

ALINE ELIAS DA SILVA

FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS DE ALTA
RESISTÊNCIA APLICADOS EM CABEÇOTES DE
MOTORES



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2016

ALINE ELIAS DA SILVA

**FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS DE ALTA
RESISTÊNCIA APLICADOS EM CABEÇOTES DE
MOTORES**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Ph.D. Álisson Rocha Machado

Co-orientador: Dr. Wilson Luiz Guessser

Uberlândia – MG

2016

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

S5861f Silva, Aline Elias da, 1990-
2016 Furação de ferros fundidos de alta resistência aplicados em
cabeçotes de motores / Aline Elias da Silva. - 2016.
114 f. : il.

Orientador: Álisson Rocha Machado.

Coorientador: Wilson Luiz Guesser.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.

Inclui bibliografia.

1. Engenharia Mecânica - Teses. 2. Ferro fundido - Teses.
3. Microestrutura - Teses. 4. Metais - Usinabilidade. 5. Desgaste
mecânico - Teses. I. Machado, Álisson Rocha, 1956-. II. Guesser,
Wilson Luiz. III. Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621

ALINE ELIAS DA SILVA

**FURAÇÃO DE FERROS FUNDIDOS DE ALTA RESISTÊNCIA APLICADOS EM
CABEÇOTES DE MOTOR**

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. - Álisson Rocha Machado - (UFU) - Orientador

Prof. Dr. - Wilson Luiz Guesser - (UDESC) - Co-orientador

Prof. Dr. - Márcio Bacci da Silva - (UFU)

Prof. Dr. - Nelis Evangelista Luiz - (Senai/SP)

Uberlândia, 26 de fevereiro de 2016

AGRADECIMENTOS

Ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pela oportunidade de realizar este curso.

Ao professor Álisson Rocha Machado pela sua orientação e todo o suporte no desenvolvimento deste trabalho.

Ao meu co-orientador Wilson Luiz Guesser por todo o auxílio prestado na caracterização dos materiais envolvidos nesta pesquisa e pelo conhecimento transferido.

À empresa Tupy S.A. pelo incentivo e fornecimento dos materiais inerentes à este estudo e também à ISCAR Ltda. pela colaboração no fornecimento das ferramentas utilizadas.

Aos professores Márcio Bacci da Silva, Rosemar Batista da Silva, Wisley Falco Sales e Eder Silva Costa por sempre se mostrarem prestativos em todas as solicitações de auxílio e em todos os momentos de dúvida.

Aos meus colegas do LEPU que me auxiliaram durante todo o mestrado, Mauro Paipa, Cleudes Guimarães, Alcione dos Reis, Saimon Vendrame, Luciano Fernandes, Antônio de Mello, Victor Rubin, Raphael Lima, Mariana Landim e Aline Gonçalves, obrigada pela companhia e pelo ajuda prestada durante toda esta etapa da minha vida. Em especial, agradeço ao colega Armando Marques, que me auxiliou durante toda a execução dos ensaios, e que sem este auxílio não seria possível finalizá-los.

Aos alunos de iniciação científica, Álvaro Carneiro, Divino Júnior, Lindolfo Assis, Arthur Henrique, Matheus Carvalho e Luís Guilherme que me auxiliaram nos ensaios de furação, todos sempre muito competentes e prestativos.

Aos técnicos da oficina do LEPU Cláudio Nascimento, Thiago Pereira e Thiago Menezes que sempre me auxiliaram durante toda a execução dos testes.

À técnica responsável pelo LTM Ângela Andrade, pelo auxílio na preparação das amostras.

Às agências financiadoras CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

Aos meus pais Miguel José e Maria Donizete, meus avós, Tereza de Souza (*in memoriam*) e Sebastião Elias, e por fim, aos amigos queridos, em especial à Fadylla Caetano, pelo apoio incondicional, carinho e incentivo durante todo este tempo.

SILVA, A. E. **Furação de Ferros Fundidos de Alta Resistência Aplicados em Cabeçotes de Motores.** 2016. 114f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

Resumo

Nos últimos anos, a necessidade de redução da emissão de poluentes tem impulsionado o crescimento da tecnologia para motores. O desenvolvimento de motores diesel é determinado pelo constante esforço em reduzir o peso e aumentar a performance. Desta forma, é necessário que componentes, como os blocos e cabeçotes de motores, possam suportar o aumento do pico de pressão de queima na câmara de combustão. Por tanto, é exigida uma maior resistência mecânica dos materiais empregados na confecção de blocos e cabeçotes, possibilitando a estas peças suportarem maiores pressões, reduzindo, assim, a possibilidade de falhas prematuras nesses componentes. Em função das menores espessuras de seções da peça obtidas, motores mais leves e menos poluentes podem ser fabricados. Entretanto, este fato constitui um desafio para a usinagem, devido à queda na produtividade e elevação do custo com ferramentas de corte. Nesse sentido, o presente trabalho objetiva avaliar a usinabilidade de ferros fundidos de alta resistência para aplicação em cabeçotes de motores por meio de ensaios de furação, processo este escolhido por ser amplamente utilizado na confecção destes itens. A pesquisa consiste, fundamentalmente, no estudo da usinabilidade de dois materiais com resistências elevadas, o ferro fundido cinzento classe FC-300 com refino de grafita e adição de molibdênio e o ferro fundido cinzento FC-300 ligado ao molibdênio. Para efeito comparativo, outros dois materiais foram também estudados, sendo estes o ferro fundido cinzento classe FC-250 e o ferro fundido vermicular classe 450. Utilizou-se nos ensaios experimentais uma broca de aço com pontas de metal duro intercambiáveis. Como parâmetros de usinabilidade foram utilizados a vida das brocas, força de avanço e momento torçor, além de análises da qualidade dos furos produzidos. De um modo geral, os resultados mostraram que o ferro cinzento FC-250 apresentou a melhor usinabilidade, seguido dos ferros cinzentos da classe 300, enquanto o ferro fundido vermicular demonstrou possuir a pior usinabilidade.

Palavras Chave: ferros fundidos de alta resistência, usinabilidade, características microestruturais, furação, desgaste da ferramenta.

SILVA, A. E. **Drilling of High Strength Cast Irons Applied to Engine Cylinder Heads**. 2016. 114p. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

Abstract

In recent years, the need to reduce pollution has driven the growth of technology for engines. The development of diesel engines is determined by the constant effort to reduce weight and improve performance. Thus, it is necessary that components such as engine blocks and cylinder heads, can withstand increased peak pressure in the combustion camera. Therefore, an increased mechanical strength of the materials used in the manufacture of engine blocks and heads is required, enabling these parts withstand higher pressures, thereby reducing the possibility of premature failure of these components. Due to the smaller piece thicknesses obtained, lighter and less polluting engines can be manufactured. However, this fact is a challenge for machining due to lower productivity and higher costs with cutting tools. In this sense, this study aims to evaluate the machinability of high-strength cast irons for use in engine cylinder heads through drilling tests, a process chosen because it is widely used in the manufacture of these items. Basically, the research focus on the study of the machinability of two materials with high resistance, the grey cast iron FC-300 with refining of the graphite and addition of molybdenum and the grey cast iron FC-300 with addition of molybdenum. For comparison purposes other two materials were also studied, the grey cast iron FC-250 and the compact graphite iron CGI-450. A steel drill with interchangeable carbide tips was used in the drilling tests. As machinability parameters were used the drill's life, the thrust force and torque, and the quality of the holes produced. Overall, the results showed that the grey cast iron FC-250 showed the best machinability, followed by the grey irons of the 300 class, while the compacted graphite iron has demonstrated the worst machinability.

Keywords: high strength cast irons, machinability, microstructural characteristics, drilling, tool wear.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Microestrutura do ferro fundido: a) branco hipereutético; b) cinzento; c) nodular; d) maleável de núcleo branco; e) maleável de núcleo preto; f) vermicular (COLPAERT; SILVA, 2008).....	6
Figura 2.2 - Microestrutura do ferro cinzento: a) sem ataque; b) com ataque de Nital 4%. Ampliação 100x (STUEWE, 2008).....	7
Figura 2.3 - Microestrutura do CGI: a) aspecto da grafita compacta em metalografia óptica; b) aspecto da grafita compacta após ataque profundo - MEV (GUESSER, 2002).....	10
Figura 2.4 - Vantagens do CGI em relação ao ferro fundido cinzento e ao ferro nodular (Adaptado de ASM, 1990a).....	12
Figura 2.5 - Tipos de grafita em ferro fundido cinzento: a) Tipo A; b) Tipo B; c) Tipo C; d) Tipo D; e) Tipo E (COLPAERT; SILVA, 2008).....	13
Figura 2.6 - Vida da ferramenta em relação à quantidade de Fe ₃ C na perlita (BATES, 1996).....	17
Figura 2.7 - Morfologia típica da grafita: a) cinzento; b) vermicular; c) nodular (DAWSON et al., 2014).....	18
Figura 2.8 - Comparação entre ferro fundido cinzento e ferro fundido vermicular nas operações de fresamento e torneamento em relação à vida da ferramenta (DAWSON et al., 2014).....	19
Figura 2.9 - Representação do processo de furação (GERONIMO, 2011).....	20
Figura 2.10 - Gráfico comparativo dos materiais em estudo (MOCELLIN et al., 2003).....	23
Figura 2.11 - Representação das forças presentes na furação (BOEIRA, 2010).....	24
Figura 2.12 - Medições de torque em furação (EVANS; HOOGENDOORN; PLATT, 2013).....	26
Figura 2.13 - Brocas helicoidais: a) broca inteiriça de metal duro; b) broca com ponta de metal duro; c) broca de metal duro com pastilhas intercambiáveis (TSCHÄTSCH, 2009).....	27
Figura 2.14 - Classificação dos metais duros (MACHADO et al., 2015).....	29
Figura 2.15 - Elementos de uma broca helicoidal (Adaptado de TSCHÄTSCH, 2009).....	30
Figura 2.16 - Corpo de uma broca helicoidal (DINIZ; MARCONDES; COPINNI, 2006).....	31
Figura 2.17 - Tipos de broca helicoidal (TSCHÄTSCH, 2009).....	32
Figura 2.18 - Micrografia mostrando a morfologia dos tipos de desgaste: a) desgaste por difusão (MACHADO et al., 1998); b) desgaste por attrition (CORRÊA, 2014); c) desgaste por abrasão (MORE et al., 2006); d) desgaste por oxidação (SAHM; ABELE; SCHULZ, 2002).....	35
Figura 2.19 - Evolução do desgaste em brocas helicoidais (ERTUNC; OYSU, 2004).....	36
Figura 2.20 - Desgaste de brocas helicoidais (BRINKSMEIER, 1990).....	36
Figura 2.21 - Zonas de compressão e cisalhamento durante o corte (ELEFTHERIOU; BATES, 1999).....	37

Figura 2.22- Desgaste de flanco na ferramenta após usinagem de uma liga de CGI ($V_c = 250$ m/min): a) desgaste de flanco; b) detalhe em A (ROSA et al., 2010).....	39
Figura 2.23 - Desgaste da ferramenta de PCBN ($V_c = 800$ m/min): a) ferro fundido vermicular; b) ferro fundido cinzento (GASTEL et al., 2000).....	39
Figura 2.24 - Curvas de desgaste da ferramenta de metal duro classe K35 do Cinzento A (FC-250) e do Vermicular B (CGI-550) (MOCELLIN et al., 2003).....	40
Figura 2.25 - Representação dos desvios de: a) circularidade; b) cilindricidade (SOUZA; ARENCIBIA; SATO, 2011).....	42
Figura 2.26 - Rugosidade R_a dos furos alargados (EVANS; HOOGENDOORN; PLATT, 2013).....	43
Figura 3.1 - Esquema dos ensaios realizados	46
Figura 3.2 - Geometria dos corpos de prova dos materiais usinados	47
Figura 3.3 - Micrografias do a) FC250; b) FC300; c) FC300(RG); d) FV450. (MEV).....	49
Figura 3.4 - Micrografias do a) FC250; b) FC300; c) FC300 _(RG) ; d) FV450. Ataque em Nital 3% (Microscópio óptico).....	49
Figura 3.5 - Identificação das inclusões de sulfeto de manganês.....	51
Figura 3.6 - Determinação do espaçamento interlamelar da perlita.....	52
Figura 3.7 - Geometria das ferramentas utilizadas a) corpo de brocas; b) ponta intercambiável de brocas SUMOCHAM.....	53
Figura 3.8 - Sequência de usinagem.....	55
Figura 3.9 - Sistema de fixação dos corpos de prova e da ferramenta.....	55
Figura 3.10 - Sistema para medição do batimento a) radial; b) axial.....	56
Figura 3.11 - Exemplo da forma de medição do desgaste de flanco máximo e médio a) ferramenta nova; b) ferramenta desgastada.....	57
Figura 3.12 - Comparativo entre: a) e b) ferramenta nova sem ataque; c) e d) ferramenta desgastada sem ataque químico; e) e f) ferramenta desgastada após ataque químico.....	58
Figura 4.1 - Quantidade média de partículas de MnS por milímetro quadrado.....	62
Figura 4.2 - Distribuição das áreas das partículas de MnS.....	62
Figura 4.3 - Caracterização da perlita dos materiais estudados.....	63
Figura 4.4 - Imagens comparativas da perlita do: a) FC250; b) FC300; c) FC300 _(RG) ; d) FV450.....	64
Figura 4.5 - Comprimento do desgaste de flanco máximo para os quatro ferros fundidos analisados na condição $V_c = 70$ m/min e $f = 0,15$ mm/rot.....	65
Figura 4.6 - Análise das características do desgaste da ferramenta na furação do FV450: a) vista geral da ferramenta; b) vista ampliada da região 1 mostrada na Fig. 4.6a; c) vista ampliada da região 2 mostrada na Fig. 4.6b; d) vista ampliada da região 3 da Fig. 4.6b.....	67

- Figura 4.7 - Análise do desgaste da ferramenta na furação do FC250: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da região 1 sem ataque químico; c) vista ampliada da região 1 depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.7c...69
- Figura 4.8 - Análise do desgaste da ferramenta na usinagem do FC300: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da região 1 sem ataque químico; c) vista ampliada da região 1 depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.8c...70
- Figura 4.9 - Análise das características do desgaste da ferramenta na furação do FC300_(RG): a) vista geral da ferramenta; b) vista ampliada da região 1 mostrada na Fig. 4.9a; c) vista ampliada da região 3 mostrada na Fig. 4.9b; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.9a.....71
- Figura 4.10 - Comprimento do desgaste de flanco máximo para os quatro ferros fundidos analisados na condição $V_c = 70$ m/min e $f = 0,25$ mm/rot.....72
- Figura 4.11 - Análise das características do desgaste da ferramenta na furação do FV450: a) vista geral da ferramenta; b) vista ampliada da região 1 mostrada na Fig. 4.11a; c) vista ampliada da região 2 mostrada na Fig. 4.11b; d) vista ampliada da região 3 da Fig. 4.11b.....73
- Figura 4.12 - Comparativo entre as ferramentas utilizadas na furação do: a) FC250; b) FC300; c) FC300_(RG) antes do ataque químico.....74
- Figura 4.13 - Comparativo entre as brocas utilizadas na usinagem, após ataque químico, do: a) FC250; b) ampliação da região 1a ilustrada na Fig. 4.13a; c) FC300; d) ampliação da região 1c ilustrada na Fig. 4.13c; e) FC300_(RG); e) ampliação da região 1e mostrada na Fig. 4.13e...75
- Figura 4.14 - Comprimento do desgaste de flanco máximo para os quatro ferros fundidos analisados na condição $V_c = 140$ m/min e $f = 0,15$ mm/rot.....78
- Figura 4.15 - Análise do desgaste da ferramenta na usinagem do FV450: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da região 1 sem ataque químico; c) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.15d depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 1 da Fig. 4.15a.....80
- Figura 4.16 - Análise da característica do desgaste da ferramenta na usinagem do FC250: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da região 1 sem ataque químico; c) vista ampliada da região 1 da Fig. 4.16a depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.16a.....82
- Figura 4.17 - Comparativo entre as brocas utilizadas na furação do: a) FC300; b) FC300_(RG) antes do ataque químico.....83
- Figura 4.18 - Comparativo entre as ferramentas utilizadas na furação, após ataque químico, do: a) FC300; b) FC300_(RG); c) ampliação da região 1a ilustrada na Fig. 4.18a; d) ampliação da região 1b ilustrada na Fig. 4.18b; e) ampliação da região 2a mostrada na Fig. 4.18a; f) ampliação da região 2b ilustrada na Fig. 4.18b.....84
- Figura 4.19 - Comprimento do desgaste de flanco máximo para os quatro ferros fundidos analisados na condição $V_c = 140$ m/min e $f = 0,25$ mm/rot.....85
- Figura 4.20 - Comparativo entre as ferramentas utilizadas na furação, após ataque químico, do: a) FV450; b) FC250; c) FC300; d) FC300_(RG).....87
- Figura 4.21 - Análise do desgaste da broca na usinagem do FV450: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da ponta da broca sem ataque químico; c) vista ampliada da região 1 depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.21a.....88

Figura 4.22 - Gráfico comparativo da usinabilidade dos ferros fundidos em estudo, segundo o critério de vida $VB_{Bmax} = 0,40$ mm.....	89
Figura 4.23 - Mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da velocidade de corte (Adaptado de VIEREGGE, 1970 apud KÖNIG; KLOCKE, 2008).....	90
Figura 4.24 - Variação dos esforços de corte pela velocidade para os quatro ferros fundidos: a) F_z ; b) M_z . Condições de corte: $f = 0,27$ mm/rot e $L_f = 16$ mm.....	95
Figura 4.25- Variação dos esforços de corte pelo avanço: a) F_z ; b) M_z . Condições de corte: $V_c = 135$ m/min e $L_f = 16$ mm.....	96
Figura 4.26 - Variação dos desvios de forma pela velocidade de corte: a) Circularidade; b) Cilindricidade. Condições de corte: $f = 0,27$ mm/rot e $L_f = 16$ mm.....	98
Figura 4.27 - Variação dos desvios de forma pelo avanço: a) Circularidade; b) Cilindricidade. Condições de corte: $V_c = 135$ m/min e $L_f = 16$ mm.....	99
Figura 4.28 - Variação da rugosidade: a) Ra ; b) Rq ; c) Rz pela velocidade. Condições de corte: $f = 0,27$ mm/rot e $L_f = 16$ mm.....	102
Figura 4.29 - Variação da rugosidade: a) Ra ; b) Rq ; c) Rz pelo avanço. Condições de corte: $V_c = 135$ m/min e $L_f = 16$ mm.....	103

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Classes de ferro fundido cinzento conforme a resistência à tração (GUESSER, 2009).....	8
Tabela 2.2 - Classes do ferro vermicular conforme norma SAE J1887/2002 (GUESSER, 2009).....	11
Tabela 2.3 - Efeito da microestrutura dos ferros fundidos cinzentos sobre a vida da ferramenta de corte (ASM, 1989).....	16
Tabela 2.4 - Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, vermiculares e nodulares (DAWSON et al., 2014)	18
Tabela 2.5 - Caracterização dos ferros fundidos do estudo (MOCELLIN et al., 2003).....	22
Tabela 2.6 - Principais parâmetros de rugosidade de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002)	42
Tabela 2.7 - Matriz de planejamento 2^3	45
Tabela 3.1 - Composição química dos materiais estudados.....	48
Tabela 3.2 - Características da grafita e da matriz dos ferros fundidos.....	48
Tabela 3.3 - Dureza e resistência mecânica dos ferros fundidos.....	50
Tabela 3.4 - Variáveis de entrada à dois níveis.....	54
Tabela 3.5 - Planejamento fatorial 2^3	54
Tabela 3.6 - Dados das condições de corte para os ensaios específicos.....	58
Tabela 4.1 - Análise de significância dos resultados de desgaste comparando FC250 e FC300.....	91
Tabela 4.2 - Análise de significância dos resultados de desgaste comparando FC250 e FC300 _(RG)	93
Tabela 4.3 - Análise de significância dos resultados de desgaste comparando FC250 e FV450.....	94
Tabela 4.4 - Variação da circularidade e cilindridade pela velocidade de corte.....	100
Tabela 4.5 - Variação da circularidade e cilindridade pelo avanço.....	100

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

Abreviações

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI - *American Iron and Steel Institute*

APC - Aresta postiça de corte

ASM - *American Society of Metals*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CBN - Nitreto cúbico de boro

CGI - Ferro fundido vermicular

CVD - Deposição química de vapor

DIN - *Deutsches Institut für Normung*

DOE - *Design of experiments*

EDS - Espectrômetro de energia dispersiva

HB - Dureza Brinell

HSS - Ferramenta de aço rápido

HV - Dureza Vickers

ISO - Organização Internacional para Padronização

IT - Intervalo de Tolerância ou Qualidade do Trabalho

LE - Limite de escoamento

LEPU - Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem

LR - Limite de resistência à tração

MEV - Microscópio eletrônico de varredura

NBR - Norma Brasileira

PCBN - Nitreto de boro cúbico policristalino

PVD - Deposição física de vapor

SAE - *Society of Automotive Engineers*

UFU - Universidade Federal de Uberlândia

Letras Gregas

σ - Ângulo da ponta da ferramenta [graus]

Letras Latinas

C_m - Largura do desgaste da aresta transversal [mm]

C_t - Ponto mais alto do desgaste da aresta transversal [mm]

D - Diâmetro da broca [mm]

f - Avanço [mm/rot]

F - Força de usinagem resultante [N]

F_c - Força principal de corte [N]

F_p - Força passiva [N]

F_z - Força de avanço [N]

H - Desgaste de guia [mm]

k - Número de variáveis controladas em um planejamento experimental

KB - Desgaste de cratera [mm]

K_c - Pressão específica de corte [N/mm^2]

K_f - Pressão específica de avanço [N/mm^2]

KT - Profundidade de cratera [mm]

L - Comprimento [mm]

L_f - Profundidade de penetração da broca

M_z - Momento Torçor [N.mm]

Ra - Desvio aritmético médio

Rq - Desvio médio quadrático

Rt - Altura total do perfil

T_c - Tempo de usinagem

VB - Desgaste de flanco [mm]

$VB_{B_{max}}$ - Desgaste de flanco máximo [mm]

$VB_{B_{med}}$ - Desgaste de flanco médio [mm]

V_c - Velocidade de corte

\overline{y}_+ - resposta média para o nível superior da variável

\overline{y}_- - resposta média para o nível inferior da variável

SUMÁRIO

CAPÍTULO I.....	1
CAPÍTULO II.....	4
2.1 Ferros fundidos.....	4
2.1.1 Caracterização dos ferros fundidos cinzentos	7
2.1.1.1 Classificação dos ferros fundidos cinzentos.....	8
2.1.2 Caracterização dos ferros fundidos vermiculares.....	9
2.1.1.2 Classificação dos ferros fundidos vermiculares.....	11
2.1.3 Ferros fundidos cinzentos e vermiculares de alta resistência.....	12
2.2 Usinabilidade dos ferros fundidos.....	15
2.2.1 Usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos.....	16
2.2.2 Usinabilidade dos ferros fundidos vermiculares.....	17
2.3 Furação do ferro fundido cinzento e vermicular.....	20
2.4 Força e torque na furação de ferros fundidos cinzentos e vermiculares.....	23
2.5 Materiais e geometria de ferramentas utilizados no processo de furação.....	26
2.5.1 Metal duro	27
2.5.2 Estrutura da broca helicoidal.....	30
2.6 Desgaste nas ferramentas de corte.....	32
2.6.1 Mecanismos de desgaste.....	33
2.6.2 Desgaste em brocas helicoidais.....	35
2.6.3 Desgaste e vida da ferramenta em ferros fundidos.....	37
2.7 Integridade superficial dos furos usinados	42
2.7.1 Circularidade e Cilindricidade.....	41
2.7.2 Rugosidade Superficial.....	42
2.8 Planejamento de Experimentos	43
2.8.1 Planejamento Fatorial.....	44
2.8.2 Cálculo dos efeitos principais e de interação entre variáveis	45

CAPÍTULO III	46
3.1 Aspectos gerais.....	46
3.2 Corpos de prova	47
3.3 Caracterização dos materiais utilizados	47
3.3.1 Composição química.....	48
3.3.2 Análise metalográfica.....	48
3.3.3 Propriedades Mecânicas	50
3.3.4 Determinação da distribuição das inclusões de MnS nos ferros fundidos cinzentos.	50
3.3.5 Determinação do espaçamento interlamelar da perlita.....	51
3.3.6 Ensaio de microdureza na perlita.....	52
3.4 Ferramentas utilizadas.....	53
3.5 Ensaio de furação (vida da ferramenta)	53
3.5.1 Critério de fim de vida da ferramenta e monitoramento da evolução do desgaste.....	56
3.6 Caracterização dos Mecanismos de Desgaste da Ferramenta	57
3.7 Ensaio específico (força de avanço, torque e qualidade dos furos).....	58
3.7.1 Monitoramento da força de avanço (Fz) e do torque (Mz)	59
3.7.2 Medição da rugosidade.....	59
3.7.3 Medição da circularidade e cilindricidade.....	59
CAPÍTULO IV	61
4.1 Caracterização microestrutural dos ferros fundidos	61
4.1.1 Distribuição das partículas de sulfeto de manganês nos ferros fundidos cinzentos	61
4.1.2 Caracterização da perlita nos ferros fundidos	63
4.2 Resultados dos ensaios de vida e da caracterização do desgaste das ferramentas	64
4.2.1 Condição $V_c = 70$ m/min e $f = 0,15$ mm/rot	65
4.2.2 Condição $V_c = 70$ m/min e $f = 0,25$ mm/rot	71
4.2.3 Condição $V_c = 140$ m/min e $f = 0,15$ mm/rot	77
4.2.4 Condição $V_c = 140$ m/min e $f = 0,25$ mm/rot	85
4.2.5 Discussão geral.....	88
4.2.6 Análise de significância dos resultados de desgaste	91

4.3 Resultados dos ensaios específicos de furação.....	94
4.3.1 Força de avanço e torque.....	94
4.3.2 Circularidade e Cilindricidade	97
4.3.3 Rugosidade (R_a , R_q , R_z)	101
CAPÍTULO V	105
5.1 Conclusões	105
5.2 Propostas para trabalhos futuros	107
CAPÍTULO VI.....	108
Referências Bibliográficas	108

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Atualmente observa-se, por parte das indústrias, uma busca crescente pela maior eficiência e expansão de mercado através da agregação de valor ao produto final, redução dos custos e de impactos ambientais, entre outras ações. Neste contexto, os fabricantes de veículos, sob constantes exigências da Legislação Ambiental com relação à emissão de poluentes, vêm buscando cada vez mais a melhoria contínua de seus processos, tendo como um dos principais objetivos a diminuição do consumo dos combustíveis fósseis.

O alto preço dos combustíveis e os danos ao meio ambiente, principalmente devido à liberação de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), dióxido de carbono (CO₂) e hidrocarbonetos (HC), movem estes estudos.

Pesquisa realizada pelo *Ward's Auto* estima que a frota mundial de veículos atingiu 1,2 bilhão de unidades em 2014, com perspectivas de alcançar 2 bilhões em 2035. Deste modo, a quantidade utilizada de combustível fóssil pode ultrapassar ao que a natureza oferece, tornando-o mais escasso e caro. Assim sendo, é essencial sua utilização eficiente associada às pesquisas de outras fontes de combustíveis ou no desenvolvimento de novos materiais que permitam alcançar maior desempenho, juntamente com menor emissão de gases poluentes.

Entre os trabalhos que a indústria automobilística e seus fornecedores vêm desenvolvendo para melhorar a eficiência, no que se refere ao motor diesel, este com melhor desempenho e menor emissão de poluentes, está a utilização de novos e mais resistentes materiais para aplicação nos componentes que fazem parte do motor, como é o caso do cabeçote e do bloco do motor. Mocellin (2002) afirma que estes motores necessitam de uma estrutura rígida para suportar os esforços, pois trabalham com elevadas taxas de compressão.

Desta forma, o seu desempenho e emissão de poluentes poderiam ser melhorados se maiores picos de pressão na câmara de combustão pudessem ser suportados.

Para tanto, os engenheiros de projeto devem escolher entre aumentar a espessura das seções das peças e, conseqüentemente, o peso ou utilizar materiais mais resistentes. Contudo, o peso dos motores influencia diretamente o consumo de combustível do veículo, aumentando o custo e tornando-o menos competitivo frente às exigências de redução da emissão de poluentes. Portanto, a alteração de material se torna uma opção defensável (DAWSON; INDRA, 2012).

O ferro fundido cinzento é um material muito utilizado na fabricação de cabeçotes de motores diesel. Entretanto, o aumento nas taxas de compressão pode ocasionar trincas e deformações neste componente, razão pela qual estes materiais devem ser fabricados ligados normalmente ao cromo ou molibdênio, que aumentam significativamente a resistência mecânica, impactando de forma positiva na vida do cabeçote (GUESSER, 2009).

Outra alternativa é o uso de ferros fundidos vermiculares, cuja a alta resistência mecânica, se comparado ao ferro fundido cinzento, permite o alcance de maiores taxas de compressão nestes motores, o que pode resultar em reduções de espessuras das peças. Porém, suas características mecânicas e físicas tornam os custos dos processos de usinagem ainda mais elevados, pois estes aceleram o desgaste da ferramenta, aumentando o número de trocas e assim o tempo de máquina parada, o que reduz a capacidade de produção ao utilizar este material.

De acordo com Marquard, Helfried e McDonald (1998), a escolha de um material para aplicação na indústria automobilística deve ser embasada nas seguintes características: peso, resistência mecânica, custo do material, considerações ambientais e custo de usinagem.

Desta forma, considerando o interesse das empresas do ramo automobilístico e seus fornecedores em materiais que atendam ao mercado com os menores custos de produção e com o menor impacto possível ao meio ambiente, fazem-se necessários estudos que permitam avaliar o comportamento de novos tipos de materiais frente aos processos de fabricação, possibilitando decisões maduras quanto à substituição ou não dos materiais já disponíveis.

Diante desta realidade, este trabalho visa avaliar a usinabilidade de um ferro fundido cinzento de alta resistência, o FC-300 com refino de grafita e adição de molibdênio, para aplicação em cabeçotes de motores, comparando-o com materiais já utilizados para este fim: o FC-300 apenas ligado ao molibdênio, o ferro fundido cinzento FC-250 e o ferro fundido vermicular classe 450.

Assim sendo, esta pesquisa objetiva estudar a usinabilidade de ferros fundidos de alta resistência, utilizando o processo de furação, por ser um processo amplamente utilizado na confecção de cabeçotes de motor, com brocas helicoidais com corpo de aço e pontas de metal duro intercambiáveis. O trabalho é fruto de uma parceria entre o Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU) e a Empresa Tupy S.A., fornecedora do material usinado.

O presente estudo consiste na avaliação da vida da ferramenta, identificação dos mecanismos de desgaste ocorridos nas brocas, monitoramento da força de avanço e o momento torçor, além de análises da qualidade dos furos usinados (rugosidade, cilindridade e circularidade). Ademais, as características microestruturais dos materiais em questão, tais como distribuição das inclusões de sulfeto de manganês (MnS) na matriz, espaçamento interlamelar e microdureza da perlita desses materiais são correlacionadas com a usinabilidade.

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, incluindo esta introdução – Capítulo I; Revisão Bibliográfica – Capítulo II; Metodologia – Capítulo III; Resultados e Discussões – Capítulo IV; Conclusões e Propostas para Trabalhos Futuros – Capítulo V e Referências – Capítulo VI.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ferros fundidos

Os ferros fundidos, sejam como utensílios, objetos de arte ou armamentos, são produzidos há mais de 2000 anos. Como processo industrial, este sem dúvida causou grande impacto na sociedade devido à sua utilização em larga escala na produção de peças de máquinas, automóveis, entre outras. Isto se deve à alta flexibilidade que o processo de fundição permite no emprego dos ferros fundidos em diversos componentes de engenharia (MAGALHÃES, 2011).

Ferros fundidos são essencialmente ligas de ferro carbono que contêm outros elementos importantes, tais como silício, manganês, enxofre e fósforo. Estas ligas possuem teores de carbono superiores a 2,0%, quantidade superior a que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a originar carbono parcialmente livre, na forma de lamelas de grafita (ANGUS, 1978; CHIAVERINI, 1986).

Cada um dos elementos de liga presentes na composição química do ferro fundido apresentará algum efeito em sua estrutura final, conforme citam, em termos gerais, Chiaverini (1986) e Dawson et al. (2014):

- Carbono: determina a quantidade de grafita a se formar;
- Silício: elemento grafitizante, que facilita a decomposição do carboneto de ferro;
- Manganês: possui efeito oposto ao do silício, ou seja, tende a estabilizar a cementita, além de atuar como dessulfurante;
- Fósforo: este elemento forma um composto eutético (carboneto e fosfeto de ferro) que apresenta aparência branca, chamada steadita;

- Enxofre: este elemento juntamente com o manganês forma o composto chamado sulfeto de manganês (MnS), que tendem a melhorar a usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos.

De acordo com Guesser (2009), os ferros fundidos são classificados em famílias principalmente de acordo com a forma da grafita. O nome de cada família reflete em alguns casos a forma da grafita (nodular, vermicular), em outros casos tem relação com o aspecto da fratura (cinzento, branco) ou com alguma propriedade relevante (maleável).

Sendo assim, as principais famílias de ferros fundidos são caracterizadas da seguinte forma:

- Ferros fundidos brancos: nesses materiais a maior parte do carbono está presente na forma de cementita (carboneto de ferro - Fe_3C) ou outros carbonetos metálicos, apresentando uma fratura com coloração branca. São ligas de elevada dureza e resistência ao desgaste, o que o torna difícil de ser usinado. Aplicações típicas destas ligas estão relacionadas com equipamentos de manuseio de terra, mineração e moagem (CHIAVERINI, 2002).

- Ferros fundidos cinzentos: apresentam grafita em forma de veios, o que torna esses materiais bons condutores térmicos, por isso é muito empregado em componentes sujeitos à fadiga térmica (tambores e discos de freio, cabeçotes de motor). Suas características, tais como fácil fusão e moldagem, boa resistência mecânica, excelente usinabilidade, boa resistência ao desgaste, entre outras, são o que faz com que seja uma das ligas mais usadas (GUESSER, 2009; CHIAVERINI, 2002).

- Ferros fundidos maleáveis: estas ligas superam a limitação referente à ductilidade, sendo obtidas através de tratamento térmico a fim de transformar toda a cementita em grafita (ferro fundido maleável de núcleo preto) ou de modo que parte do carbono seja eliminado por oxidação e o restante transformado parcial ou completamente em grafita (ferro fundido maleável de núcleo branco). No Brasil e na Europa, são aplicadas em conexões para transportes de fluidos, em ferro maleável branco ou preto. No entanto, foram em grande parte substituídas pelos ferros fundidos nodulares, devido as suas vantagens técnicas e econômicas (ROTHERY, 1968; GUESSER, 2009).

- Ferros fundidos nodulares: são obtidos através da adição de magnésio, cálcio e cério a um ferro fundido comum, desta forma será produzida grafita em formato de nódulos quase esféricos, de modo que a ductilidade seja uma propriedade importante desses materiais. Estas ligas tem encontrado aplicação crescente na engenharia, substituindo componentes de ferro fundido cinzento, ferro fundido maleável, entre outros. São muito usados na fabricação de

girabrequins, eixos comando de válvulas, carcaças, componentes hidráulico, etc. (ROTHERY, 1968; GUESSER, 2009).

- Ferros fundidos vermiculares: nestas ligas a grafita apresenta-se predominantemente em forma de vermes. Estes materiais apresentam boas características de resistência mecânica, tenacidade, ductilidade, resistência a choques térmicos, entre outras. São utilizados em coletores de exaustão e blocos de motores diesel (GUESSER, 2009; ALVES, 2010).

Na Fig. 2.1 são mostradas microestruturas das classes de ferros fundidos citadas anteriormente:

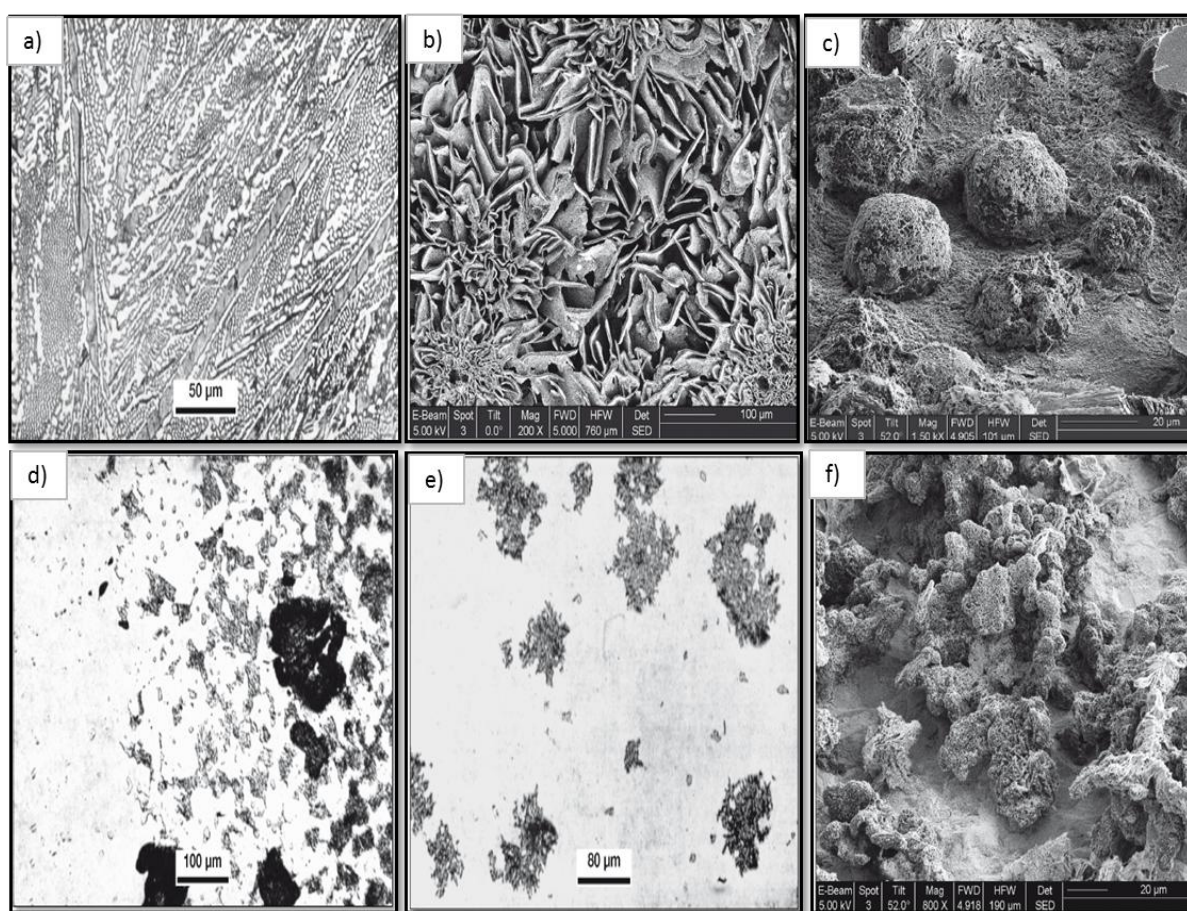


Figura 2.1 - Microestrutura do ferro fundido: a) branco hipereutético; b) cinzento; c) nodular; d) maleável de núcleo branco; e) maleável de núcleo preto; f) vermicular (COLPAERT; SILVA, 2008)

Nos próximos tópicos serão feitas abordagens mais detalhadas dos ferros fundidos cinzentos e dos ferros fundidos vermiculares, os quais foram utilizados nos ensaios de usinabilidade deste trabalho.

2.1.1 Caracterização dos ferros fundidos cinzentos

O ferro fundido cinzento é uma liga ferro-carbono-silício, caracterizados por apresentar microestrutura bruta de fusão constituída de veios de grafita em uma matriz ferrosa, normalmente perlítica (Fig. 2.2). Sua composição química varia de 2,5 a 4% de carbono e 1 a 3% de silício (CASTILLO, 2005; STUEWE, 2008).

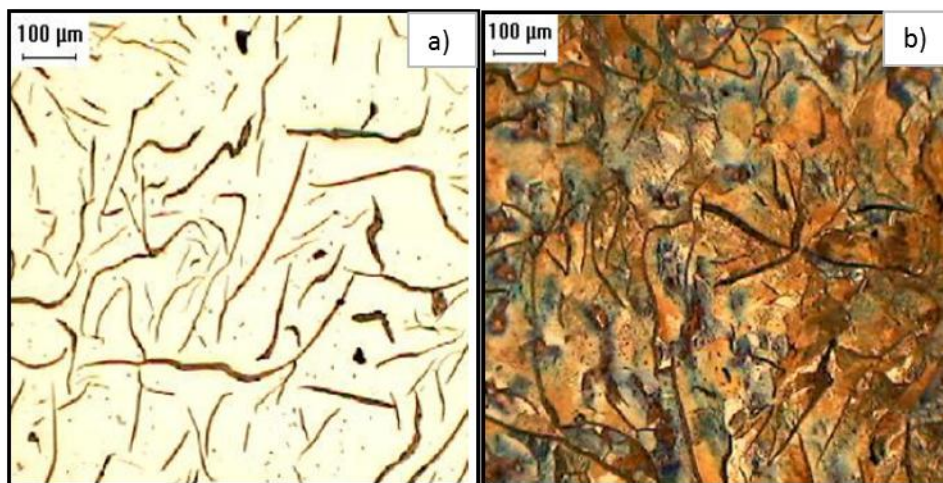


Figura 2.2 - Microestrutura do ferro cinzento: a) sem ataque; b) com ataque de Nital 4% (STUEWE, 2008).

O carbono e o silício promovem a formação da grafita, sendo que quanto maior a sua quantidade menos resistente será o material. Além disso, a forma da grafita, a dimensão dos veios e a sua distribuição afetam igualmente as suas propriedades. Por outro lado, a matriz dos ferros fundidos cinzentos é composta de ferrita e perlita. Se a primeira predominar, o material torna-se mais fácil de ser usinado, mas suas propriedades mecânicas são prejudicadas, visto que a ferrita possui dureza mais baixa, se comparada aos demais constituintes, com exceção da grafita. Se a perlita, constituinte que apresenta resistência e dureza média, for predominante na matriz metálica, os ferros cinzentos apresentarão melhor resistência mecânica (CHIAVERINI, 2002).

Nos ferros fundidos também existe a possibilidade de se formar carbonetos de ferro ao invés de grafita. Estes constituintes são extremantes duros e em maiores quantidades geram efeitos negativos sobre os processos de usinagem (GUESSER, 2009).

2.1.1.1 Classificação dos ferros fundidos cinzentos

A classificação adotada pela ABNT representa o ferro fundido cinzento pelas iniciais FC, seguido de algarismos que representam o limite mínimo de resistência à tração. A Tab. 2.1 apresenta as classes do ferro fundido cinzento segundo a norma ABNT NBR 6589/1986:

Tabela 2.1 - Classes de ferro fundido cinzento conforme a resistência à tração (GUESSER, 2009)

Classe	D (mm) (*)	d (mm) (**)	LR mínimo (MPa)
FC-100	20	20,0	100
FC-150	13	8,0	230
	20	12,5	180
	30	20,0	150
	45	32,0	110
FC-200	13	8,0	280
	20	12,5	230
	30	20,0	200
	45	32,0	160
FC-250	13	8,0	330
	20	12,5	280
	30	20,0	250
	45	32,0	210
FC-300	20	12,5	330
	30	20,0	300
	45	32,0	260
FC-350	20	12,5	380
	30	20,0	350
	45	32,0	310
FC-400	30	20,0	400
	45	32,0	360

D - diâmetro da barra no estado bruto de fundição

d - diâmetro do corpo de prova usinado

LR - limite de resistência mínimo especificado

As classes FC-100 e FC-150 correspondem aos ferros fundidos cinzentos comuns, com excelente fundibilidade e fácil usinagem. A classe FC-100 é empregada para aplicações envolvendo choque térmico ou alta capacidade de amortecimento de vibrações. A classe FC-150 é utilizada, entre outras aplicações, em bases de máquinas e carcaças metálicas. As classes FC-200 e FC-250, também de boas fundibilidade e usinabilidade, apresentam melhor resistência mecânica e se aplicam a discos, tambores de freio, blocos de motores (geralmente

especificados na classe FC-250), cabeçotes (normalmente especificados nas classes FC-250 e FC-300), entre outros (CHIAVERINI, 2002; GUESSER, 2009).

Para esses autores, as classes FC-350 e FC-400, com maiores dureza e resistência mecânica, são empregadas para aplicações específicas, como engrenagens, bases pesadas de máquinas, eixos comandos de válvulas e grandes blocos de motores. No entanto, o uso comercial das classes FC-350 e FC-400 tem decrescido, pois estão sendo substituídas por ferros fundidos nodulares, com menores quantidades de elementos de liga.

2.1.2 Caracterização dos ferros fundidos vermiculares

O ferro fundido vermicular, ou do inglês *Compacted Graphite Iron* (CGI), foi produzido por acaso durante a fabricação do ferro fundido nodular, devido a erros de composição química como resultado do sub-tratamento com magnésio ou cério. Estes materiais possuem estruturas e propriedades intermediárias aos ferros fundidos cinzentos e os nodulares. O CGI possui teores de carbono entre 2,5 a 4,0%, de silício entre 1,0 a 3,0% e de magnésio variando entre 0,1 e 0,6%, dependendo se é desejada uma estrutura de matriz perlítica ou ferrítica (ASM, 1990a; ASM, 1994).

