

MARIANA LANDIM SILVEIRA LIMA

**RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL DOS FERROS
FUNDIDOS NODULAR, VERMICULAR E CINZENTO
EM VÁRIAS CONDIÇÕES DE CORTE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2016

MARIANA LANDIM SILVEIRA LIMA

**RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL DOS FERROS FUNDIDOS
NODULAR, VERMICULAR E CINZENTO EM VÁRIAS CONDIÇÕES DE
CORTE**

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. Dr. Rosemar Batista da Silva

Uberlândia – MG

2016

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

L732r Lima, Mariana Landim Silveira, 1991-
2016 Retificação plana tangencial dos ferros fundidos nodular, vermicular
e cinzento em várias condições de corte / Mariana Landim Silveira Lima.
- 2016.
105 f. : il.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Ferro fundido - Teses. 3.
Retificação e polimento - Teses. I. Silva, Rosemar Batista da, 1974- II.
Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

DEDICATÓRIA

Ao meu pai Ivanderli Ribeiro de Lima (in memorian)

AGRADECIMENTOS

A Deus primeiramente, por estar sempre à frente dos meus planos, guiando os meus passos e me dando forças para prosseguir.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), pela oportunidade concedida.

À CAPES, pela concessão da bolsa de mestrado e às agências financiadoras, CNPq e FAPEMIG pelo apoio financeiro na realização deste projeto.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva pelo apoio, orientação, conhecimento e incentivo, essenciais para a realização deste trabalho.

A todos os membros do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pela amizade e contribuição no desenvolvimento do trabalho, em especial aos mestrandos Deborah de Oliveira, Raphael Lima de Paiva e Victor Rubin, aos doutorandos Antonio Vitor de Mello, Saimon Vendrame, Cleudes Guimarães, Armando Marques e Luciano Antônio Fernandes.

Aos alunos de iniciação científica do LEPU, José Renato S. do Amaral Cardoso, Arnon Jadir R. Alves e Lurian Souza Vieira da Silva pelo auxílio nos ensaios de retificação e preparação das amostras dos ferros fundidos.

À técnica Ângela Andrade pelo auxílio nos ensaios metalográficos e de microdureza.

À empresa Saint- Gobain pelo fornecimento das ferramentas utilizadas nos ensaios.

À empresa Tupy pela doação dos ferros fundidos estudados nesta pesquisa.

À minha família pelo amor incondicional, carinho e por sempre apoiarem as minhas escolhas.

Ao meu noivo Israel, que mesmo distante, se fez presente com todo amor e compreensão.

Às Alines por todo apoio e convivência diária durante estes dois anos.

LIMA, M. L. S. **Retificação plana tangencial dos ferros fundidos nodular, vermicular e cinzento em várias condições de corte.** 2016. 105 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG.

RESUMO

Em um cenário de crescente competitividade do setor industrial global aliado a um mercado consumidor cada vez mais exigente, há um aumento da demanda por novos materiais, que, por sua vez, impulsiona novas pesquisas e avanços tecnológicos no desenvolvimento de novos métodos de fabricação ou no aprimoramento daqueles já existentes. No caso dos ferros fundidos, novas classes também foram desenvolvidas de forma que suas propriedades mecânicas foram aprimoradas, tornando-os ainda mais competitivos em relação aos aços, ampliando as aplicações e, portanto, representando grande ganho econômico para os setores de metalurgia e de fabricação. Com isso, aumenta-se o interesse e criam-se novas oportunidades para estudar estes materiais e identificar como eles respondem em termos de integridade da superfície, desgaste de ferramenta, forças de corte, dentre outros, ao serem processados pelos processos de retificação, por exemplo. Neste contexto, devido à escassez de trabalhos na literatura apresentando resultados de processos de retificação e sobre a retificabilidade entre classes de ferros fundidos, este trabalho visou gerar contribuição científica e tecnológica para o setor metal mecânico por meio de resultados de rugosidade (R_a e R_z) e avaliação da integridade subsuperficial de três classes de ferros fundidos (cinzento, vermicular e nodular) que foram retificados com rebolo de carbeto de silício em diferentes condições de corte. Foram variadas a penetração de trabalho (15 μm e 30 μm), velocidade da mesa (v_w) (5 e 10 m/min) e o tamanho do grão abrasivo médio do rebolo. Os resultados mostraram que rugosidade aumentou com a penetração de trabalho para todos os materiais testados; e os menores valores foram obtidos para ferro fundido cinzento. A rugosidade também se mostrou sensível a variação da velocidade longitudinal da mesa e os menores valores foram obtidos para $v_w = 5$ m/min. Com relação ao tamanho do grão do rebolo, à medida que este diminuiu a rugosidade aumentou para os ferros fundidos cinzento e nodular. Além disso, a queima de retificação foi observada nas superfícies dos ferros fundidos nodular e vermicular após a retificação com o rebolo com grãos menores, contrariando o que normalmente é relatado na literatura. No entanto, pelos resultados de microdureza e imagens obtidas via MEV constatou-se que não houve evidência de danos severos abaixo das superfícies retificadas.

