	276		
9	Max	337		
10	Min	202		

Obs: penetrador de diamante com formato de pirâmide quadrada com 136° entre faces, com carga aplicada de 300 g.

APÊNDICE C – Valores obtidos pela medição nas ferramentas do desgaste de flanco V_B

ENSAIOS DE TORNEAMENTO DO FC250 CURTA DURAÇÃO

Velocidade (m.min^{-1})	Pereira (2010)		Neste trabalho	
	Ensaio 1 V_B (μm)	Ensaio 2 V_B (μm)	Ensaio 1 V_B (μm)	Ensaio 2 V_B (μm)
300	286	291		
400	240	223		
500	198	269		
600	125	160		
700	103	118	98	100
800			108	104
900			112	110
1000			107	97
1200			116	109
1400			109	111

Obs: valores obtidos através da utilização do MEV

ENSAIOS DE TORNEAMENTO FC 250 - LONGA DURAÇÃO

Comprimento Usinado (mm)	$V_C = 400 \text{ m.min}^{-1}$	$V_C = 1200 \text{ m.min}^{-1}$
	V_B (μm)	V_B (μm)
400	70	60
800	100	80
1200	160	80
1600	170	80
2000	170	100
2400	190	100
2800	200	100
3200	210	100
3600	210	100
4000	230	100
4400	230	110
4800	240	110
5200		120
5600		120
6000		120
6400		120
6800		120
7200		120
7600		120
8000		120
8400		120
8800		120
9200		130
9600		130

Obs: valores obtidos através da utilização de microscópio óptico de ferramentaria.