Chiaverini (2002) afirma que este material é um produto intermediário entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido nodular. Dessa forma, o CGI apresenta melhor resistência mecânica que o ferro cinzento além de uma maior ductilidade. Já em relação ao ferro nodular, o vermicular possui maior capacidade de amortecimento e condutividade térmica.

A Fig. 2.3a mostra o aspecto da grafita compacta, que em duas dimensões rendeu a denominação de grafita vermicular. No entanto, a Fig. 2.3b mostra que, na realidade, as lamelas são interconectadas. Esta morfologia compacta, com extremidades arredondadas, dificultam a nucleação e a propagação de trincas, que no caso dos ferros fundidos cinzentos, com grafita lamelar, se tornam mais fáceis de ocorrer (GUESSER, 2002).

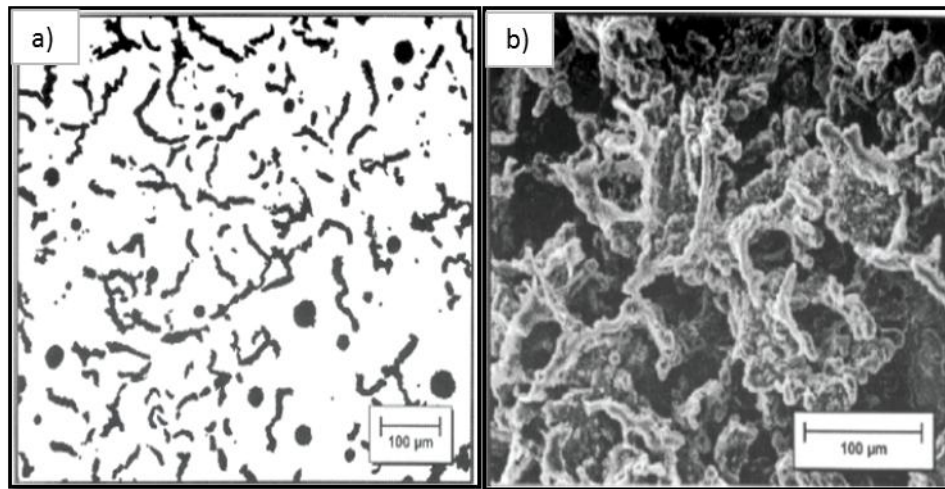


Figura 2.3 - Microestrutura do CGI: a) aspecto da grafita compacta em metalografia óptica; b) aspecto da grafita compacta após ataque profundo - MEV (GUESSER, 2002)

Dawson et al. (2014) classificaram as principais variáveis envolvidas na usinagem do ferro fundido vermicular:

- Efeito da forma da grafita: nos ferros fundidos, o tamanho, a forma e a quantidade de grafita são na maioria das vezes mais significativos do que a sua composição. A variação da grafita da forma lamelar para a vermicular faz com que se altere a forma de ruptura do cavaco, passando de frágil para dúctil.

- Influência da perlita: durante a solidificação, os materiais passam por uma faixa de temperatura na qual se encontram sob a forma de austenita. Abaixo de 727° C, estes materiais podem se transformar em ferrita ou perlita. Caso a velocidade de resfriamento seja lenta o necessário e as condições químicas favoráveis, os átomos de carbono presentes na austenita migram para formar partículas de grafita. Entretanto, se os átomos ficarem retidos na matriz, ocorrerá a formação de perlita. Este composto é constituído por uma estrutura lamelar alternada entre ferrita e cementita. Estas lamelas de Fe_3C reforçam a matriz, tornando-a mais dura e resistente.

- Efeito do enxofre: o enxofre juntamente com o manganês forma o MnS , que atua como lubrificante, formando uma camada protetora na superfície da ferramenta contra a oxidação e a difusão, facilitando assim a usinagem dos ferros fundidos cinzentos. Já no CGI, a camada protetora de MnS não ocorre, devido à porcentagem de enxofre ser dez vezes menor que nos ferros cinzentos.

- Efeito do titânio: este elemento é utilizado tanto para prevenir a formação de grafita nodular, como para melhorar a resistência ao desgaste. O titânio reage com o carbono e/ou nitrogênio presentes na liga para formar inclusões de carbonitreto de titânio (TiCN).

- Influência do cromo: este elemento é perlitizante, por aumentar a solubilidade do carbono no ferro. Nos ferros fundidos é introduzido de forma intencional, assim como o titânio, para conferir maior resistência quando em temperaturas elevadas.

- Efeito das inclusões: todos os metais fundidos podem conter inclusões não metálicas, as quais podem ser óxidos, nitretos, sulfetos ou complexos intermediários. Dependendo da sua composição, as inclusões podem ser duras e abrasivas como o carboneto de titânio (TiC) ou macia e flexível como o sulfeto de manganês (MnS).

- Influência do Silício: tipicamente, o CGI contém teores de silício de 2,0 a 2,4%, que, combinado a elementos perlitizantes, permite atingir a proporção de perlita desejada. Casos os elementos formadores de perlita sejam reduzidos e o teor de silício aumentado para cerca de 3,0%, o resultado será a formação de ferro fundido vermicular com matriz totalmente ferrítica. Essa elevada concentração de silício tende a endurecer a ferrita, fazendo com que um material ferrítico atinja valores de dureza e resistência até mesmo próximas do vermicular perlítico.

2.1.1.2 Classificação dos ferros fundidos vermiculares

A Tab. 2.2 apresenta as classes de ferro fundido vermicular segundo a Norma SAE J1887/2002. Guesser (2009) afirma que essa norma prevê duas classes com valores de nodularidade maiores que os usuais (máximo 20%), uma classe com matriz ferrítica e outra com matriz perlítica.

Tabela 2.2 - Classes do ferro vermicular conforme norma SAE J1887/2002 (GUESSER, 2009)

Classe	Dureza típica (HB)	LR min (MPa)	LE min (MPa)	Alongamento min (%)	Matriz típica	Nodularidade (%)
C250	121-179	250	175	3,0	ferrita	< 20
C300HN	131-189	300	175	3,0	ferrita	20-50
C300	143-207	300	210	2,5	ferrita-perlita	< 20
C350	163-229	350	245	2,0	ferrita-perlita	< 20
C400	197-255	400	280	1,5	perlita-ferrita	< 20
C450	207-269	450	315	1,0	perlita	< 20
C500HN	207-269	500	315	1,5	perlita	20-50

As aplicações das diferentes classes do CGI decorrem da sua posição intermediária entre os ferros fundidos cinzentos (grafita lamelar) e os ferros fundidos nodulares (grafita esferoidal). As vantagens do ferro fundido vermicular sobre o ferro cinzento e o nodular estão sintetizadas na Fig. 2.4.

Vantagem da grafita compactada sobre a grafita lamelar	Vantagem da grafita compactada sobre a grafita esferoidal
<ul style="list-style-type: none"> - maior relação resistência/dureza; - maiores ductilidade e tenacidade, o que resulta em margem superior de segurança para fratura; - menor oxidação e dilatação a temperaturas elevadas 	<ul style="list-style-type: none"> - maior condutividade térmica; - maior resistência ao choque térmico; - maior capacidade de amortecimento; - maior fundibilidade; - melhor usinabilidade

Figura 2.4 - Vantagens do CGI em relação ao ferro fundido cinzento e ao ferro nodular (Adaptado de ASM, 1990a)

Em consequência dessas características, os ferros fundidos vermiculares são aplicados em situações em que a resistência do ferro fundido cinzento é insuficiente, mas é indesejável a utilização do ferro nodular devido as suas propriedades menos favoráveis à fundição e devido a sua condutividade térmica ser menor em relação ao CGI. Exemplos de aplicação envolvem placas de suporte para grandes motores diesel, tubulações de exaustão, caixas de engrenagens, lingoteiras, blocos e cabeçotes de motor, discos de freio, rodas dentadas, entre outras (ASM, 1990a).

2.1.3 Ferros fundidos cinzentos e vermiculares de alta resistência

Em termos gerais, a resistência mecânica dos ferros fundidos e, consequentemente, suas classes estão condicionadas à sua estrutura final obtida. Desta forma, tal propriedade, depende da forma e quantidade de grafita e também da quantidade de ferrita e/ou perlita da matriz metálica, em que a resistência é aumentada com maiores teores de perlita e, também, com a diminuição do espaçamento interlamelar da perlita (TUPY, 2014; NAVES, 2009).

No que diz respeito aos ferros fundidos cinzentos, a quantidade de perlita na matriz é influenciada, primeiramente, pelo tipo de grafita, pois grafitas de super-resfriamento (tipo D e

núcleo da célula do tipo B) favorecem a formação de ferrita na matriz por apresentarem pequenas distâncias para difusão do carbono. Entretanto, uma boa inoculação promove a formação de grafita do tipo A, geralmente associada à matriz perlítica. Sendo assim, para se obter classes de alta resistência nos ferros cinzentos é necessário que a grafita seja do tipo A (MROCZEK, 2000; GUESSER, 2009). Os tipos de grafita em ferros cinzentos, segundo a norma ASTM A 247 (COLPAERT; SILVA, 2008) estão ilustradas na Fig. 2.5.

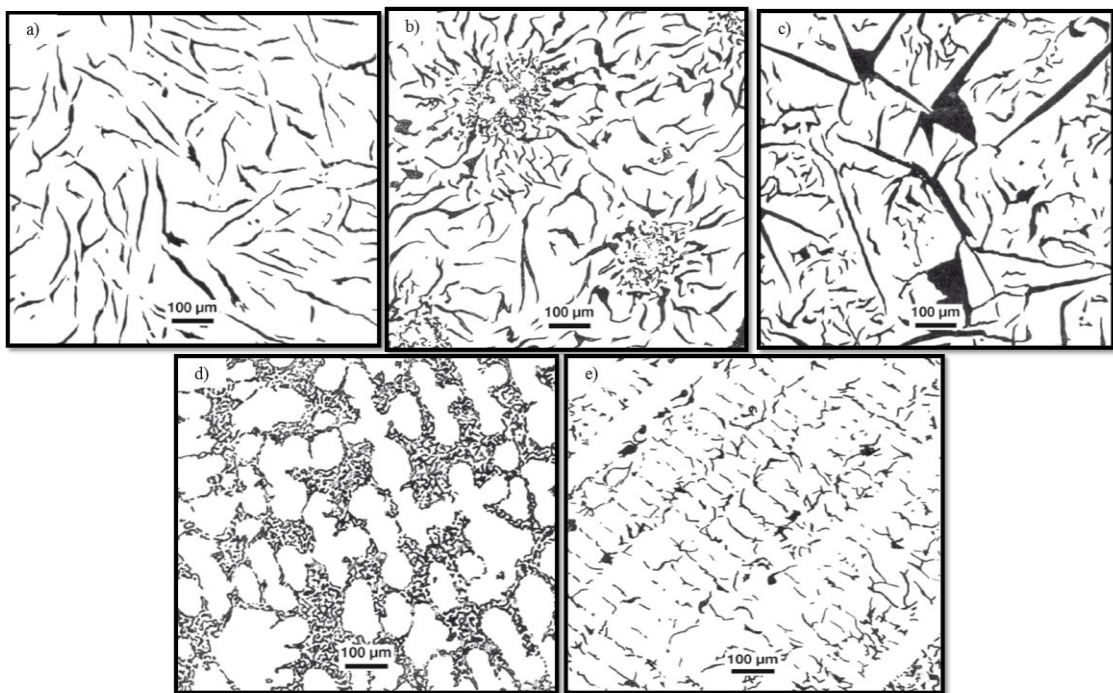


Figura 2.5 - Tipos de grafita em ferro fundido cinzento: a) Tipo A; b) Tipo B; c) Tipo C; d) Tipo D; e) Tipo E (COLPAERT; SILVA, 2008)

Embora o ferro fundido cinzento ainda seja hoje o material tradicionalmente utilizado em muitas aplicações industriais, devido a sua excelente performance nos processos de usinagem, capacidade de amortecimento contra vibrações, resistência ao desgaste, resistência a fadiga, entre outras, a possibilidade de melhorar as propriedades mecânicas deste material é de grande interesse industrial. Muitos projetistas podem preferir o ferro fundido vermicular ou mesmo o ferro fundido nodular, caso seja necessária elevada resistência à tração, mesmo sendo estes mais caros que o ferro cinzento (AZTERLAN, 2013).

O mecanismo usual de elevação da resistência à tração e da dureza dos ferros fundidos cinzentos consiste na adição de elementos de liga, tais como cromo (Cr), molibdênio (Mo), estanho (Sn) e cobre (Cu). Quantidades adicionais de cobre e estanho (elementos perlitizantes) promovem o refino da perlita, ou redução do espaçamento interlamelar, que

resulta em acréscimo na resistência. Já o Cr e o Mo atuam na formação de carbonetos e, assim como o Sn e o Cu, o Mo pode ser utilizado, também, como refinador de perlita (RÖHRIG, 1981; GUESSER, 2009).

No intuito de se alcançar uma resistência à tração mínima de 300 MPa, também, reduz-se o teor de carbono de 3,2 para 3,0% o que resulta em menores lamelas de grafita, reduzindo, assim, o risco de inicialização e propagação de trincas. Ademais, consegue-se, a partir disto, um aumento de 10 a 20% nas propriedades mecânicas (DAWSON, 2009).

Entretanto, essas modificações afetam significativamente algumas das principais vantagens dos ferros cinzentos, como por exemplo, a usinabilidade. Além disso, é necessário considerar o efeito da segregação de elementos de liga (Mn, Cr, Sn e Mo) que promovem heterogeneidade de propriedades mecânicas ao longo da microestrutura dos materiais. Dependendo da concentração alcançada durante a segregação, alguns destes elementos (Mo, Cr, Mn) podem formar carbonetos. No entanto, estes problemas de segregação podem ser minimizados, também, com uma boa inoculação, que proporciona aumento no número de células eutéicas que refina a grafita e, também, promove a distribuição da segregação (DAWSON, 2009; GUESSER, 2009).

No processo de fundição, assim como a composição química, a velocidade de resfriamento no estado sólido, também pode influenciar de forma significativa as propriedades mecânicas dos materiais. Um aumento na taxa de resfriamento irá refinar tanto o tamanho da grafita quanto a estrutura da matriz (refinando e aumentando a quantidade de perlita), o que resultará em um aumento de dureza e resistência (RÖHRIG, 1981; ASM, 1990a).

Similarmente aos ferros fundidos cinzentos, a resistência mecânica dos ferros vermiculares depende da matriz e da grafita, em que a porcentagem de nódulos e a quantidade de perlita na matriz são as variáveis que mais afetam a resistência destes materiais (MONROE; BATES, 1982).

A nodularidade é influenciada pela quantidade de elementos nodulizantes, tais como cério, cálcio e magnésio, pelo aumento do teor de carbono equivalente e pela velocidade de resfriamento na solidificação (taxas de resfriamento mais rápidas promovem o aumento dos nódulos). Já a quantidade de perlita na matriz é controlada pela adição de elementos perlizantes, como Sn, Mn e Cu, que atuam de forma a refinar a perlita, diminuindo o espaçamento interlamelar e, assim, promovendo a obtenção de diferentes classes de ferros vermiculares (DAWSON; SCHROEDER, 2000; SERGEANT, 1980).

2.2 Usinabilidade dos ferros fundidos

Groover (2007) define usinabilidade como sendo a relativa facilidade com que o material pode ser usinado, utilizando de ferramentas e condições de corte adequadas. Para Ferraresi (2003), a usinabilidade retrata, por meio de um índice comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão. Estas propriedades são definidas por Trent e Wright (2000) como aquelas que quantificam o índice de usinabilidade dos materiais, como por exemplo:

- Vida da ferramenta: quantidade de material removido antes que a performance da ferramenta se torne indesejável ou, então, que esta apresente um nível de desgaste padrão que comprometa o seu desempenho.
- Forças de usinagem: forças que atuam sob a ferramenta (medidas por um dinamômetro, a partir de específicas condições) ou o consumo de energia necessário no processo.
- Acabamento superficial: superfície obtida em condições de corte padronizadas.
- Forma do cavaco: a forma do cavaco como influência do seu escorregamento pela superfície de saída da ferramenta, sob condições específicas de usinagem.

Os ferros fundidos são considerados materiais com boa usinabilidade, sendo empregados em muitos componentes devido a esta característica. Para Trent e Wright (2000), a alta usinabilidade dos ferros fundidos vem sendo confirmada através das baixas taxas de desgaste das ferramentas, altas taxas de remoção de material, força e potência de usinagem relativamente baixas e de seus cavacos serem produzidos como pequenos fragmentos que podem ser retirados facilmente da área de corte, mesmo em altas velocidades.

Entretanto, existem alguns materiais deste grupo que tem a sua usinabilidade prejudicada, como é o caso dos ferros fundidos brancos, devido à alta quantidade de cementita que confere propriedades fundamentais de elevada dureza e resistência ao desgaste. Por outro lado, dentre os ferros fundidos com grafita, os ferros cinzentos, são os que apresentam melhores resultados de usinabilidade (CHIAVERINI, 2002).

Com relação aos ferros fundidos nodulares, estes possuem usinabilidade inferior aos ferros fundidos cinzentos. As lamelas de grafita dos ferros fundidos cinzentos atuam como concentradores de tensão no plano de cisalhamento, facilitando assim o corte. No ferro nodular, as esferas de grafita são menos eficazes do que a grafita lamelar no enfraquecimento do material no plano de cisalhamento, e a zona de fluxo de material tende a ser extremamente dúctil (MARQUES, 2012).

De forma geral, a usinabilidade depende do estado metalúrgico do material, da dureza, das suas propriedades mecânicas, composição química, das operações anteriormente efetuadas sobre o material e do seu eventual encruamento. Nos ferros fundidos, quanto maior a dureza e a resistência menor será sua usinabilidade (DINIZ; MARCONDES; COPINNI, 2006).

2.2.1 Usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos

Entre as várias classificações dos ferros fundidos, os ferros cinzentos se configuram como uma das ligas mais fáceis de serem usinadas. A grafita, presente nesses materiais, atua como agente lubrificante durante o corte, produzindo cavacos descontínuos. No que concerne aos materiais ferrosos, a dureza é considerada como um guia razoável de usinabilidade. Contudo, em relação aos ferros fundidos cinzentos a microestrutura é o indicador mais fundamental. Uma redução no teor de ferrita ou diminuição do espaçamento interlamelar da perlita reduz a usinabilidade deste material (ASM, 1990b; ASM, 1989).

Na Tab. 2.3, observa-se que a taxa de desgaste da ferramenta aumenta com o incremento das proporções de perlita na matriz e com a diminuição do espaçamento interlamelar (perlita refinada). Além disso, nota-se também que o excesso de carboneto de ferro na matriz perlítica proporciona aumento adicional na taxa de desgaste.

Tabela 2.3 - Efeito da microestrutura dos ferros fundidos cinzentos sobre a vida da ferramenta de corte (ASM, 1989)

Microestrutura da matriz	Dureza Brinell	Índice de vida da ferramenta
ferrita	121-179	250
50% de ferrita e 50% de perlita	131-189	300
perlita grossa	143-207	300
perlita média	163-229	350
perlita fina	197-255	400
perlita fina com 5% em excesso de Fe_3C	207-269	450

Segundo Guesser (2009), a usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos decresce à medida que se caminha para classes de maior resistência, devido ao aumento da abrasividade com o aumento da quantidade de perlita na matriz e devido à diminuição da ação lubrificante e consequente redução da facilidade de quebra cavaco com a diminuição da quantidade de grafita.

Além disso, verifica-se um decréscimo na usinabilidade à medida que se aumenta a fração de cementita na perlita. O trabalho de Bates (1996) mostra a influência do percentual de Fe_3C na vida da ferramenta através da furação do ferro fundido cinzento com brocas de aço-rápido. Observa-se, através do gráfico da Fig. 2.6, que o aumento da quantidade de cementita na perlita resulta em uma redução do número de furos produzidos.

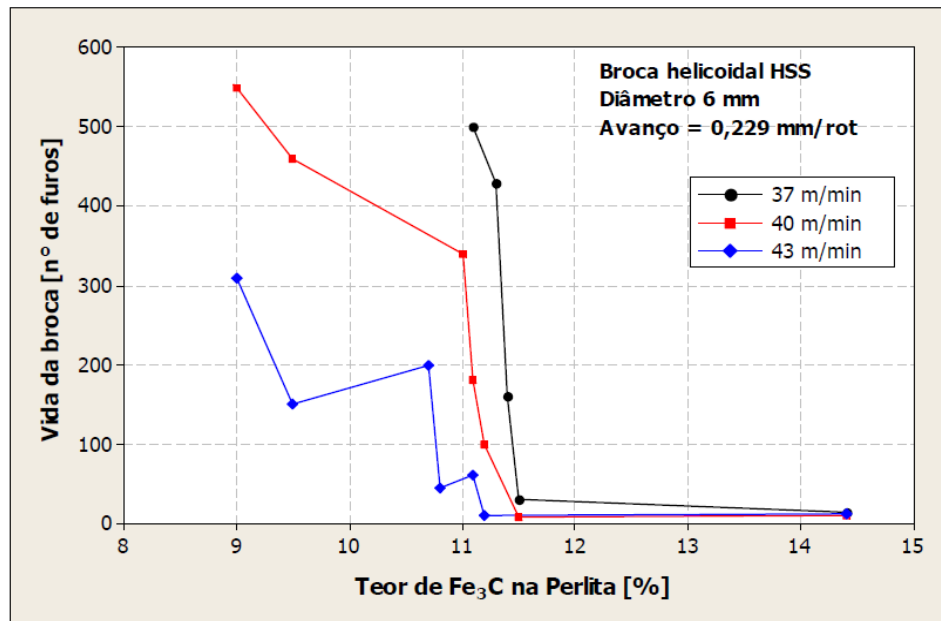


Figura 2.6 - Vida da ferramenta em relação à quantidade de Fe_3C na perlita (BATES, 1996)

2.2.2 Usinabilidade dos ferros fundidos vermiculares

Os ferros fundidos cinzento, vermicular e nodular são diferenciados pela forma das partículas de grafita. A Fig. 2.7 mostra que o ferro fundido cinzento é caracterizado por longas lamelas de grafita orientadas aleatoriamente. As partículas de grafita do ferro fundido nodular se apresentam como nódulos individuais, enquanto as partículas de grafita no ferro fundido vermicular aparecem em forma de vermes ligados aos seus vizinhos mais próximos em uma complexa morfologia de grafita que se assemelha a um coral (DAWSON et al., 2014).

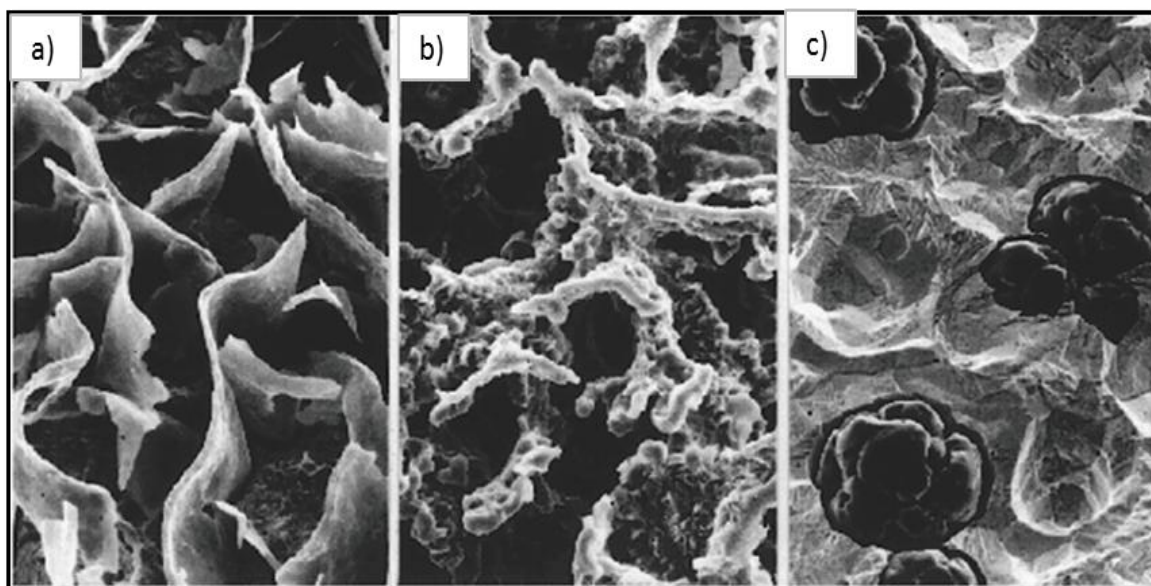


Figura 2.7 - Morfologia típica da grafita: a) cinzento; b) vermicular; c) nodular (DAWSON et al., 2014)

A morfologia da grafita dos ferros fundidos vermiculares, juntamente com as arestas arredondadas e superfícies irregulares, resulta em forte adesão entre a grafita e a matriz ferrosa, o que inibe o início e a propagação de trincas, sendo esta a razão das melhores propriedades mecânicas em relação ao ferro fundido cinzento (SINTERCAST, 2014). As propriedades desses três materiais se encontram resumidas na Tab. 2.4:

Tabela 2.4 - Comparação entre as propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, vermiculares e nodulares (DAWSON et al., 2014)

Propriedade	Cinzento	Vermicular	Nodular
Resistência à Tração (MPa)	250	450	750
Módulo de Elasticidade (GPa)	105	145	160
Alongamento (%)	0	1,5	5
Condutividade Térmica (W/mK)	48	37	28
Capacidade Relativa de Amortecimento	1	0,35	0,22
Dureza (BHN 10/3000)	179-202	217-241	217-255
Resistência à Fadiga (MPa)	110	200	250

Para tanto, segundo Dawson et al. (2014), fica evidente que o ferro fundido vermicular é mais difícil de se usar que o ferro fundido cinzento. Visto que, o primeiro possui limite de

resistência 75% maior e módulo de elasticidade 40% maior que o segundo, além de ter o dobro de resistência à fadiga que o ferro cinzento.

A Fig. 2.8 mostra que a usinagem do ferro fundido vermicular em velocidades mais baixas (150 - 250 m/min) com ferramentas de metal duro fornece aproximadamente 50% da vida da ferramenta em comparação ao ferro fundido cinzento em operações de fresamento e de torneamento. Similarmente, na operação de fresamento em alta velocidade (400 – 800 m/min), ao usar ferramenta de nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN) ou insertos cerâmicos, o ferro fundido vermicular apresenta cerca de 50% da vida da ferramenta, comparado ao ferro fundido cinzento. No entanto, observa-se que a diferença entre a usinabilidade do ferro fundido vermicular e do ferro cinzento é mais significativa ao usar ferramentas de PCBN ou insertos de cerâmica em operações contínuas de alta velocidade do corte, tais como o torneamento e brunimento de cilindros (DAWSON et al., 2014).

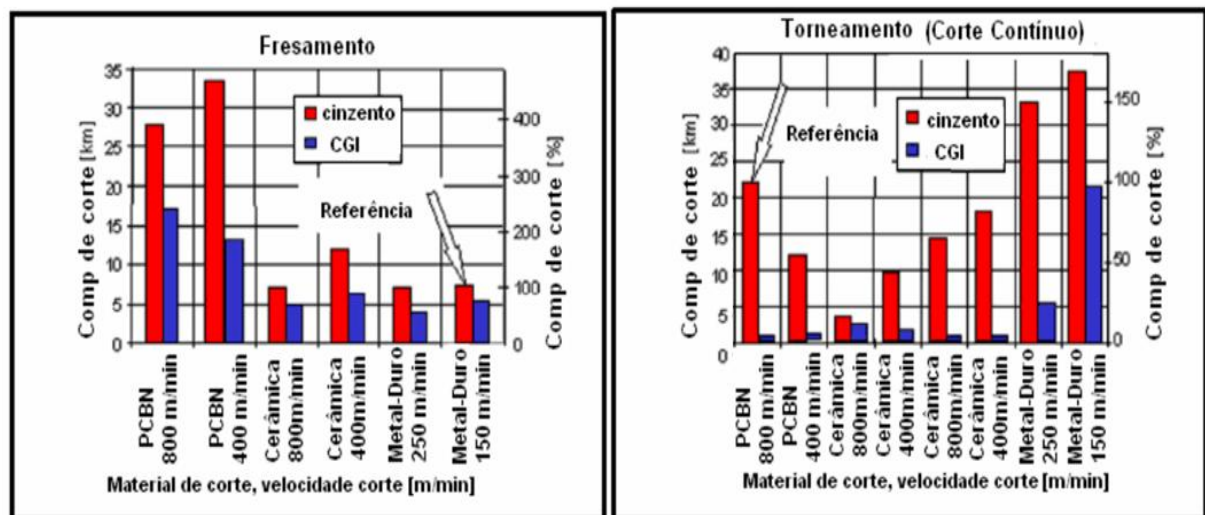


Figura 2.8 - Comparação entre ferro fundido cinzento e ferro fundido vermicular nas operações de fresamento e torneamento em relação à vida da ferramenta (DAWSON et al., 2014)

Estes autores também afirmam que a dificuldade na usinagem dos ferros fundidos vermiculares está relacionada à ausência de sulfeto de manganês em sua microestrutura, pois baixos teores de enxofre são necessários para se obter a grafita vermicular. As partículas de MnS, normalmente presente nos ferros fundidos cinzentos, se depositam sobre a ferramenta, formando uma camada lubrificante uniforme que protege a aresta de corte, melhorando, assim, a usinabilidade, especialmente em altas velocidades de corte.

2.3 Furação do ferro fundido cinzento e vermicular

Ferraresi (2003) define furação como sendo a operação de usinagem destinada à obtenção de furos em que a ferramenta ou a peça giram e simultaneamente a ferramenta ou a peça se deslocam em uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela ao eixo principal da máquina.

No processo de furação, mostrado na Fig. 2.9, normalmente a peça (P) é fixada à estrutura da máquina-ferramenta (E) e através do movimento, rotativo (R) e de translação (T) da ferramenta (F) na direção do eixo do furo, o cavaco é removido e à medida que é retirado, se enrola em forma de espiral cilíndrica. A ferramenta utilizada neste processo é chamada de broca, que é dotada de um movimento giratório contínuo e de um movimento retilíneo de avanço segundo o eixo de perfuração (GERONIMO, 2011; CHIAVERINI, 1986).

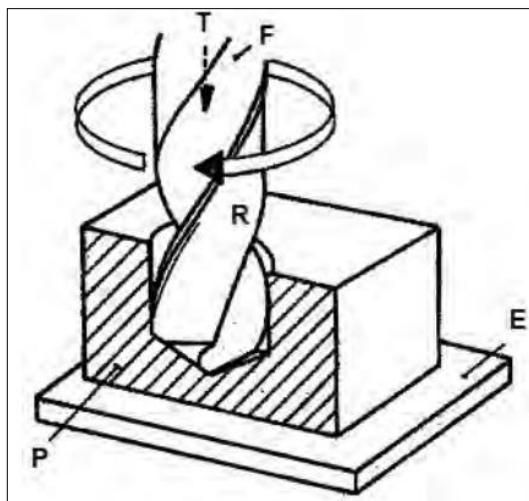


Figura 2.9 - Representação do processo de furação (GERONIMO, 2011)

Stemmer (1995), lista algumas características do processo de furação:

- A formação do cavaco é interna e existe um espaço limitado para a sua remoção, dificultando o seu transporte para fora da região de corte;
- A velocidade de corte não é uniforme, variando desde zero, no centro do furo, até um valor máximo na periferia;
- A distribuição de calor na região de corte não é adequada;
- Ocorre desgaste acentuado nas quinas com cantos vivos das brocas.

Para Marmentini (2009), no processo de furação, existe ainda a dificuldade de acesso do fluido de corte na ponta da broca, o que faz com que a temperatura na região de corte seja bastante elevada, ocasionando imprecisão dimensional e maiores desvios na forma geométrica

dos furos usinados. Além disso, ocorre uma concentração adicional de calor nas pontas de corte da broca, consequência de uma maior velocidade de corte em relação às demais áreas da aresta de corte, acelerando o processo de desgaste e, conseqüentemente, prejudicando o acabamento superficial dos furos usinados.

Na furação do ferro fundido cinzento, destaca-se os trabalhos de Eleftheriou e Bates (1999), que realizaram testes de furação em ligas de ferro fundido. Segundo os resultados destes autores, os carbonetos de ferro influenciam o processo de usinagem e a sua quantidade se deve à maior concentração de elementos que retardam a difusão do carbono na liga. Para estes autores, a vida da ferramenta diminui com o incremento da velocidade de corte ou com o aumento da porcentagem de cementita presente na liga. Portanto, em velocidades de corte mais baixas pode-se obter uma vida mais longa para a ferramenta, por minimizar o superaquecimento na ponta da ferramenta.

Entretanto, em baixas velocidades de corte, a camada protetora de sulfeto de manganês não propicia redução significativa do coeficiente de atrito, que por sua vez, facilita o corte. Sendo assim, verifica-se que no processo de furação com brocas de metal-duro, que é realizado em velocidades de corte mais baixas que os processos que utilizam ferramentas de nitreto cúbico de boro (CBN) ou cerâmica, ocorrem menores diferenças de usinabilidade entre o ferro fundido cinzento e o ferro fundido vermicular (MOCELLIN, 2002).

Nestas condições, este autor explica que estas menores diferenças de usinabilidade ocorrem devido à camada protetora de MnS, que não se forma na usinagem do CGI e que possuirá menor tendência a se formar na furação do ferro fundido cinzento. Dessa forma, observa-se normalmente uma redução de usinabilidade do CGI de 50% em relação ao cinzento, o que é um resultado relativamente bom, considerando-se que a resistência mecânica do vermicular é aproximadamente o dobro do cinzento.

Mocellin et al. (2003) realizaram ensaios de furação, com brocas inteiriças de metal duro classe K35 e recobrimento monocamada de TiAlN (3.000 HV), em ferro fundido cinzento FC-250 e cinco variações de ferro fundido vermicular, sem adição de Ti, cujas características estão apresentadas na Tab. 2.5.

Tabela 2.5 - Caracterização dos ferros fundidos do estudo (MOCELLIN et al., 2003)

Propriedade	Cinz. A	Verm. B	Verm. C	Verm. D	Verm. E	Verm. F
% vermicular	lamelar	64	92	91	86	89
% nodular	lamelar	36	8	9	14	11
% perlita	97/100	99	84	89	90	39
Dureza média (HB)	214/223	229	237	229	229	173
Classe	250	550	450	450	450	350

Com relação à usinabilidade, segundo o critério de vida das ferramentas dado por um desgaste de flanco máximo de 0,40 mm, estes autores encontraram os seguintes resultados (Fig. 2.10):

- As brocas utilizadas no Vermicular B tiveram uma vida média equivalente a 44% daquelas empregadas no Cinzento A, fato explicado devido à elevada porcentagem de grafita nodular (36%) que, segundo Dawson et al. (2014), resulta em elevada rigidez e resistência mecânica, diminuindo a usinabilidade e a condutividade térmica.

- Apesar do Vermicular D pertencer à mesma classe de resistência mecânica que o Vermicular C, o primeiro, com 5% a mais de perlita e menor dureza em relação ao segundo, foi produzido com parâmetros de fundição que permitiram um ganho de usinabilidade de 25%, quando comparado ao vermicular C e passando a apresentar uma usinabilidade mais próxima do Cinzento (83%). Enquanto o Vermicular E, o qual possui um maior teor de perlitizantes em relação ao Vermicular C e D, apresentou uma vida menor de 78%, também em relação ao Cinzento A.

- O Vermicular F, com apenas 39% de perlita, apresentou uma usinabilidade muito superior ao Cinzento A. Este resultado evidencia a influência da razão perlita/ferrita. Dawson et al. (2014) afirmam que um aumento no teor de perlita, mantendo se as demais variáveis constantes, aumenta a resistência à tração e dureza dos ferros fundidos, sendo intuitivo que também irá influenciar a vida da ferramenta.

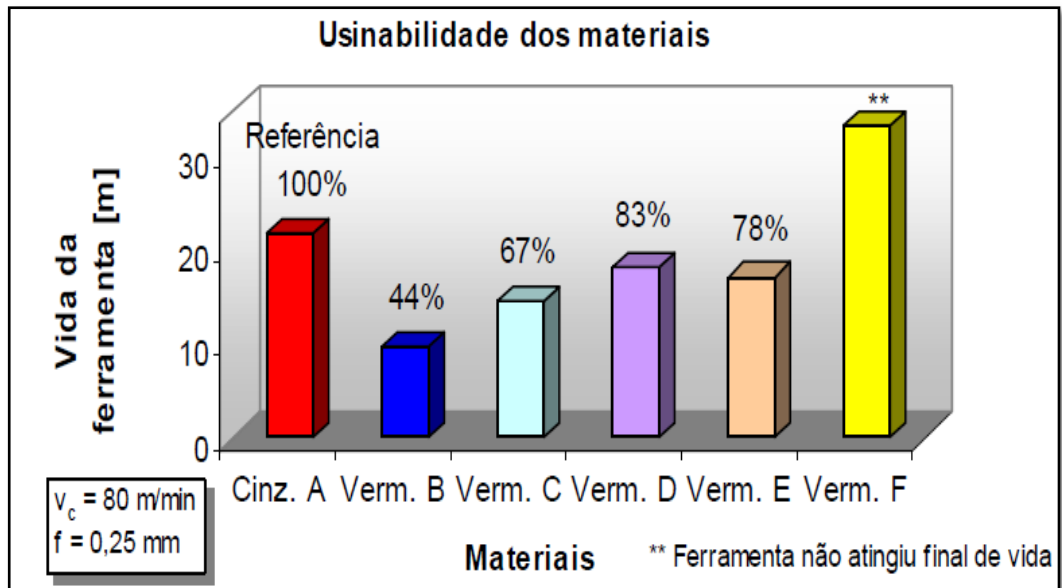


Figura 2.10 - Gráfico comparativo dos materiais em estudo (MOCELLIN et al., 2003)

2.4 Força e torque na furação de ferros fundidos cinzentos e vermiculares

O estudo das forças atuantes nos processos de usinagem é de fundamental importância para a determinação das condições ótimas de corte, na verificação dos fenômenos que ocorrem na região de formação do cavaco, na avaliação das solicitações sobre a máquina-ferramenta, entre outros. As forças de usinagem afetam a potência de corte, a capacidade de obtenção de tolerâncias estreitas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta, além de ser critério de usinabilidade para um determinado material (MOCELLIN, 2002; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

No processo de furação (Fig. 2.11), a força de usinagem resultante (F) em cada uma das arestas da broca é decomposta em força principal de corte (F_c), decorrente da resistência ao corte do material e predominantemente responsável pelo momento torçor gerado no processo, pela força de avanço (F_f), devido à atuação da aresta transversal de corte e da resistência à penetração da peça trabalhada e pela força passiva (F_p) atuante em uma aresta principal com sentido oposto à força passiva atuante na outra aresta principal. Considerando a velocidade de avanço desprezível em relação à velocidade de corte, qualquer ponto selecionado das arestas da ferramenta possuirá uma trajetória circular, na qual a força passiva será perpendicular, a força de corte será tangencial e a força de avanço possuirá a mesma direção do eixo da broca (BARBOSA, 2009; MARMENTINI, 2009; STEMMER, 1995).

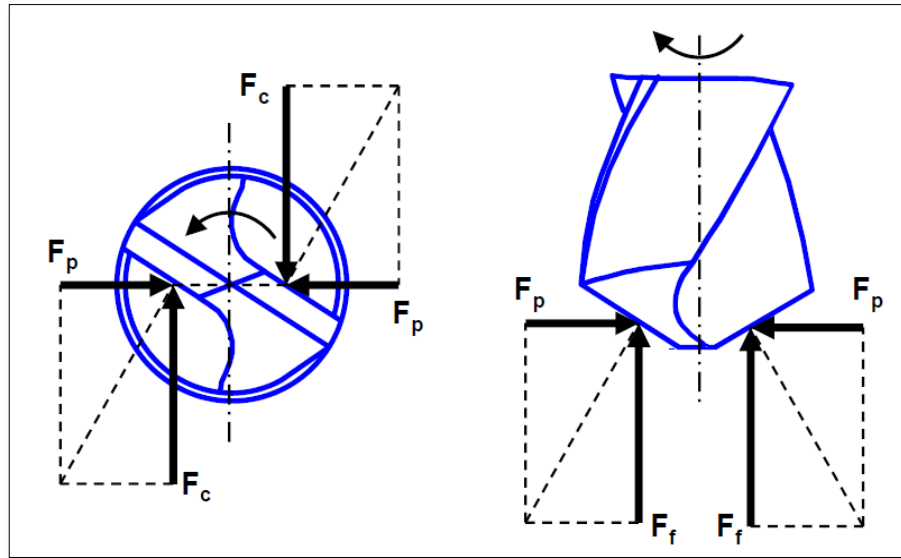


Figura 2.11 - Representação das forças presentes na furação (BOEIRA, 2010)

Durante o corte, a ferramenta de furação é basicamente submetida a esforços de torção (devido à rotação da broca) e a esforços de compressão devido ao avanço da mesma. Desta forma, para se estimar os esforços de um processo de furação, basta calcular a força de avanço e o momento torçor do processo, que pode ser medido de forma direta na peça ou na ferramenta, por meio de um dinamômetro (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2006).

Segundo Stemmer (1995), pode se utilizar as equações abaixo na determinação aproximada das componentes de força e momento torçor na furação em cheio:

$$F_c = K_c \cdot \frac{f \cdot D}{4} \quad [\text{N}] \quad (2.1)$$

Onde: F_c = Força de corte [N]
 K_c = Pressão específica de corte [N/mm^2]
 f = Avanço [mm]
 D = Diâmetro da broca [mm]

$$F_f = k_f \cdot \frac{f \cdot D \cdot \sin \frac{\sigma}{2}}{2} \quad [\text{N}] \quad (2.2)$$

Onde: F_f = Força de avanço [N]
 k_f = Pressão específica de avanço [N/mm^2]
 f = Avanço [mm]
 D = Diâmetro da broca [mm]
 σ = Ângulo da ponta da broca [graus]

$$M_t = k_c \cdot \frac{f \cdot D^2}{8000} \quad [\text{N.m}] \quad (2.3)$$

Onde: M_t = Momento Torçor [N.mm]
 K_c = Pressão específica de corte [N/mm²]
 f = Avanço [mm]
 D = Diâmetro da broca [mm]

A pressão específica de corte (K_c) é retirada de tabelas ou obtidas através de ensaios, em que é medido o torque aplicado na ferramenta, e depende basicamente do diâmetro da broca, do avanço e do material da peça. O ângulo da ponta, o fluído de corte, e o estado de afiação da ferramenta afetam K_c de forma secundária (STEMMER, 1995).

Nos ferros fundidos as forças de corte são relativamente baixas, principalmente nos materiais que apresentam baixa dureza e relativa ductilidade. A força de corte também é baixa, porque as lamelas de grafita são muito frágeis. Uma lamela pode-se estender de forma significativa através do plano de cisalhamento (MACHADO et al., 2015; TRENT; WRIGHT, 2000).

Evans, Hoogendoorn e Platt (2013) realizaram estudos envolvendo a furação do ferro fundido vermicular classe 450 e o ferro fundido cinzento FC-400 (ensaios realizados com uma broca com diâmetro de 6,35 mm) a fim de verificar a usinabilidade destes materiais por meio de medidas do momento torçor e desgaste da ferramenta. Para estes autores, os valores de torque medidos durante a furação do FC-400 mostraram-se constantes e estáveis durante todo o processo, enquanto os medidos na usinagem do CGI classe 450 demonstraram uma transição a partir do 27º furo, seguido por um rápido e crescente aumento do momento torçor ao longo do restante do teste (Fig. 2.12). A mudança nos valores dos torques medidos no processo constitui uma medida indireta útil, pois evidencia o desgaste da ferramenta e/ou a adesão do metal na aresta de corte.

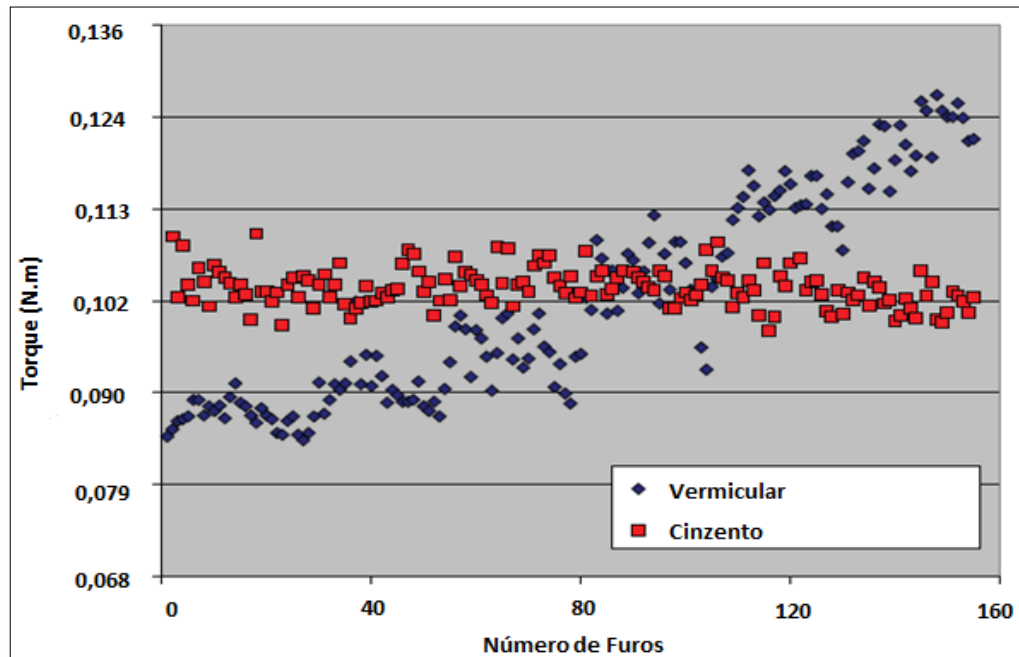


Figura 2.12 - Medições de torque em furação (EVANS; HOOGENDOORN; PLATT, 2013)

Ainda segundo estes autores, a ausência da camada lubrificante formada pelo MnS no CGI é responsável pelo alto atrito, aquecimento e aceleração do desgaste da ferramenta. Desta forma, estes resultados revelam que houve altas taxas de desgaste da ferramenta e adesão de metal na aresta de corte do CGI, evidenciando, como esperado, que o ferro fundido vermicular é significativamente mais difícil de usinar do que o ferro fundido cinzento.

2.5 Materiais e geometria de ferramentas utilizados no processo de furação

A seleção correta do material da ferramenta representa, sem dúvida, a chave para a eficiência econômica das operações de furação. Existem estudos e uso de diferentes tipos de materiais, como o aço rápido, o metal duro, ferramentas cerâmicas, Cermets, entre outros (TÖNSHOFF et al., 1994).

No processo de furação, uma ferramenta muito utilizada é a broca helicoidal de aço rápido (HSS, do inglês *high-speed steel*), devido ao seu baixo custo. No entanto, apesar de sua denominação, o aço rápido não proporciona velocidades tão altas, ao se comparar com materiais mais modernos para ferramentas de corte, o que pode restringir a adoção deste material em diversos processos de usinagem (KIECKOW et al., 2013).

Segundo Tschätsch (2009), as brocas de metal duro (Fig. 2.13) são ferramentas avançadas de alto desempenho e que possuem três vezes a rigidez das ferramentas de aços

rápidos, além de alta resistência ao desgaste e resistência ao calor. As brocas de metal duro inteiriças operam em velocidades de corte de até 250 m/min em aços e ferros fundidos e até 1000 m/min em ligas de alumínio. Desta forma, no processo de furação de ferros fundidos, geralmente são empregadas ferramentas de metal duro.

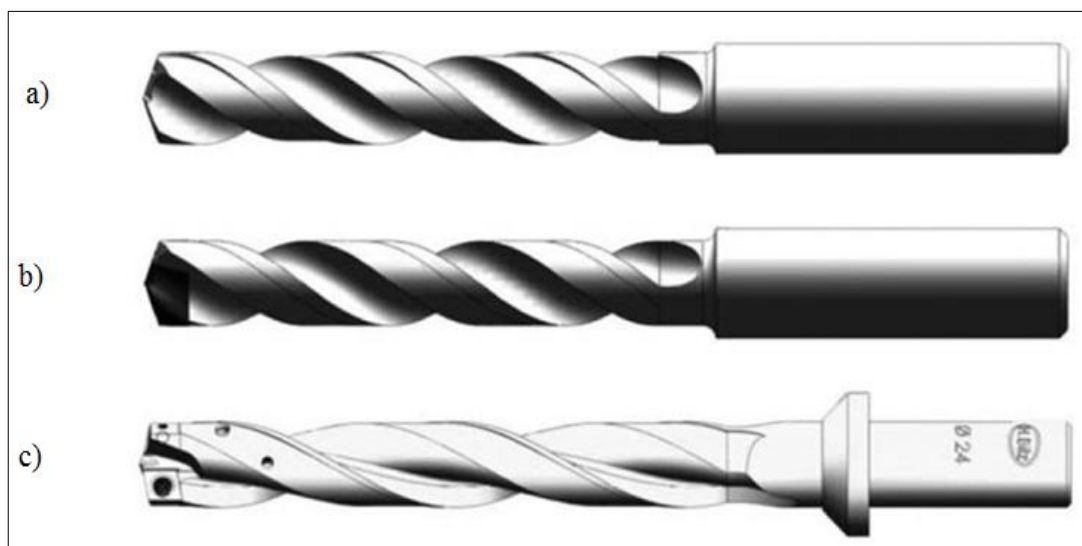


Figura 2.13 - Brocas helicoidais: a) broca inteiriça de metal duro; b) broca com ponta de metal duro; c) broca de metal duro com pastilhas intercambiáveis (TSCHEIDT, 2009)

2.5.1 Metal duro

O metal duro é o material de ferramenta de corte mais importante para a indústria moderna, devido à excelente combinação de dureza à temperatura ambiente, dureza à quente, resistência ao desgaste e tenacidade. Essencialmente, o metal duro é formado por um carboneto extremamente duro e de alta resistência ao desgaste, trata-se do carboneto de tungstênio (WC) isolado ou associado com outros carbonetos, como o de titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC), que conferem resistência ao desgaste do material. Também é constituído de um elemento aglomerante, usualmente o cobalto (Co), cuja função é aglomerar as partículas duras dos carbonetos, sendo este o responsável pela tenacidade do produto final (FERRARESI, 2003).

Machado et al. (2015) descrevem as diferentes classes dos metais duros segundo a Norma ISO 513:2004:

- Classe K: no sistema de cores de especificação internacional, coube a este grupo a coloração vermelha, normalmente possui composição dada apenas por WC e Co. É conhecida por ser a classe dos ferros fundidos ou a classe dos materiais que produzem cavacos curtos;

- Classe P: cor padrão azul, normalmente, em sua composição são acrescentados TiC, TaC e/ou NbC. Esta classe ficou conhecida como a classe dos aços ou dos materiais que produzem cavacos longos;

- Classe M: esta é uma classe intermediária, entre as classes K e P, de coloração amarela e, normalmente, possui adições de TiC, TaC e/ou NbC, mas em menores teores que aqueles apresentados pela classe P. Esta classe é recomendada para a usinagem dos aços inoxidáveis, principalmente dos austeníticos;

- Classe N: cor de referência verde, aplicável em metais e ligas não ferrosos, principalmente o cobre e o alumínio. Normalmente, são constituídos por WC e Co apenas;

- Classe S: recomendável para as superligas ou ligas resistente ao calor, tais como ferro, titânio, níquel e cobalto. Apresenta coloração padrão marrom; também, são, normalmente, constituídos por WC e Co apenas;

- Classe H: aplicável a aços endurecidos, como aços fundidos e ferros fundidos temperados, cuja coloração padrão é o cinza. Normalmente, constituídos por WC, Co e adições de TiC, TaC e NbC.

A letra de designação dos metais duros é sempre acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta. Sendo assim, quanto maior for o número (normalmente com variação entre 01 e 50), maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste. Para a usinagem de ferros fundidos, a classe de aplicação varia de K01 a K40 (MACHADO et al., 2015). A Fig. 2.14 ilustra a classificação e aplicação das diferentes classes de metal duro com base na Norma ISO 513:2004.

Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem utilizados	Metais Duros			
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	a ↑	b ↓
M	Amarelo	Aço Inoxidável: Aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	a ↑	b ↓
K	Vermelho	Ferro Fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	a ↑	b ↓
N	Verde	Metais não ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	a ↑	b ↓
S	Marrom	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor à base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	a ↑	b ↓
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	a ↑	b ↓

a - aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta.

b - aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta.

Figura 2.14 - Classificação dos metais duros (MACHADO et al., 2015)

Com relação ao revestimento das ferramentas de metal duro, este oferece um aumento significativo no desempenho das mesmas, resultando em uma maior vida útil, bem como possibilitando o aumento das velocidades de corte. Os metais duros podem ser revestidos por CVD (deposição química de vapor) ou PVD (deposição física de vapor). O processo CVD é realizado em temperaturas na faixa de 850 à 1000°C, a partir da alimentação de gases em uma câmara onde ocorre a reação química, que resulta na formação do revestimento sobre a superfície da ferramenta. Através dessa técnica é possível a deposição de carboneto de titânio (TiC), carbonitreto de titânio (TiCN), nitreto de titânio (TiN), óxido de alumínio (Al₂O₃) e carbonitreto de zircônio (ZrCN). As ferramentas revestidas por CVD apresentam redução na tenacidade e são mais indicadas para os cortes contínuos, como o torneamento. O Processo PVD é realizado em temperaturas inferiores, em torno de 500°C, onde íons metálicos combinam com gases para se depositarem no substrato na forma de nitretos e carbonetos. Este

processo gera menores distorções na tenacidade e, portanto, mais indicados para ferramentas de fresamento (TSCHÄTSCH, 2009; MACHADO et al., 2015).

2.5.2 Estrutura da broca helicoidal

Apesar da enorme variedade de brocas para furação disponíveis no mercado, a broca helicoidal é a mais utilizada para este processo. Segundo Kieckow et al. (2013), este tipo de broca envolve de 20 a 25% do total de aplicações, seja na geração de furos curtos ou profundos, na furação em cheio ou com pré-furo. As diversas partes de uma broca helicoidal são mostradas na Fig. 2.15:

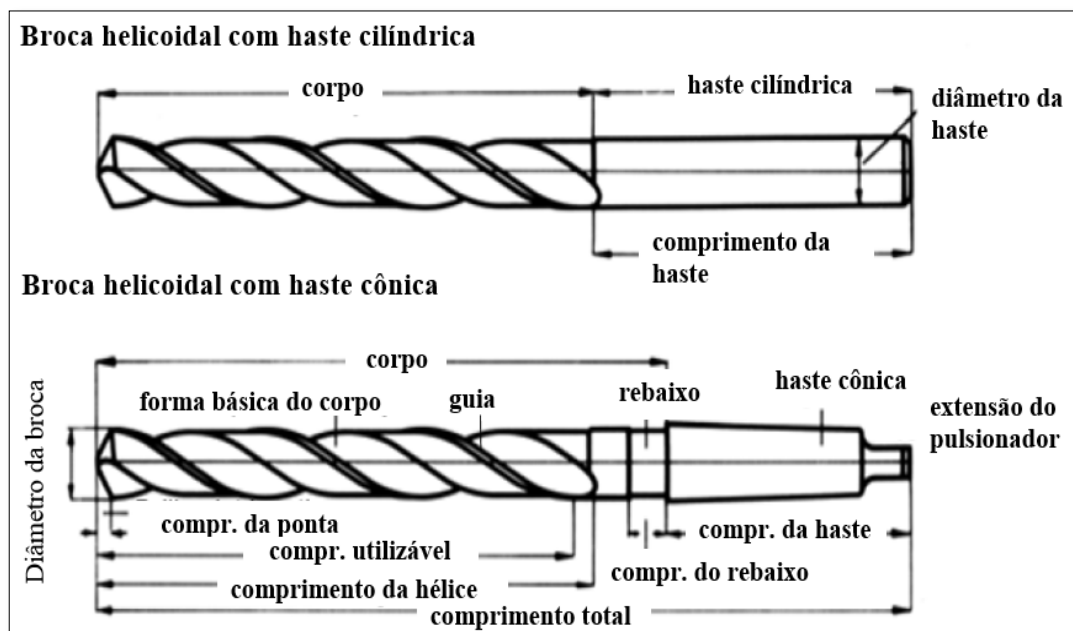
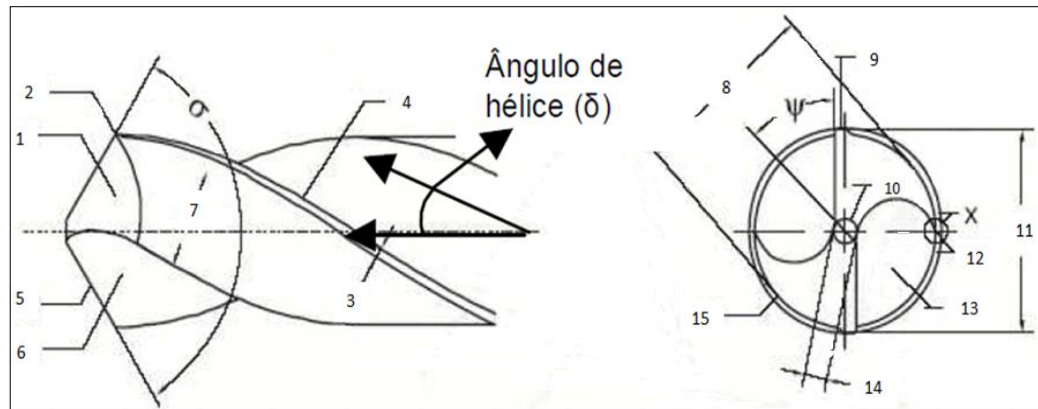


Figura 2.15 - Elementos de uma broca helicoidal (Adaptado de TSCHÄTSCH, 2009)

A Fig. 2.16 mostra a forma básica do corpo que, segundo Tschätsch (2009), é criada por duas ranhuras helicoidais e o ponto cônico de furação:



1. Superfície principal de folga
2. Ponta de corte
3. Largura (l) da guia
4. Aresta lateral
5. Aresta principal
6. Superfície de saída
7. Largura da superfície lateral de folga
8. Diâmetro da superfície lateral de folga

9. Guia
10. Aresta transversal
11. Diâmetro da broca
12. Quina
13. Canal helicoidal
14. Espessura do núcleo
15. Superfície lateral de folga

Figura 2.16 - Corpo de uma broca helicoidal (DINIZ; MARCONDES; COPINNI, 2006)

As principais partes de uma broca helicoidal (apresentadas nas Figs. 2.15 e 2.16) são descritas por Diniz, Marcondes e Copinni, (2006) da seguinte forma:

- Haste: destina-se a fixação da broca na máquina. Em brocas de diâmetro pequeno (até 15 mm), em geral usa-se brocas de haste cilíndrica e a fixação à máquina se dá através de mandris. Já em brocas com diâmetros maiores prende-se a broca em um cone morse preso à máquina;

- Diâmetro (D): é medido entre as duas guias da broca;

- Núcleo: parte interior da broca de diâmetro igual a 0,16D. Serve para conferir rigidez à broca;

- Guias: a superfície externa da broca apresenta duas regiões (uma em cada aresta secundária de corte) que possui diâmetro maior que o diâmetro das paredes da broca. Estas regiões são denominadas de guias, cuja função básica é guiar a broca dentro do furo, além de evitar que toda parede externa da broca atrite com as paredes do furo, reduzindo assim os esforços necessários à furação;

- Arestas: em uma broca helicoidal existem duas arestas principais, duas arestas laterais ou secundárias e uma quinta aresta ligando as duas arestas principais de corte. Esta quinta aresta é chamada de aresta transversal de corte. O ângulo formado entre as duas arestas

principais, denominado de ângulo de ponta da broca (σ) é normalmente igual a 118° . Para brocas usadas na usinagem de materiais dúcteis o valor recomendado é de 140° .

- Canais helicoidais: são as superfícies de saída da ferramenta. O ângulo de hélice de brocas normais, que na periferia da broca coincide com o ângulo de saída, pode ser de 28° para brocas de aplicação geral (brocas do tipo N com ângulo de ponta igual a 118°), 15° para brocas destinadas à usinagem de materiais com cavacos curtos (brocas tipo H com ângulo de ponta igual a 60 ou 90°) e 40° para brocas destinadas à usinagem de materiais com cavacos longos e/ou materiais moles (broca tipo W com ângulo de ponta de cerca de 140°). Os três tipos básicos de brocas (N, H e W) são mostrados na Fig. 2.17:

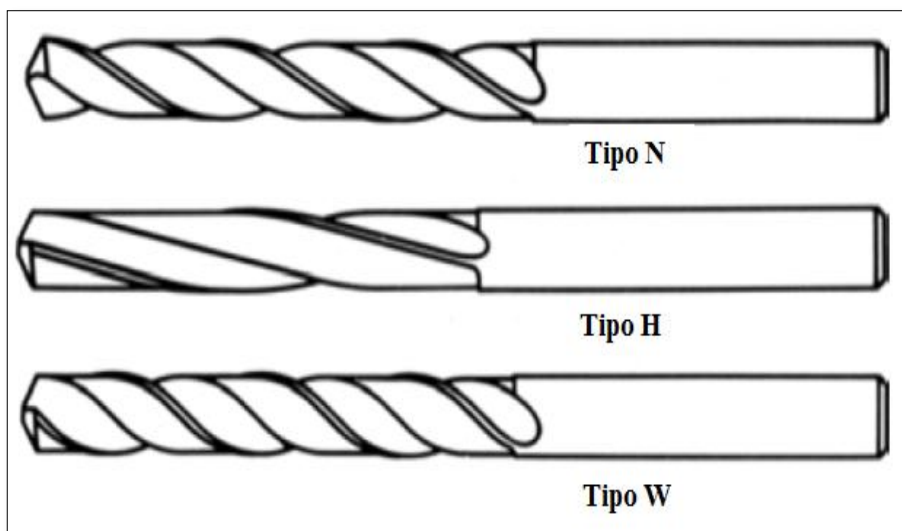


Figura 2.17 - Tipos de broca helicoidal (TSCHÄTSCH, 2009)

Para Stemmer (1995), na usinagem de ferros fundidos é recomendável o uso de brocas tipo N, com ângulo de ponta de 118° . Brocas do tipo H são também bastantes utilizadas na usinagem de ferros fundidos, por apresentarem cavacos curtos.

2.6 Desgaste nas ferramentas de corte

Segundo Kieckow et al. (2013), os problemas oriundos do desgaste em ferramentas de corte sempre foram motivos de preocupação, principalmente devido à possibilidade de paradas no processo para troca de ferramentas que resulta em custos adicionais. Sendo assim, devem ser considerados os estudos dos fenômenos envolvidos no processo de desgaste que ocorrem nas brocas, pois a obtenção de uma menor taxa de desgaste implica em maior tempo

de vida da ferramenta, maior quantidade de peças furadas, menor tempo de parada para troca de ferramenta e, conseqüentemente, uma maior produtividade.

Hutchings (1992) define o desgaste como sendo a destruição de uma ou de ambas as superfícies que compõe um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Para Molinari e Nouari (2002), os mecanismos básicos de desgaste da ferramenta são controlados pelas propriedades mecânicas e características físico-químicas do material a ser usinado e da ferramenta, além da influência das condições de corte. Várias causas básicas de desgaste da ferramenta têm sido investigadas, sendo as mais importantes: difusão, adesão, abrasão e oxidação.

2.6.1 Mecanismos de desgaste

Difusão: o mecanismo de desgaste por difusão é caracterizado por apresentar áreas desgastadas com textura lisa, sem deformação plástica, onde átomos são transferidos da ferramenta para o cavaco e/ou peça (e vice e versa) e assim são levados pelo fluxo de material da peça ou do cavaco ao longo da superfície de contato. A taxa de desgaste aumenta com o aumento da velocidade de corte e do avanço, o que, conseqüentemente, eleva a temperatura, que atua como fonte de energia para a difusão. Sendo assim, durante altas velocidades com ferramenta HSS (temperatura de contato da ordem de 750°C) o desgaste por difusão pode ser observado, embora com menor probabilidade, uma vez que nas temperaturas elevadas a deformação plástica das ferramentas de HSS poderá predominar. O desgaste difusivo é, portanto, mais significativo para ferramentas de metal duro, pois temperaturas de contato elevadas, como 1200°C, podem ser obtidas nas altas velocidades de corte que esse material permite obter, sem danos maiores de deformação plástica (MOLINARI; NOUARI, 2002; MACHADO et al., 2015). A Fig. 2.18a mostra o desgaste por difusão da ferramenta de metal duro K20 após usinagem de Ti6Al4V.

Adesão: este mecanismo ocorre quando superfícies deslizam uma contra a outra e predomina, normalmente, em baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Além disso, pode ser formada a aresta postiça de corte (APC) e o contato entre o material da peça e a ferramenta pode se tornar menos contínuo. A alta pressão local e o deslizamento relativo entre as superfícies de contato resultam em aderência e na sequencia, fragmentos microscópicos (grãos) da superfície da ferramenta são arrancados e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface. Superfícies desgastadas por este mecanismo têm aparência áspera, devido ao desgaste ocorrer

em nível de grãos. Este mecanismo de adesão é também chamado de *attrition*, segundo a denominação de Trent (GAHR; HEINZ, 1987; TRENT; WRIGHT, 2000). A Fig. 2.18b apresenta uma situação em que ocorre esse tipo de desgaste em uma ferramenta de metal duro, com revestimento em CVD, no torneamento do material S410000 classificado como um aço inoxidável martensítico, onde observa-se que as áreas desgastadas por este mecanismo apresentam aparência áspera.

Abrasão: Este mecanismo pode ser classificado em dois corpos e três corpos. A abrasão de dois corpos ocorre quando uma superfície dura e áspera ou macia, esta última contendo partículas abrasivas, desliza sobre uma superfície mais mole, gerando uma série de sulcos paralelos, com perda ou deslocamento de material. Em usinagem, as partículas abrasivas são precipitados duros, tais como óxidos, carbonetos, nitretos ou carbonitretos oriundos do material da peça ou do cavaco, promovendo o desgaste da ferramenta. No desgaste abrasivo por três corpos, um terceiro meio contendo partículas abrasivas (uma lama abrasiva, por exemplo) se coloca entre duas superfícies em deslizamento. Em usinagem o meio abrasivo pode ser o fluxo de material da peça ou do cavaco, com partículas abrasivas arrancadas da própria ferramenta (consequência do mecanismo de desgaste anterior - adesão) (DWIVEDI, 2010; MACHADO et al., 1998). A Fig. 2.18c mostra a ocorrência desse mecanismo em pastilhas de metal duro revestidas com CBN-TiN, na usinagem do Aço ABNT/AISI 4340.

Oxidação: ocorre em altas temperaturas na presença de ar e/ou água, esta última contida nos fluidos de corte. Este tipo de desgaste se forma preferencialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, levando ao desgaste de entalhe. No metal duro, o tungstênio e o cobalto formam camadas de óxido sobre a ferramenta, que podem ser removidas pelo atrito entre a peça e a ferramenta, gerando o desgaste. No entanto, alguns óxidos são mais resistentes, como o óxido de alumínio. Desta forma, materiais de ferramentas, que não contem esse material, desgastam-se mais facilmente por oxidação (DINIZ; MARCONDES; COPINNI, 2006). A Fig. 2.18d mostra que nos testes realizados por Sahm, Abele e Schulz (2002), ao usinar o ferro fundido vermicular com ferramentas de PCBN, foi observada a oxidação da fase ligante da ferramenta para dióxido de titânio (TiO_2) e microtrincas próximas aos pontos de óxidos.

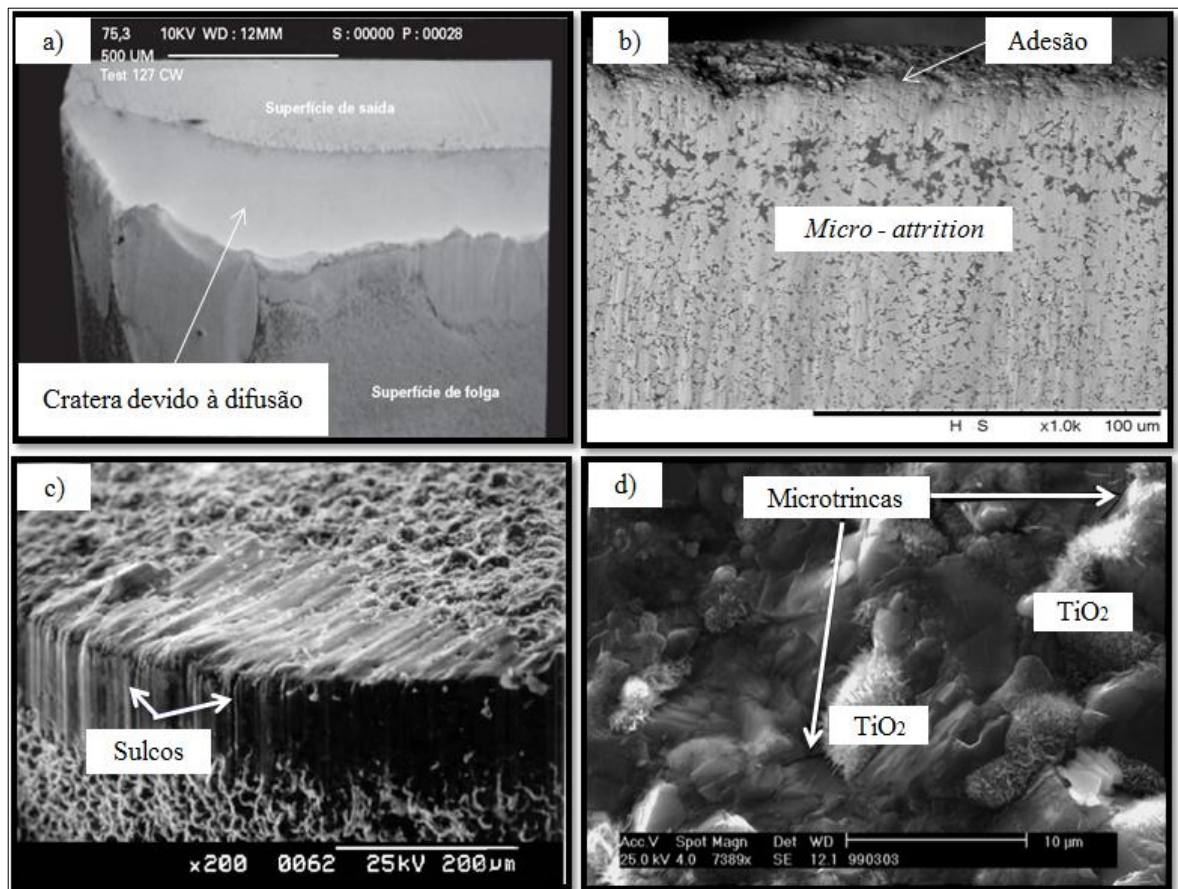


Figura 2.18 - Micrografia mostrando a morfologia dos tipos de desgaste: a) desgaste por difusão (MACHADO et al., 1998); b) desgaste por *attrition* (CORRÊA, 2014); c) desgaste por abrasão (MORE et al., 2006); d) desgaste por oxidação (SAHM; ABELE; SCHULZ, 2002)

2.6.2 Desgaste em brocas helicoidais

O desgaste da broca em furação é um processo progressivo que ocorre em ritmo acelerado. Durante o seu desenvolvimento, as forças de corte aumentam, a temperatura sobe e ocorrem deformações e perda das arestas afiadas. Após certo limite, o desgaste da ferramenta pode causar falha repentina que pode gerar danos à peça e até mesmo à máquina-ferramenta.

A Fig. 2.19 ilustra a evolução do desgaste em função da vida útil da broca, que pode ser classificada em diferentes estágios: (1) desgaste inicial; (2) desgaste regular; (3) desgaste moderado por microlascamentos; (4) desgaste severo e (5) ruptura da ferramenta (ERTUNC; OYSU, 2004).

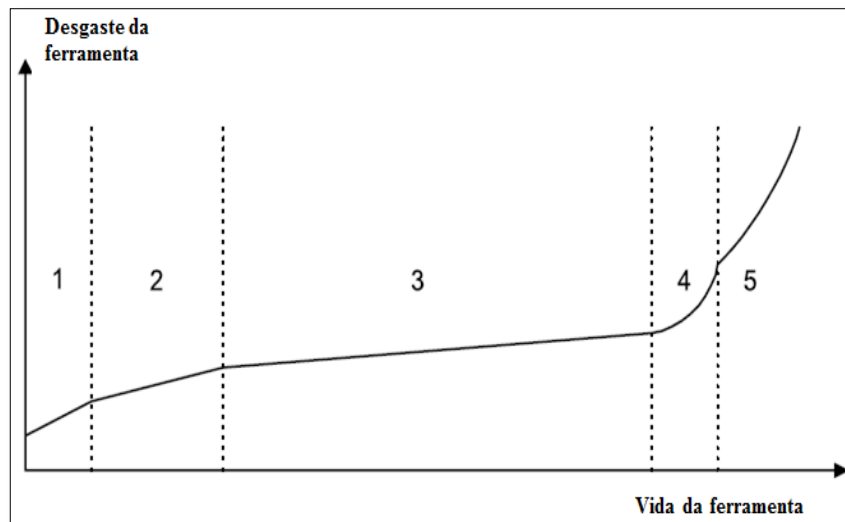


Figura 2.19 - Evolução do desgaste em brocas helicoidais (ERTUNC; OYSU, 2004)

Para Brinksmeier (1990), o desgaste em uma broca helicoidal pode ocorrer na aresta transversal de corte, na quina (ponta de corte) e nas guias laterais, sendo, normalmente, considerados os desgastes de flanco e de cratera como critério de fim de vida de uma ferramenta.

O fim de vida de uma broca é atingido quando esta apresenta elevado desgaste em partes consideradas essenciais para o processo de furação. Os principais tipos de desgastes, observados em uma broca helicoidal, são mostrados na Fig. 2.20 e comentados em seguida (BORK, 1995 apud Barbosa, 2009):

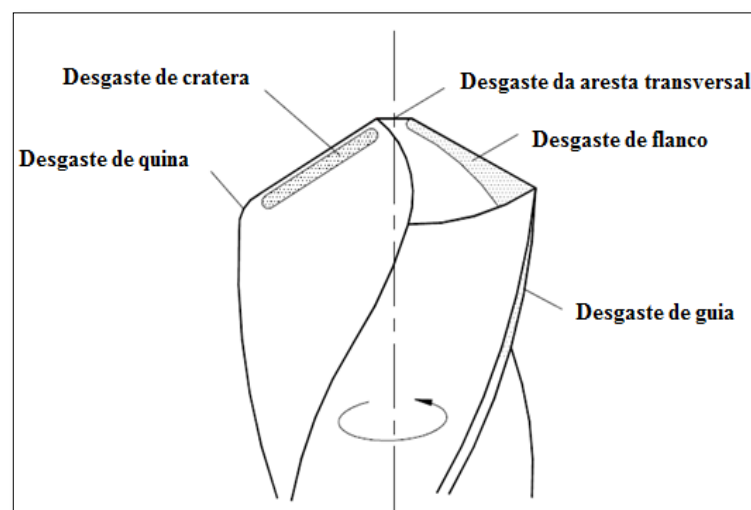


Figura 2.20 - Desgaste de brocas helicoidais (BRINKSMEIER, 1990)

- Desgaste de flanco (VB): ocorre na superfície de folga, ao longo da aresta de corte da ferramenta, podendo ser classificado em desgaste de flanco médio (VB_{Bmed}) e desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax}).

- Desgaste de cratera (KB): ocorre na superfície de saída da ferramenta, caracterizado pela distância (KB), que corresponde à medida do ponto mais distante da cratera em relação à aresta de corte, ou pela sua profundidade (KT).

- Desgaste de guia (H): medido a partir da quina da broca em relação à aresta secundária de corte.

- Desgaste de quina: se caracteriza pelo arredondamento da quina da broca, podendo corresponder ao valor médio do arredondamento de todas as quinas da ferramenta.

- Desgaste da aresta transversal: dimensionado através da largura da faixa de desgaste (C_m) e também do ponto mais alto do desgaste (C_t).

2.6.3 Desgaste e vida da ferramenta em ferros fundidos

Eleftheriou e Bates (1999) afirmam que muitos fatores podem influenciar a vida da ferramenta na usinagem de ferros fundidos, tais como tamanho e distribuição da grafita, composição química, relação ferrita/perlita e a presença de micro-inclusões abrasivas. A Fig. 2.21 representa o avanço da ferramenta em um material contendo macro e micro-inclusões, que podem ser óxidos, carbetos, nitretos, areia, entre outros. Os autores explicam que esse avanço cria uma zona de compressão abaixo e à frente da superfície de folga e flanco da ferramenta.

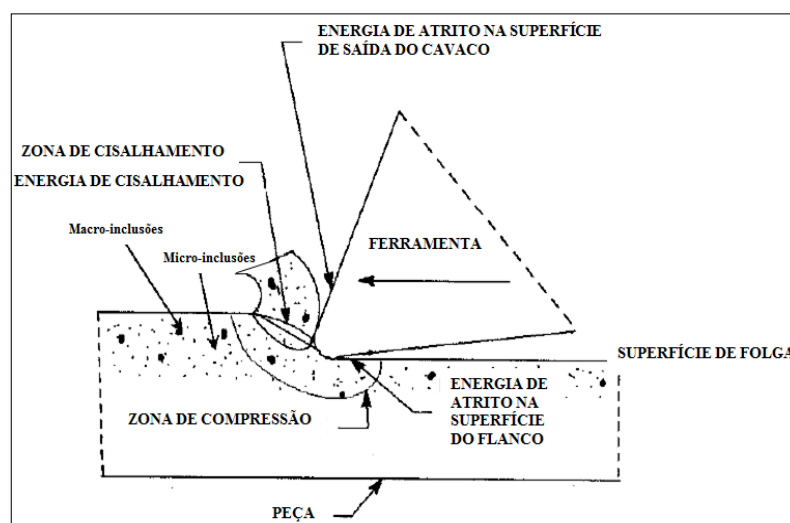


Figura 2.21 - Zonas de compressão e cisalhamento durante o corte (ELEFTHERIOU; BATES, 1999)

Conforme esses autores, a deformação plástica produzida pelo avanço da ferramenta na peça e a fricção entre ambas geram calor que precisa ser dissipado. Sob tais circunstâncias, o calor e a abrasão podem causar crateras que se desenvolvem sob a superfície de saída da ferramenta.

No que diz respeito ao ferro fundido vermicular e ao ferro fundido cinzento, Sahm, Abele e Schulz (2002), afirmam que, para o mesmo nível de dureza entre os materiais, o primeiro é 33% mais abrasivo e 15% mais adesivo que o segundo, fato este explicado, principalmente, devido à ausência da formação da camada lubrificante de MnS no CGI. Esta camada não se forma na usinagem do CGI devido à maior concentração de magnésio (elemento forte formador de sulfetos), que por sua vez é responsável pela formação da grafita vermicular. Desta forma, inclusões de sulfeto de magnésio (MgS) são preferencialmente formadas ao invés das inclusões de MnS. É importante ressaltar que, durante o processo de fundição, as inclusões de MgS são geralmente removidas junto com a escória, portanto não são relevantes no estudo desses materiais.

Testes realizados por Rosa et al. (2010), utilizando ferramenta de metal duro classe K10, evidenciaram que, independentemente da velocidade de corte ou das características dos materiais, a adesão foi o principal mecanismo de desgaste em ligas de CGI com adição de Ti (Fig. 2.22). Para estes autores, essa aderência ocorre devido às condições favoráveis desenvolvidas durante o corte entre a superfície de flanco e o material da peça. Além disso, a abrasão também pode ter ocorrido intensamente, principalmente para ligas com elevado teor de Ti e maior número de carbonetos. No entanto, este mecanismo pode ter ocorrido antes da adesão, pois não foi detectado qualquer vestígio de sua presença.

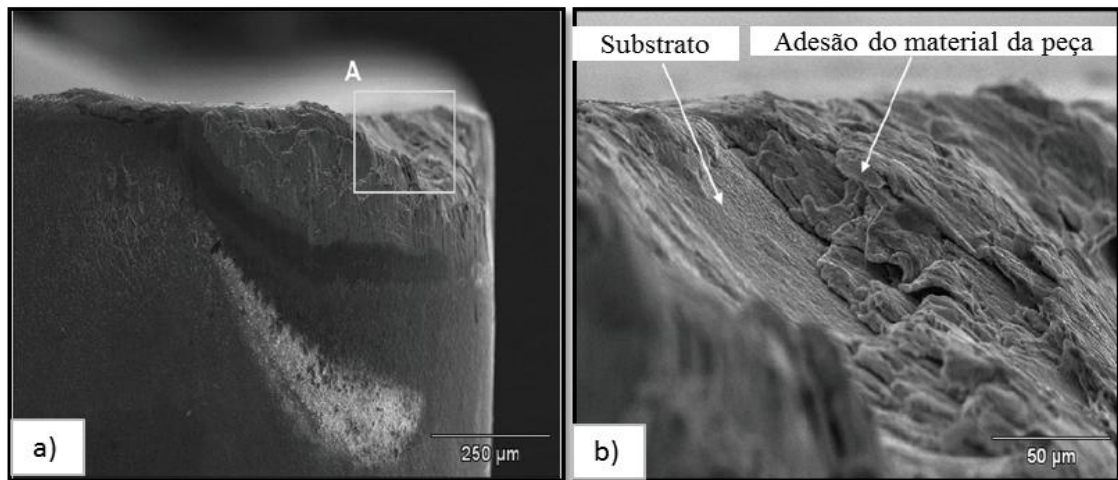


Figura 2.22 - Desgaste de flanco na ferramenta após usinagem de uma liga de CGI ($V_c = 250$ m/min): a) desgaste de flanco; b) detalhe em A (ROSA et al., 2010)

Gastel et al. (2000) realizaram testes em insertos de PCBN, os quais deixaram evidente a diferença no desgaste da ferramenta na usinagem do CGI e do ferro cinzento, conforme mostra a Fig. 2.23.

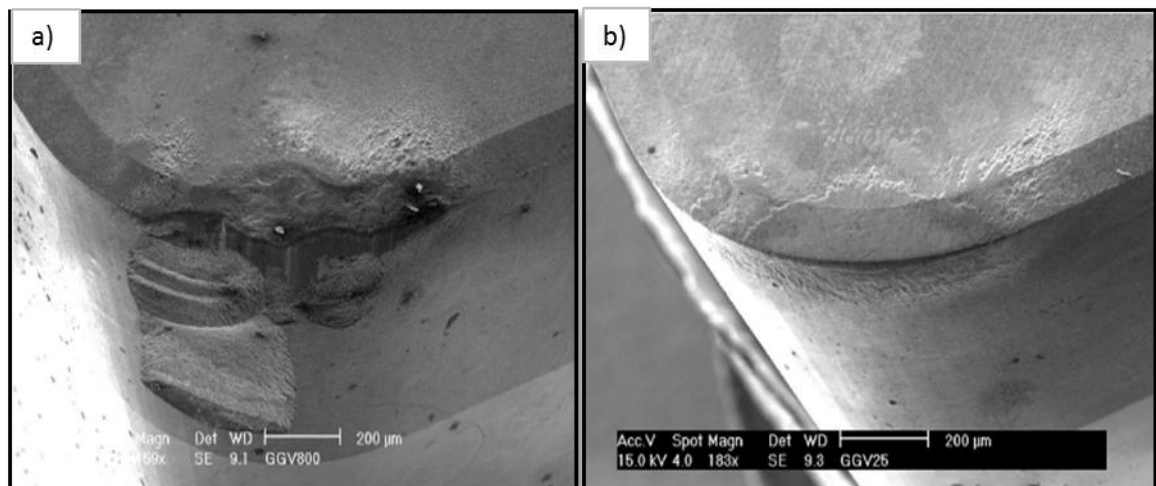


Figura 2.23 - Desgaste da ferramenta de PCBN ($V_c = 800$ m/min): a) ferro fundido vermicular; b) ferro fundido cinzento (GASTEL et al., 2000)

Os mecanismos responsáveis por esse desgaste, segundo estes autores, foram a oxidação e a difusão de elementos constituintes entre ferramenta e o CGI. Desta forma, comprova-se, como esperado, que o ferro fundido cinzento possui melhor usinabilidade que o ferro vermicular, fato explicado, também, devido à formação de MnS , no caso da usinagem

do ferro cinzento, que adere sobre a face da ferramenta formando uma camada protetora contra oxidação e difusão.

Ensaios realizados por Mocellin et al. (2003) na furação de ferro fundido cinzento e do CGI também comprovaram essa diferença expressiva de vida da ferramenta na usinagem entre esses materiais. A Fig. 2.24 mostra que as curvas referentes à usinagem do ferro fundido cinzento apresentaram menores desgastes de ferramentas já no início dos testes, dado por um desgaste de flanco máximo de 0,40 mm como critério de fim de vida das brocas. Algumas características desses materiais foram apresentadas na Tabela 2.5.

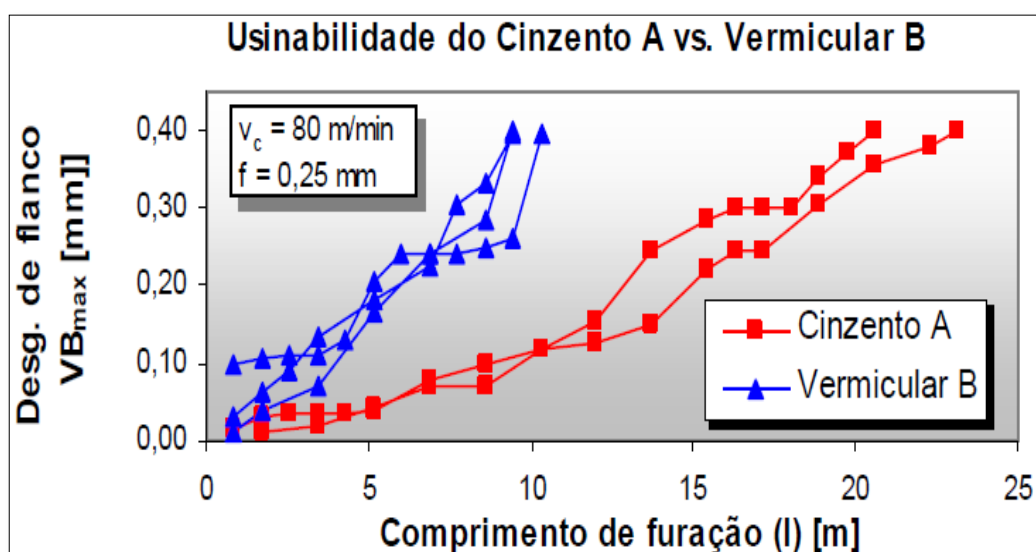


Figura 2.24 - Curvas de desgaste da ferramenta de metal duro classe K35 do Cinzento A (FC-250) e do Vermicular B (CGI-550) (MOCELLIN et al., 2003)

2.7 Integridade superficial de furos usinados

A integridade superficial é definida como a qualidade das superfícies usinadas interpretada em função dos elementos que descrevem a estrutura da superfície e do material. A qualidade do processo de furação é definida normalmente pelos erros geométricos e dimensionais e pela rugosidade da superfície das peças obtidas (JANG et al., 1996; TOOL and MACHINING ENGINEERS HANDBOOK, 1983).

Diniz, Marcondes e Copinni (2006) afirmam que o processo de furação apresenta problemas em termos de precisão, podendo apresentar tolerâncias dimensionais das peças furadas da ordem de IT 11. Desta forma, para furos de precisão, geralmente emprega-se uma broca helicoidal e depois o furo passa por operações de acabamento, tais como alargamento, brochamento, retificação interna, entre outros.

Para que se possa obter a qualidade no furo usinado existem critérios expressos na forma de tolerâncias, dentre os quais podem ser dimensionais ou geométricos:

- Tolerância dimensional: pode ser entendida como a diferença entre o valor máximo e mínimo admissíveis para uma dimensão, resultante dos processos de fabricação planejados para cada caso (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977).

- Tolerância geométrica: na maioria dos casos, as peças são compostas de corpos geométricos, tais como planos, superfícies planas, cilíndricas ou cônicas. Durante a usinagem, consideram-se também os desvios das formas da superfície real com relação à teórica, sejam eles macro ou microgeométricos, assim como os desvios de posição entre as diversas superfícies entre si. Tais desvios se encontram descritos a seguir (AGOSTINHO; RODRIGUES; LIRANI, 1977):

- a) Desvios de forma: descritos como sendo o grau de variação das superfícies reais com relação aos sólidos geométricos que os definem. Sendo estes classificados em desvios macrogeométricos (retilidade, circularidade, cilindridade, planicidade, etc.) e desvios microgeométricos (rugosidade superficial).

- b) Desvios de posição: definidos como o grau de variação entre as diversas superfícies reais entre si, com relação ao seu posicionamento teórico. São as tolerâncias de paralelismo, ângulos, alinhamento, perpendicularidade, simetria e posicionamento.

2.7.1 Circularidade e Cilindridade

O desvio de circularidade é determinado através da distância radial mínima entre duas circunferências concêntricas de raios distintos, dentre as quais deve estar contido o perfil real da peça. Para que a distância entre os círculos seja mínima, são considerados o maior círculo inscrito à seção transversal da peça e o menor círculo circunscrito. Entretanto, em diversos projetos a aplicação de tolerâncias de circularidade pode não ser suficiente para garantir a qualidade das peças, sendo necessária a utilização de tolerâncias de cilindridade (SOUZA; ARENCIBIA; SATO, 2011).

Ainda segundo estes autores, o desvio de cilindridade pode ser definido como a diferença entre os raios de dois cilindros com eixo coincidente, entre os quais deve estar compreendida a superfície real da peça. A Fig. 2.25 ilustra a representação gráfica dos desvios de circularidade e cilindridade.

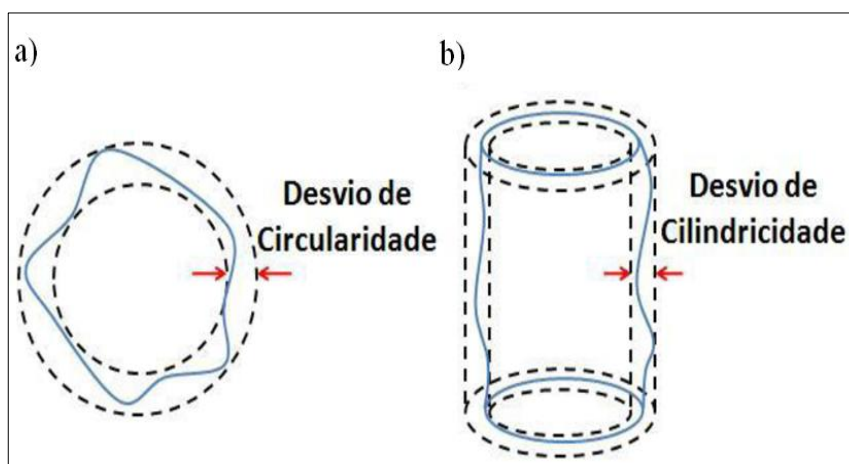


Figura 2.25 - Representação dos desvios de: a) circularidade; b) cilindridade (SOUZA; ARENCIBIA; SATO, 2011)

2.7.2 Rugosidade Superficial

A rugosidade superficial é o conjunto de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte (marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc.). Os principais parâmetros empregados na medição da rugosidade, segundo a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002), se encontram na Tab. 2.6:

Tabela 2.6 - Principais parâmetros de rugosidade de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002)

Símbolo	Nome	Definição
Ra	Desvio aritmético médio do perfil avaliado	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rq	Desvio médio quadrático do perfil avaliado	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
Rt	Altura total do perfil avaliado	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade do vale do perfil no comprimento de avaliação.
Rz	Altura máxima do perfil avaliado	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
Rsk	Fator de assimetria do perfil avaliado (<i>skewness</i>)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e Rq ao cubo, no comprimento de amostragem.
Rku	Fator de achatamento do perfil avaliado (<i>kurtosis</i>)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de Rq à quarta potência no comprimento de amostragem.

Em seus estudos, após a furação do ferro fundido cinzento e do CGI, Evans, Hoogendoorn e Platt (2013) submeteram estes materiais ao processo de alargamento a fim de verificar o acabamento dos furos usinados. A Fig. 2.26 mostra os valores de rugosidade Ra ao longo dos 130 furos alargados para ambos os materiais. Nota-se que a dificuldade em se usinar o CGI também pode ser vista em operações de acabamento após a furação. Como observado, há um aumento constante na rugosidade dos furos alargados em relação aos primeiros 80 furos, tanto para o CGI quanto para o ferro fundido cinzento. Entretanto, a partir desse valor os níveis de rugosidade tornam-se relativamente constantes para o ferro cinzento, enquanto continuam aumentando para o ferro fundido vermicular. Os autores atribuem esse fato a ausência da lubrificação fornecida pelas inclusões de MnS, presente no ferro fundido cinzento, sendo a principal razão para o maior atrito, forças superiores de corte, desgaste acelerado da ferramenta e pior acabamento superficial do ferro fundido vermicular.

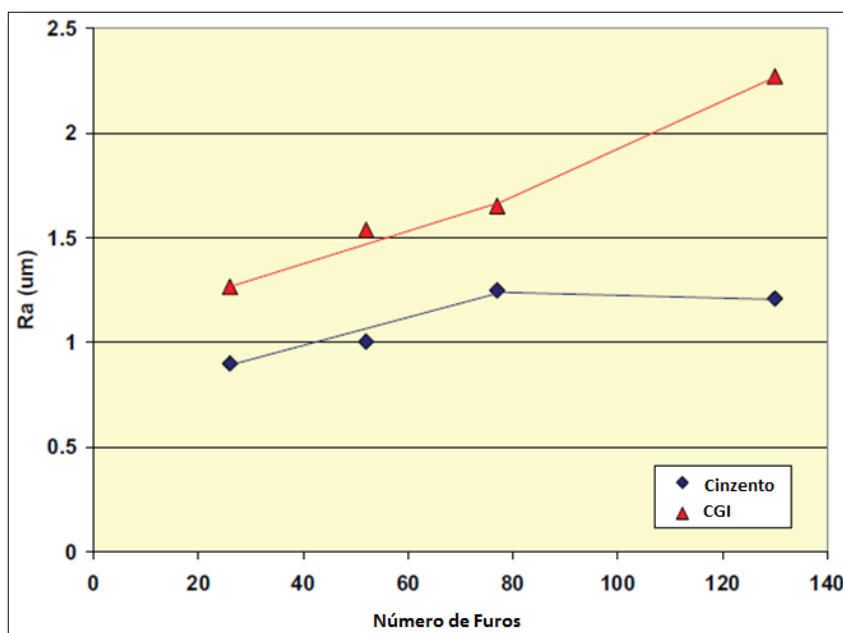


Figura 2.26 - Rugosidade Ra dos furos alargados (EVANS; HOOGENDOORN; PLATT, 2013)

2.8 Planejamento de experimentos

O Planejamento de Experimentos (*Design of Experiments*, DOE) é uma técnica utilizada para se definir quais dados, em que quantidade e condições devem ser coletados durante um determinado experimento, buscando satisfazer dois grandes objetivos: a precisão estatística da resposta e o menor custo (ARANDA; JUNG; CATEN, 2008).

Hajjaji et al. (2010) afirmam que, através desta técnica, pesquisadores podem determinar as variáveis que exercem maior influência no desempenho de um determinado processo, tendo como resultados:

- maior volume de informações nos experimentos planejados, em relação às abordagens feitas pelo método de tentativa e erro;
- redução no número de experimentos e consequentemente nos custos;
- torna possível o cálculo de interações entre as variáveis de controle, levando a um maior conhecimento do processo;
- facilita a determinação das melhores condições experimentais na tentativa de aumentar a escala de produção.

2.8.1 Planejamento fatorial

O planejamento fatorial é utilizado no estudo dos efeitos de duas ou mais variáveis de influência. É um método onde as variáveis que apresentam influências significativas na resposta são avaliadas ao mesmo tempo. As variáveis são escolhidas e os experimentos são realizados em diferentes valores destes fatores para todas as combinações possíveis dos níveis de cada variável selecionada. Diz-se que há interação dessas variáveis quando o efeito de uma variável depende do nível das outras variáveis (Macedo, 2007).

Para esta autora, quando se estuda o mesmo número de níveis para todos os fatores, o planejamento fatorial pode ser representado por b^k , onde k é o número de fatores e b é o número de níveis escolhidos. Em geral, os planejamentos fatoriais do tipo 2^k são os mais comuns, apresentando como vantagem a realização de poucos ensaios. Nos planejamentos experimentais em que as variáveis são exploradas em 2 níveis é comum codificá-los usando os sinais (+) e (-). A atribuição dos sinais é feita aleatoriamente, não interferindo na realização dos experimentos ou interpretação dos resultados.

Quando o número de fatores é igual a 3 (que foi adotado neste trabalho), correspondendo assim, na realização de 2^3 (ou oito) ensaios, o planejamento é representado pela matriz da Tab. 2.7:

Tabela 2.7 - Matriz de planejamento 2^3

Ensaio	Fatores de Controle		
	1	2	3
01	-	-	-
02	+	-	-
03	-	+	-
04	+	+	-
05	-	-	+
06	+	-	+
07	-	+	+
08	+	+	+

(-) representa o nível inferior do fator

(+) representa o nível superior

2.8.2 Cálculo dos efeitos principais e de interação entre variáveis

Segundo Barros Neto, Scarminio e Bruns (2001), o efeito principal de um fator é a diferença média observada na resposta quando se muda o nível do fator de controle investigado. Desta forma, o efeito principal é dado pela diferença entre médias: $\bar{y}_+ - \bar{y}_-$, o qual \bar{y}_+ é a resposta média para o nível superior da variável (+) e \bar{y}_- é a resposta média para o nível inferior da variável (-).

Segundo estes autores, o efeito de interação é a metade da diferença entre os efeitos principais de um fator nos níveis de outro fator. A interpretação dos resultados é dada pelo efeito da média juntamente com os efeitos principais e os efeitos de interação entre dois fatores.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Aspectos gerais

O objetivo deste trabalho é avaliar a usinabilidade de ferros fundidos de alta resistência por meio do processo de furação. Para tanto, foi programado uma série de ensaios que estão divididos em quatro etapas principais e sete sub-etapas, esquematizadas na Fig. 3.1.

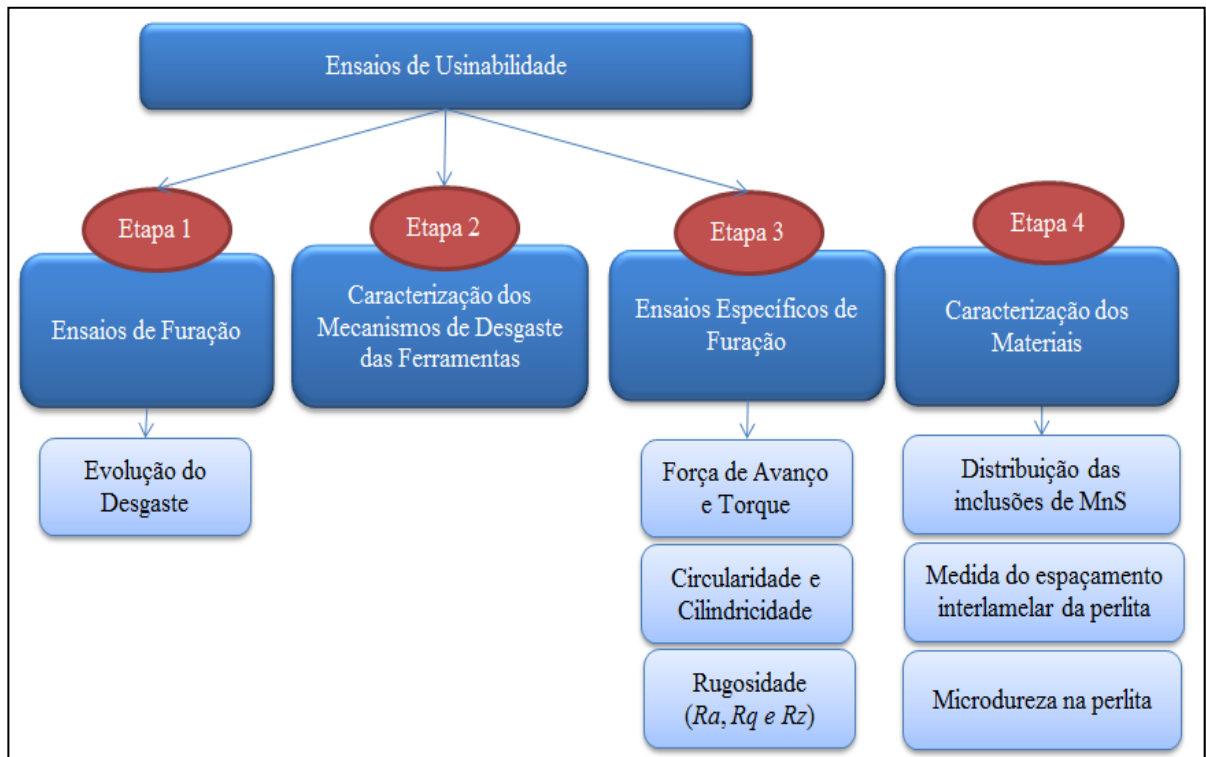


Figura 3.1 - Esquema dos ensaios realizados

3.2 Corpos de prova

Os corpos de prova foram fornecidos pela empresa TUPY S.A em forma de barras retangulares, cujas dimensões foram de, aproximadamente, 400 mm de comprimento, 240 mm de largura e 40 mm de espessura (Fig. 3.2). Cada barra comporta 589 furos de 10 mm de diâmetro, com 2 mm de espaçamento entre eles.

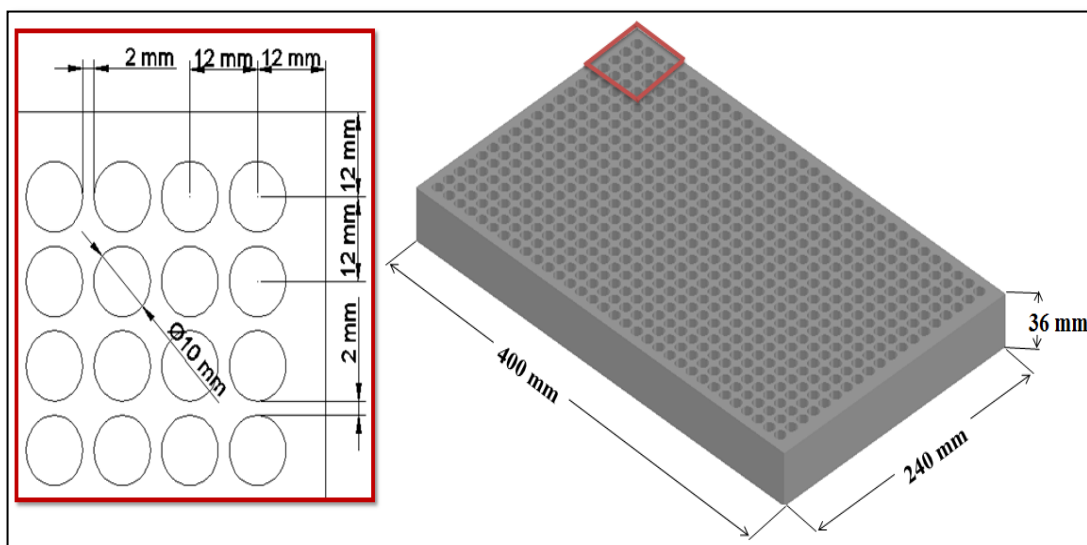


Figura 3.2 - Geometria dos corpos de prova dos materiais usinados

Para a execução desta pesquisa foram feitos furos na parte inferior e superior da placa. Desta forma, foi necessária uma preparação dos corpos de prova, sendo estes pré-usinados antes da realização dos testes. Foi realizado o faceamento na parte inferior das placas e na parte superior a fim de melhorar o assentamento do material na mesa da máquina e também para eliminar qualquer resíduo proveniente do processo de fundição que pudesse interferir no desgaste das brocas. Os corpos de prova foram faceados de forma a manter uma espessura padronizada de 36 mm.

3.3 Caracterização dos materiais utilizados

Os materiais utilizados nesta pesquisa foram: ferro fundido cinzento classe FC-250 (FC250), dois ferros fundidos cinzentos de alta resistência classe FC-300, um com adição de Mo em sua microestrutura (FC300) e o outro, também ligado ao Mo, com refino de grafita (FC300_(RG)) e o ferro fundido vermicular classe 450 (FV450). As informações referentes à composição química, propriedades mecânicas e características da matriz e da grafita dos

materiais foram obtidas por meio de relatórios cedidos pela TUPY S.A. e se encontram detalhadas a seguir.

3.3.1 Composição química

Os valores médios da composição química de cada ferro fundido produzido se encontram na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 - Composição química dos materiais estudados

Material	Si [%]	Mn [%]	P [%]	S [%]	Cr [%]	Ti [%]	Sn [%]	Cu [%]	Mo [%]	Ni [%]
FC250	1,900	0,500	0,020	0,100	0,270	-	0,130	0,280	0,020	-
FC300	-	-	-		0,220		0,050	0,700	0,250	
FC300 _(RG)	2,000	0,600	0,030						0,200	
FV450	2,210	0,320	-	0,003	0,031	0,007	0,070	0,990	-	0,016

3.3.2 Análise metalográfica

A Tab. 3.2 mostra a caracterização dos quatro materiais referentes à grafita e à matriz:

Tabela 3.2 - Características da grafita e da matriz dos ferros fundidos

Material	Matriz	Grafita	
		Forma	% Nodular
FC250	100% Perlítica	I	-
FC300	100% Perlítica	I	-
FC300 _(RG)	100% Perlítica	I	-
FV450	99% Perlítica	III - VI	9

As micrografias destes materiais, obtidas por meio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV *Hitashi* TM 3000) do LEPU, são exibidas na Fig. 3.3. Observa-se, nesta figura, o aspecto de apresentação da grafita nos três ferros cinzentos como sendo de placas finas e uniformes com orientação aleatória, típicos da forma I e tipo A, bem como o aspecto da grafita refinada do FC300_(RG). Já para o ferro vermicular, as formas observadas como III e VI da grafita correspondem, respectivamente, à grafita em forma de vermes e nódulos.

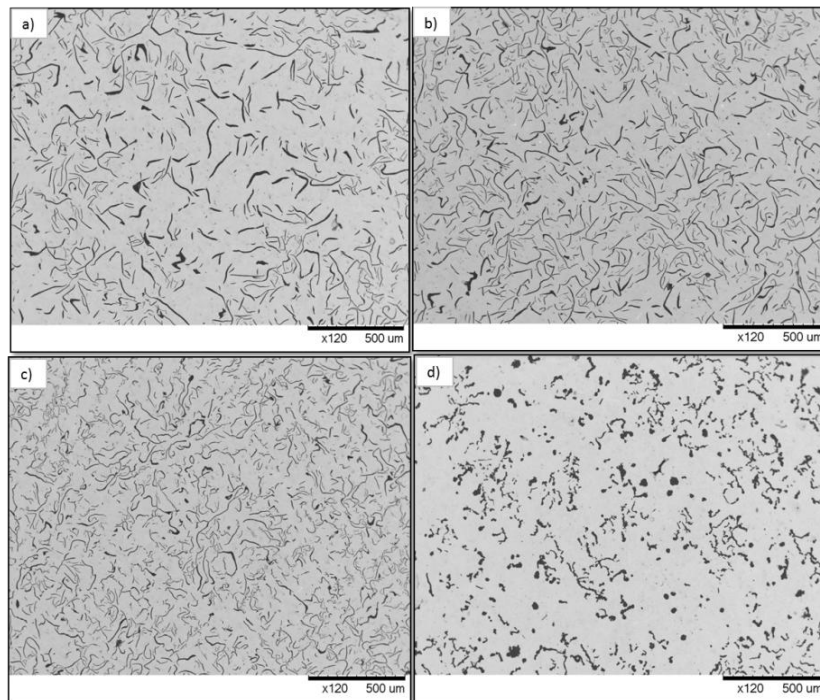


Figura 3.3 - Micrografias do a) FC250; b) FC300; c) FC300_(RG); d) FV450. (MEV)

As micrografias evidenciando a matriz perlítica destes materiais, obtidas por microscopia óptica (Microscópio Olympus) e fornecidas pela TUPY S.A, se encontram na Fig. 3.4:

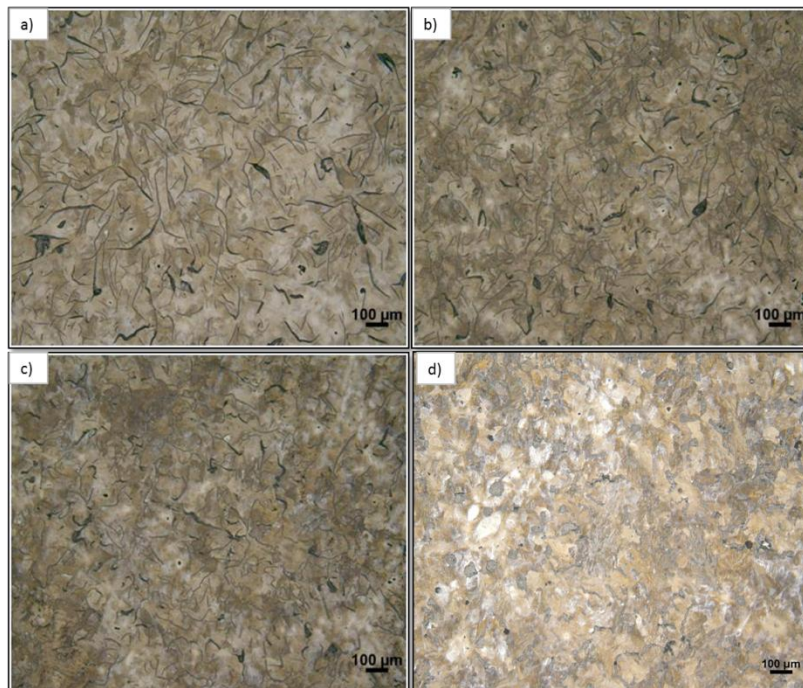


Figura 3.4 - Micrografias do a) FC250; b) FC300; c) FC300_(RG); d) FV450. Ataque em Nital 3% (Microscópio óptico)

3.3.3 Propriedades Mecânicas

Os valores da dureza Brinell (Durômetro Wolpert) e da resistência mecânica (Máquina EMIC), ambos fornecidos pela Tupy, dos quatro materiais se encontram na Tab. 3.3. Normalmente, não se mede o alongamento nos ferros fundidos cinzentos, pois estes materiais apresentam um alongamento muito baixo (inferior a 1%). Além disso, o Limite de Escoamento também não é medido. Isto porque os veios de grafita atuam como se fossem espaços vazios, reduzindo a resistência mecânica e impedindo a deformação plástica. Como resultado, uma peça de ferro fundido cinzento não tem, na prática, comportamento plástico. Assim, o Limite de Escoamento está muito próximo do Limite de Resistência à Tração (MASSIRER, 2010).

Tabela 3.3 - Dureza e resistência mecânica dos ferros fundidos

Propriedades	FC250	FC300	FC300_(RG)	FV450
Dureza [HB]	187	207	217	229
LE [MPa]	-	-	-	379
LR [MPa]	259	278	283	524
Alongamento [%]	-	-	-	1,54

3.3.4 Determinação da distribuição das inclusões de MnS nos ferros fundidos cinzentos

Para determinar a distribuição de inclusões de MnS nos ferros fundidos, foram retiradas pequenas amostras dos corpos de prova de usinagem. Após o processo de embutimento, as amostras foram lixadas com lixas de carbetto de silício, iniciando com lixa, cujo tamanho de grão foi de 220 mesh até a lixa com tamanho de grão de 2000 mesh, e no polimento com óxido de cromo de granulometria 1 μm . Como lubrificante, durante o polimento, foi utilizado água.

Para a avaliação da quantidade e área das partículas de sulfeto de manganês, distribuídas na matriz dos materiais, utilizou-se o microscópio óptico do fabricante Olympus (modelo BX51) e o *software Stream Essentials* 1.9.4 (fabricante Olympus) nas imagens com área de 0,05 mm².

Foram utilizadas 10 imagens com ampliação de 500x para determinar a quantidade de inclusões de MnS/mm² em cada amostra de ferro cinzento. Já para avaliação da área foram selecionadas aleatoriamente 150 partículas de sulfeto de manganês em imagens com níveis de ampliação, também, de 500x. Tais inclusões eram identificadas visualmente e quando o

software incluía óxidos (provavelmente formados durante a secagem das amostras), estes eram removidos durante o processo de avaliação. A Fig. 3.5 mostra um exemplo de como a área das partículas foi medida.

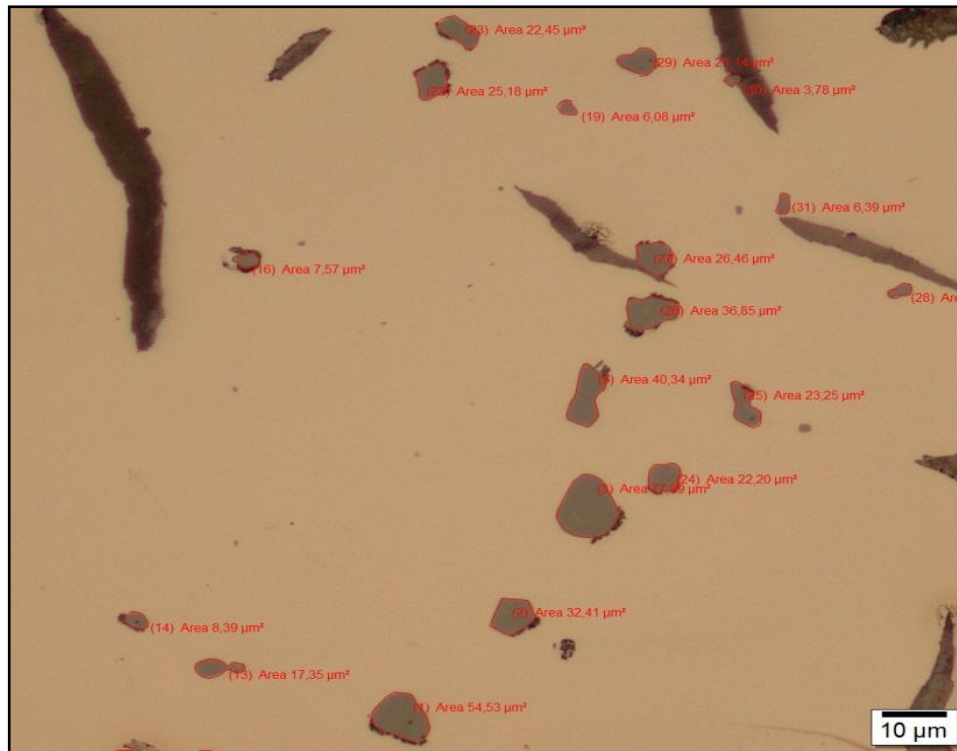


Figura 3.5 - Identificação das inclusões de sulfeto de manganês

3.3.5 Determinação do espaçamento interlamelar da perlita

Após o término da análise do item anterior (distribuição das inclusões de MnS), as amostras foram atacadas com o reagente Nital 2% para a revelação da matriz dos quatro materiais em questão. A determinação do espaçamento interlamelar foi realizada com a utilização do MEV (*Hitashi TM 3000*), do LEPU. Desta forma, foram tiradas 25 imagens, ampliadas 20000x, de diferentes regiões e selecionados, aleatoriamente, 25 pontos para a medição das interseções das lamelas de cementita, utilizando os seguintes critérios (VOORT e ROOSZ, 1984):

- Selecionou-se as colônias de perlita com o menor espaçamento de campo;
- Com auxílio do *software Image J (Image Processing and Analysis in Java 1.5)* foi traçada uma linha (Fig. 3.6) perpendicular às lamelas de cementita, cujo comprimento conhecido era de 3,7 µm;

- Dividiu-se o comprimento desta linha pelo número de lamelas de cementita cortadas pela linha. O resultado desta divisão foi considerado como sendo o valor do espaçamento interlamelar da perlita.

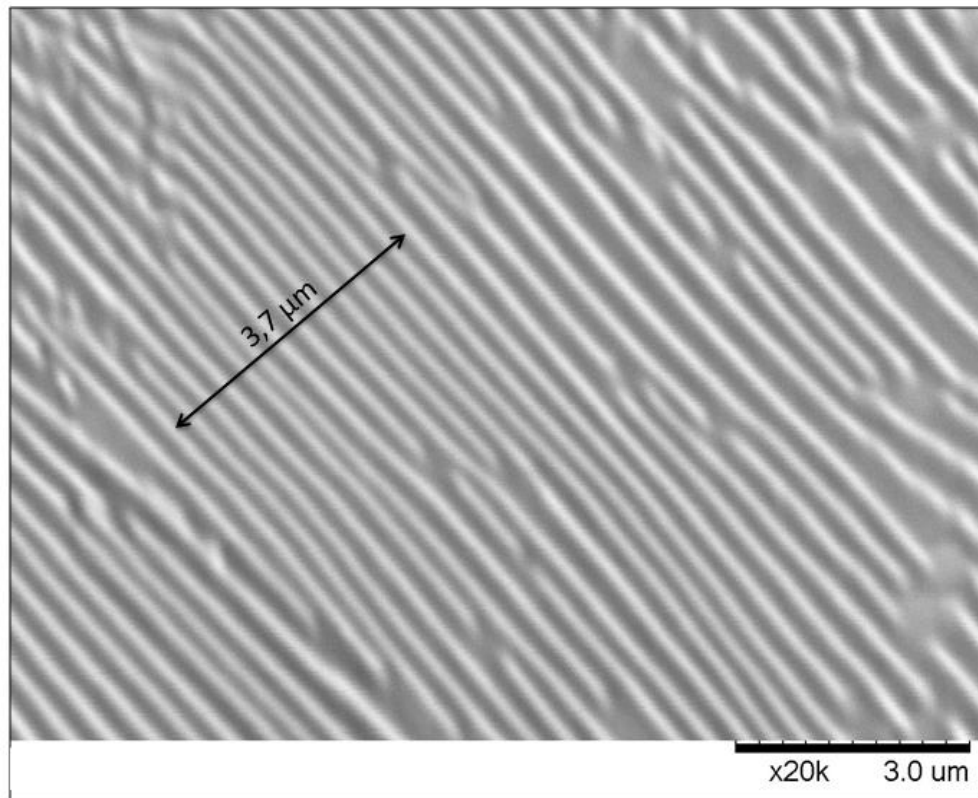


Figura 3.6 - Determinação do espaçamento interlamelar da perlita

3.3.6 Ensaios de microdureza na perlita

Para a medição da microdureza Vickers na perlita foi utilizado um microdurômetro da marca SHIMADZU, modelo HMV, do Laboratório de Tribologia e Materiais da UFU. As amostras utilizadas para esta avaliação foram as mesmas do item anterior.

A determinação da microdureza foi realizada em 15 pontos distintos ao longo das amostras, sendo estas submetidas a uma carga de 100 gramas em um tempo de aplicação de 15 segundos.

Para este ensaio, tomou-se o cuidado em não permitir que o penetrador atingisse os veios de grafita, devido a esta fase possuir baixa dureza e resistência. Além disso, foram descartados os menores valores encontrados de microdureza referente aos quatro materiais, reduzindo assim a incerteza de que o penetrador tenha atingido grafitas que porventura estejam logo abaixo da superfície analisada.

3.4 Ferramentas utilizadas

As ferramentas de corte utilizadas nesta pesquisa foram um corpo de brocas SUMOCHAM, produzido em aço, com diâmetro de 10 mm e código DCN 100-050-16A-5D, e 60 pontas de brocas intercambiáveis de metal duro (classe K20-K40) SUMOCHAN com cobertura de TiAlN, também de 10 mm e código ICK 100 IC 908. São ferramentas recomendadas pelo fabricante para a usinagem de ferros fundidos e foram mantidas como uma constante, sendo estas fabricadas pela ISCAR Ltda. A Fig. 3.7 ilustra a configuração das ferramentas utilizadas.

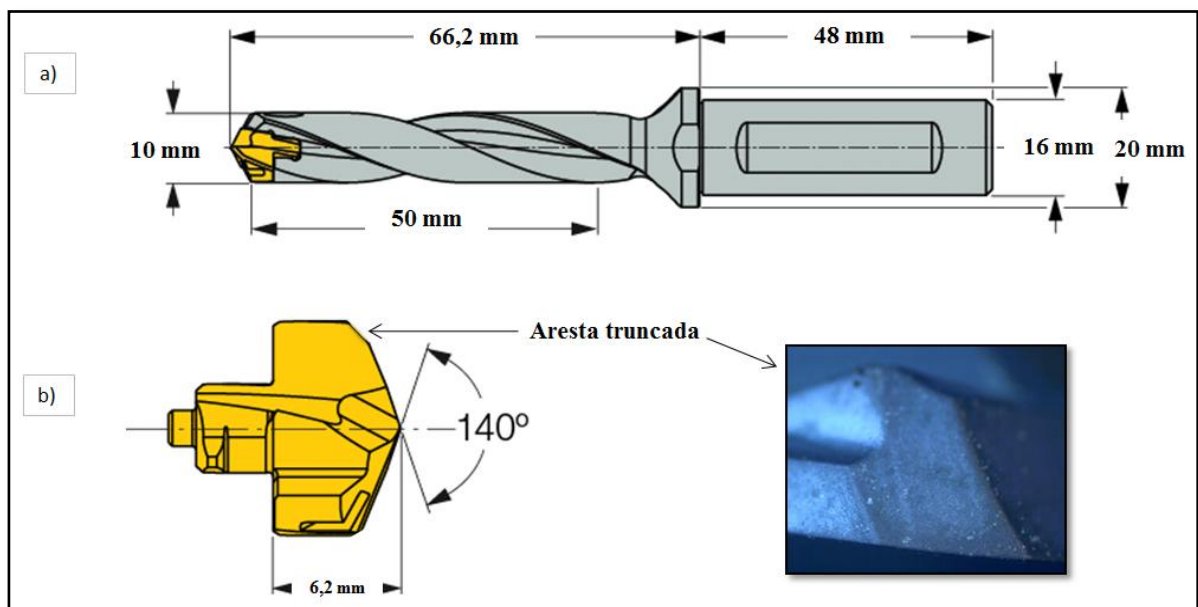


Figura 3.7 - Geometria das ferramentas utilizadas a) corpo de brocas; b) ponta intercambiável de broca SUMOCHAM

3.5 Ensaios de furação (vida da ferramenta)

Os ensaios de vida da ferramenta foram desenvolvidos segundo um planejamento fatorial completo 2^3 , consistindo de duas variáveis quantitativas, velocidade de corte (V_c) e avanço (f), e uma variável qualitativa, que é o material. Todos os testes foram repetidos duas vezes, totalizando 3 testes em cada condição (teste, réplica e tréplica), garantindo assim confiabilidade estatística nos resultados. As Tabs. 3.4 e 3.5 mostram, respectivamente, as variáveis de entrada à dois níveis e o planejamento fatorial 2^3 .

Tabela 3.4 - Variáveis de entrada à dois níveis

Variável	Nível (- 1)	Nível (+ 1)
Vc (m/min)	70	140
f (mm/rot)	0,15	0,25
Material	FC250	FC300, FC300 _{RG} e FV450

Tabela 3.5 - Planejamento fatorial 2³

Ensaio	Vc [m/min]	f [mm/rot]	Material
01	- 1	- 1	- 1
02	+ 1	- 1	- 1
03	- 1	+ 1	- 1
04	+ 1	+ 1	- 1
05	- 1	- 1	+ 1
06	+ 1	- 1	+ 1
07	- 1	+ 1	+ 1
08	+ 1	+ 1	+ 1

Os valores da velocidade de corte e do avanço recomendados pelo fabricante das brocas se encontram no intervalo de 80 a 140 m/min e 0,20 a 0,35 mm/rot, respectivamente. No entanto, para este trabalho adotou-se valores mais conservadores, evidenciados na tab. 3.4, devido a usinagem ser a seco (sem refrigeração) no corte de materiais de alta resistência.

Foram usinados furos não passantes com um comprimento de penetração fixo (Lf) de 16 mm, realizados no centro de Usinagem Vertical CNC linha DISCOVERY, modelo 760, da marca ROMI do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU). Esta máquina apresenta potência do motor principal de 11 KW e rotação máxima de 10.000 RPM. Adotou-se um valor pequeno de relação L/D devido ao fato dos testes terem sido conduzidos sem refrigeração, evitando, assim, possíveis falhas catastróficas.

Foi desenvolvido um programa CNC específico para a usinagem dos furos para que, ao final de sequências determinadas, fossem realizadas a inspeção visual dos furos e da ferramenta (a fim de registrar possíveis avarias), como também a medição do desgaste da broca de forma progressiva. O esquema da Fig. 3.8 mostra a configuração da sequência de usinagem seguida nesta pesquisa.

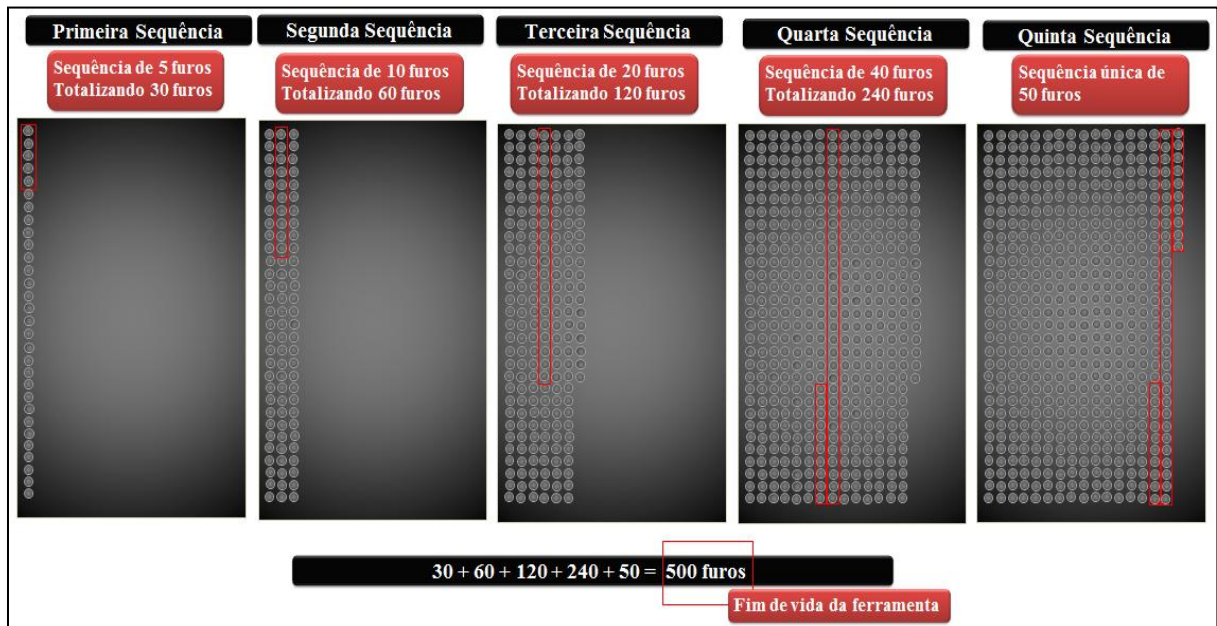


Figura 3.8 - Sequência de usinagem

A ferramenta foi acoplada à máquina através de um mandril hidromecânico Corogrip®, de alta precisão, fabricado pela Sandvik Coromant®. Para a fixação das placas de ferro fundido foram utilizadas castanhas fixadas à mesa da máquina, garantindo assim rigidez e agilidade na retirada e colocação dos corpos de prova na máquina. A Fig. 3.9 mostra o sistema de fixação dos corpos de prova e da broca.

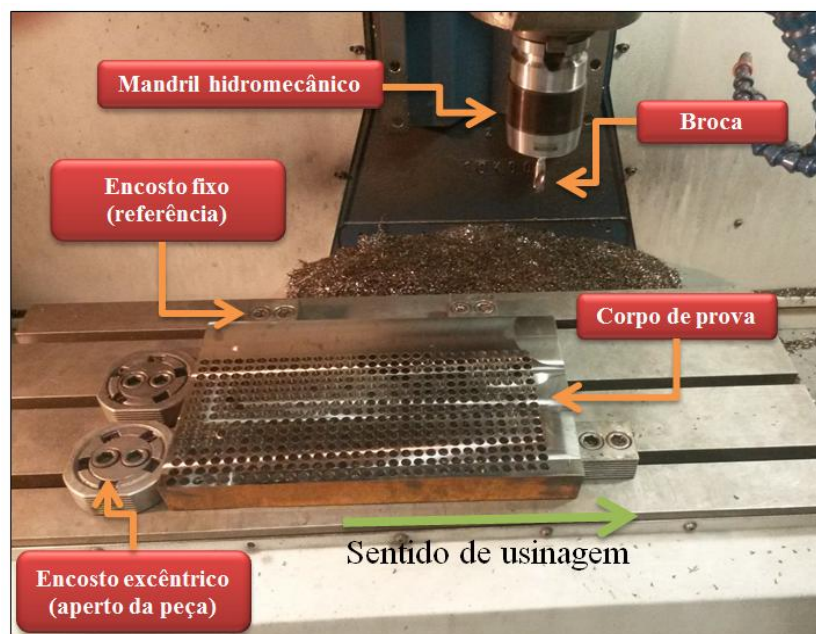


Figura 3.9 - Sistema de fixação dos corpos de prova e da ferramenta

Antes da realização dos ensaios foram medidos os valores dos batimentos radial e axial das pontas de corte da broca, onde os valores médios para cinco medições foram de, respectivamente, 0,013 e 0,008 mm. Para tanto, foi utilizado um relógio comparador analógico do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm e faixa nominal de 1 mm, utilizado junto à base magnética, como mostra a Fig. 3.10.

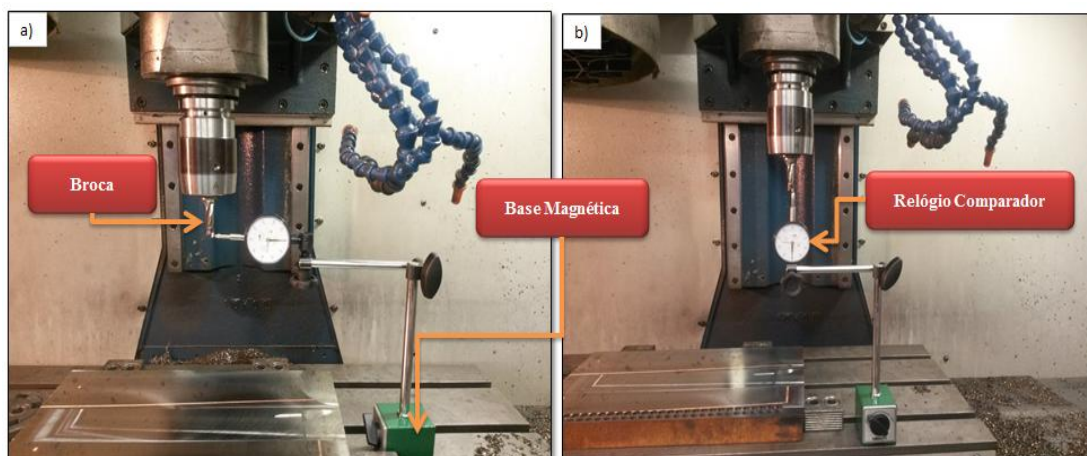


Figura 3.10 - Sistema para medição do batimento a) radial; b) axial

3.5.1 Critério de fim de vida da ferramenta e monitoramento da evolução do desgaste

O critério de fim de vida adotado para os testes de usinabilidade foi o desgaste máximo de flanco (VB_{Bmax}) cujos valores foram de 0,4 e 0,3 mm, dependendo da posição na superfície de folga, de acordo com a Fig. 3.11. Estes valores como critério de fim de vida foram adotados levando-se em consideração a recomendação do fabricante das brocas e também trabalhos semelhantes a este, tais como as pesquisas de Mocellin (2002) e Massirer (2010). O desgaste de flanco médio (VB_{Bmed}) também foi medido para controle, mas este não atingiu valores significativos ao ponto de ser importante para determinar o fim de vida. Além disso, foi fixado um número de furos máximo de 500, caso a taxa de desgaste seja muito pequena. Isto para evitar a utilização de excessiva quantidade de material.

Durante os ensaios de vida das brocas, o desgaste de flanco foi medido por meio de imagens geradas dos desgastes ao longo dos ensaios. Estas imagens foram adquiridas através de um Estéreo Microscópio SZ6145TR Olympus, acoplado ao sistema de Captura & Análise de Imagens Colorido, modelo Image-Pro Express Kit. A Fig. 3.11 mostra um exemplo de como o desgaste da ferramenta foi medido através deste *software*.

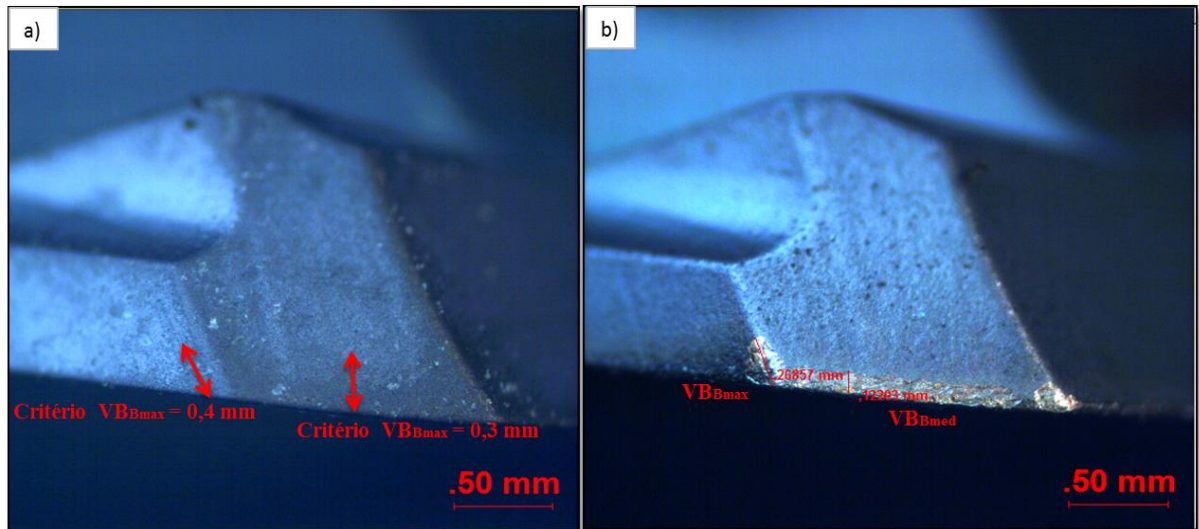


Figura 3.11 - Exemplo da forma de medição do desgaste de flanco máximo e médio a) ferramenta nova; b) ferramenta desgastada

3.6 Caracterização dos Mecanismos de Desgaste da Ferramenta

Os mecanismos de desgaste das brocas foram caracterizados por meio do MEV (*Hitashi TM3000*). Em todos os ensaios observou-se uma grande quantidade de material aderido na aresta de corte da ferramenta. Desta forma, para que os mecanismos de desgaste pudessem ser analisados, foi necessário atacar quimicamente as ferramentas com uma solução de HNO_3 (ácido nítrico), cujo tempo de ataque das brocas foi de 6 minutos.

A Fig. 3.12 mostra um comparativo em dois níveis de imagens obtidas no MEV, com ampliações de 100x para a localização do desgaste e 600x para visualização macro da área desgastada e para análise dos elementos químicos obtidos em diferentes pontos, através do Espectrômetro de Energia Dispersiva (EDS).

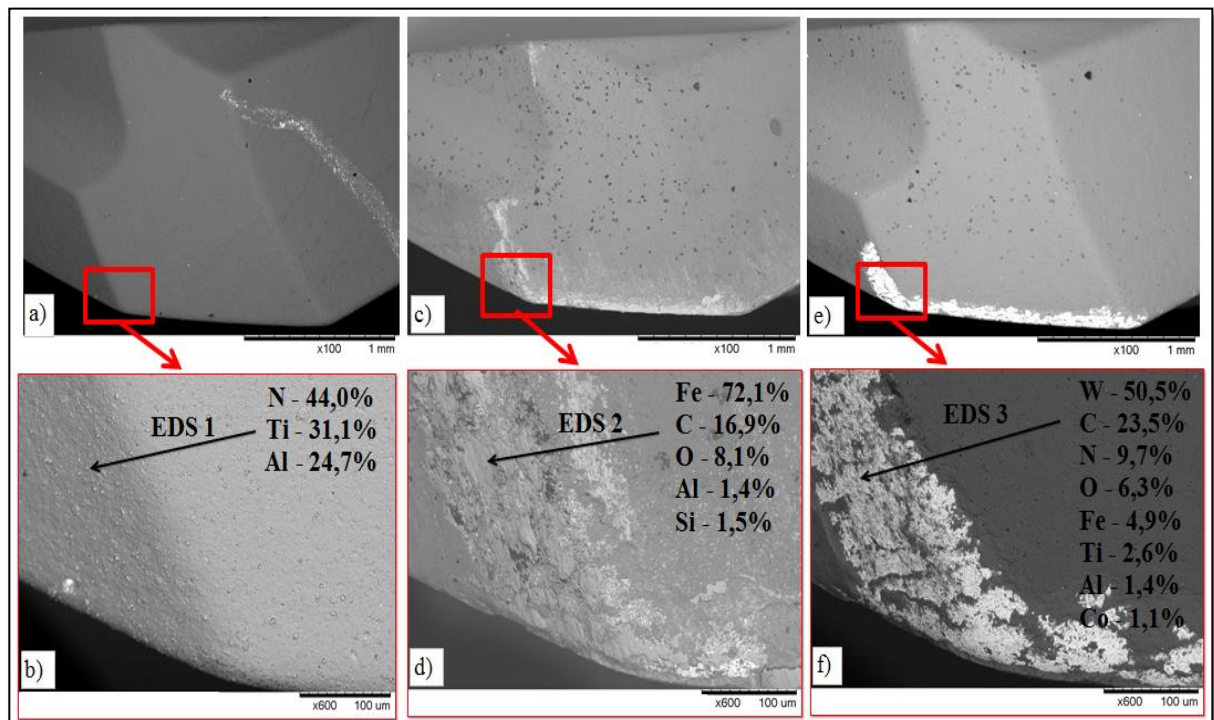


Figura 3.12 - Comparativo entre: a) e b) ferramenta nova sem ataque; c) e d) ferramenta desgastada sem ataque químico; e) e f) ferramenta desgastada após ataque químico

3.7 Ensaios específicos (força de avanço, torque e qualidade dos furos)

Ensaios específicos foram realizados a fim de se monitorar a força de avanço e o torque, bem como para medição da rugosidade, circularidade e cilindricidade, sem a influência do desgaste da ferramenta. Desta forma, para cada ensaio foi utilizado uma ponta de broca nova e, a cada 3 furos, o desgaste de flanco era monitorado a fim de que este não atingisse a marca de 0,1 mm. Estes testes foram realizados através da metodologia univariada, em que se é avaliada uma variável de cada vez, ou seja, entre a velocidade de corte e o avanço fixa-se uma e varia-se a outra. Para cada teste foram executados 3 furos, todos realizados sem a presença de fluido de corte. As condições utilizadas para estes ensaios se deram conforme a Tab. 3.6.

Tabela 3.6 - Dados das condições de corte para os ensaios específicos

Ensaios	Vc (m/min)	f (mm/rot)	Lf (mm)
Ensaio 01	110 - 140	0,27	16
Ensaio 02	135	0,20 - 0,32	

3.7.1 Monitoramento da força de avanço (F_z) e do torque (M_z)

Para o monitoramento da força de avanço e do momento torçor foi utilizado um sistema constituído pelos seguintes componentes: dinamômetro rotativo modelo 9124B e condicionador de sinais, modelo 5223B, ambos fabricados pela *Kistler Instruments*, placa de aquisição de sinais (USB 6000) e o *software Signal Express 14.0®*, estes últimos fabricados pela *National Instrument*.

O dinamômetro, fixado no mandril da máquina, recebia os sinais de tensão e os transmitia por telemetria ao estator, que por sua vez passa por um condicionador de sinais que realiza a transformação dos sinais de mV para sinais de força (N). Nesta pesquisa foi utilizado o intervalo de medição “Range 1”, com faixa de medição variando ± 20 KN para F_z e ± 200 Nm para M_z . Os sinais captados pelo condicionador foram enviados à placa de aquisição de sinais para, assim, serem processados pelo *software Signal Express*. A taxa de aquisição dos dados de força da furação foi de 1000 Hz para todos os ensaios, sendo o tempo de aquisição dependente dos parâmetros de corte.

3.7.2 Medição da rugosidade

Para a medição dos parâmetros de rugosidade foi utilizado o rugosímetro *Taylor Robson Surftest 201*. Este instrumento possui agulha do apalpador de diamante com raio de ponta de 5 μm , resolução de 0,1 μm e trabalha com carga de 150 a 300 mg. Foram medidos os parâmetros R_a , R_q e R_z , utilizando um *cut-off* de 0,8 mm (ABNT NBR ISO 4288, 2008).

Foram executadas em cada furo três medições espaçadas de 90° para, assim, obter a média aritmética e o desvio padrão para análise dos resultados. Estas medições foram realizadas sobre uma mesa de desempenho, com o intuito de minimizar a propagação de vibrações, onde as paredes dos furos foram limpas com hastes flexíveis de algodão umedecidas em álcool.

3.7.3 Medição da circularidade e cilindricidade

As medições referentes aos desvios de circularidade e cilindricidade foram feitas em uma Máquina de Medir por Coordenadas do tipo Ponte Móvel, modelo BR M443, fabricante Mitutoyo, resolução de 0,001 mm e volume de trabalho, respectivamente para os eixos x, y e z, de 400 x 400 x 300 mm³. Todas as medições foram realizadas à temperatura ambiente de $20 \pm 1^\circ\text{C}$, sendo esta monitorada através de um termohigrômetro digital, com resolução de 0,1 °C e faixa de medição de (-20 a 60) °C.

As paredes dos furos, bem como os equipamentos e dispositivos utilizados foram limpos para que a medição pudesse ser efetuada, isto com o intuito de remover partículas de poeira que poderiam interferir nos resultados das medições.

Para a medição da circularidade foram considerados 8 pontos apalpados em uma única seção transversal, enquanto que, para a medição da cilindridade, foram apalpados 24 pontos distribuídos em 3 planos de medição ao longo de cada furo, cujas posições foram de 2,5 mm, 6,5 mm e 9 mm de profundidade. A medição foi executada utilizando-se uma ponta única de esfera de rubi com diâmetro de 2 mm. Em todos os casos o desvio de calibração foi de no máximo 1 μm .

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os resultados experimentais apresentados a seguir estão organizados em três partes. A primeira parte refere-se à caracterização microestrutural dos materiais analisados. Esta análise será importante para contribuir na discussão e justificativas dos resultados dos testes de usinabilidade. A segunda e a terceira parte são destinadas, respectivamente, aos resultados obtidos com relação à vida das ferramentas de corte, incluindo a caracterização dos mecanismos de desgaste das brocas, e os ensaios específicos de usinagem.

4.1 Caracterização microestrutural dos ferros fundidos

4.1.1 Distribuição das partículas de sulfeto de manganês nos ferros fundidos cinzentos

Dependendo da distribuição das inclusões de MnS presentes nos ferros cinzentos, diferentes resultados de usinabilidade podem ser obtidos. Estudos realizados por Pereira, Boehs e Guesser (2005) mostram que o aumento da quantidade de partículas de sulfeto de manganês, juntamente com o aumento da velocidade de corte, tornam o efeito benéfico dessas partículas mais evidente na usinagem.

Os resultados das medidas quantitativas referentes à quantidade média de MnS/mm² e à área das inclusões de sulfeto de manganês dos ferros fundidos cinzentos estão ilustrados na Figs. 4.1 e 4.2, respectivamente. O ferro fundido vermicular não apresenta partículas dessas inclusões em sua microestrutura, uma vez que o enxofre é reduzido nestes materiais.

Através da Fig. 4.1 pode-se observar que não existe diferença estatística significativa na quantidade de inclusões por milímetro quadrado com relação aos três materiais. Houve pequenas diferenças nas médias dessas partículas. O ferro cinzento ligado ao Mo e com refino de grafita (FC300_(RG)) possui, em média, 412 partículas de MnS/mm², em que 27% das

inclusões medidas na amostra tem área entre 11 e 20 μm^2 , 21% das partículas possuem área entre 6 e 10 μm^2 e inclusões menores que 6 μm^2 representam cerca de 13% das inclusões totais (Fig. 4.2).

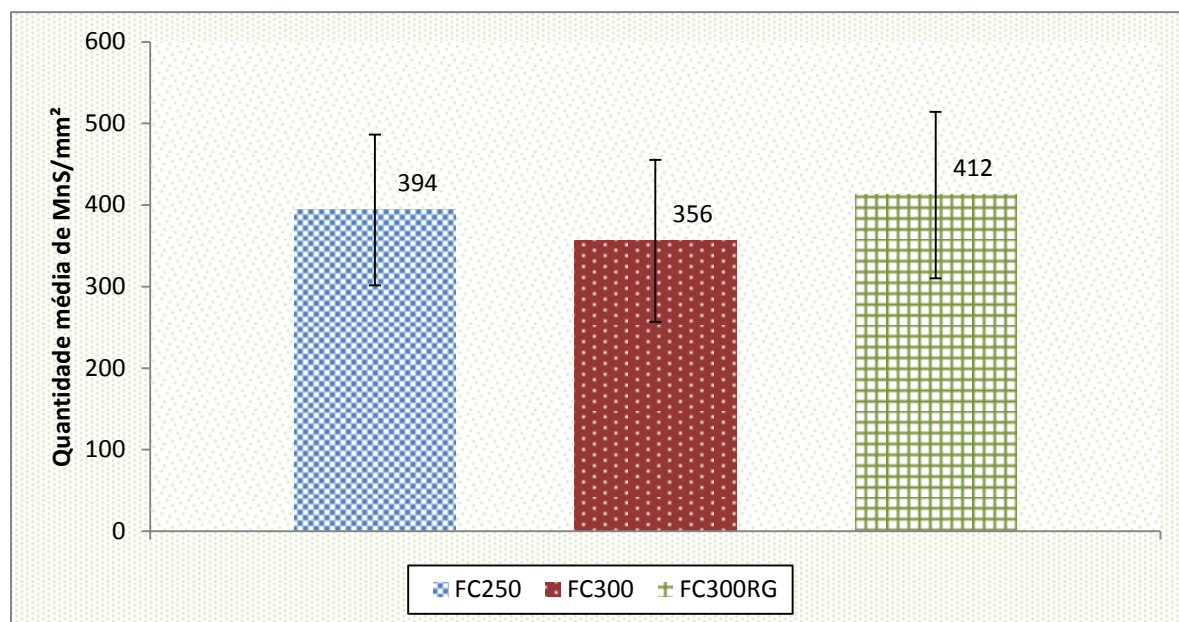


Figura 4.1 - Quantidade média de partículas de MnS por milímetro quadrado

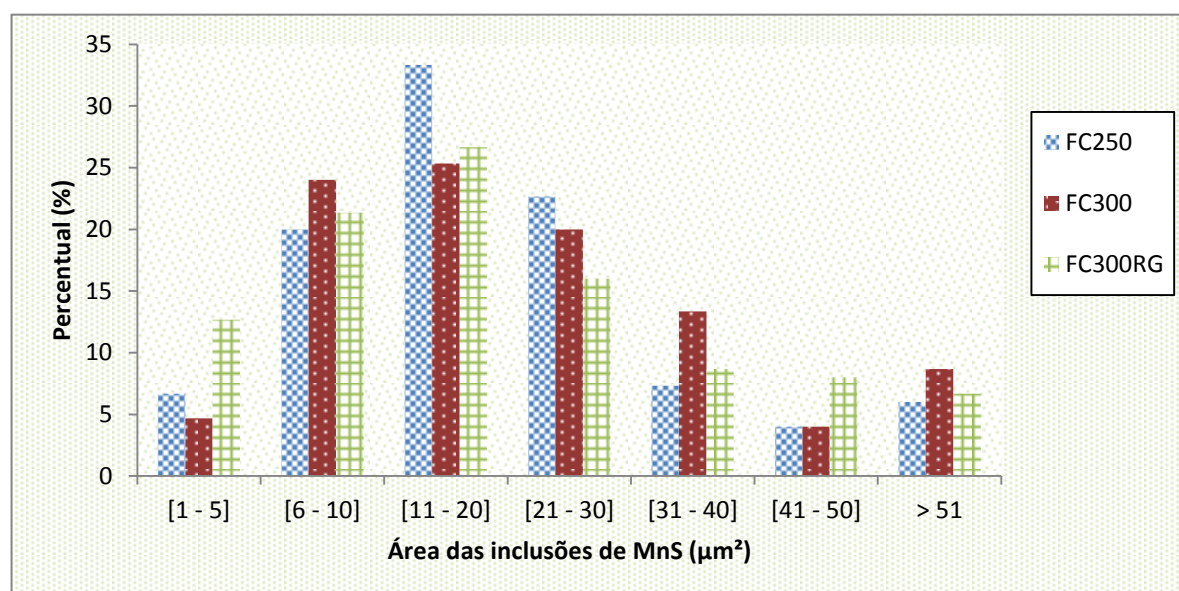


Figura 4.2 - Distribuição das áreas das partículas de MnS

Já para o FC250, que apresenta 394 partículas de MnS/mm², 33% das inclusões possuem área entre 11 e 20 μm^2 , 20% das partículas têm área entre 6 e 10 μm^2 , enquanto 7% das inclusões apresentam área entre 1 e 5 μm^2 . Por fim, o FC300 possui, em média, 356 inclusões por milímetro quadrado que estão presentes no material da seguinte forma: 25% das

partículas analisadas apresentam área entre 11 e 20 μm^2 , 24% das inclusões têm área entre 6 e 10 μm^2 e apenas 5% das partículas de MnS possuem área menor que 6 μm^2 .

4.1.2 Caracterização da perlita nos ferros fundidos

Os resultados de caracterização da perlita dos quatro ferros fundidos avaliados estão ilustrados na Fig. 4.3. O gráfico superior é relativo ao espaçamento interlamelar e o inferior da microdureza da perlita.

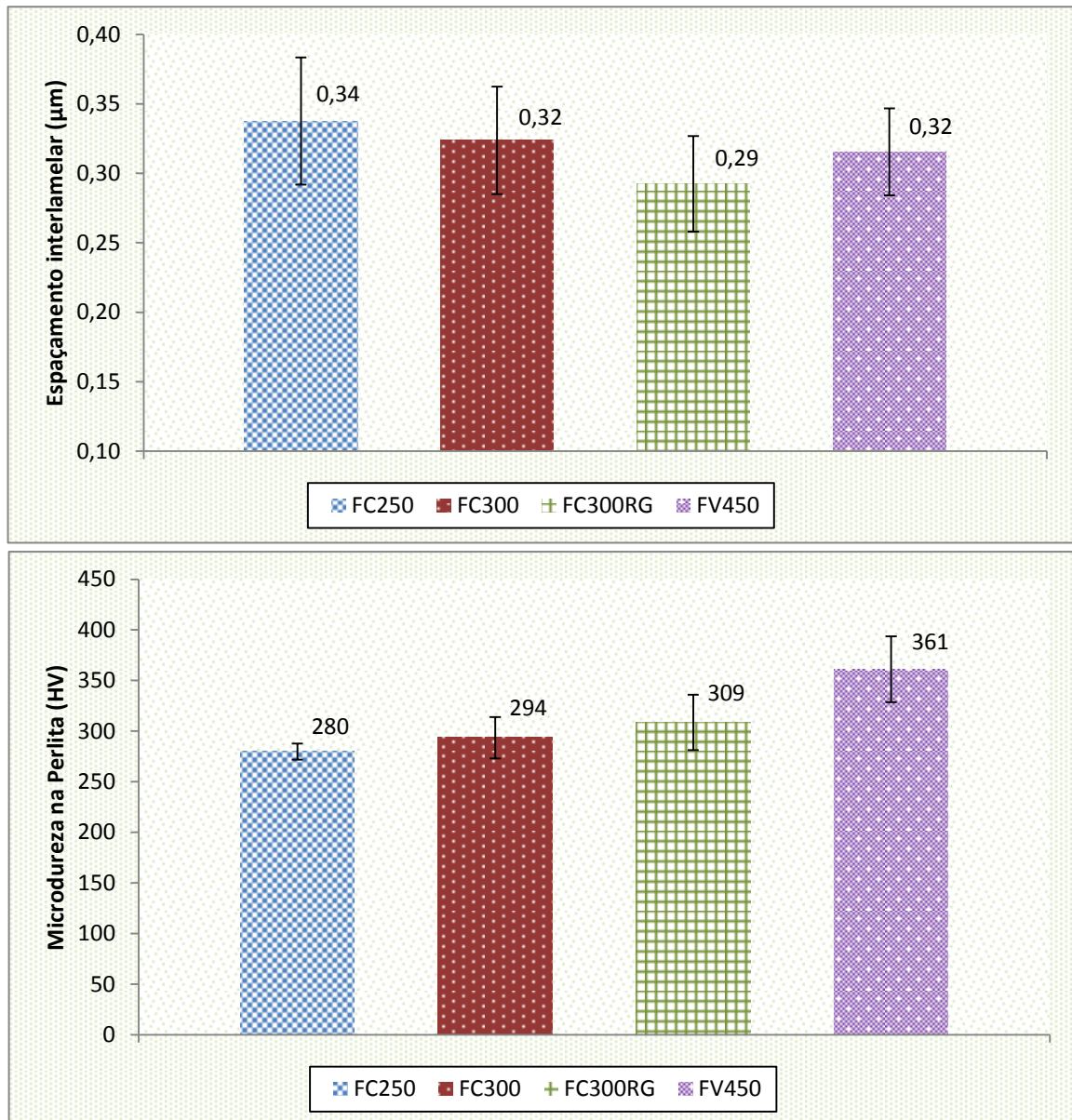


Figura 4.3 - Caracterização da perlita dos materiais estudados

Pode-se observar, por meio da Fig. 4.3, que não há diferença estatística significativa entre os materiais avaliados (exceto entre a microdureza do FV450 e do FC250), como

indicado pelas barras de dispersão dos resultados. Entretanto, como comentários gerais, em termos de valores médios, o FC300_(RG) possui o menor espaçamento interlamelar da perlita, em média de 0,29 μm . Desta forma, tal fator pode ter influenciado a microdureza deste material, a qual foi a maior entre os ferros cinzentos e menor apenas em relação ao ferro fundido vermicular da classe 450. Isto pode indicar, que para ambos os materiais ocorrerá um aumento na resistência à tração e abrasividade. A Fig. 4.4 mostra imagens comparativas da perlita dos quatro ferros fundidos pesquisados, obtidas através do MEV:

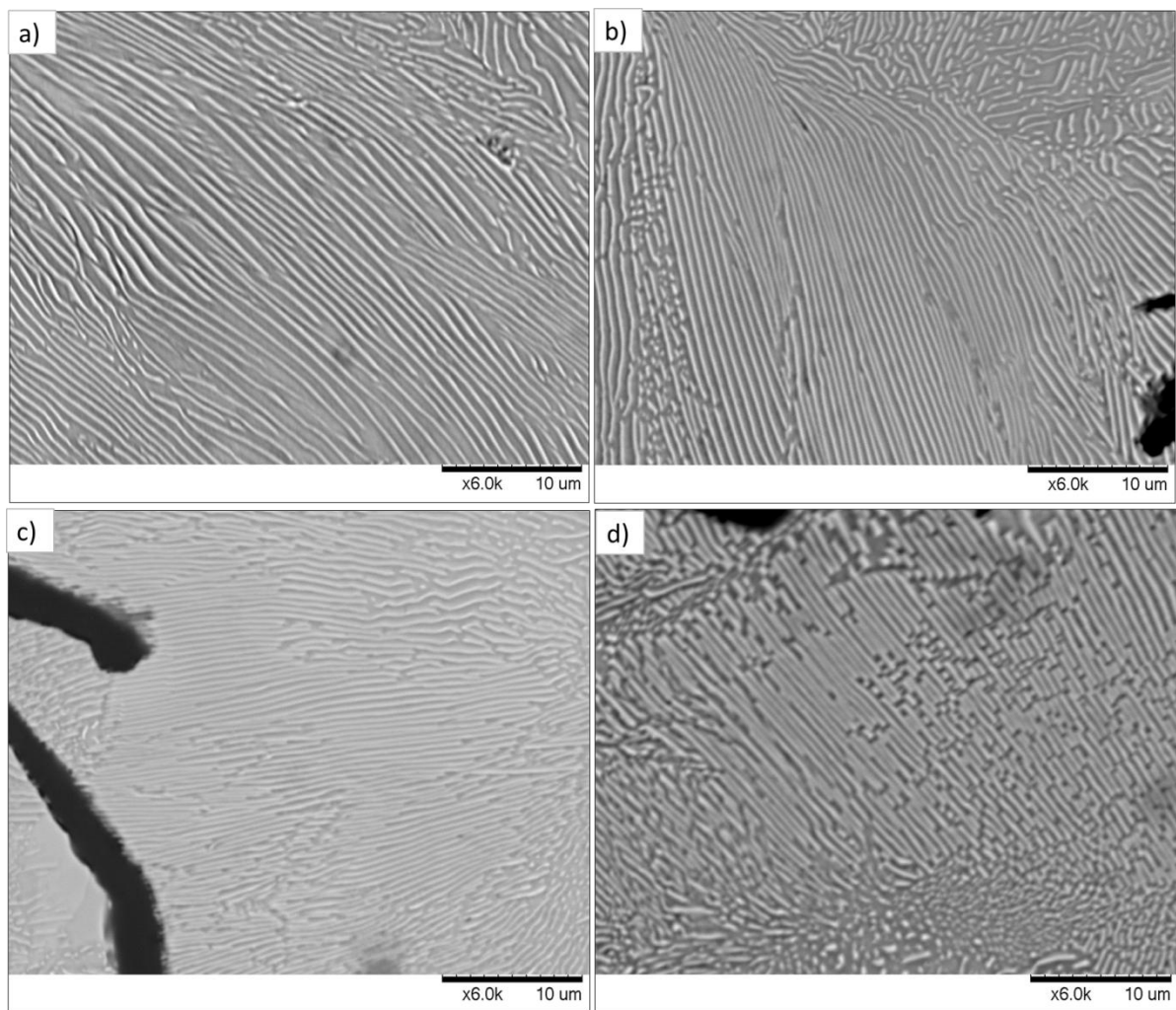


Figura 4.4 - Imagens comparativas da perlita do: a) FC250; b) FC300; c) FC300_(RG); d) FV450

4.2 Resultados dos ensaios de vida e da caracterização do desgaste das ferramentas

Os gráficos referentes ao fim de vida das ferramentas foram construídos com valores oriundos do comprimento do desgaste de flanco da aresta de corte que demonstrou maiores taxas. Para facilitar a interpretação dos resultados obtidos com relação à vida das brocas e

também da caracterização dos mecanismos de desgaste, estes estão divididos em tópicos de acordo com cada condição de corte utilizada neste trabalho.

4.2.1 Condição $V_c = 70 \text{ m/min}$ e $f = 0,15 \text{ mm/rot}$

A Fig. 4.5 descreve o comportamento da ferramenta utilizando velocidade de corte igual a 70 m/min e avanço de $0,15 \text{ mm/rot}$, cujos valores não se encontram dentro das faixas sugeridas pelo fabricante das brocas (80 a 140 m/min para a velocidade de corte e $0,20$ a $0,35 \text{ mm/rot}$ para o avanço).

Para esta condição, onde o tempo de usinagem de cada furo (T_c) foi de $2,87$ segundos, a ferramenta mostrou um desgaste extremamente prematuro para todos os materiais. Em todas as repetições ensaiadas a ferramenta com o melhor desempenho revelou uma vida inferior a 1 minuto, produzindo somente 20 furos.

Neste caso, a baixa velocidade de corte, provavelmente, possibilitou a formação da aresta postiça de corte (APC) em toda a extensão da aresta principal de corte, que pode atuar no arrancamento prematuro de material na superfície da ferramenta, conduzindo-a a um acelerado desgaste e até mesmo o seu colapso. Embora a influência da velocidade de corte seja maior que a do avanço, este último, quando pequeno, pode também prejudicar o desempenho das ferramentas (MACHADO et al., 2015).

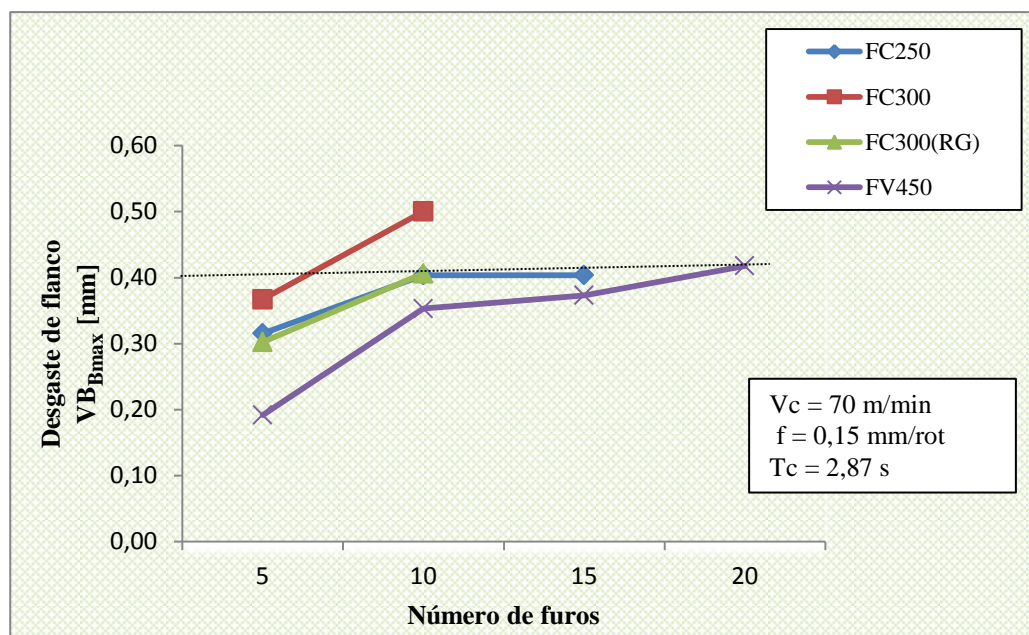


Figura 4.5 - Comprimento do desgaste de flanco máximo para os quatro ferros fundidos analisados na condição $V_c = 70 \text{ m/min}$ e $f = 0,15 \text{ mm/rot}$

De acordo com a Fig. 4.5 o desgaste de flanco máximo foi maior para o ferro fundido cinzento ligado ao molibdênio (FC300), pois com apenas 10 furos (28,7 segundos de usinagem) a ferramenta atingiu um comprimento de desgaste de 0,50 mm. A broca utilizada na furação do ferro fundido ligado ao Mo com refino de grafita (FC300_(RG)) também teve o seu fim de vida com 10 furos atingindo um desgaste de flanco máximo de 0,41 mm. Nesta condição o material que apresentou melhor índice foi o ferro fundido vermicular (FV450), que atingiu um comprimento de 0,42 mm (57,4 segundos de vida) com o dobro de furos do FC300 e do FC300_(RG). Já o ferro fundido cinzento FC250, que apresentou valores intermediários entre o FV450 e o FC300, atingiu o critério de fim de vida com 15 furos.

Evidentemente, que na usinagem não se espera que ferros fundidos cinzentos, que possuam menor resistência à tração e menor dureza, apresentem uma taxa de desgaste mais acelerada do que um ferro fundido vermicular da classe 450. Esperava-se, também, que o ferro fundido FC250 apresentasse vidas de ferramentas maiores que os concorrentes cinzentos da classe 300. Portanto, para esta condição de corte, outros fatores estão contribuindo para afastar os resultados do comportamento esperado. A análise dos mecanismos de desgaste atuantes pode contribuir para oferecer uma explicação plausível. Esta análise foi realizada e seus resultados serão apresentados adiante.

Para realizar a caracterização dos mecanismos de desgaste da ferramenta, além de análises no MEV foram realizados ensaios de EDS, que evidenciaram, para esta condição de corte, a adesão (*attrition*) como causa predominante de desgaste para os quatro ferros fundidos estudados.

A Fig. 4.6 mostra detalhes do desgaste da ferramenta, após ataque químico, que usinou o FV450 com três níveis de imagens em ampliações de 100 vezes para se obter a vista geral da broca, 600 vezes para visualização macro do desgaste e de 2000 vezes para análise de elementos químicos e caracterização dos mecanismos de desgaste.

A primeira observação importante é que o desgaste de flanco ocorreu praticamente só na parte truncada da aresta principal de corte, conforme identificado na Fig. 3.7, e ele é máximo na extremidade da região truncada, no diâmetro máximo da broca, onde, portanto, a velocidade de corte é maior. Na região da aresta de corte antes do truncamento, praticamente não houve desgaste significativo. Isto ocorreu também na usinagem dos outros três materiais, como se verá adiante (Figs. 4.7, 4.8 e 4.9).

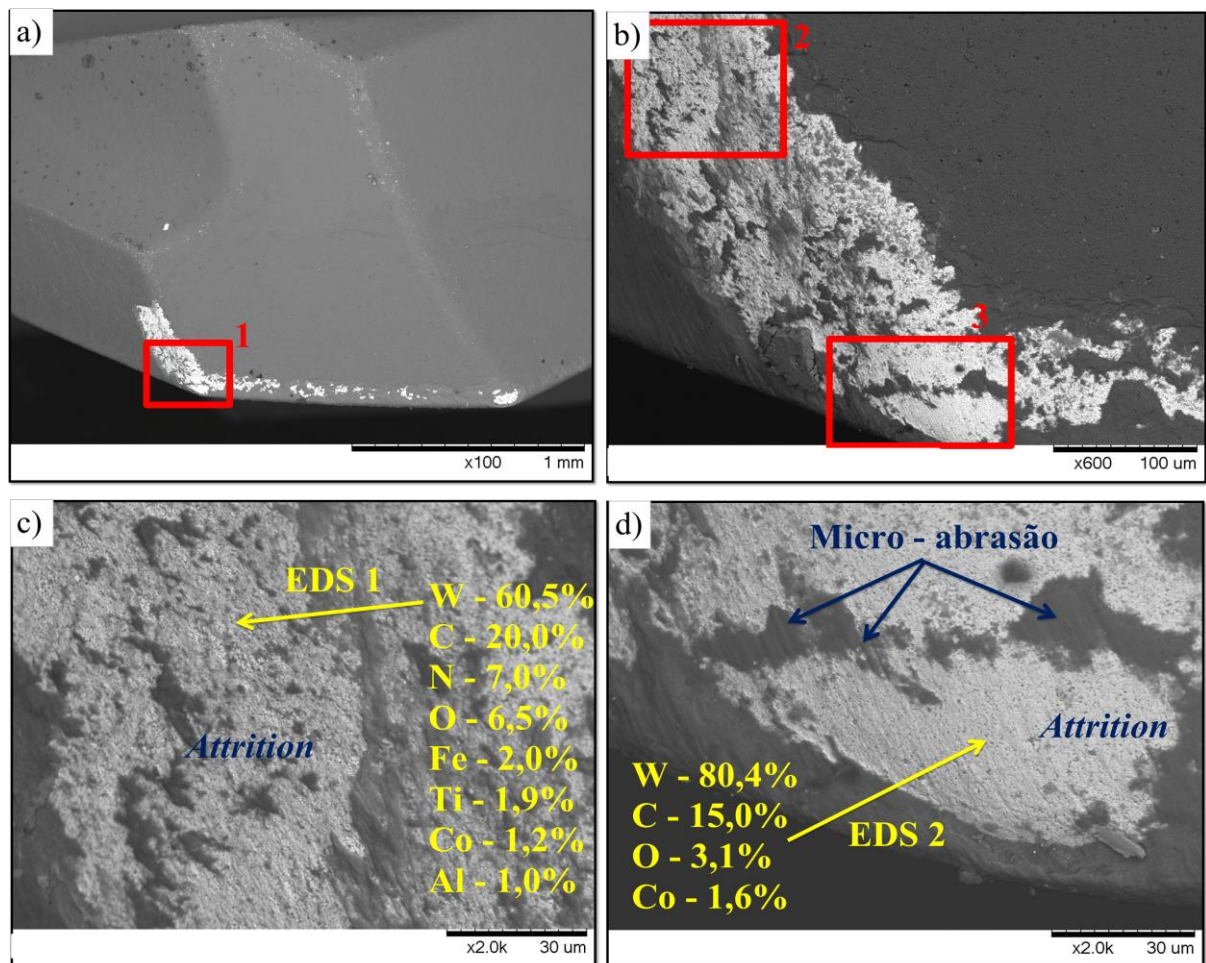


Figura 4.6 - Análise das características do desgaste da ferramenta na furação do FV450: a) vista geral da ferramenta; b) vista ampliada da região 1 mostrada na Fig. 4.6a; c) vista ampliada da região 2 mostrada na Fig. 4.6b; d) vista ampliada da região 3 da Fig. 4.6b

As Figs. 4.6a e 4.6b mostram que o desgaste atingiu o substrato da ferramenta em grande parte da aresta de corte de forma agressiva. Isto pode ser comprovado pelo EDS 1 (Fig. 4.6c) e EDS 2 (Fig. 4.6d) que indicam a presença de tungstênio em grande quantidade e de cobalto na superfície da broca. Na Fig 4.6c (vista ampliada da região 2 da Fig. 4.6b) pode-se observar uma superfície com aparência áspera evidenciando o mecanismo de desgaste por

attrition, resultado do arrastamento de grãos junto ao fluxo de material aderido que escorrega sobre a superfície da ferramenta. A Fig. 4.6d (vista ampliada da região 3 da Fig. 4.6b) mostra detalhes da quina da broca (ponta de corte), onde a superfície de folga encontra a guia cilíndrica. Nela se observa a predominância do fenômeno de adesão e a presença de micro-sulcos paralelos no revestimento de TiAlN, indicando desgaste por micro-abrasão que, segundo Diniz, Marcondes e Copinni (2006), ocorre em função do atrito na interface ferramenta/peça que com o passar do tempo remove o revestimento da ferramenta e intensifica o desgaste sobre o seu substrato.

A Fig. 4.7a mostra a vista geral de parte da broca que usinou o FC250. Em todos os ensaios observa-se uma grande quantidade de material aderido na aresta de corte da ferramenta, antes do ataque químico com solução de HNO_3 , evidenciado na Fig. 4.7b e confirmado através do EDS 3, pois existe uma alta concentração do elemento ferro, além de outros elementos presentes no material do ferro fundido, como carbono e silício. A Fig. 4.7c, que mostra a ferramenta após o ataque químico, ilustra a ampliação da região 1 (Fig. 4.7a), enquanto que por meio da Fig. 4.7d (ampliação da região 2 da Fig. 4.7c) é possível observar em detalhes a morfologia do desgaste que atinge o substrato da broca (confirmado pelo EDS 4 pela presença de W). Esta imagem mostra uma superfície com aspecto de material arrancado, característico do desgaste adesivo, fenômeno que pode ser justificado também pela forte presença do ferro sobre a superfície da ferramenta antes do ataque químico (EDS 3).

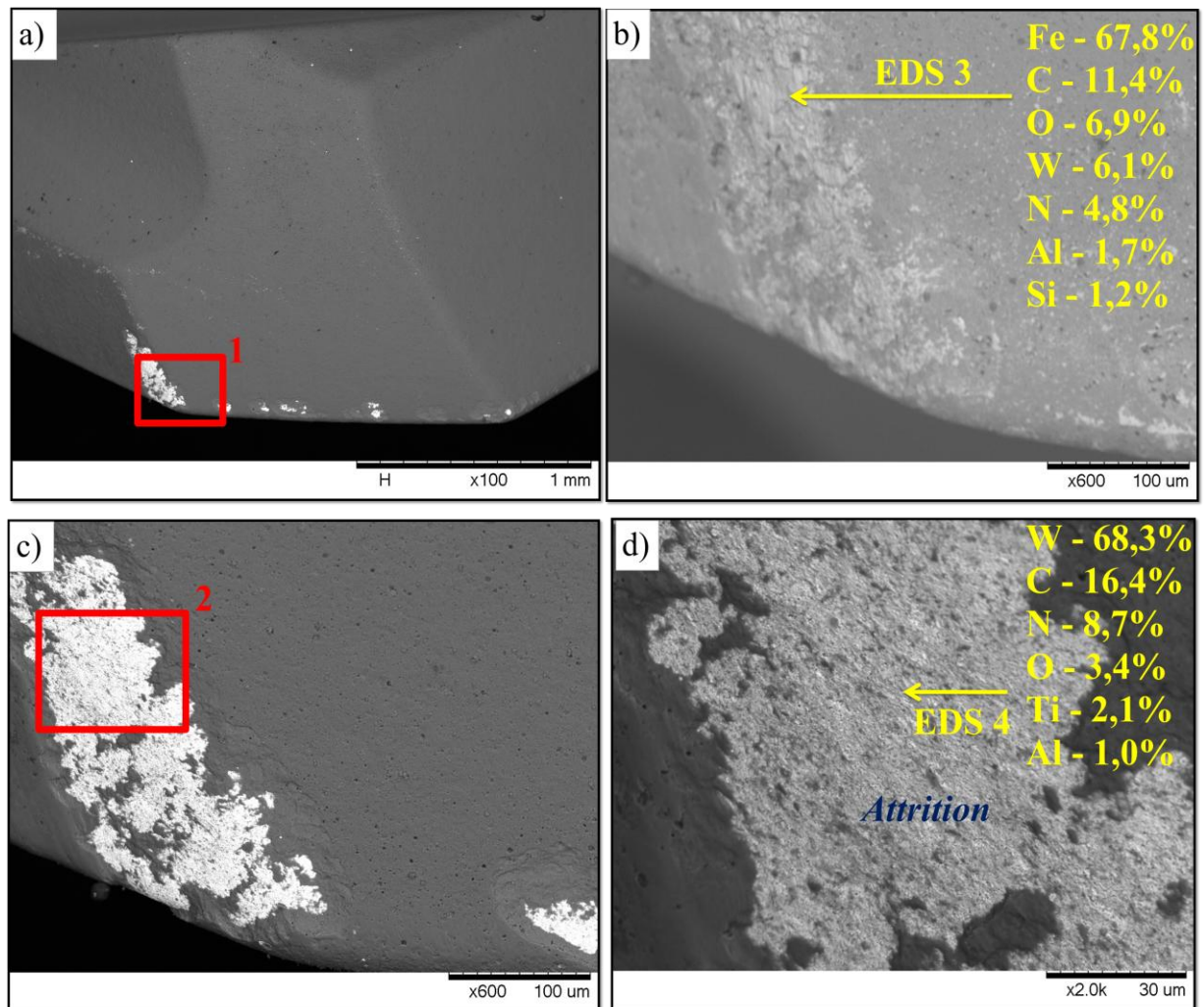


Figura 4.7 - Análise do desgaste da ferramenta na furação do FC250: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da região 1 sem ataque químico; c) vista ampliada da região 1 depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.7c

A Fig. 4.8 mostra a ferramenta utilizada na furação do FC300 que, nesta condição de corte, atingiu a pior taxa de desgaste com apenas 28,7 segundos de usinagem. Em comparação ao desgaste ocorrido na broca que usinou o FV450 foi possível observar que neste último a área desgastada é maior do que no FC300. No entanto, no ferro fundido cinzento o desgaste aumentou em altura mais rápido que o ferro vermicular, atingindo, assim, o critério de fim de vida mais cedo. As Figs. 4.8a e 4.8b (ampliação da região 1 da Fig. 4.8a) ilustram, respectivamente, a vista geral da ferramenta atacada quimicamente e um nível de ampliação de 600 vezes evidenciando, juntamente com o EDS 5, a alta concentração de material aderido proveniente do ferro fundido cinzento classe 300 ligado ao Mo. Na Fig. 4.8c (ampliação da região 1) é mostrada a eficácia da solução de ácido nítrico na remoção do material da peça aderido. Na Fig. 4.8d (região 2 ampliada da Fig. 4.8c), observa-se, com o auxílio da análise do

EDS 6, a presença dos elementos pertencentes ao revestimento da ferramenta. Além disso, nota-se que o *attrition* foi o mecanismo gerador do desgaste na ferramenta, devido à aparência áspera que esta superfície apresenta.

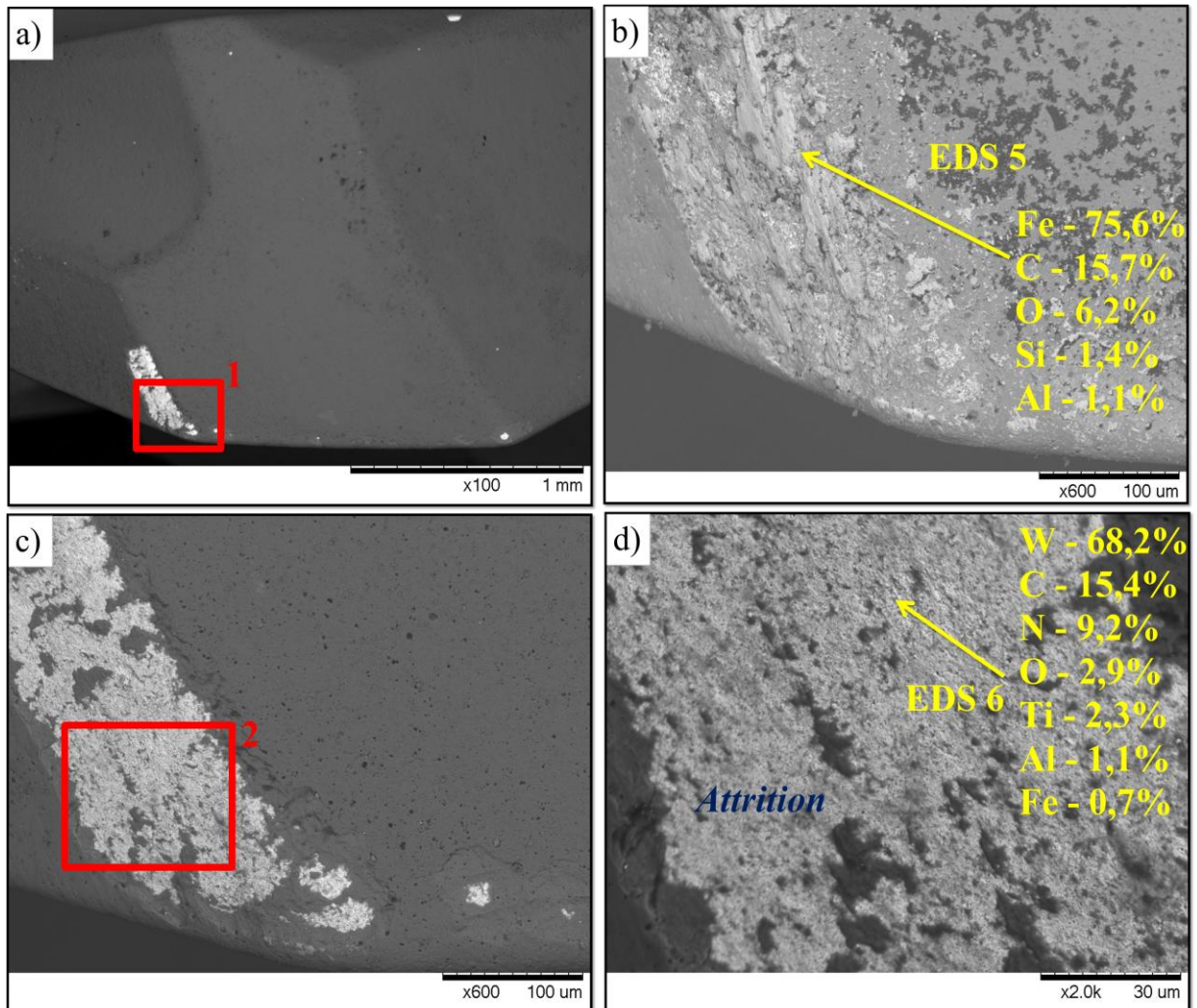


Figura 4.8 - Análise do desgaste da ferramenta na usinagem do FC300: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da região 1 sem ataque químico; c) vista ampliada da região 1 depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.8c

Assim como no FV450, o ferro fundido cinzento FC-300 ligado ao molibdênio com grafita refinada também apresentou um desgaste de flanco que abrange uma área maior se comparado ao FC250 e ao FC300. A Fig. 4.9 ilustra a broca utilizada na furação do FC300_(RG). Tal qual nos ensaios referentes aos demais ferros fundidos cinzentos para esta condição, a aparência rugosa/áspera (Figs. 4.9c e 4.9d) foi predominante nas regiões desgastadas, indicando que o mecanismo de desgaste por *attrition* levou a ferramenta ao seu fim de vida.

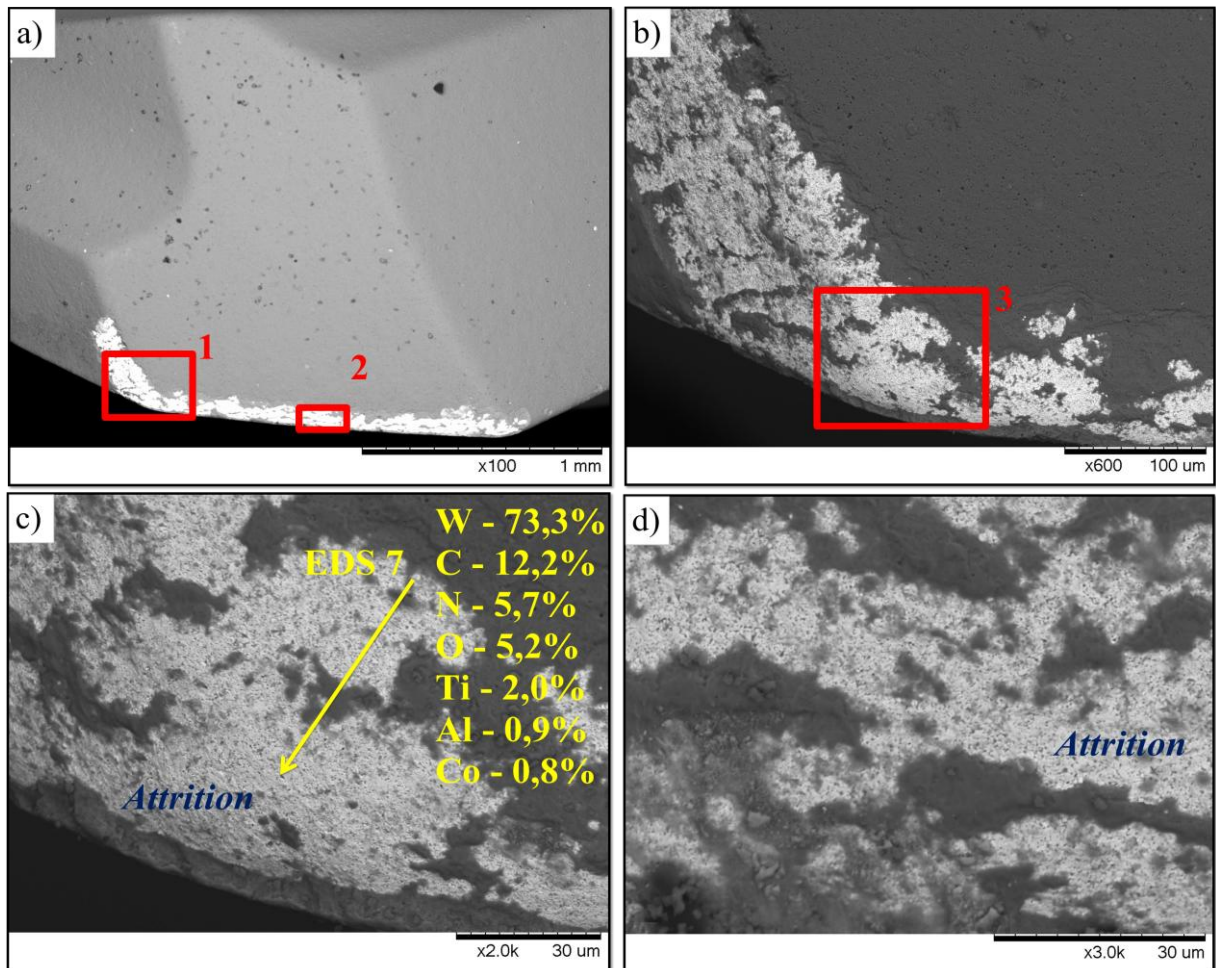


Figura 4.9 - Análise das características do desgaste da ferramenta na furação do FC300_(RG): a) vista geral da ferramenta; b) vista ampliada da região 1 mostrada na Fig. 4.9a; c) vista ampliada da região 3 mostrada na Fig. 4.9b; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.9a

4.2.2 Condição $V_c = 70 \text{ m/min}$ e $f = 0,25 \text{ mm/rot}$

O comportamento prematuro do desgaste na condição da velocidade de corte de 70 m/min e avanço de 0,25 mm/rot, ilustrado na Fig. 4.10, é semelhante ao apresentado na Fig. 4.5 do tópico anterior. Nota-se novamente que o FV450 apresentou melhor índice de usinabilidade em comparação aos demais ferros fundidos. Para o tempo de furação de 34,4 segundos (20 furos) o desgaste da ferramenta utilizada para o ferro vermicular da classe 450 foi de 0,49 mm decretando, assim, o fim de vida da broca. Enquanto para a ferramenta que usinou o FC250 o VB_{Bmax} atingiu 0,42 mm com apenas 10 furos ou ainda 17,2 segundos de vida, tornando-o o pior material a se usinar para esta condição de corte.

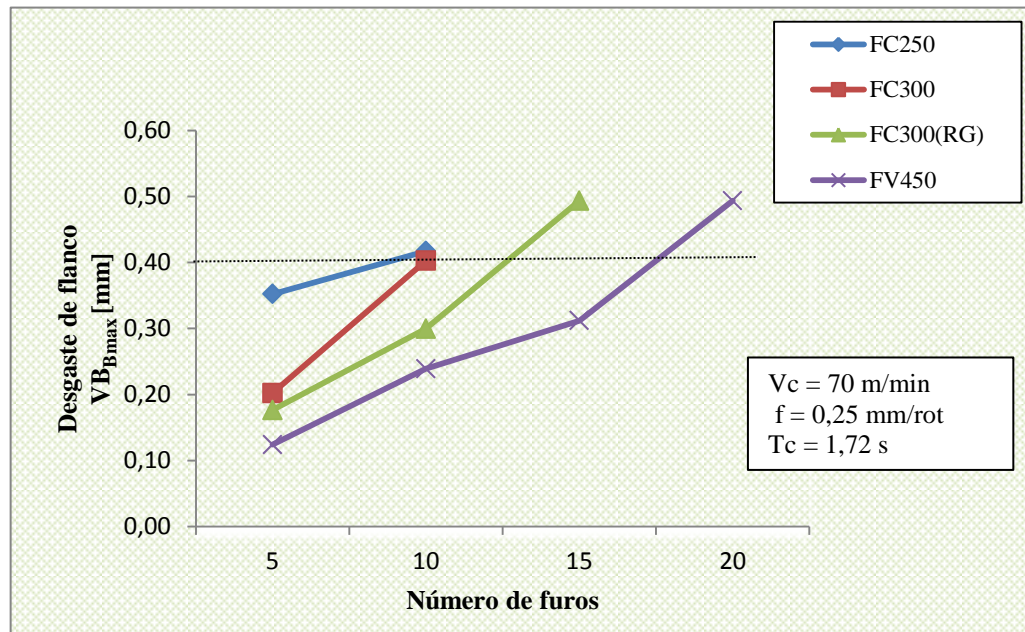


Figura 4.10 - Comprimento do desgaste de flanco máximo para os quatro ferros fundidos analisados na condição $V_c = 70$ m/min e $f = 0,25$ mm/rot

Em relação às ferramentas que usinaram os demais ferros fundidos cinzentos, estas atingiram um desgaste máximo de flanco de 0,40 mm ao produzir 10 furos na barra de FC300 e 0,49 mm ao usar 15 furos no FC300_(RG), desta forma, ambas também obtiveram um desempenho relativamente inferior ao FV450.

Destaca-se que a velocidade de corte analisada neste tópico se encontra abaixo da recomendação do fabricante (80 a 140 m/min), mas o avanço está dentro da faixa sugerida (0,20 a 0,35 mm/rot). Outra observação é a presença da APC nesta condição de corte (baixa velocidade de corte) na usinagem desses materiais.

Na análise realizada através do MEV, foi possível observar nas brocas submetidas a essa condição de corte, os mesmos mecanismos de desgaste ocorridos na condição do tópico anterior. A Fig. 4.11a mostra a vista geral para o desgaste de flanco da ferramenta que usinou o FV450. Na Fig. 4.11b está evidenciada a ampliação da região 1 identificada na Fig. 4.11a para visualização mais detalhada do desgaste, enquanto a Fig. 4.11c ilustra a ampliação da região 2 mostrada na Fig. 4.11b. Com esta última ampliação constata-se, claramente, uma região desgastada de forma profunda (confirmada através do EDS 8 pela presença de constituintes do substrato, como o tungstênio e baixa concentração dos elementos constituintes do revestimento da ferramenta: N, Ti e Al) e com aspecto áspero, característico do mecanismo adesivo. A região 3 da Fig. 4.11b pode ser vista ampliada na Fig. 4.11d. Verificam-se aqui a forte presença do mecanismo de *attrition*, devido ao aspecto áspero

deixado pelos grãos de material arrancado. Observa-se também alguns traços de micro-sulcos, confirmando a ligeira presença do mecanismo de desgaste micro-abrasivo.

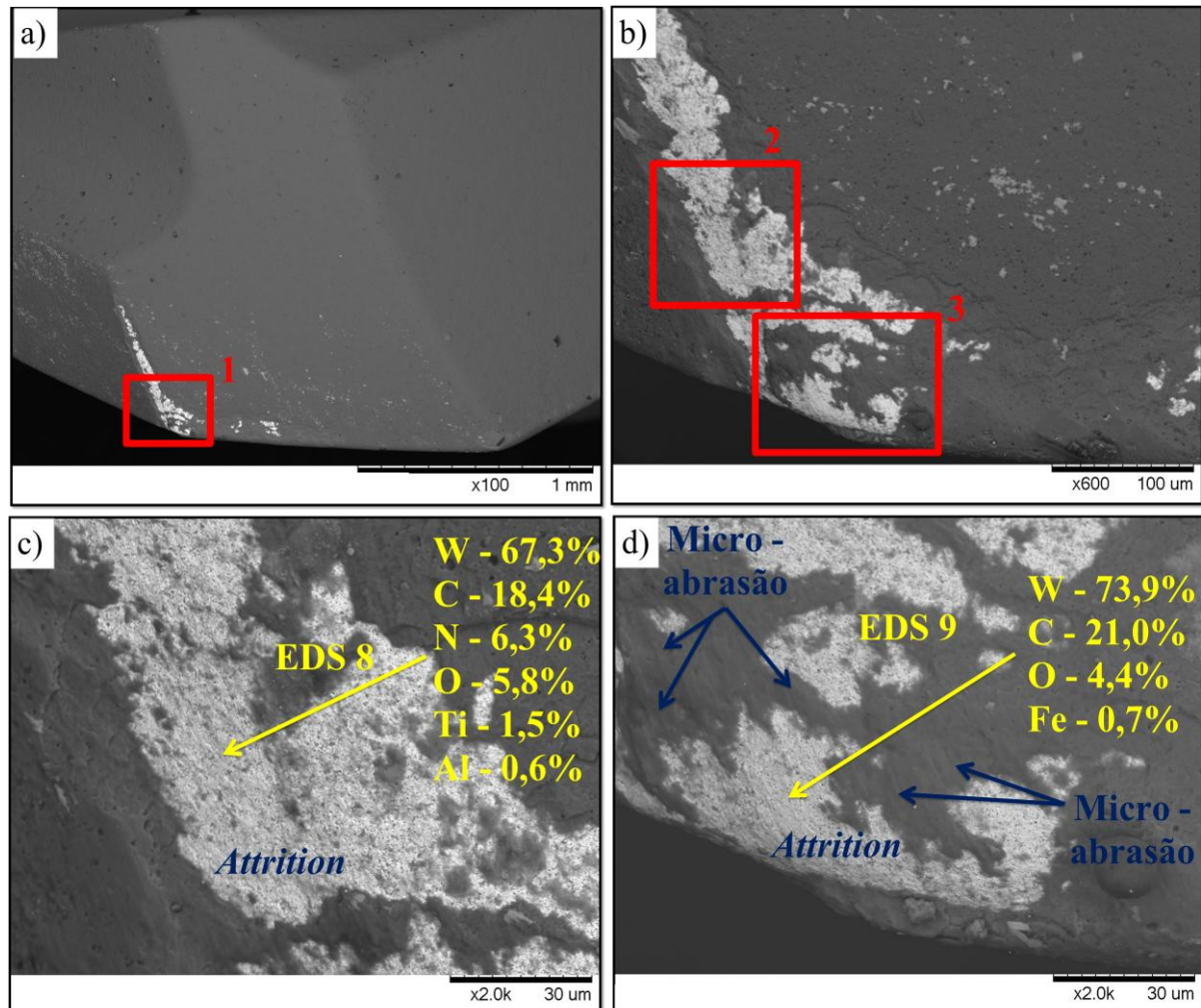


Figura 4.11 - Análise das características do desgaste da ferramenta na furação do FV450: a) vista geral da ferramenta; b) vista ampliada da região 1 mostrada na Fig. 4.11a; c) vista ampliada da região 2 mostrada na Fig. 4.11b; d) vista ampliada da região 3 da Fig. 4.11b

A Fig. 4.12 mostra um comparativo das brocas, sem ataque químico, utilizadas na usinagem dos três ferros fundidos cinzentos analisados através desta pesquisa, nesta condição de corte. Aqui se verifica um grande acúmulo de material aderido na superfície das ferramentas, formando uma espécie de filme que recobre a área desgastada. Este material aderido é oriundo dos ferros cinzentos e pode ser comprovado através da análise química dos ensaios do EDS 10, EDS 11 e EDS 12 que evidenciaram uma alta concentração do elemento ferro, além dos elementos carbono, silício e enxofre em menores proporções.

O material aderido altera a geometria da ferramenta de forma a resultar em arestas desiguais, podendo afetar as forças de corte e a qualidade dos furos usinados. Ademais,

representa um forte indício da ocorrência do fenômeno *attrition*, que ocorre devido a uma forte junção entre o material da peça usinada e a ferramenta, deste modo parte do material da ferramenta que compõe esta união é removida pelo fluxo de material da peça (ou cavaco, quando na superfície de saída) adjacente, arrancando grãos e caracterizando o mecanismo de desgaste por adesão.

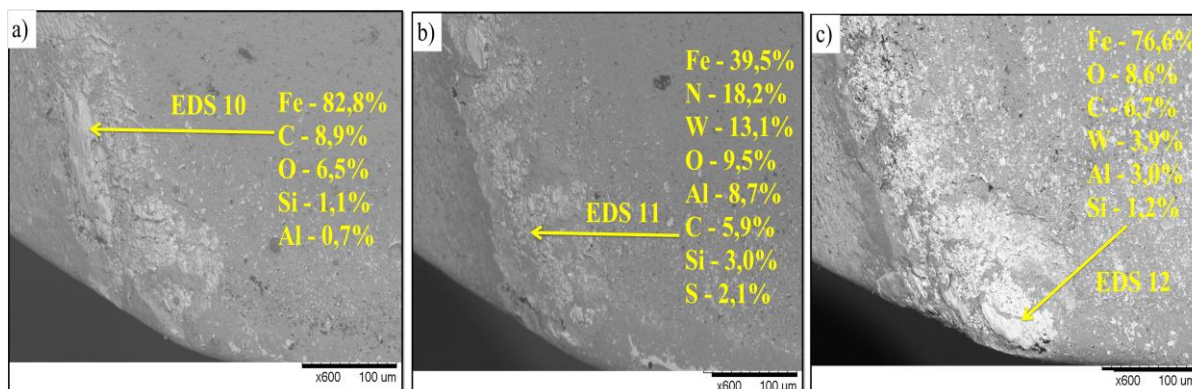


Figura 4.12 - Comparativo entre as ferramentas utilizadas na furação do: a) FC250; b) FC300; c) FC300_(RG) antes do ataque químico

A Fig. 4.13 mostra dois níveis de ampliação para cada ferramenta usada na furação dos ferros fundidos cinzentos depois de todas serem atacadas com solução de ácido nítrico, procedimento este necessário para que fosse possível observar a morfologia dos desgastes e comprovar os seus mecanismos sem a enorme concentração de material aderido sobre a superfície das brocas.

A partir da análise da Fig. 4.13 é possível notar que a morfologia do desgaste é bastante semelhante, tanto para o FC250 e FC300, quanto para o FC300_(RG). O aspecto rugoso/áspero, que pode ser melhor observado nas Figs. 4.13b, 4.13d e 4.13f, não deixa dúvidas que o mecanismo de desgaste predominante, que levou a retirada prematura do revestimento de TiAlN presente nas brocas, foi o adesivo.

Além da análise das imagens obtidas através do MEV, o EDS também constitui uma importante ferramenta na caracterização do desgaste sofrido pelas ferramentas. Visto que oferecem estimativas razoáveis dos elementos químicos presentes na superfície analisada, que neste caso, para todos os ferros cinzentos, as altas concentrações encontradas de tungstênio (EDS 13, EDS 14 e EDS 15) são indicativas de ter atingido o substrato e, portanto, um desgaste bastante agressivo.

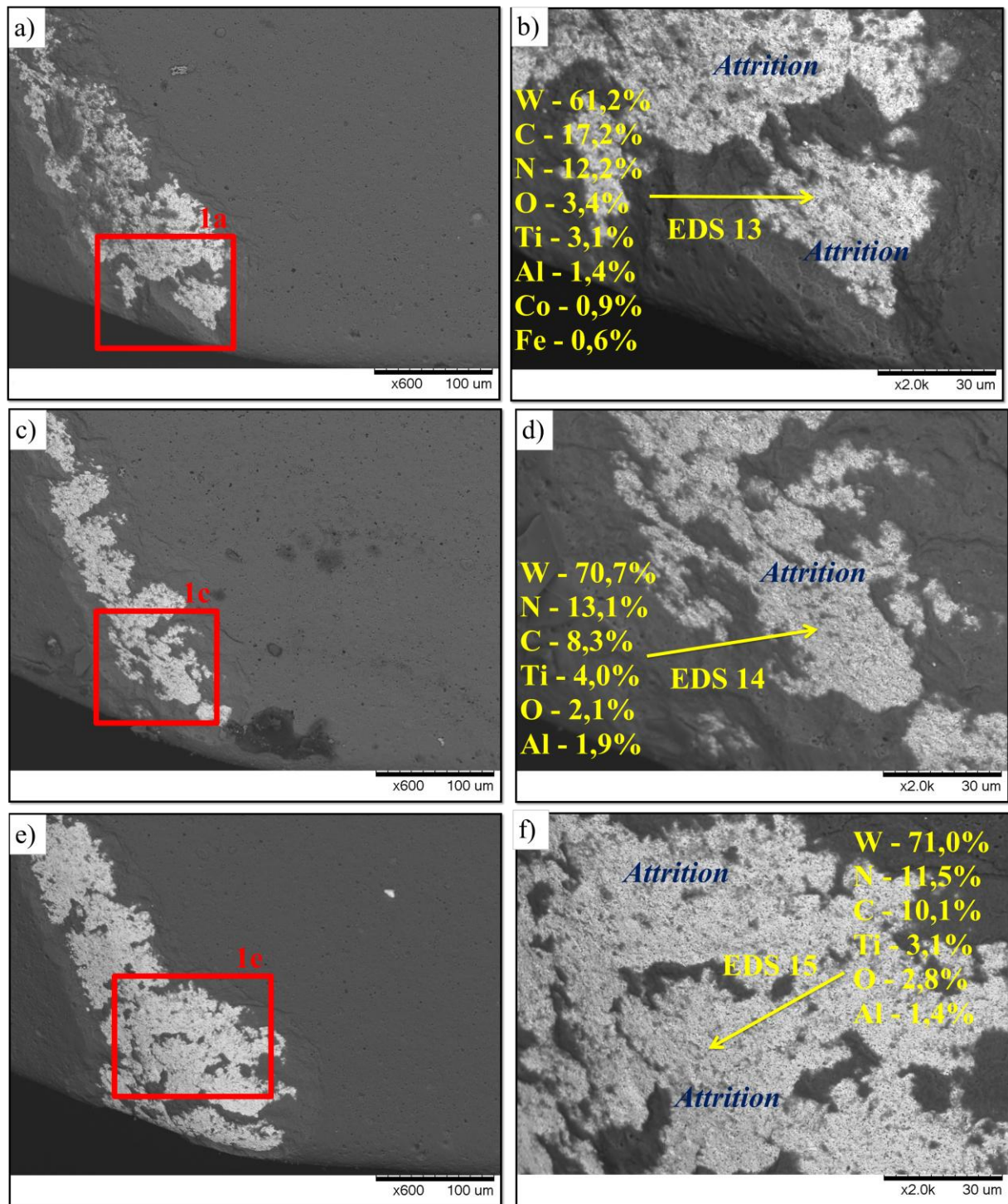


Figura 4.13 - Comparativo entre as brocas utilizadas na usinagem, após ataque químico, do: a) FC250; b) ampliação da região 1a ilustrada na Fig. 4.13a; c) FC300; d) ampliação da região 1c ilustrada na Fig. 4.13c; e) FC300_(RG); e) ampliação da região 1e mostrada na Fig. 4.13e

A evidência clara da predominância do mecanismo de desgaste por adesão (ou *attrition*), oferecida pelas fotos obtidas no MEV das brocas usadas nos testes com a velocidade de corte mais baixa de 70 m/min (Figs 4.6 a 4.9, 4.11 e 4.13), contribui para a discussão dos resultados dos testes de vida, apresentados nas Fig. 4.5 e 4.10. Como já

comentado, foi considerado surpresa as vidas das ferramentas que usinaram os ferros fundidos cinzentos serem mais curtas do que as que usinaram o vermicular FV450. O ferro fundido vermicular possui maior dureza e resistência mecânica que os cinzentos e, portanto, é considerado mais difícil de usinar.

O mecanismo de desgaste por adesão é o mecanismo mais comum na presença da APC - Aresta Postiça de Corte. Trent e Wright (2000) destacam que a APC se faz presente na usinagem de ferros fundidos em dimensões maiores que na usinagem dos aços, e estas desaparecem em velocidade de corte superiores aos dos aços (velocidades críticas para os ferros fundidos são maiores que para os aços), podendo aparecer em velocidade de até aproximadamente 120 m/min. A explicação é a presença da grafita na microestrutura dos ferros fundidos, que possui propriedades muito diferentes da matriz, sendo, portanto, uma grande promotora de microtrincas (necessárias para formar a APC). No aço, as fases presentes possuem também propriedades diferentes entre si, para garantir a formação da APC, mas não tão diferentes quanto as fases dos ferros fundidos (MACHADO et al., 2015).

Desta forma, a taxa de desgaste em cada material, vai depender da geometria e da estabilidade (ou instabilidade) da APC, bem como da frequência em que esta libera fragmentos, que irão causar o desgaste por adesão. Pelos resultados, pode-se afirmar que durante a usinagem do ferro FC250 houve maior frequência de liberação de fragmentos da APC para promover o desgaste, seguido pela usinagem dos dois ferros fundidos da classe 300 e pelo vermicular.

Ademais, a baixa velocidade pode ter ocasionado um aporte térmico insuficiente para que a camada protetora formada pelas inclusões de MnS fosse capaz de influenciar positivamente a usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos, como preconizou Reuter, Schulz, McDonald (1999).

É importante destacar que estes resultados foram gerados nos testes de furação com uma broca especial de corpo de aço e pontas de metal duro, utilizando o critério de fim de vida baseado no valor do desgaste de flanco máximo. As fotos tiradas no MEV são claras em mostrar que estes desgastes foram muito localizados (na ponta de corte, onde o diâmetro é maior), sem promover desgaste de flanco médio considerável ao longo da superfície principal de folga da ferramenta. Assim, é evidente que não se pode afirmar que os mesmos resultados seriam encontrados, em termos de classificação de usinabilidade entre os materiais testados, se o critério de fim de vida fosse mudado para critérios menos conservadores, por exemplo para altos valores de desgaste de flanco médio, sem considerar o desgaste de flanco máximo.

Infelizmente, o processo de furação não possui normas abrangentes que sugira uma metodologia adequada para testes de vida em ferramentas, como ocorrem nos processos de torneamento e fresamento, por exemplo. A Norma NORDTEST NT MECH 038 (1997) talvez seja uma exceção, porém ela foi proposta para testar fluidos de corte no processo de furação com brocas de aço rápido, mas que pode ser estendida para outros fins, sem dúvidas. Ela recomenda o colapso da broca, como critério de fim de teste de vida da ferramenta.

Neste caso, outros fatores podem contribuir para desempenhos diferentes, uma vez que com o crescimento do desgaste o aporte térmico é alterado e, conseqüentemente, também o sistema tribológico envolvido. Nesta pesquisa optou-se por adotar um critério de fim de vida da ferramenta mais conservador, porque a broca utilizada era de corpo de aço, com ponta de metal duro indexável, e só havia um corpo de broca disponível. Um critério mais robusto poderia causar danos irreparáveis ao corpo da broca, em caso de avaria grave na ponta de metal duro, que impediria a finalização dos testes.

4.2.3 Condição $V_c = 140 \text{ m/min}$ e $f = 0,15 \text{ mm/rot}$

Durante a furação com velocidade de corte de 140 m/min e avanço de 0,15 mm/rot, em um tempo de usinagem (T_c) de 1,44 segundos, o desgaste de flanco passa a ter um diferente comportamento àquele apresentado na velocidade de 70 m/min. Nesta condição, os ensaios revelaram que a ferramenta com o pior desempenho usinou 150 furos, enquanto a ferramenta que apresentou o melhor desempenho não atingiu o final de vida após a usinagem de 500 furos, considerando o critério de desgaste de flanco máximo. Desta forma, ainda que o avanço esteja abaixo da recomendação do fabricante das brocas, o aumento da velocidade de corte, parâmetro que aqui se encontra dentro da faixa recomendada pelo fabricante, mostra ser um fator significativo no tempo de vida da ferramenta, considerando os critérios aqui adotados, como mostra a Fig. 4.14.

A ferramenta que usinou o FC250 (material que apresentou a melhor usinabilidade nesta condição) não atingiu o seu fim de vida, segundo o critério referente ao desgaste máximo de flanco. Os testes foram interrompidos após a usinagem de 500 furos em um tempo de vida de, aproximadamente, 12 minutos. Este resultado, evidencia a excelente usinabilidade do ferro cinzento da classe 250 em decorrência, entre outras, do efeito de sua grafita lamelar que facilita a propagação de trincas nos planos de cisalhamento e a presença das partículas de sulfeto de manganês.

Ademais, o FC250 gera condições para uma menor taxa de desgaste, entre todos os demais materiais analisados, por apresentar menores valores de resistência a tração e de dureza, além de possuir, o maior espaçamento entre as lamelas de cementita e menor microdureza na perlita (Fig. 4.3).

Em contrapartida, a maior resistência mecânica juntamente com a morfologia da grafita vermicular, que restringe a propagação de trincas, podem ter exercido influência no fato de que o $VB_{B_{max}}$ tenha sido sempre maior para o FV450, sendo o material a apresentar a pior usinabilidade em um tempo de vida de 3,6 minutos. A ferramenta que usinou este material atingiu um desgaste máximo de flanco de 0,40 mm após produzir 150 furos, enquanto a broca utilizada na furação do FC250 chegou a um desgaste de 0,21 mm após 500 furos.

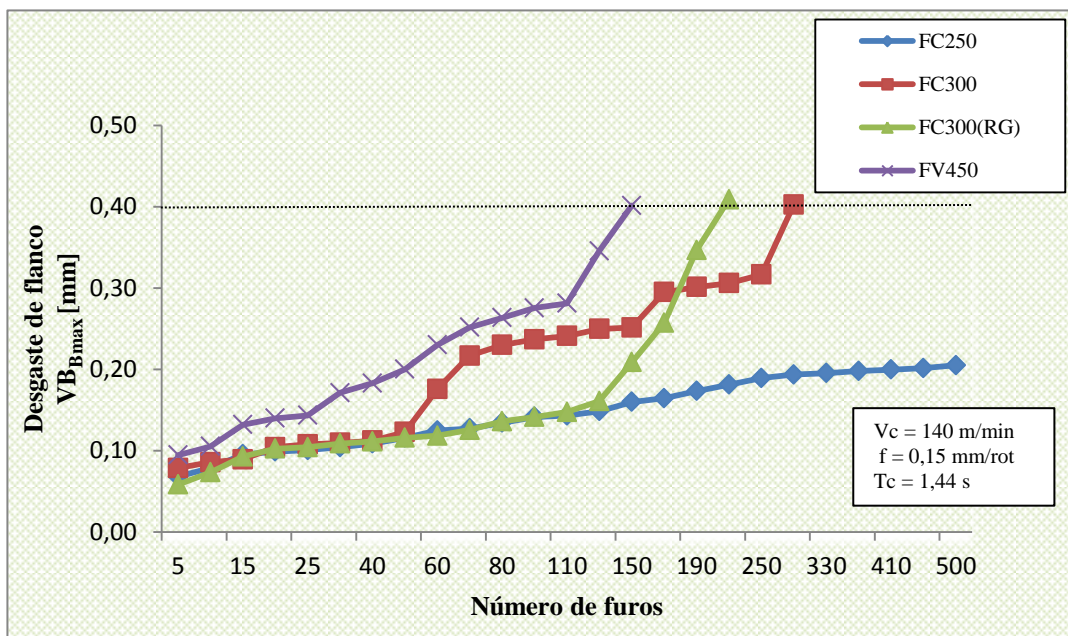


Figura 4.14 - Comprimento do desgaste de flanco máximo para os quatro ferros fundidos analisados na condição $V_c = 140 \text{ m/min}$ e $f = 0,15 \text{ mm/rot}$

Observa-se na Fig. 4.14, que o FC300_(RG) obteve valores de desgaste muito próximos ao FC250 até a marca dos 130 furos usinados, após isto o ferro cinzento ligado ao Mo da classe 300 com grafita refinada cresce rapidamente até alcançar o seu fim de vida com um comprimento de desgaste de 0,41 mm após perfazer 210 furos. Já o FC300, atinge valores de desgaste próximos ao FC250 apenas até o quinquagésimo furo, no entanto, após isto a taxa de desgaste passa a evoluir de forma mais acelerada, no entanto, atinge o critério de fim de vida depois que o FC300_(RG), levando-o a ser o segundo material com a melhor usinabilidade ao totalizar 290 furos ao atingir o desgaste máximo de flanco de 0,40 mm.

Posto isso, fica evidente que a pior usinabilidade apresentada por esses materiais, em relação ao ferro fundido cinzento da classe 250, se dá por suas melhores propriedades mecânicas, bem como as respectivas microestruturas. Propõe-se que a mudança na taxa de desgaste para a ferramenta utilizada na usinagem do FC300_(RG), que o levou a apresentar a pior usinabilidade entre os ferros cinzentos, pode ser justificada pelo fato de que este material apresenta o menor espaçamento interlamelar médio e maior média de microdureza da perlita, esta última menor apenas em relação ao FV450 (ver Fig. 4.3).

A Fig. 4.15 ilustra, por meio de fotos obtidas no microscópio eletrônico de varredura (MEV), a broca empregada na furação do FV450. Em função das características do ferro fundido vermicular, sendo este mais duro e resistente, o que gera forças e tensões maiores e o coloca como mais abrasivo e adesivo que o ferro fundido cinzento, durante a furação, o desgaste da ponta da broca passa a remover, progressivamente, as camadas do revestimento até a exposição, em partes, do seu substrato, que fica sob a ação do constante atrito contra a peça/cavaco, tornando a ferramenta susceptível a lascamentos.

A Fig. 4.15a mostra a vista geral da ferramenta após ataque químico, onde é possível observar um micro-lascamento na ponta da broca, onde a velocidade atinge seu valor máximo. Na Fig. 4.15b é evidenciada a adesão de material na aresta de corte que recobre o lascamento, constituída dos principais elementos do ferro vermicular (EDS 16): ferro, carbono e silício, que apontam para a provável presença do mecanismo de desgaste adesivo, confirmado após revelação da superfície desgastada, realizada através da remoção do material aderido com ácido HNO₃ (Fig. 4.15c). Observa-se, em detalhes, nesta figura (Fig. 4.15c), o arrancamento drástico de material na região do lascamento, descendo pela superfície de folga principal, configurando o mecanismo de desgaste por *attrition*. Ao lado desta região, nota-se que a remoção do revestimento acontece pela ação de partículas duras e abrasivas, devido à morfologia desta região se apresentar de forma micro-sulcada (micro-abrasão). Por fim, a Fig. 4.15d evidencia detalhes do desgaste que ocorreu no revestimento, com ampliações ainda maiores, sugerindo que nesta região de superfície bem lisa tenha ocorrido o mecanismo de desgaste difusivo, incentivado pela maior temperatura ocorrida neste ensaio em virtude da maior velocidade de corte e do avanço relativamente baixo, parâmetro que ocasiona um maior tempo de usinagem, o que provoca maior tempo de atrito da ferramenta com a peça e, consequente, o aumento da temperatura, gerando, assim, um maior desgaste.

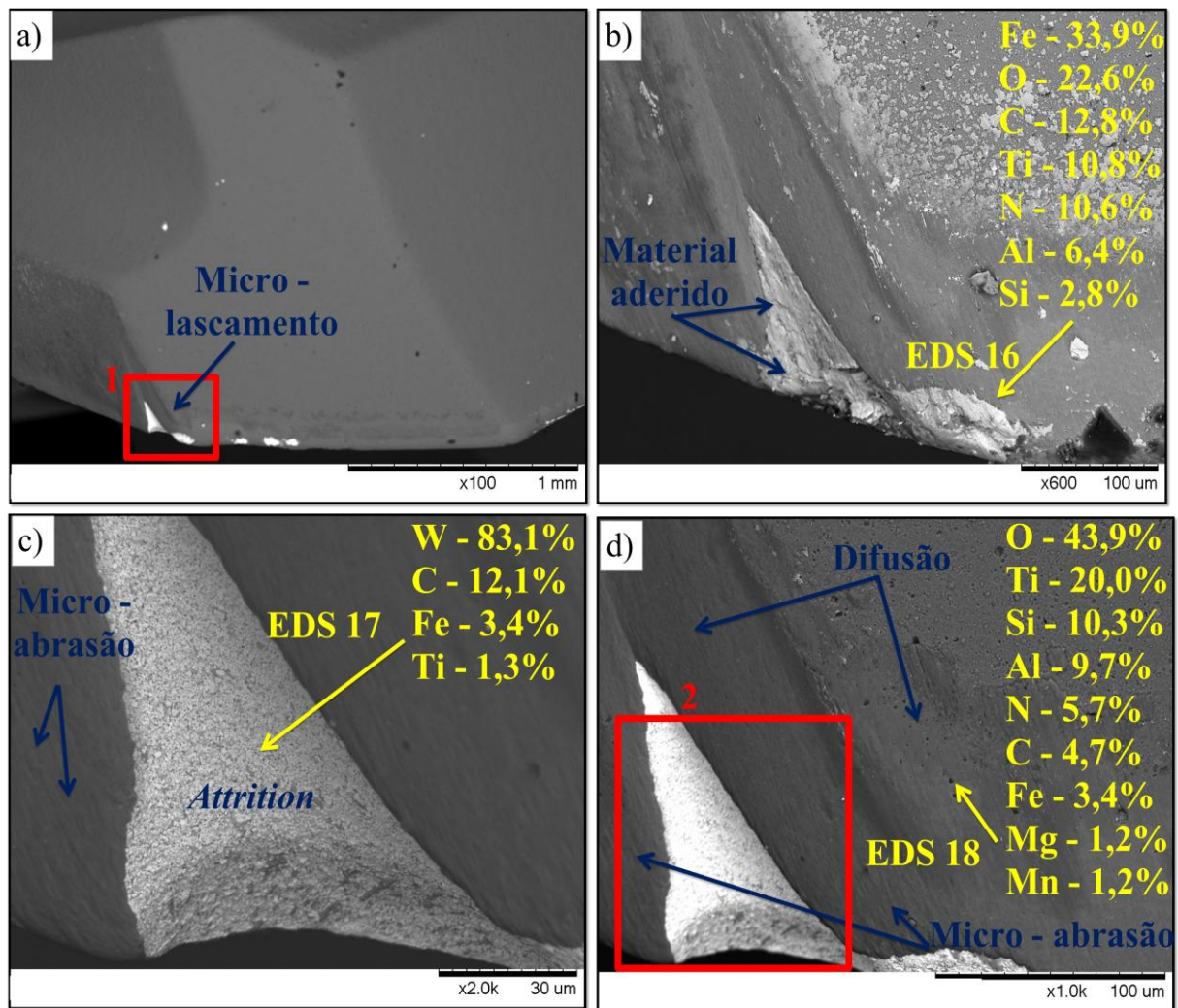


Figura 4.15 - Análise do desgaste da ferramenta na usinagem do FV450: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da região 1 sem ataque químico; c) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.15d depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 1 da Fig. 4.15a

Percebe-se, visualmente e com o auxílio do EDS 18, que o desgaste desta região não atinge o substrato da ferramenta (não há vestígio da presença de W e Co). Neste local é encontrado elementos oriundos do material da peça, que podem ter sido provenientes da retirada incompleta de material aderido durante o ataque químico ou, então, tais elementos (especialmente o silício) podem ser indicativos da ocorrência de difusão química no revestimento. Entretanto, para se confirmar esta hipótese são necessárias técnicas mais eficientes que possibilitem análises através do aprofundamento no corpo da ferramenta.

Além disso, através do EDS 18, observa-se uma alta concentração do elemento oxigênio (aproximadamente 44%), o qual pode fornecer indícios da ocorrência do mecanismo de oxidação no revestimento da ferramenta de corte, fato que pode ser desencadeado em

função da temperatura atingida durante a furação. Entretanto, são necessárias análises mais profundas para se confirmar a presença de tal fenômeno.

A Fig. 4.16 ilustra a morfologia do desgaste da ferramenta que não atingiu o fim de vida, segundo o critério de desgaste máximo de flanco, ao usinar o FC250, após usinar 500 furos. Na Fig. 4.16a é ilustrada a vista geral da ferramenta (com ataque químico), enquanto a Fig. 4.16b mostra a ampliação da região 1 (Fig. 4.16a) que se encontra sem ataque químico e com a presença de material aderido (de acordo com o EDS 19). Na Fig. 4.16c é evidenciado, na superfície da broca, uma região desgastada bem brandamente, mas que não atinge o substrato, com alguns micro-riscos indicando que houve um processo de desgaste por micro-abrasão em algumas áreas e em outras áreas o aspecto bem liso e polido do desgaste, que apontam a provável presença do mecanismo de difusão química. Além disso, de acordo com o EDS 20, é encontrada a presença dos elementos Mn e S localizados no final do desgaste de flanco e que podem estar combinados na forma de sulfeto de manganês. Entretanto, na ponta da broca, onde o desgaste tende a ser mais pronunciado, não há vestígio da presença de tais elementos (EDS 21). Por fim, a região 2 da Fig. 4.16c, ampliada na Fig. 4.16d, mostra uma pequena área desgastada, que expõe o substrato, com aparência áspera, característico do início de arrancamento de grãos (*attrition*).

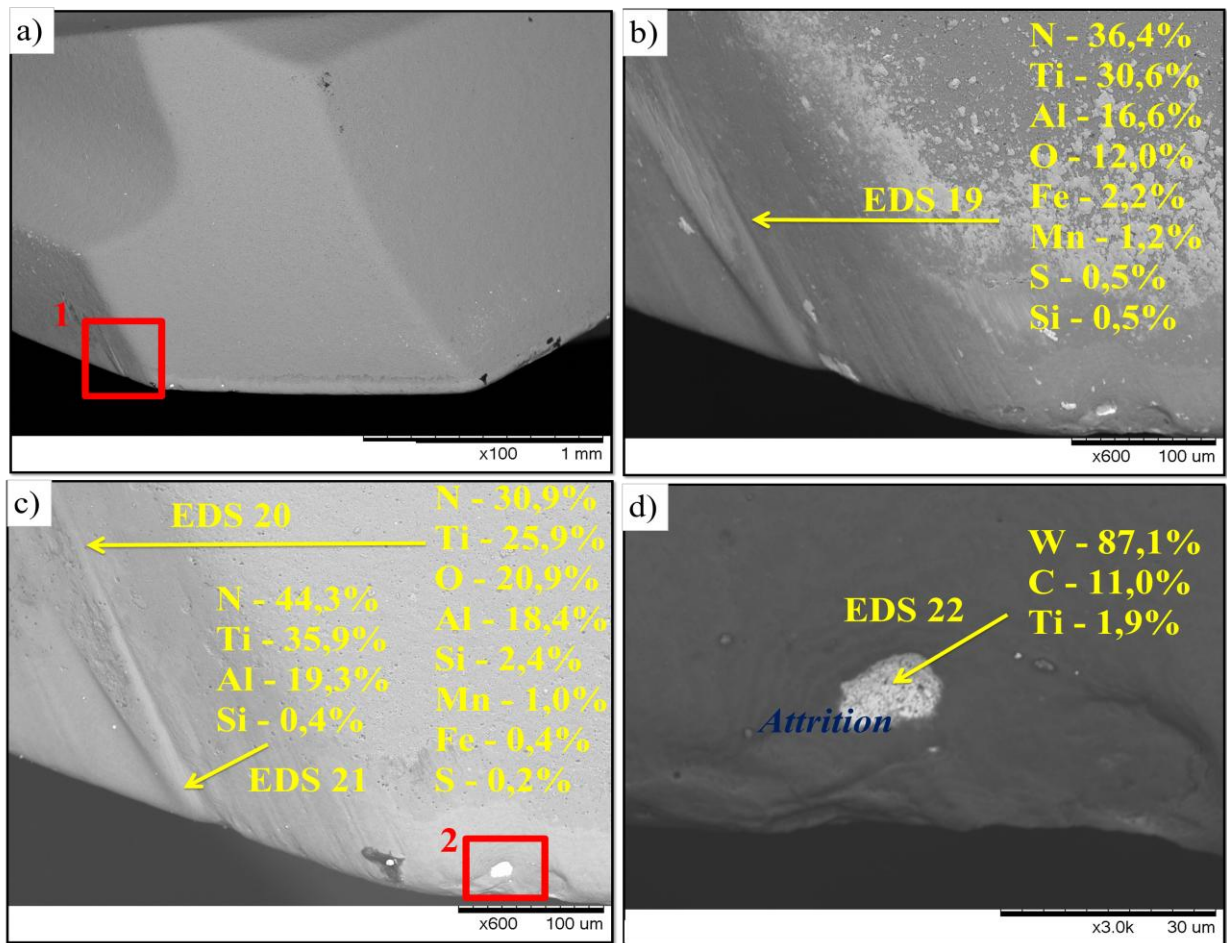


Figura 4.16 - Análise da característica do desgaste da ferramenta na usinagem do FC250: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da região 1 sem ataque químico; c) vista ampliada da região 1 da Fig. 4.16a depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.16c

A Fig. 4.17 mostra um comparativo das ferramentas, sem ataque químico, utilizadas nos ferros fundidos cinzentos da classe 300, em que nota-se, visualmente e também com o auxílio do EDS 23 e do EDS 24, uma maior quantidade de material aderido no FC300 em comparação ao FC300_(RG).

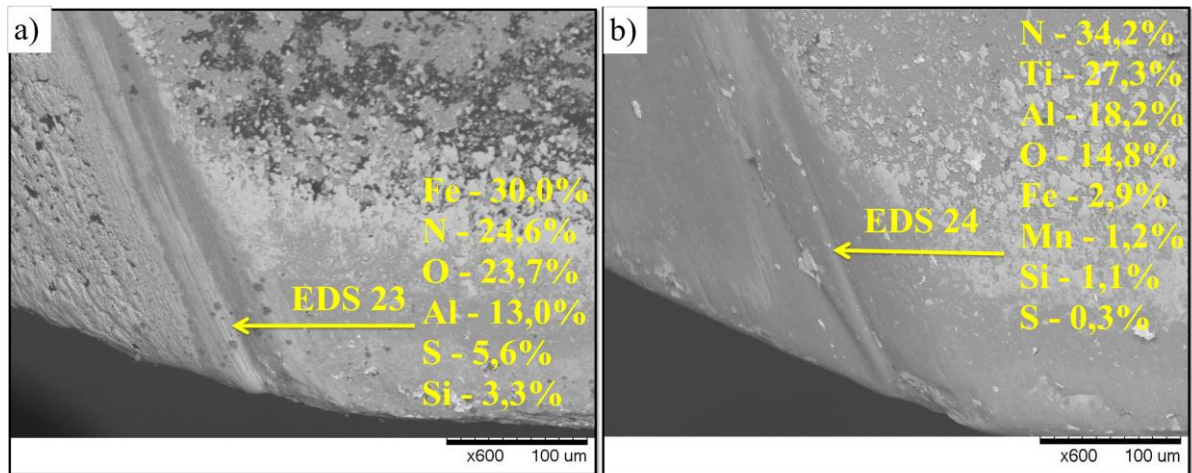


Figura 4.17 - Comparativo entre as brocas utilizadas na furação do: a) FC300; b) FC300_(RG) antes do ataque químico

Na Fig. 4.18 é ilustrada detalhes das ferramentas, já com ataque químico, que usinaram os ferros cinzentos da classe 300. As Figs. 4.18a e 4.18b mostram a visualização macro da região desgastada das brocas usadas na usinagem, respectivamente, do FC300 e do FC300_(RG).

Os resultados do ESD 25 e EDS 26, para as regiões indicadas nas figuras, evidenciam que são encontrados os elementos enxofre e manganês que, provavelmente, podem estar combinados na forma de MnS (funcionando como um eficiente lubrificante) e que pode, assim, ter atuado de forma a reduzir o desgaste da ferramenta, impedindo-o de atingir o seu substrato.

A Fig. 4.18c ilustra a região 1a ampliada da Fig. 4.18a, cujo aspecto liso e a presença de leves asperezas da broca que usinou o FC300 indicam a presença, respectivamente, do desgaste difusivo e desgaste por *attrition*. Através da análise desta figura e também com o auxílio do EDS 27 é possível observar uma pequena área desgastada que começa a atingir o substrato da ferramenta, provavelmente pela ação do fenômeno *attrition*. O elemento Ca indicado no EDS 25 e EDS 27 pode ser atribuído à contaminação da amostra, os demais elementos, com exceção do oxigênio, são oriundos do material da peça e da ferramenta. A presença de oxigênio indica que nesta região (área da superfície de folga principal mais externa na broca) houve a penetração do ar atmosférico e possível formação de óxidos, que se aderem na superfície da ferramenta e, posteriormente, são arrancados pelo fluxo de material da peça adjacente, interagindo, portanto no sistema tribológico, para promover o desgaste adesivo.

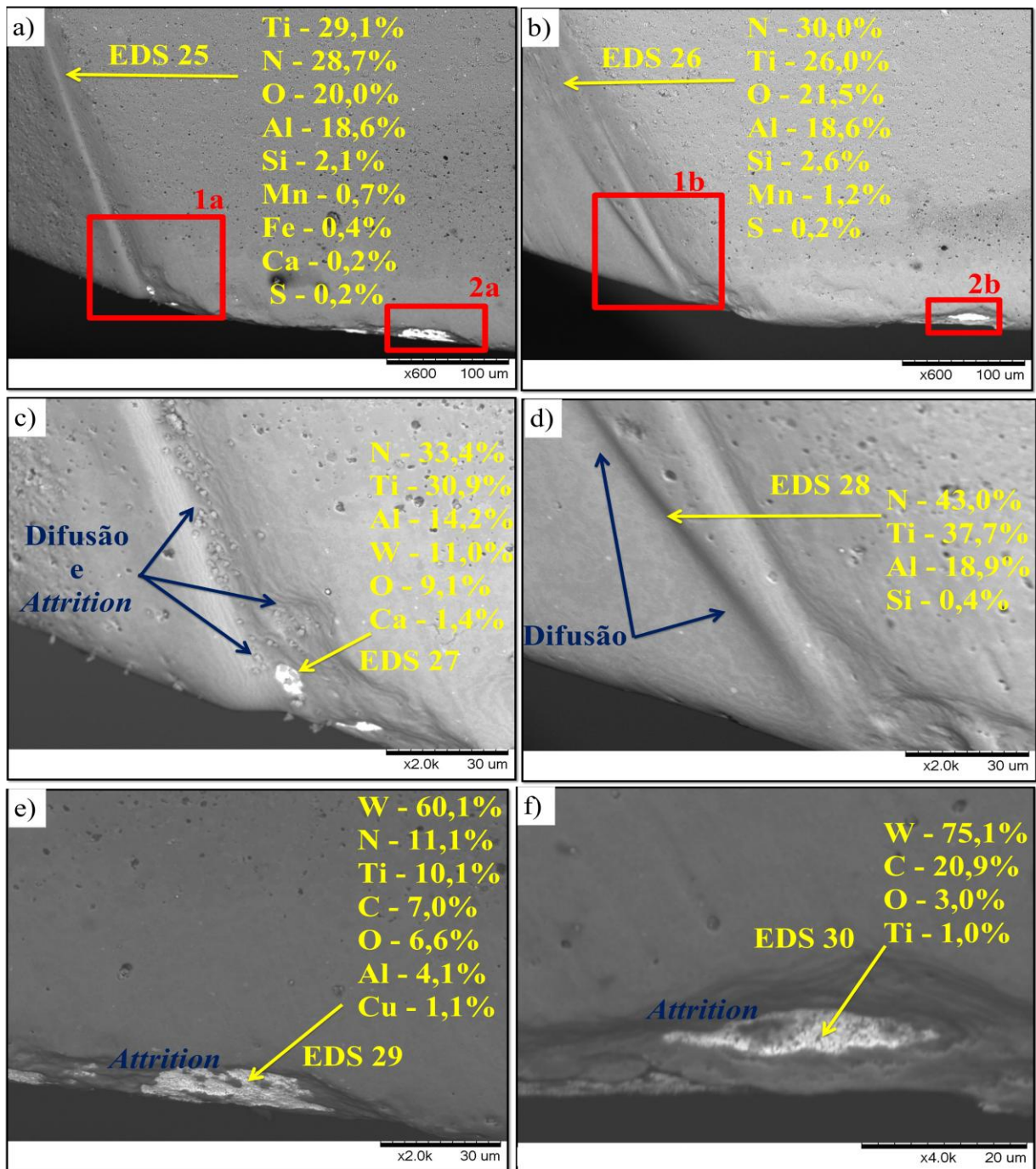


Figura 4.18 - Comparativo entre as ferramentas utilizadas na furação, após ataque químico, do: a) FC300; b) FC300_(RG); c) ampliação da região 1a ilustrada na Fig. 4.18a; d) ampliação da região 1b ilustrada na Fig. 4.18b; e) ampliação da região 2a mostrada na Fig. 4.18a; f) ampliação da região 2b ilustrada na Fig. 4.18b

Na Fig. 4.18d é possível observar riscos, na ponta da broca utilizada na usinagem do FC300_(RG), que apresentam um aspecto polido, indício de que o processo de retirada do revestimento tenha sido pela ação da difusão química. No entanto, este desgaste, de acordo também com o EDS 28, não atinge o substrato da ferramenta. As Figs. 4.18e e 4.18f ilustram

regiões com aparência rugosa, típicas do mecanismo de desgaste adesivo, oriundas, respectivamente, das ferramentas que usinaram o FC300 e o FC300_(RG). A análise das imagens, juntamente com os resultados do EDS 29 e do EDS 30, mostram que o desgaste atingiu o substrato da ferramenta em uma pequena área.

4.2.4 Condição $V_c = 140 \text{ m/min}$ e $f = 0,25 \text{ mm/rot}$

A Fig. 4.19 mostra a evolução do desgaste máximo de flanco da ferramenta, após usinar os quatro materiais na condição de velocidade igual a 140 m/min e avanço de 0,25 mm/rot. A broca que usinou o FC250, a qual obteve a maior vida entre as demais, até o 330° furo apresentou uma taxa de desgaste praticamente constante, a partir disto, o desgaste evolui de forma acelerada fazendo com que a ferramenta chegasse ao fim de vida, com 6,45 minutos de vida, após 450 furos.

O FC300 foi o segundo melhor material a se usinar, segundo o critério de vida da ferramenta. Com 150 furos o comprimento do desgaste máximo de flanco atingiu 0,41 mm, deixando evidente o efeito negativo, sobre a usinabilidade, da maior resistência mecânica, aliada ao menor espaçamento entre as lamelas de perlita do ferro fundido cinzento da classe 300 em comparação ao FC250.

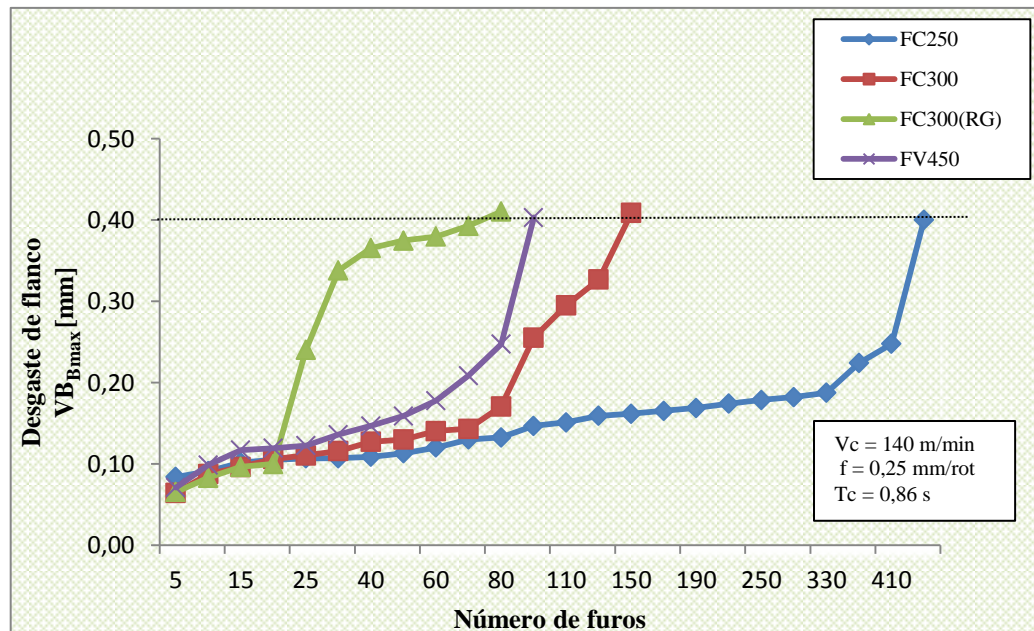


Figura 4.19 - Comprimento do desgaste de flanco máximo para os quatro ferros fundidos analisados na condição $V_c = 140 \text{ m/min}$ e $f = 0,25 \text{ mm/rot}$

Para o ferro fundido cinzento da classe 300 ligado ao molibdênio com refino de grafita e para o ferro vermicular da classe 450, durante a furação com avanço de 0,25 mm/rot, o comportamento do desgaste de flanco passa a ter uma característica diferenciada àquela apresentada com o avanço de 0,15 mm/rot. Nesta condição, o material que apresentou a pior taxa de desgaste foi o FC300_(RG), seguido do FV450. Com 80 furos usinados o FC300_(RG) atingiu um comprimento de desgaste de 0,41 mm, enquanto o ferro vermicular, com 90 furos atingiu 0,40 mm de desgaste.

Observa-se, através do gráfico, que após o vigésimo furo, o desgaste para a ferramenta que usinou o FC300_(RG) evolui de forma acelerada e não uniforme o que pode ter sido consequência de sua perlita refinada aliada, também, ao efeito do molibdênio na microestrutura. Este elemento segrega nos contornos de células eutéticas (áreas brancas que podem ser observadas nas micrografias dos ferros cinzentos da Fig 3.4 do capítulo anterior), resultando em um ferro fundido com microestrutura heterogênea, podendo até ocorrer variações significativas nas propriedades mecânicas destes materiais. Desta forma, nas áreas segregadas, o refinamento da perlita se torna ainda mais intenso, resultando em acréscimo na resistência e, conseqüentemente, dificultando a usinagem.

Entretanto, as informações da evolução do desgaste não devem ser analisadas de forma isolada. A Fig. 4.20 mostra um comparativo em um nível de ampliação de 600x para as brocas que usinaram os quatro ferros fundidos aqui analisados. A partir disto, observa-se a diferença na morfologia do desgaste entre os materiais, em que nota-se um desgaste mais acentuado na ferramenta utilizada na furação do FV450.

Destaca-se, novamente, a presença de elevada concentração do elemento oxigênio (EDS 31 - Fig. 4.20a) na superfície da ferramenta que usinou o ferro fundido vermicular. Este fato pode sugerir que durante a furação houve a formação de filmes de óxidos em certas regiões da broca, que são facilmente removidos pelo atrito, ocasionando, assim, o desgaste. Contudo, esta hipótese só pode ser comprovada através de análises mais aprofundadas e específicas no corpo da ferramenta.

As Figs. 4.20b, 4.20c e 4.20d mostram desgastes maiores localizados, com aspecto polido (indicativo de difusão química) nas superfícies das ferramentas que usinaram os ferros cinzentos, cuja altura da marca atinge o critério de vida estabelecido para este trabalho. Os desgastes, entretanto, são muito superficiais, não atingem o substrato da ferramenta e tampouco causam lascamentos nas brocas.

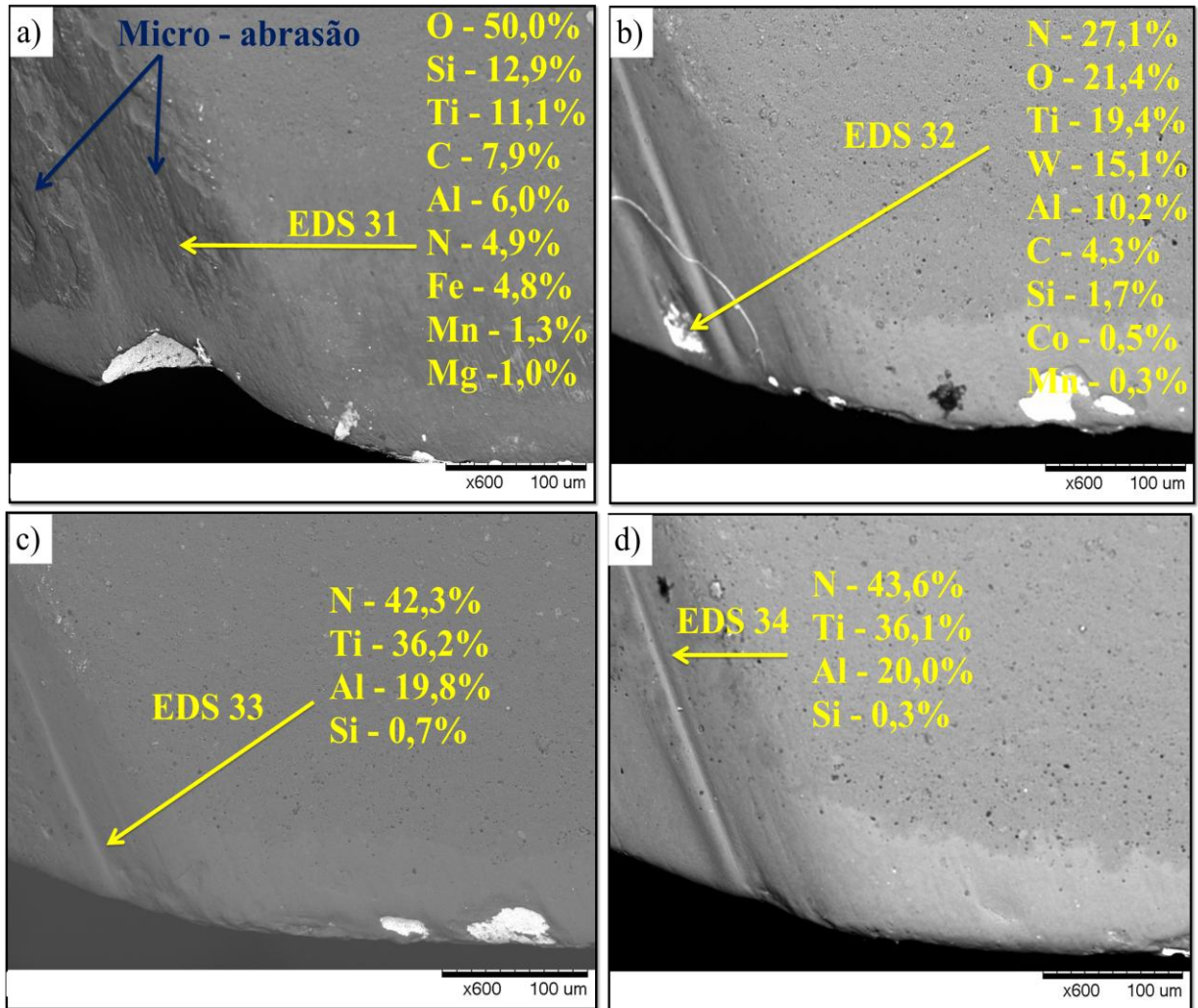


Figura 4.20 - Comparativo entre as ferramentas utilizadas na furação, após ataque químico, do: a) FV450; b) FC250; c) FC300; d) FC300_(RG)

A Fig. 4.21 ilustra, em maiores detalhes, a morfologia do desgaste da broca utilizada na furação do FV450. Notam-se, através da análise da Fig. 4.21a, micro-lascamentos na superfície de corte da broca. Entretanto, tais lascamentos eram camuflados durante os testes de vida da ferramenta, devido a grande quantidade de material aderido presente na aresta de corte, como pode ser observado na Fig. 4.21b e comprovado através do EDS 35. Segundo Xavier (2009), esta elevada quantidade de material aderido sobre a broca evidencia que junções fortes entre o cavaco e o revestimento podem ocorrer. Desta forma, sucessivos esforços de tração relacionados com a separação dessas junções facilitam a formação de trincas e a remoção do revestimento, e em alguns casos até do substrato.

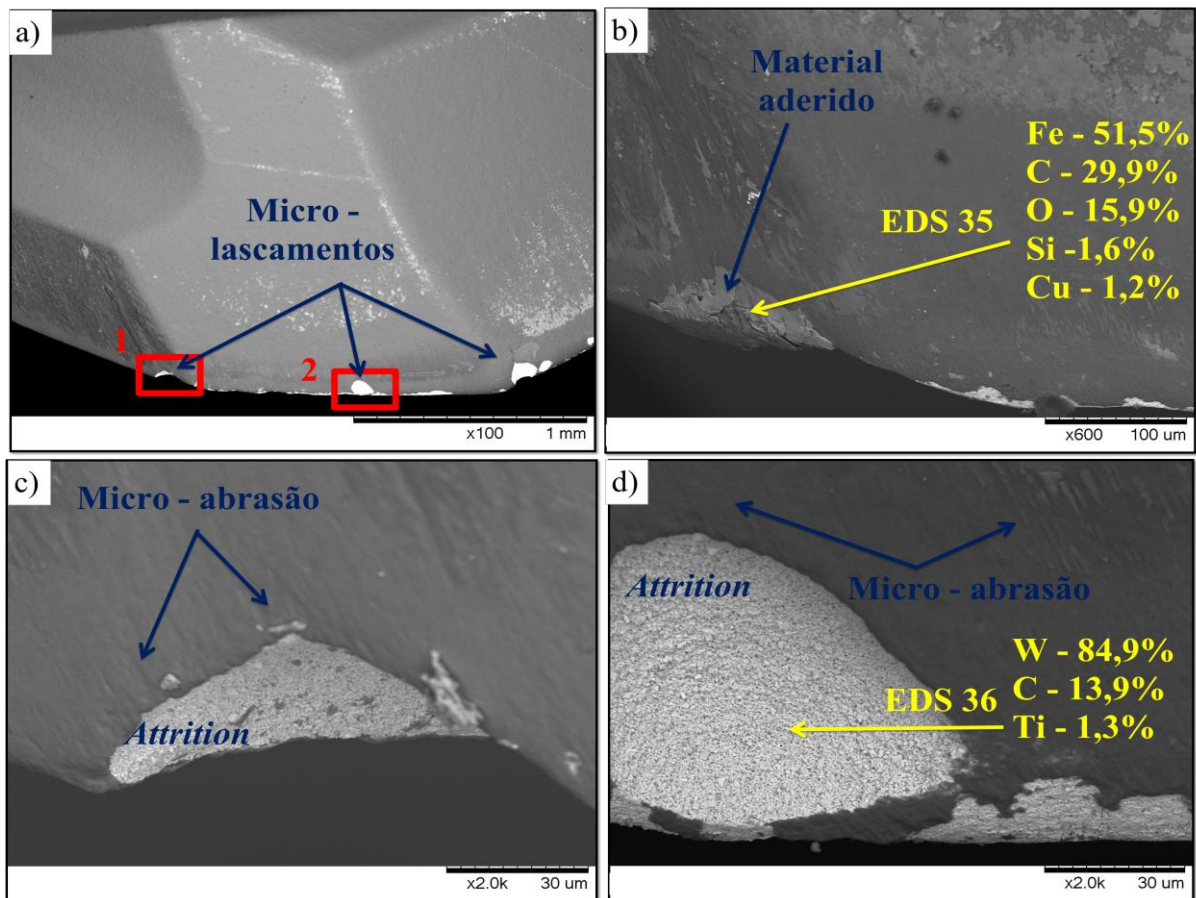


Figura 4.21 - Análise do desgaste da broca na usinagem do FV450: a) vista geral da ferramenta após ataque químico; b) vista ampliada da ponta da broca sem ataque químico; c) vista ampliada da região 1 depois do ataque químico; d) vista ampliada da região 2 da Fig. 4.21a

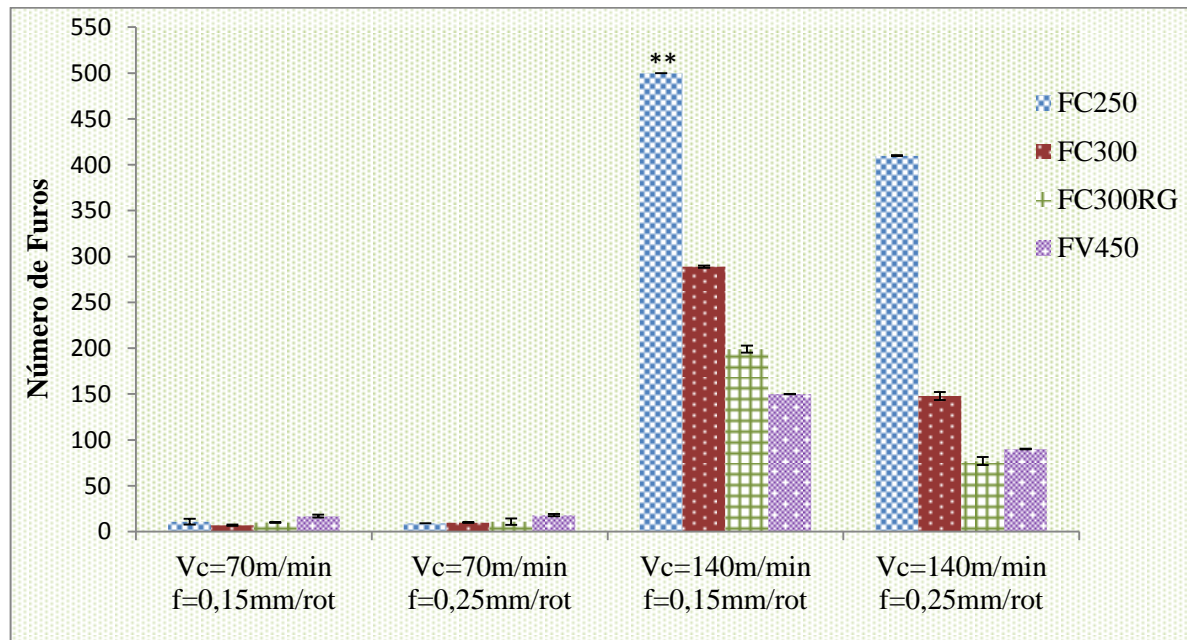
As Figs. 4.21c e 4.21d mostram, em níveis maiores de ampliação, que o arrancamento de material da broca foi causado pelo mecanismo de desgaste de adesão. Nota-se que este desgaste consumiu a ponta da ferramenta, alterando a sua geometria. Ademais, observa-se ainda a presença de micro-sulcos no revestimento oriundos do processo abrasivo.

Assim, sugere-se, por meio da comparação das imagens obtidas no MEV (Figs. 4.20 e 4.21) que o desgaste que a ferramenta esteve sujeita durante a usinagem do FV450 foi bem mais severo do que o desgaste sofrido pelas brocas que usinaram os ferros cinzentos, ainda que o FC300_(RG) tenha atingido primeiro o desgaste máximo de flanco.

4.2.5 Discussão geral

O gráfico da Fig. 4.22 apresenta os resultados de vida das ferramentas utilizadas na usinagem dos quatro materiais, nas quatro condições de usinagem testadas. Nele fica mais evidente o alto impacto da velocidade de corte na usinagem dos materiais em análise.

Tomando como exemplo o desempenho da ferramenta que usinou o FC250, observa-se que a mudança da velocidade de 70 m/min para 140 m/min, com relação ao avanço de 0,25 mm/rot, implica em um aumento percentual de cerca de 4456% no número de furos produzidos (11 contra 500), sem que, na maior velocidade corte, o critério de fim de vida adotado tenha sido atingido.



** Ferramenta não atingiu o final de vida

Figura 4.22 - Gráfico comparativo da usinabilidade dos ferros fundidos em estudo, segundo o critério de vida $VB_{max} = 0,40$ mm

No intuito de se encontrar justificativas para este comportamento adverso, ou seja, o número de furos aumentar substancialmente com o aumento da velocidade, propõe-se uma análise comparativa dos mecanismos de desgaste encontrados nas ferramentas utilizadas neste trabalho.

De acordo com a Fig. 4.23 os mecanismos de abrasão, adesão (*attrition*), difusão e oxidação são apresentados em função da temperatura de corte. Em baixas temperaturas ou em baixas velocidades de corte, os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes, em que a adesão é predominante, enquanto em temperaturas elevadas, a adesão perde espaço para os mecanismos de difusão, abrasão e oxidação.

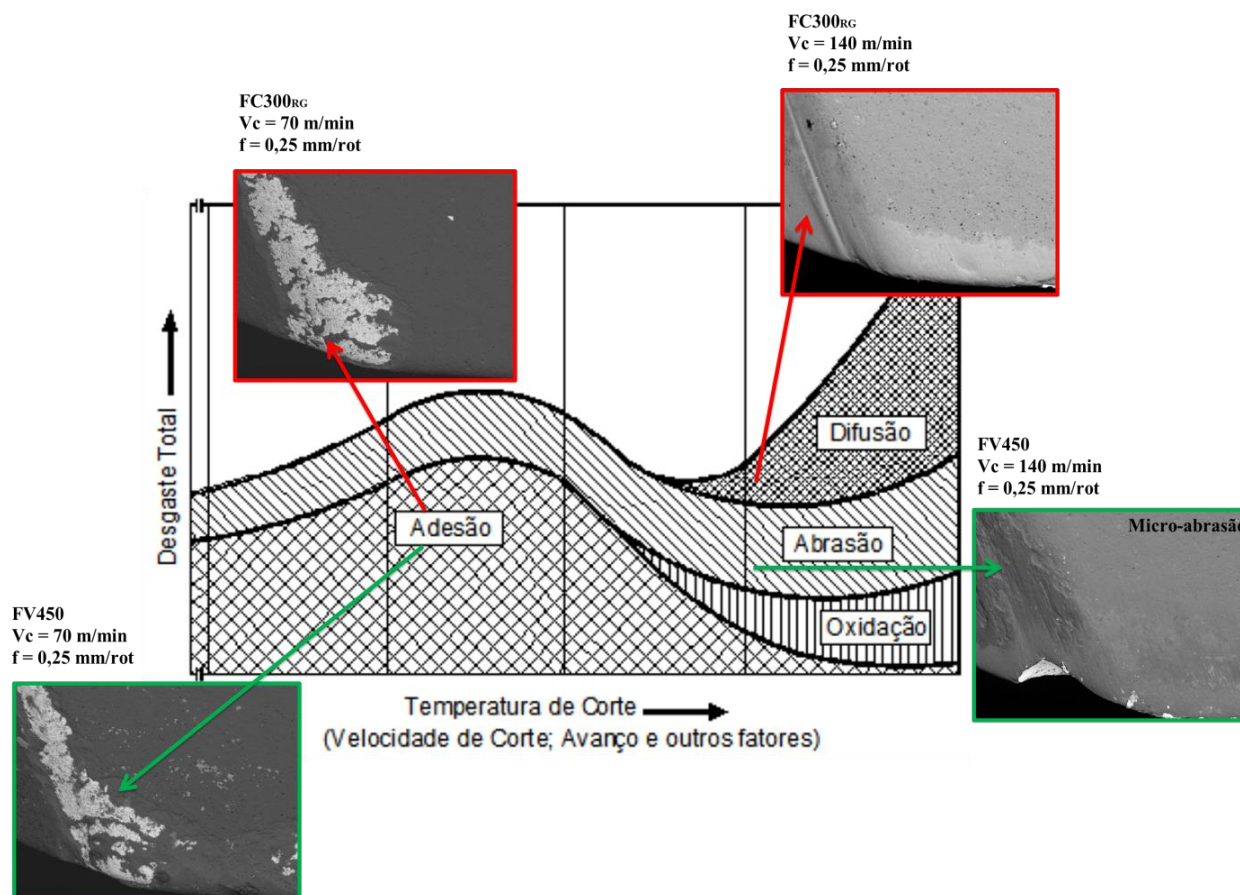


Figura 4.23 - Mecanismos de desgaste das ferramentas de corte em função da velocidade de corte (Adaptado de VIEREGGE, 1970 apud KÖNIG; KLOCKE, 2008)

De modo geral, os mecanismos de desgaste encontrados nas brocas que usinaram os quatro ferros fundidos obedecem a este diagrama da Fig. 4.23. A partir disto, constata-se que, com o aumento da velocidade, o mecanismo de desgaste adesivo foi sendo suprimido, passando a predominar os mecanismos de difusão e micro-abrasão. Desta forma, sugere-se que o tipo de ferramenta utilizada nos ensaios de furação apresenta um melhor desempenho quando submetida à ação destes dois últimos mecanismos mencionados e uma pior performance sob a ação do fenômeno de adesão.

Ao se analisar as Figs 4.15, 4.16, 4.18 e 4.20 que revelam os aspectos dos desgastes das brocas usadas na usinagem dos quatro materiais investigados na condição de alta velocidade de corte (140 m/min) (tanto para o avanço de 0,15 mm/rot, como 0,25 mm/rot), verifica-se que o desgaste nas ferramentas foram muito superficiais, e em apenas algumas ilhas isoladas da região desgastada o substrato é atingido. Isto significa que a vida da ferramenta, pelo critério adotado, é governada fortemente pela resistência ao desgaste do revestimento (TiAlN). Observa-se ainda que o mecanismo de desgaste predominante é o

difusivo, com alguma região evidenciando a presença da micro-abrasão. Entretanto, quando o desgaste atinge o substrato da ferramenta, as imagens são claras em demonstrar a predominância do mecanismo de desgaste por adesão (ou *attrition*).

Ao comparar a usinagem dos quatro materiais com a menor velocidade de corte de 70 m/min, quando as ferramentas de corte se desgastaram predominantemente por adesão (ou *attrition*), verificam-se dois aspectos interessantes. Primeiro que a taxa do desgaste adesivo, que prevalece na menor velocidade de corte, foi maior que a taxa do desgaste difusivo, predominante na usinagem na maior velocidade de corte. Segundo que o FV450 e o FC300_(RG), apresentaram menores usinabilidade nas altas velocidades em comparação aos outros dois cinzentos, isto porque o mecanismo predominante, a difusão, é fortemente dependente da temperatura e estes dois materiais possuindo maiores resistência mecânica e dureza, irão exigir maiores esforços na usinagem, desenvolvendo maiores temperaturas. Na menor velocidade de corte, o mecanismo predominante, a adesão, que depende menos da temperatura e mais da capacidade de aderir na superfície da ferramenta e da irregularidade do fluxo desse material aderido, os resultados demonstraram que a maior resistência mecânica do vermicular e do FC300_(RG) não é significativa neste processo.

4.2.6 Análise de significância dos resultados de desgaste

Ignorando o efeito da interação entre o avanço e o material (para que outras variáveis possam se tornar significativas), foi realizada uma análise de significância para a comparação dos materiais referente ao desgaste máximo de flanco, considerando as quatro condições de corte testadas. As Tabs. 4.1 a 4.3 apresentam, com uma confiabilidade de 95% e 5% de nível de significância (p), a análise estatística realizada por meio do *software Statistica 7.0*.

Tabela 4.1 - Análise de significância dos resultados de desgaste comparando FC250 e FC300

Fator	Efeito (furos)	p
Média	179,375	0,003922
Velocidade (Vc) [m/min]	336,250	0,004461
Avanço (f) [mm/rot]	- 48,750	0,162982
Material	-128,750	0,029295
Interação entre Vc x f	-46,250	0,176557
Interação entre Vc x material	-126,250	0,030414

A Tab. 4.1 mostra que existe diferença significativa entre o FC250 e o FC300. O material influenciou significativamente nos resultados de desgaste promovendo uma redução deste, em média, de 129 furos, quando se passou do nível (-1), ferro fundido cinzento da classe 250, para o nível (+1), ferro cinzento da classe 300 ligado ao molibdênio. A diferença na dureza, microestrutura e nas propriedades mecânicas dos materiais contribuem para esta variação. A interação entre a velocidade e o material também reduziu o número de furos (aproximadamente 127 furos) ao se passar do nível (-1), interação entre FC250 e a velocidade de 70 m/min, para o nível (+ 1), interação entre o FC300 e a velocidade de 140 m/min.

Em contrapartida, o aumento da velocidade, de 70 m/min para 140 m/min, aumentou, em média, o número de furos para 337. Além da hipótese apresentada no item anterior (4.2.5), diversas pesquisas têm mostrado que o desgaste da ferramenta diminui com o aumento da velocidade de corte para os ferros fundidos cinzentos, entre eles destacam-se os trabalhos de Reuter, Schulz, McDonald (1999) e Pereira (2010). O aumento da velocidade de corte torna o efeito das partículas de MnS mais evidente, pois propicia condições favoráveis à formação de uma camada protetora, na aresta de corte das ferramentas, responsável pela redução do desgaste e das forças de corte (ABELE; SAHM; SCHULZ, 2002).

Na comparação entre o FC250 e o FC300_(RG) (Tab. 4.2), pode-se observar que também há diferença significativa entre estes materiais. Por apresentarem o valor p menor que 0,05, tanto o tipo de material, quanto a velocidade de corte e a interação entre ela e o material mostraram efeitos significativos nos resultados encontrados.

Na coluna dos efeitos da Tab. 4.2, percebe-se que, com o aumento da velocidade, houve uma elevação no número de furos produzidos, em média de 298. No entanto, na mudança do ferro cinzento da classe 250 para o ferro cinzento da classe 300, ligado ao Mo e com grafita refinada pode-se constatar uma redução no número de furos, em média de 165. Por fim, a interação entre a Vc e o tipo de ferro fundido também reduziu o número de furos realizados, na média de 165, ao se passar do nível (-1) para o nível (+1). Novamente, o efeito da microestrutura e das propriedades mecânicas destes materiais podem ter influenciado estes resultados, além do efeito produzido pelo aumento da velocidade, o qual foi explicitado no item anterior.

Tabela 4.2 - Análise de significância dos resultados de desgaste comparando FC250 e FC300_(RG)

Fator	Efeito (furos)	p
Média	161,250	0,003883
Velocidade (Vc) [m/min]	297,500	0,004559
Avanço (f) [mm/rot]	-45,000	0,155218
Material	-165,000	0,014596
Interação entre Vc x f	-45,000	0,155218
Interação entre Vc x material	-165,000	0,014596

As informações contidas na Tab. 4.3 mostram a existência de diferença significativa entre o FC250 e o FV450 em que todas as variáveis influenciaram significativamente na resposta do número de furos produzidos. Mais uma vez, a Vc foi a variável mais influente, conduzindo a um aumento no número de furos, em média, de 284 ao se passar do nível (-1) para o nível (+1). No que concerne à influência do tipo de material, a mudança do ferro cinzento da classe 250 para ferro vermicular classe 450 acarretou uma redução média no número de furos de, aproximadamente, 177. Além disso, pode ser observado que a interação entre a velocidade de corte e o material levou a uma redução na resposta, em média de 179 furos, quando se passou do nível (-1), interação entre FC250 e a velocidade de 70 m/min, para o nível (+1), interação entre o FV450 e a velocidade de 140 m/min.

Neste caso, diferentemente da análise realizada para os ferros cinzentos classe 300, o aumento do avanço, de 0,15 para 0,25 mm/rot, também, demonstrou efeito significativo na resposta referente ao número de furos. Desta forma, quando se passou do nível (-1) para o nível (+1), em média, houve uma redução de 27 furos. Por fim, a interação entre a Vc e o f ocasionou uma redução média de 29 furos ao se trocar o nível (-1) pelo nível (+1).

Durante a usinagem, o cavaco do ferro fundido vermicular tende a ficar mais em contato com a face da ferramenta do que o cavaco do ferro fundido cinzento. Este fato, aliado ao maior coeficiente de atrito do vermicular e à sua menor condutividade térmica, tendem a elevar a temperatura da ferramenta durante o corte. Neste caso, o incremento do avanço pode ter ocasionado um aumento adicional da temperatura de usinagem, resultando em aumento da intensidade dos mecanismos de desgaste e, portanto, tornando o avanço significativo na furação do FV450 (REUTER, SCHULZ 1999; KÖNIG, KLOCKE, 2008).

Tabela 4.3 - Análise de significância dos resultados de desgaste comparando FC250 e FV450

Fator	Efeito (furos)	p
Média	155,625	0,000210
Velocidade (Vc) [m/min]	283,750	0,000252
Avanço (f) [mm/rot]	-26,250	0,028236
Material	-176,250	0,000653
Interação entre Vc x f	-28,750	0,023704
Interação entre Vc x material	-178,750	0,000635

Estes resultados conduzem a uma explicação estatística referente à comparação da usinabilidade dos materiais aqui estudados, considerando o critério de desgaste máximo de flanco. Portanto, de posse desses dados e, juntamente, com a análise qualitativa dos ensaios de vida, é possível concluir que o material com a pior usinabilidade foi o FV450, seguido pelo FC300_(RG) e FC300 e o que apresentou a melhor usinabilidade foi o FC250. Esta diferença de usinabilidade entre os ferros fundidos pode estar relacionada com as propriedades mecânicas dos materiais e suas diferentes microestruturas.

Ressalta-se que na usinagem do FC 250 na maior velocidade de corte e menor avanço o critério de fim de vida baseado no desgaste de flanco máximo não foi atingido, o que significa dizer que a real diferença entre a usinabilidade deste com os concorrentes é ainda maior.

4.3 Resultados dos ensaios específicos de furação

4.3.1 Força de avanço e torque

A Figura 4.24 ilustra o comportamento da força de avanço (F_z) e do torque (M_z) quando se varia a velocidade de corte para os quatro materiais estudados.

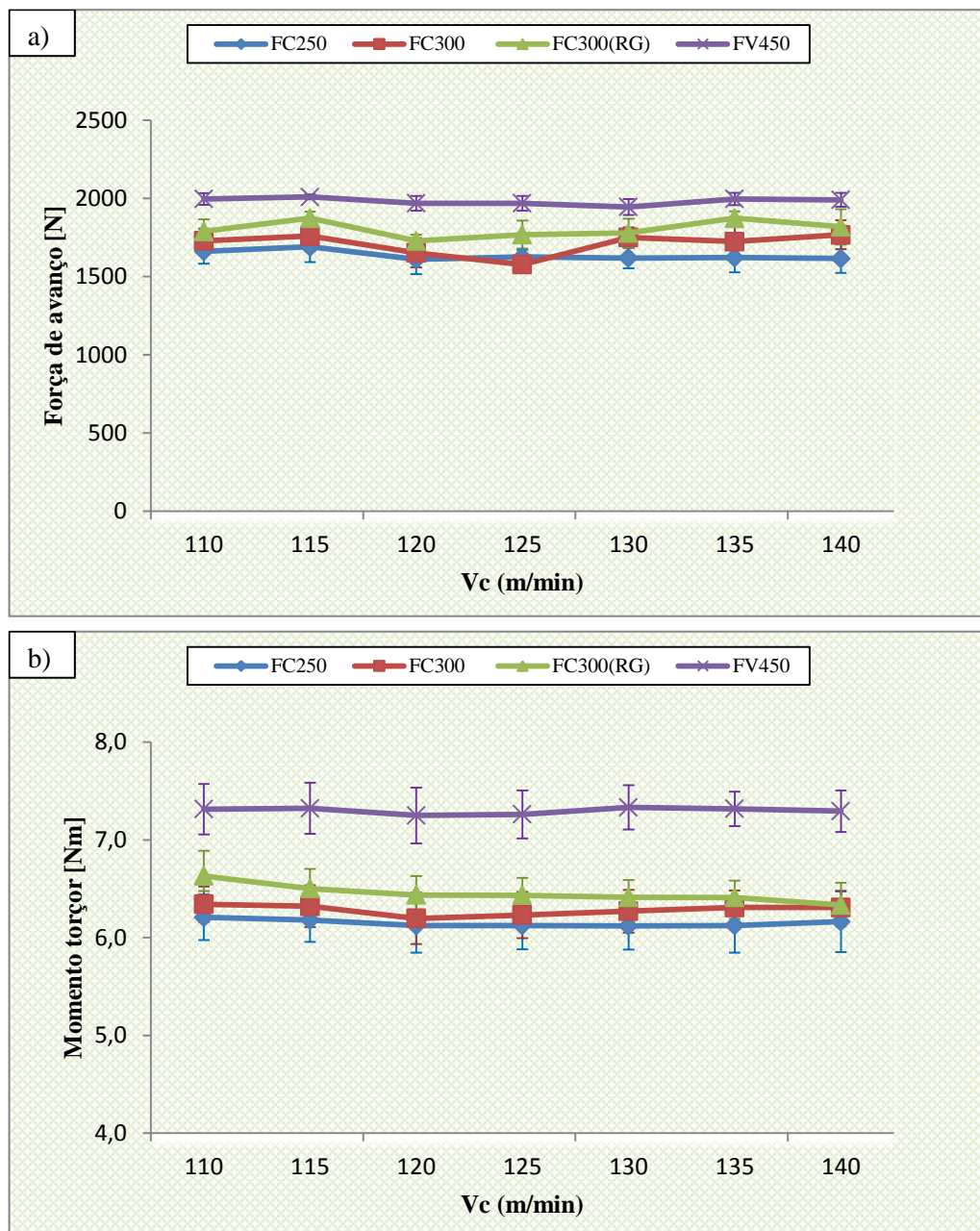


Figura 4.24 - Variação dos esforços de corte pela velocidade para os quatro ferros fundidos: a) F_z ; b) M_z . Condições de corte: $f = 0,27$ mm/rot e $L_f = 16$ mm

Os resultados dos gráficos apresentados na Fig. 4.24 mostram que tanto a força de avanço quanto o torque se mantiveram aproximadamente constantes ao longo desses ensaios, ou seja, a velocidade de corte não influenciou significativamente estes parâmetros de usinagem, na faixa testada. Os resultados médios de F_z e de M_z foram, em sua maioria, menores para o FC250 e sempre maiores para o FV450. O FC300 e o FC300(RG) ficaram em uma faixa intermediária, onde nota-se que o último apresenta valores ligeiramente maiores que o primeiro (ferro cinzento da classe 300 ligado ao Mo).

A variação da força de avanço e do momento torçor, para cada tipo de material, pelo avanço é mostrada na Fig 4.25:

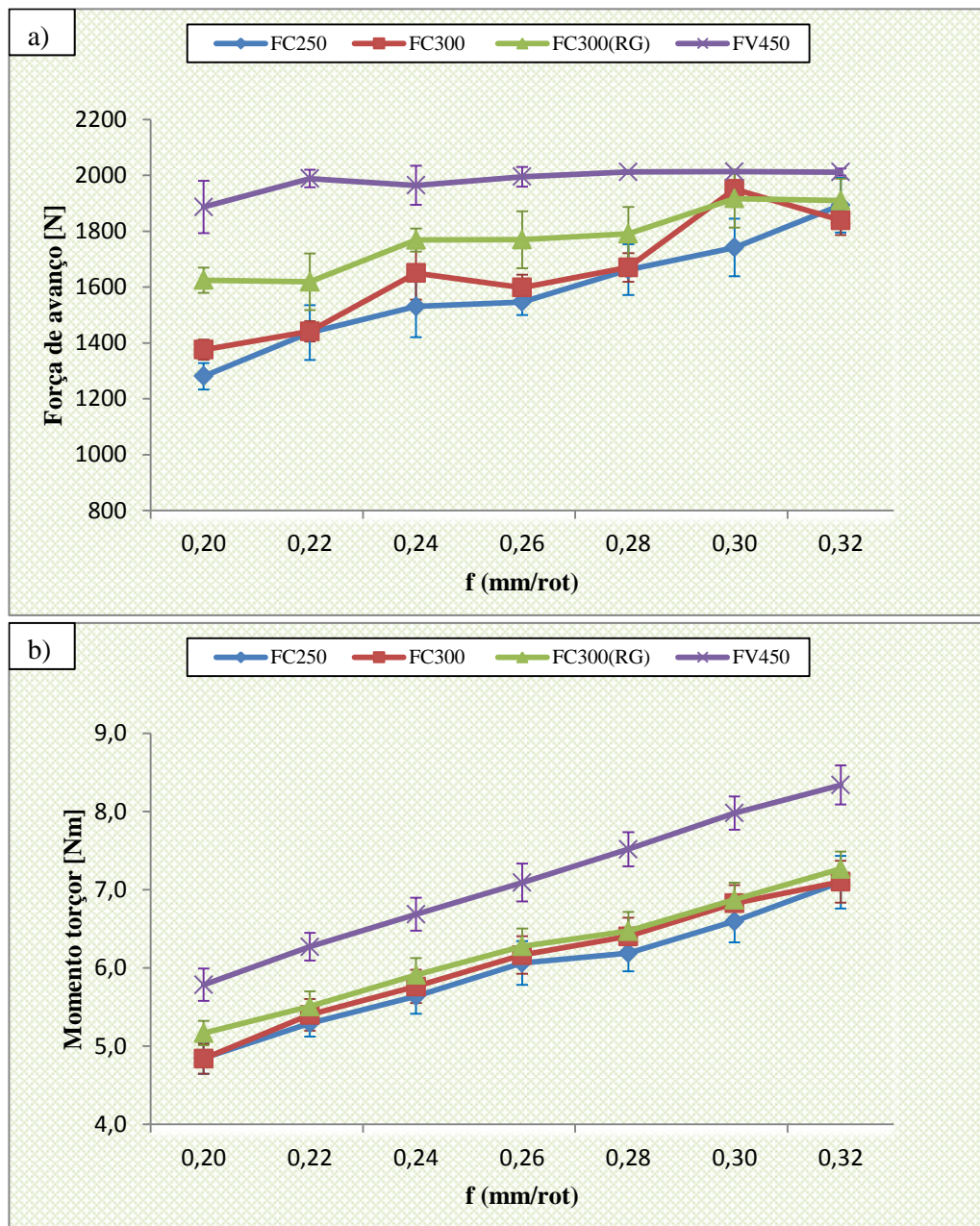


Figura 4.25- Variação dos esforços de corte pelo avanço: a) F_z ; b) M_z . Condições de corte: $V_c = 135$ m/min e $L_f = 16$ mm

Analisando a Fig. 4.25, de um modo geral, é possível observar uma leve tendência de aumento na componente F_z a medida que o avanço é incrementado. De forma um pouco mais pronunciada, com o aumento do avanço o torque também aumenta. Segundo Barbosa et al. (2009), o incremento desta variável aumenta diretamente as áreas de cisalhamento primário e secundário, causando o aumento de F_z e M_z . Além disso, quanto maior o valor do avanço, maior será a deformação plástica e encruamento do cavaco pela broca no fundo do furo. Assim, há uma maior resistência à penetração da broca devido ao efeito conjunto do

esmagamento do material na aresta transversal de corte e do corte do material nas duas arestas principais (SOUZA; MATTES; MOGNAGA; 2014).

Novamente, os valores médios de F_z e M_z foram maiores para o ferro fundido vermicular da classe 450. Assim como na condição analisada anteriormente (Fig. 4.24), os ferros cinzentos evidenciaram valores de força e torque muito semelhantes. O FC300_(RG) apresentou, relativamente, os maiores valores de F_z em comparação aos demais ferros cinzentos, exceto para o avanço de 0,30 mm/rot. Quanto aos resultados do momento torçor, o ferro cinzento com grafita refinada também apresentou valores ligeiramente maiores quando comparados aos outros ferros cinzentos, o que indica a possível interferência de sua microestrutura com perlita refinada nos resultados dos esforços de corte.

Estes resultados evidenciam que o comportamento frágil do cavaco dos ferros fundidos cinzentos e o efeito lubrificante das inclusões de MnS, partículas que se encontram distribuídas de forma bastante semelhante para os três ferros cinzentos analisados (Figs. 4.1 e 4.2), resultam em um sistema com menores esforços de corte em comparação aos ferros fundidos vermiculares.

Ademais, os ferros cinzentos possuem grafitas com lamelas afiadas, em que ocorre concentração de tensão nas suas extremidades. Tais grafitas se encontram interconectadas, assim, na usinagem criam-se planos de propagação de trincas à frente da aresta da ferramenta. Desta forma, com o avanço desta última, o material é removido completamente com menores esforços de corte (MARWANGA; VOIGT; COHEN, 1999).

Já a grafita do ferro vermicular apresenta interconexões complexas que não agem como pontos de concentração de tensão, como ocorre com a grafita lamelar, o que faz com que a resistência desse material seja maior, exigindo, assim, maiores esforços de corte.

4.3.2 Circularidade e Cilindricidade

Os valores de circularidade e cilindricidade ao se variar a velocidade de corte e o avanço, para os materiais aqui analisados, se encontram, respectivamente, nas Figs. 4.26 e 4.27.

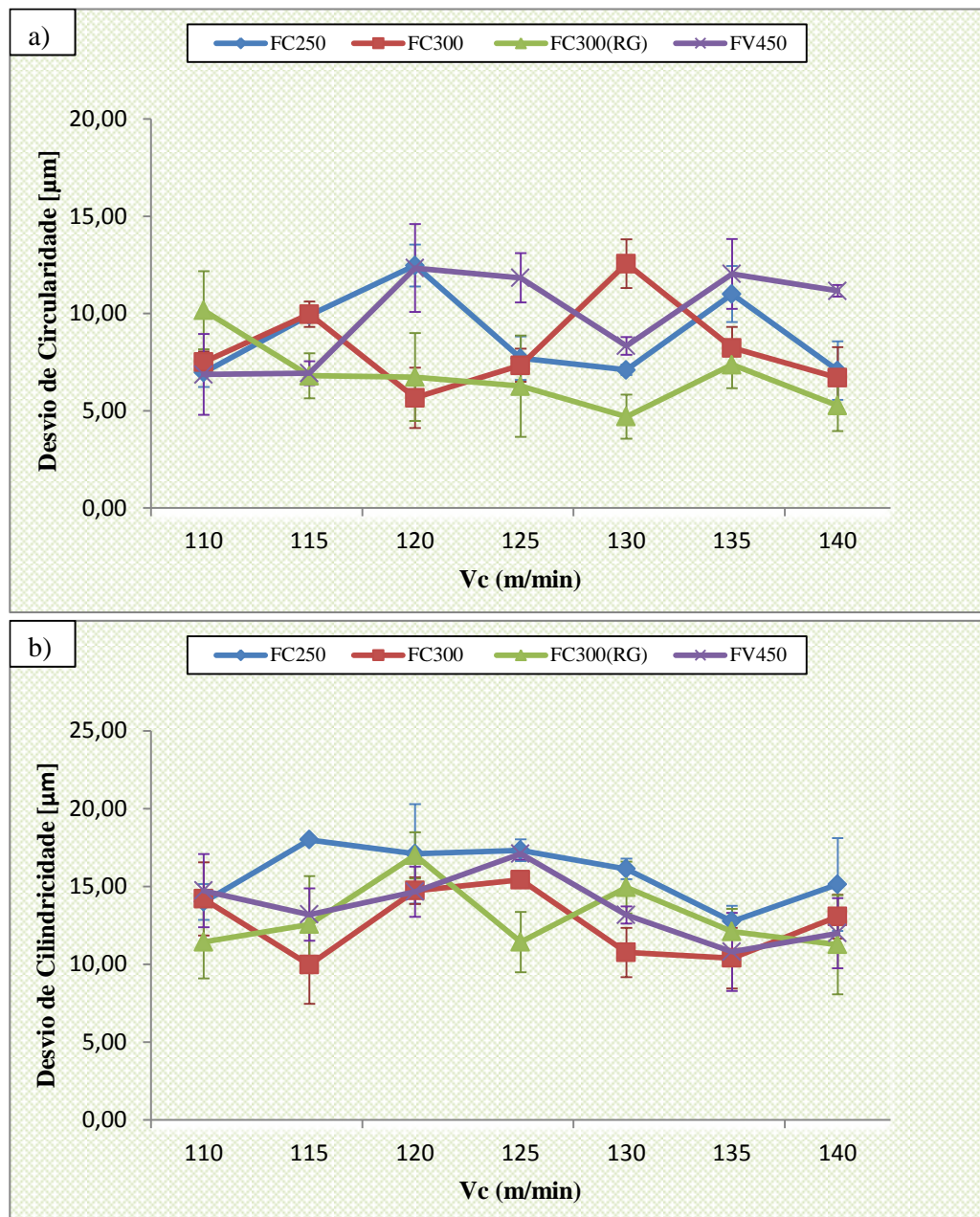


Figura 4.26 - Variação dos desvios de forma pela velocidade de corte: a) Circularidade; b) Cilindricidade. Condições de corte: $f = 0,27 \text{ mm/rot}$ e $L_f = 16 \text{ mm}$

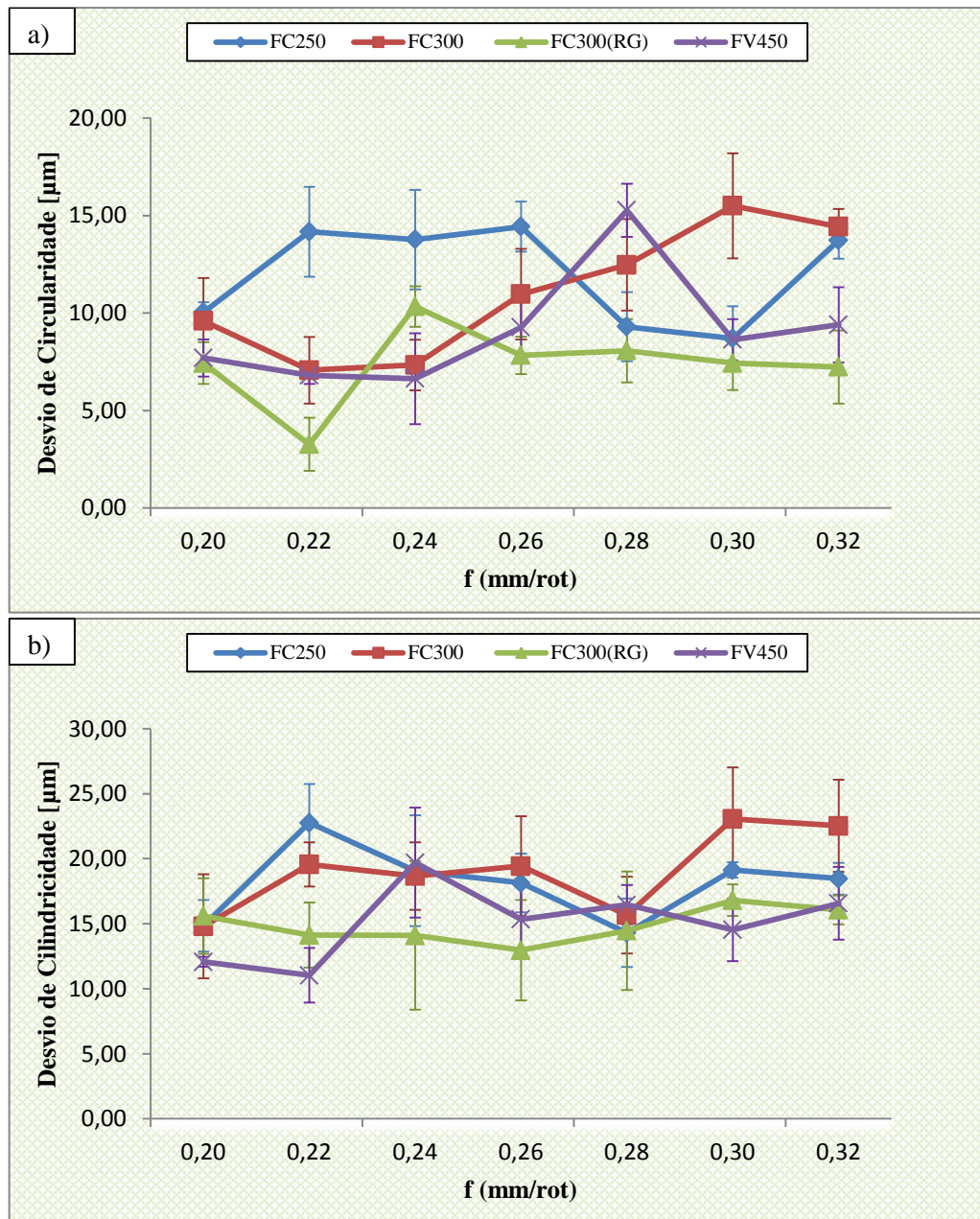


Figura 4.27 - Variação dos desvios de forma pelo avanço: a) Circularidade; b) Cilindricidade. Condições de corte: $V_c = 135$ m/min e $L_f = 16$ mm

Através da análise dos gráficos das Figs. 4.26 e 4.27, pode-se constatar que os desvios de forma aqui estudados não apresentaram uma tendência definida em função da variação da velocidade e do avanço. Pelos gráficos pode-se concluir que, em alguns casos, devido ao desvio padrão as diferenças estatísticas se tornam irrelevantes.

Contudo, de um modo geral, percebe-se que, entre todas as condições ensaiadas em um total de 28 pontos (14 pontos para variação da velocidade de corte e 14 pontos para variação do avanço), mais da metade dos valores encontrados foram menores para o FC300_(RG) em comparação aos demais ferros fundidos. Este fato pode ser melhor

compreendido por meio das Tabs. 4.4 e 4.5. Os números com a cor da fonte verde representam o menor desvio de forma encontrado ao se comparar os quatro materiais para cada condição de corte e os números com cor da fonte vermelha representam o maior desvio encontrado em determinada condição.

Tabela 4.4 - Variação da circularidade e cilindridade pela velocidade de corte

Vc (m/min)	Circularidade				Cilindridade			
	FC250	FC300	FC300 _(RG)	FV450	FC250	FC300	FC300 _(RG)	FV450
110	6,967	7,500	10,167	6,867	14,000	14,200	11,433	14,733
115	9,900	9,967	6,800	6,933	18,000	9,967	12,567	13,200
120	12,467	5,667	6,733	12,333	17,100	14,733	17,000	14,667
125	7,700	7,333	6,267	11,833	17,333	15,433	11,433	17,100
130	7,100	12,567	4,700	8,333	16,133	10,767	14,933	13,167
135	11,000	8,233	7,367	12,033	12,767	10,400	12,100	10,800
140	7,067	6,700	5,267	11,167	15,133	13,067	11,267	12,000

Tabela 4.5 - Variação da circularidade e cilindridade pelo avanço

f (mm/rot)	Circularidade				Cilindridade			
	FC250	FC300	FC300 _(RG)	FV450	FC250	FC300	FC300 _(RG)	FV450
0,20	10,033	9,600	7,433	7,700	14,833	14,800	15,600	12,067
0,22	14,167	7,067	3,267	6,800	22,767	19,567	14,133	11,033
0,24	13,767	7,333	10,333	6,633	19,067	18,667	14,100	19,700
0,26	14,433	10,967	7,833	9,267	18,133	19,433	12,967	15,333
0,28	9,300	12,467	8,067	15,267	14,300	15,667	14,467	16,467
0,30	8,700	15,500	7,433	8,633	19,133	23,067	16,800	14,533
0,32	13,733	14,433	7,233	9,400	18,467	22,533	16,067	16,567

Estes resultados podem ter evidenciado a influência do refino da grafita do FC300_(RG) na qualidade dos furos. A formação de cavaco no ferro cinzento está relacionada à fratura na frente da região de corte, onde quanto mais refinada for a grafita menor será a lamela de cavaco formada pela fratura, o que pode resultar em uma melhor qualidade na forma dos furos usinados se comparado aos ferros fundidos cinzentos com veios maiores e mais espessos de grafita.

Posto isso, fica evidente o possível motivo pelo qual o FC250, que apresenta lamelas de grafita que não são consideradas refinadas, em 6 pontos de cilindridade quando se varia a velocidade (Fig. 4.26a ou Tab. 4.4) e 4 pontos de circularidade ao se variar o avanço (Fig. 4.27a ou Tab. 4.5) foram maiores para o FC250, quando comparado aos demais materiais, em um total de 7 pontos para cada condição.

4.3.3 Rugosidade (Ra , Rq , Rz)

Os gráficos das Figs 4.28 e 4.29 representam a variação da rugosidade Ra , Rq e Rz em função da variação da velocidade e do avanço, respectivamente. Pode ser observado nesses gráficos que estes três parâmetros de rugosidade também não apresentam tendência definida conforme o aumento da velocidade de corte e do avanço, além de serem bastante semelhante para os quatro materiais. Conforme Machado et al. (2015), o incremento no avanço deveria aumentar a altura dos picos e a profundidade dos vales impactando na rugosidade da superfície. Entretanto, este efeito convencional não foi observado, possivelmente, devido ao formato da aresta das pontas das brocas.

Como comentários gerais tem-se que os valores de Ra , ao se variar a velocidade, foram menores para o FV450, quando comparado aos ferros fundidos cinzentos, isto nas velocidades de 115; 130; 135 e 140 m/min (Fig. 4.28a). Quanto aos valores de Rq e Rz , da mesma forma que no parâmetro anterior, o ferro fundido vermicular também obteve os menores valores, quando dos 7 pontos de velocidade testados, em 5 deles o FV450 apresentou os menores valores de Rq (115; 120; 130; 135 e 140 m/min - Fig. 4.28b) e Rz (110; 115; 130; 135 e 140 m/min - Fig. 4.28c).

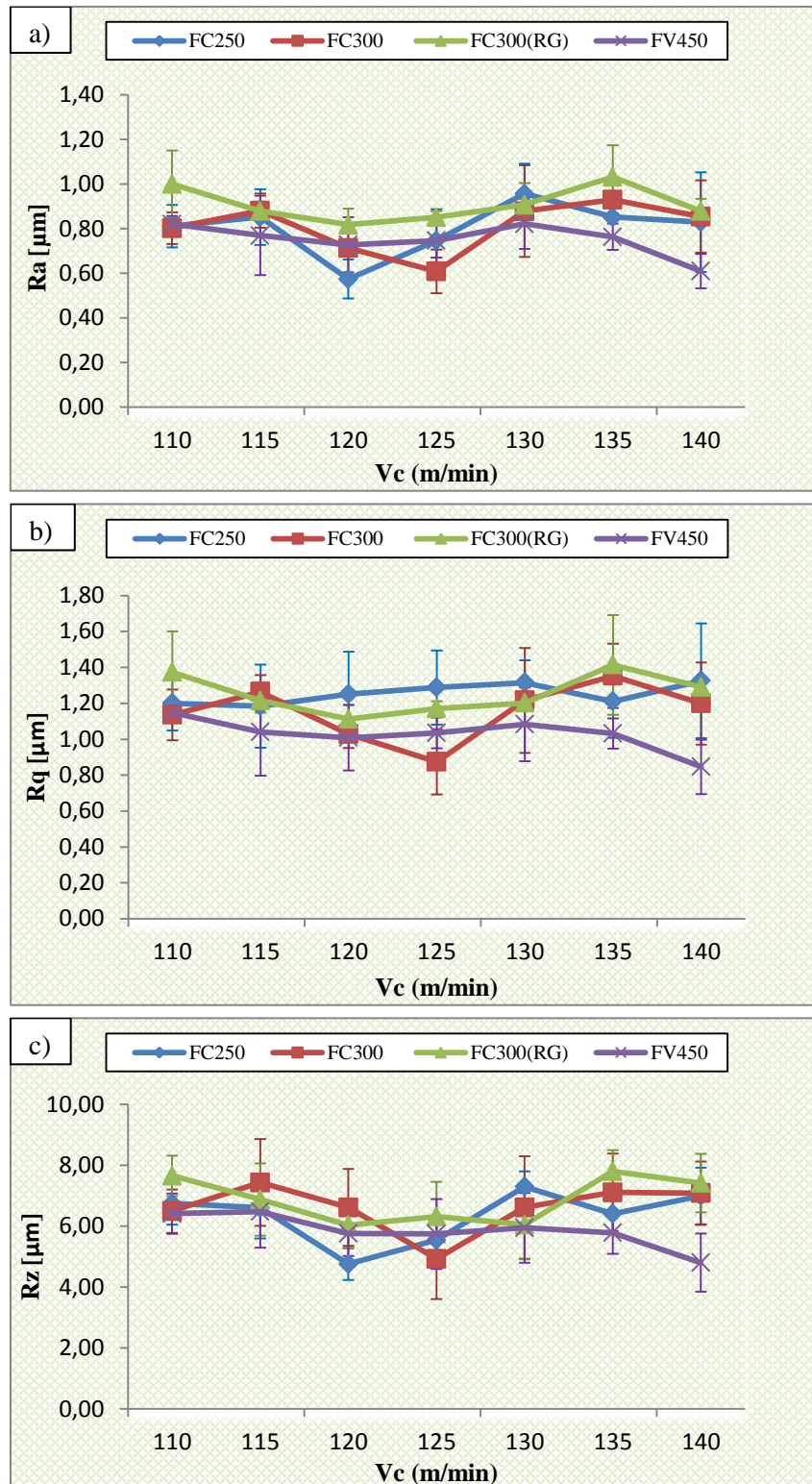


Figura 4.28 - Variação da rugosidade: a) Ra ; b) Rq ; c) Rz pela velocidade. Condições de corte: $f = 0,27$ mm/rot e $L_f = 16$ mm

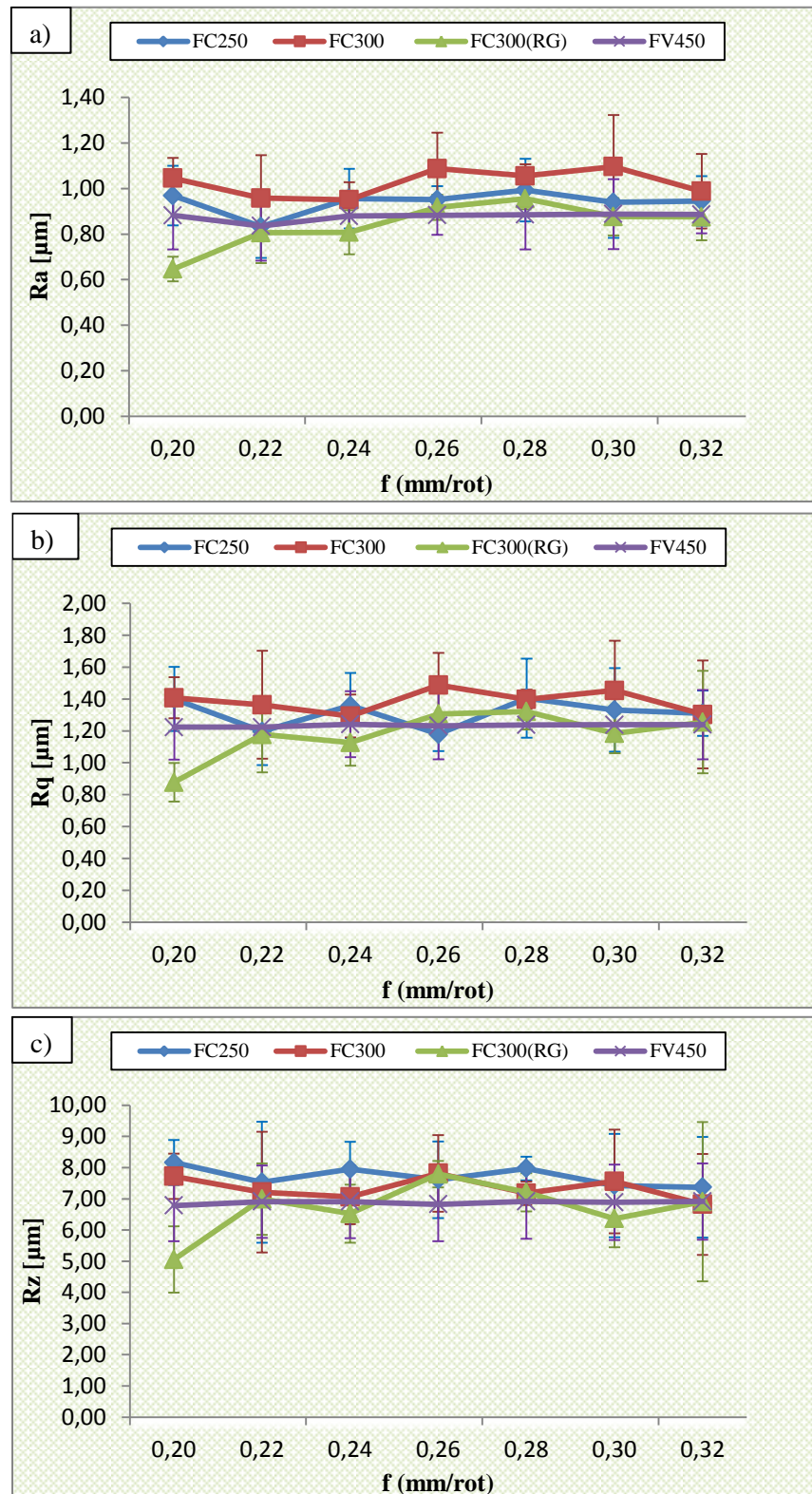


Figura 4.29 - Variação da rugosidade: a) R_a ; b) R_q ; c) R_z pelo avanço. Condições de corte: $V_c = 135 \text{ m/min}$ e $L_f = 16 \text{ mm}$

Ao se variar o avanço, de forma geral, os valores de Ra foram menores para o FC300_(RG). Dos 7 pontos de avanço ensaiados, este material obteve os menores valores de rugosidade em 5 deles: 0,20; 0,22; 0,24; 0,30 e 0,32 mm/rot (tais informações podem ser observadas na Fig. 4.29a). O ferro cinzento com grafita refinada também apresenta os menores valores para os parâmetros Rq (0,20; 0,22; 0,24 e 0,20 mm/rot - Fig 4.29b) e também para o Rz (0,20; 0,24 e 0,30 mm/rot - Fig. 4.29c).

Quando se estuda a rugosidade e os erros de forma, ao se varia as condições de corte para um determinado material, de um modo geral, o comportamento desses parâmetros são mesmo bastante oscilantes. Esta oscilação faz com que a comparação entre materiais da mesma família, como no caso aqui estudado, fica dificultada, sendo que em alguns casos inconclusivos.

Os resultados aqui encontrados indicam que, de um modo geral, o FV450 e o FC300_(RG) obtiveram melhores resultados de rugosidade, fato que pode ser justificado, segundo Machado et al. (2015), devido às melhores propriedades mecânicas destes materiais, de forma que quanto maior a dureza do material melhor tende a ser o acabamento superficial.

Resultados semelhantes foram encontrados por Massirer (2010) na furação de três ligas de ferro fundido: o ferro fundido vermicular classe 450, o ferro vermicular classe 350 e o ferro fundido cinzento classe 300, no qual o vermicular da classe 450 obteve menores valores de Ra e Rz ao utilizar ferramentas isentas da influência do desgaste (brocas novas), seguido do vermicular da classe 350 e por último o ferro fundido cinzento.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Este capítulo destina-se a apresentar as conclusões finais e, também, propor sugestões para trabalhos futuros de forma a visar o aperfeiçoamento e prosseguimento do presente trabalho.

5.1 Conclusões

A partir dos resultados encontrados dos ensaios planejados e desenvolvidos com o intuito de se comparar os quatro ferros fundidos com relação à vida da ferramenta, força de avanço, torque e qualidade dos furos usinados, pode-se concluir que:

- A usinabilidade dos materiais investigados neste trabalho depende fortemente das propriedades mecânicas e das características intrínsecas relacionadas à microestrutura.
- De um modo geral, os ferros fundidos com as melhores propriedades mecânicas, FV450 seguido do FC300_(RG), apresentaram os piores índices de usinabilidade, considerando os critérios de evolução do desgaste, força de avanço (Fz) e momento torçor (Mz).
- Em contrapartida, e também de uma maneira geral, com relação aos desvios de forma e acabamento superficial, os materiais citados acima (FV450 e FC300_(RG)) evidenciaram melhores resultados quando comparados aos demais, em que a grafita refinada do ferro cinzento classe 300 e a dureza de ambos os materiais podem ter contribuído para tais resultados.
- O FC250 mostrou, de forma geral, o melhor desempenho nos critérios de usinabilidade em que foi pesquisado, exceto para o quesito qualidade dos furos usinados devido,

provavelmente, ao conjunto dureza e microestrutura. Já o FC300, na maioria das condições testadas, se mostrou como material intermediário entre o FC250 e o FC300_(RG).

- No que concerne à evolução do desgaste, a variável que mais influenciou os resultados foi a velocidade. Na comparação entre o FC250 e o FC300 bem como entre o FC250 e o FC300_(RG) as respostas foram, ambas, influenciadas pela velocidade, tipo de material e interação entre velocidade de corte e material. Já na comparação entre FC250 e FV450 a velocidade, o avanço, interação entre a velocidade, tipo de material, interação entre velocidade de corte e o avanço foram os parâmetros que influenciaram significativamente as respostas.

- Outro aspecto relevante desta pesquisa refere-se ao desempenho das brocas quando submetidas à usinagem na menor velocidade de corte (70 m/min), o qual evidencia um comportamento extremamente prematuro de desgaste para os quatro materiais. Nesta condição, as ferramentas se desgastaram sob a ação predominante da adesão. No entanto, com o aumento da velocidade para 140 m/min, o desgaste por *attrition* foi perdendo espaço para os fenômenos de difusão e micro-abrasão, os quais podem estar ligados ao melhor desempenho das brocas utilizadas nos ensaios de vida para esta última condição, independentemente do avanço.

O presente trabalho caracteriza-se por abrir discussões quanto à utilização do FC-300 com adição de Mo e refino de grafita na confecção de cabeçotes para motores diesel. Do ponto de vista dos aspectos tecnológicos da usinagem, o comportamento do FC300_{RG} perante alguns ensaios desta pesquisa mostra que, sem dúvida, a aplicação deste material é promissora. Durante os ensaios de vida com velocidade de corte de 140 m/min e avanço de 0,15 mm/rot observou-se um comportamento deste material muito próximo ao FC250 até a marca dos 130 furos usinados. Quanto aos testes referentes aos esforços de corte, notam-se valores ligeiramente maiores para o ferro cinzento com grafita refinada em comparação aos demais ferros fundidos cinzentos. Por fim, com relação à qualidade dos furos, o FC300_{RG} também demonstrou resultados satisfatórios.

Entretanto, a fim de que se possa melhor quantificar a usinabilidade deste material, sugerem-se novos estudos (descritos em propostas para trabalhos futuros) que apresentem métodos e processos de usinagem diferentes dos utilizados nesta pesquisa.

5.2 Propostas para trabalhos futuros

Seguem abaixo as sugestões para futuros trabalhos, voltadas, principalmente, para uma maior investigação do ferro cinzento com grafita refinada para aplicação em cabeçotes de motores:

- Avaliar a usinabilidade dos quatro ferros fundidos aplicando outros processos de usinagem como o fresamento, alargamento e rosqueamento;
- Investigar a influência da utilização de fluidos de corte na furação dos materiais, com o intuito de confrontar com os dados obtidos neste trabalho;
- Estudar o processo de formação de rebarbas na entrada e na saída dos furos;
- Investigar a melhor geometria de ferramenta para a furação do FC300_(RG);
- Investigar a usinabilidade dos quatro materiais na furação, seguindo a mesma metodologia aqui adotada, mas considerando um critério de fim de vida mais agressivo, como o colapso da broca.
- Explorar de forma mais profunda a influência da grafita refinada na usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos ao variar o refino e tipo da grafita lamelar.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT NBR ISO 4288 - **Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade**, 2008.

ABELE, E.; SAHM, A.; SCHULZ, H. Wear Mechanism when Machining Compacted Graphite Iron. **CIRP Annals**, p. 53-56, 2002.

AGOSTINHO, O. L.; RODRIGUES, A. C. S.; LIRANI, J. **Tolerâncias, Ajustes, Desvios e Análise de Dimensões**. 2. ed. São Paulo: Blucher, 1977. 295p.

ARANDA, M. H.; JUNG, C. F.; TEN CATEN, C. S. Aplicação do Projeto de Experimentos para Otimização de uma Inovação Tecnológica. **Revista Gestão Industrial**, v. 04, n. 02, p. 116-132, 2008.

ALVES, R. R. **Análise do Fresamento Frontal de Ferro Fundido Vermicular**. 2010. 99f. Dissertação de Mestrado – Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos.

ASM HANDBOOK COMMITTEE. **Machining**. 9 ed. USA: ASM International, 1989. Vol. 16. 1089p.

ASM HANDBOOK COMMITTEE - **Properties and selection – Irons, Steels, and High-Performance Alloys**. 10 ed. USA: ASM International, 1990a. Vol. 01. 1063p.

ASM HANDBOOK COMMITTEE - **Properties and selection - Nonferrous alloys and special-purpose materials**. 10 ed. USA: ASM International, 1990b. Vol. 2. 3470p.

ASM HANDBOOK COMMITTEE - **Surface Engineering**. 10 ed. USA: ASM International, 1994. Vol. 5. 2535p

ANGUS, H. T. **Cast Iron: Physical and Engineering Properties**. 2. ed. London: Butterworths, 1978. 542p.

AZTERLAN RESEARCH ALIANCE. **Superfine Graphite Gray Cast Iron: High Ultimate Tensile Strength Combined with Low Hardness**. 2013. Disponível em: <<http://www.azterlan.es/es/index.aspx>>. Acesso em: 21 set. 2014.

BARBOSA, P. A. **Furação de Ferros Fundidos Austemperados e Nodular Perlítico**. 2009. 124f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

BARBOSA, P. A.; RABELO, G. B.; GUESSER, W. L.; COSTA, E. S.; MACHADO, A. R. Esforços de Usinagem na Furação de Ferro Fundido Vermicular e Nodular Perlítico. In: **V Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação (COBEF)**. 2009. Belo Horizonte – MG.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. D. **Como Fazer Experimentos – Pesquisa e Desenvolvimento na Ciência e na Indústria**. 2 ed. São Paulo: Editora Unicamp, 2001. 400p.

BATES, C. E. Study examines influences on machinability of iron castings. **Modern Castings**, p. 36-39, out. 1996.

BOEIRA, A. M. G. **Modelagem e Simulação das Forças na Furação com Brocas Helicoidais a Partir de Dados Obtidos no Torneamento de Segmentos Cilíndricos**. 2010.193f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Santa Catarina.

BRINKSMEIER, E. Prediction of tool fracture in drilling. **Annals of the CIRP**, vol. 39, p 97-100, 1990.

CASTILLO, W. J. G. **Furação Profunda de Ferro Fundido Cinzento GG25 com Brocas de Metal Duro com Canais Retos**. 2005. 134f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**. 7. ed. São Paulo: ABM, 2002. 599p.

CHIAVERINI, V. **Tecnologia Mecânica - Processos de Fabricação e Tratamento**. 2. ed. São Paulo: McGraw-Hill Ltda, 1986. Vol. 3. 388p.

COLPAERT, H.; SILVA, A. L. C. **Metalurgia dos Produtos Siderúrgicos Comuns**. 4. ed. São Paulo: Blüsher, 2008. 672p.

CORRÊA, J. G. **Usinabilidade de Aços Inoxidáveis Martensíticos Aplicados na Indústria de Petróleo**. 2014. 212f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DAWSON, S. Compacted graphite iron – A material solution for modern diesel engine cylinder blocks and heads. **China Foundry**, v. 6, p. 241-246, ago. 2009.

DAWSON, S.; HOLLINGER, I.; ROBBINS, M.; DAETH, J.; REUTER, U.; SCHULZ, H. **The Effect of Metallurgical Variables on the Machinability of Compacted Graphite Iron**. Sintercast, 2014. 22 p. Publicação Técnica.

DAWSON, S; INDRA, F. **Compacted Graphite Iron – A New Material for Highly Stressed Cylinder Blocks and Cylinder Heads**. Sintercast, 2012. 13 p. Publicação Técnica.

DAWSON, S; SCHROEDER, T. Compacted Graphite iron Offers a Viable Design Alternative. **Engineered Casting Solutions**, 10p. AFS Spring, 2000.

DINIZ, A. E; MARCONDES, F. C; COPPINI, L.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 4. ed. São Paulo: Art. Liber, 2006. 247p.

DWIVEDI, D. K. Adhesive Wear Behaviour of Cast Aluminium–Silicon Alloys. **Materials and Design**, n. 31, p. 2517 - 2531, 2010.

ELEFTHERIOU, E; BATES, C.E. Effect of Inoculation on Machinability of Gray Cast Iron. **AFS Transactions**, 1999, p. 659-669.

ERTUNC, H. M.; OYSU, C. Drill Wear Monitoring Using Cutting Force Signals. **Mechatronics**. vol. 14, p. 533-548, 2004.

EVANS, R; HOOGENDOORN, F.; PLATT, E. Lubrification & Machining of Compacted Graphite Iron. **Metal Working Division Laboratory**, 2013. 8p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. Edgard Blüsher, São Paulo, 2003. 751p.

GAHR, Z.; HEINZ, K. Microstructure and Wear of Materials. **Elsevier Science Publishers**, Nova York, 1987. 560p.

GASTEL, M.; KONETSCHNY, C.; REUTER, U.; FASEL, C.; SCHULZ, H.; RIEDEL, R.; ORTNER, H. M. Investigation of the Wear Mechanism of Cubic Boron Nitride Tools Used for the Machining of Compacted Graphite Iron and Grey Cast Iron. **International Journal of Refractory Metals and Hard Materials**. vol. 18, p. 287-296, 2000.

GERONIMO, T. M. **Estimativa do Diâmetro de Furos em Processo de Furação Utilizando Sistemas de Inteligência Artificial: Uma Análise Comparativa Entre Diferentes Técnicas**. 2011. 125f. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, Bauru.

GUESSER, W. L. . Ferro Fundido com Grafita Compacta. **Metalurgia & Materiais**. 2002. Disponível em:<<http://www.tupy.com.br/portugues/tecnologia/biblioteca.php>>. Acesso em: 3 set. 2014.

GUESSER, W. L. **Propriedades Mecânicas dos Ferros Fundidos**. 1. ed. São Paulo: Blüsher, 2009. 336p.

GROOVER, M. P. **Fundamentals of Modern Manufacturing**. 3 ed. Danvers: John Wiley & Sons, 2007. 1022p.

HAJJAJI, N.; RENAUDIN, V.; HOUAS, A.; PONS, M. N. Factorial design of experiment (DOE) for parametric exergetic investigation of a steam methane reforming process for hydrogen production. **Chemical Engineering and Processing**, vol.49, p.500–507, 2010.

HUTCHINGS, I. M. **Tribology: friction and wear of Engineering Materials**. 1. ed. Londres: Edward Arnold, 1992. 273p.

JANG, D.Y.; WATKINS, T.R.; KOZACZEK, K.J.; HUBBARD, C.R.; CAVIN, O.B., Surface residual stresses in machined austenitic stainless steel. **Wear**, vol.194, p.168-173, 1996.

KIECKOW, F.; SOUZA, A. J.; PRESTES, R. S.; ROST, B.; BASSANI, A. Avaliação do Desgaste de Brocas Helicoidais de Aço Rápido na Furação do Ferro Fundido. **MM Máquinas e Metais**. Ano 50, nº 573, out. 2013.

KÖNIG, W.; KLOCKE, F. **Fertigungsverfahren: Drehen, Frasen und Bohren**. Berlin: Heidelberg, 2008. 562p.

MACEDO, R. M. P. R. **Aplicação da Metodologia de Planejamento de Experimentos para Formulação de Massas Cerâmicas para Telhas**. 2007. 104f. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; da SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo – SP: Edgard Blucher, 2015. 408p.

MACHADO, A. R.; WALLBANK, J.; PASHBY, I. R.; EZUGWU, E. O. Tool Performance and Chip Control when Machining Ti6Al4V and INCONEL 901 Using High Pressure Coolant Supply. Machining Science and Technology: In **International Journal**, p. 1-12, 1998.

MAGALHÃES, E. F. **Caracterização e Proposição de Métodos Estimativos das Propriedades Monotônicas e Cíclicas dos Ferros Fundidos Nodulares**. 2011. 178f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos.

MARMENTINI, M. M. **Análise do Ferro Fundido Nodular Utilizando Brocas Helicoidais de M2 Nitretadas**. 2009. 128f. Dissertação de Mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba.

MARQUARD, R.; HELFRIED, S.; McDONALD, M. New materials create new possibilities. **Engine Technology International**, vol. 2, p. 58-60, 1998.

MARQUES, F. M. **Avaliação do Desempenho de Brocas Helicoidais de Aço Rápido Revestidas na Usinagem de Ferro Fundido Nodular GGG50**. 2012. 77f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre.

MARWANGA, R. O.; VOIGT, R. C.; COHEN, P. H. Influence of Graphite Morphology and Matrix Struture on Chip Formation During Machining of Gray Irons. **AFS Transactions**. vol. 800, p. 595-607. 1999.

MASSIRER, E. J. **Usinabilidade de Ligas de Ferro Fundido para Aplicação em Cabeçotes de Motor Através de Ensaio de Furação**. 2010. 76f. Dissertação de Mestrado – Universidade do Estado de Santa Catarina, Santa Catarina.

MOCELLIN, F. **Avaliação da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação**. 2002. 97f. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MOCELLIN, F.; MELLERAS, E.; BOEHS, L.; GUESSER, W. Estudo da Usinabilidade do Ferro Fundido Vermicular em Ensaio de Furação. In: **2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2003, Uberlândia.

MOLINARI, A.; NOUARI, M. Modeling of Tool Wear by Diffusion in Metal Cutting. **Wear**, n. 252, p. 135-149, 2002.

MONROE, R W.; BATES, C. E. Some Thermal and Mechanical Properties of Compacted Graphite Iron. **AFS Transactions**, v. 90, p. 615-624, 1982.

MORE, A. S; JIANG, W.; BROWN, W. D.; MALSHE, A. P. Tool Wear and Machining Performance of CBN–TiN Coated Carbide Inserts and PCBN Compact Inserts in Turning AISI 4340 Hardened Steel. **Journal of Materials Processing Technology**, n 180, p. 253 - 262, 2006.

MROCZEK, M.; WARD, J.; GOODRICH, G.; CALLISON, C.; HELM, L. SHTURMAKOV, A; WAY, J. Introduction to Gray Cast Iron Processing. 97p., **AFS**, 2000.

NAVES, V. T. G. **Estudo da Usinabilidade dos Ferros Fundidos Cinzentos Ligados (CrCuSn e CrCuSnMo) e Vermicular Classe 350 no Fresamento Frontal em Alta Velocidade de Corte**. 2009. 145p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

NORDTEST NT MECH 038. **Cutting Fluids for Drilling: Evaluation by Drill Life Test**. Published by NORDTEST, 1997.

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**. 2010, 205f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

PEREIRA, A. A., BOEHS, L.; GUESSER, W. L. O Efeito das Características das Inclusões de Sulfeto de Manganês na Usinabilidade. In: **15º Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica**, 2005, Uberlândia.

REUTER, U.; SCHULZ, H. CGI machinability developments towards production. In: **Design e Machining Workshop** – CGI, 1999.

REUTER, U.; SCHULZ, H.; McDONALD, M. The problems associated with compacted graphite iron manufacturing can be overcome. **Engine Technology International**. p.58-60. 1999

RÖHRIG, K. Niedriglegierte graphitische Gusseisenwerkstoffe – Eigenschaften und Anwendung. **Konstruieren + Giessen**, v.6, n. 3, p. 4 – 21, 1981.

ROTHERY, H. **Estrutura das Ligas de Ferro**. São Paulo: Edgard Blucher Ltda., 1968. 214p.

ROSA, S. N.; DINIZ, A. E.; ANDRADE, C. L. F.; GUESSER, W. L. Analysis of Tool Wear, Surface Roughness and Cutting Power in the Turning Process of Compact Graphite Irons with Different Titanium Content. **J. Braz. Soc. Mech. Sci. & Eng.**, vol.32, n.3, p. 234-240, 2010.

SAHM, A., ABELE, E.; SCHULZ, H.; Machining of Compacted Graphite Iron (CGI). **Material wissenschaft und Werkstofftechnik**, vol. 33, p 501-506, 2002.

SERGEANT, G. F. Effect of small variations in composition on the structure of thin-section compacted graphite iron casting. **BCIRA Journal**, p. 153-159, 1980.

SINTERCAST SUPERMETAL. **Compacted Graphite Iron-Mechanical and Physical Properties for Engine Design**. 2014. 20 p. Publicação Técnica.

SOUZA, A. J.; MATTES, F. B.; MOGNAGA, G. F. Análise dos Esforços de Corte Gerados na Furação de Ferro Fundido DIN GGG50 para Brocas de Metal Duro com Diferentes Microgeometrias. In **VIII Congresso Nacional de Engenharia Mecânica (CONEM)**, 2014. Uberlândia – MG.

SOUZA, C. C.; Valdés, R.A. ; SATO, D. P. V. . Modelo Simplificado para Cálculo da Incerteza da Circularidade e da Cilindricidade. In: **XVIII IMEKO TC4 Symposium and IX Semetro**, 2011, Natal – RN.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II**. 2.ed. Florianópolis-SC: UFSC, 1995. 314p.

STUEWE, L. **Avaliação da Influência do Cromo e Molibdênio na Solidificação e Formação de Rechupes em Ferros Fundidos Cinzentos**. 2008. 227f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Paulo.

TOOL AND MANUFACTURING ENGINEERS HANDBOOK. **Machining**. 4. ed., Society of Manufacturing Engineers, Michigan, 1983, v.1, p. 1494.

TÖNSHOFF, H; SPINTIG, W.; KÖNIG, W.; NEISES, A. Machining of Holes - Developments in Drilling Technology. **Annals of CIRP**, v. 43, p. 551-561, 1994.

TRENT, M. C., WRIGHT, P. K., **Metal Cutting Principles**. 4th edition. Butterworth – Heinemann, USA, 2000.

TSCHÄTSCH, **Applied Machining Technology**. 8. ed. Springer Dordrecht Heidelberg, Nova York, 2009, 398p.

TUPY, S.A. **Perfis de Fundição Contínua**. 2014. 34p. Catálogo Técnico.

VOORT, G. F. V.; ROOSZ, A. Measurement of the interlamellar spacing of pearlite. **METALLOGRAPHY**, v. 17, p. 1-17, 1984.

WARD'S AUTO. **1.2 Billion Vehicles On World's Roads Now, 2 Billion By 2035: Report.** 2014. Disponível em <http://www.greencarreports.com/news/1093560_1-2-billion-vehicles-on-worlds-roads-now-2-billion-by-2035-report>. Acesso em: 16 nov. 2014.

XAVIER, F.; A.; **Estudo dos Mecanismos de Desgaste em Ferramentas de Nitreto de Silício Aplicadas no Torneamento dos Ferros Fundidos Vermicular e Cinzento.** 2009. 267 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.