Palavras Chave: retificação, ferro fundido cinzento, ferro fundido vermicular, ferro fundido nodular, rugosidade, microdureza, queima de retificação.

LIMA, M. L. S. **Surface grinding of ductile iron, compacted graphite iron and gray cast iron at different cutting conditions.** 2016. 105 p. Master's Dissertation, Federal University of Uberlandia - MG.

ABSTRACT

In a scenario of increasing competitiveness of the global industrial sector and with a consumer market increasingly demanding, there is an increased demand for new materials and, consequently, possibilities to explore new research and technological advances towards the development of new manufacturing methods or the improvement of existing technologies. In the case of cast irons, new grades of them have been developed so that their mechanical properties have been improved, making them more competitive with steel, expanding the applications and thus represents great economic gain for metallurgy and manufacturing sectors. This increases the interest and creates new opportunities to study these materials and identify how they respond in terms of the surface integrity, tool wear, cutting forces, among others, when machined by grinding operation. In this context, due to the lack of results from grinding of cast irons and studies comparing grindability among several grades of cast irons found in the literature, this work aims to generate scientific and technological contribution to the metallurgical and metal working sector through roughness results (R_a and R_z parameters) and evaluation and analysis of the subsurface integrity of three cast iron grades (gray, compacted graphite and nodular). The machining trials were performed on a surface grinding machine with silicon carbide grinding wheel at different cutting conditions. The input variables were the radial depth of cut (15 and 30 μm), worktable speed, v_w (5 and 10 m/min) and the abrasive grain size of the grinding wheel. The results showed that surface roughness increased with the radial depth of cut for all materials tested; and the lowest values were obtained for gray cast iron. Also, roughness was sensitive to variation of worktable speed and the lowest values were obtained after machining with $v_w = 5$ m/min. With respect to the abrasive grain size, as it decreased the roughness values increased to gray and nodular cast iron grades. Furthermore, grinding burns marks were observed on the surfaces of nodular cast iron and compacted graphite iron grades after grinding the smallest grain size, contrary to what is usually reported in literature. However, no evidence of severe thermal damages below the machined surfaces of all cast iron grades was observed after analyzing the results of hardness and the SEM micrograph images.

Keywords: *grinding, gray cast iron, compacted graphite iron, nodular cast iron, roughness, microhardness, surface burning.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Processos de usinagem por abrasão com destaque para a retificação plana tangencial (SOUZA, 2007).....	4
Figura 2.2 - Zona de contato dos grãos abrasivos na retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).....	5
Figura 2.3 - Formação de cavaco com ferramentas de arestas com ângulos definidos e não definidos (Adaptado de NEUGEBAUER et al., 2011).....	7
Figura 2.4 - Ilustração das etapas de formação do cavaco na retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).....	8
Figura 2.5 - Formação do cavaco para materiais frágeis durante o processo de retificação (Adaptado de MARINESCU et al., 2007).....	10
Figura 2.6 - Ilustração esquemática da formação de cavacos em ferros fundidos (Cohen et al. apud Mocellin et al, 2004).....	11
Figura 2.7 - Diferenças entre a formação de cavacos dos aços e ferros fundidos (Adaptado de KLOCKE; KLÖPPER, 2006).....	12
Figura 2.8 - Parâmetros de corte do processo de retificação (Adaptada de ROWE, 2010).....	13
Figura 2.9 - Rugosidade média após retificação de aço ABNT D6 com óleo solúvel de base vegetal e emulsão em função da velocidade de mergulho (ALVES et al., 2008).....	15
Figura 2.10 - Formas e aplicações dos rebolos (SOUZA, 2007).....	18
Figura 2.11 - Composição do rebolo (MELLO, 2011).....	19
Figura 2.12 - Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (adaptada de STEMMER, 1995).....	21
Figura 2.13 - Mecanismo de dressagem dos rebolos (MACHADO et al., 2009).....	28
Figura 2.14 - Queima de retificação de aspecto visual detectada em um cilindro de ferro fundido cinzento após o processo de retificação centerless (MARINESCU et al., 2004).....	30
Figura 2.15 - Classificação dos fluidos de corte de acordo com DINIZ et al. (2010).....	35
Figura 2.16 - Microestrutura das principais classes de ferros fundidos: a) ferro fundido cinzento, b) ferro fundido nodular, c) ferro fundido branco, d) ferro fundido maleável (CALLISTER, 2002); e) ferro fundido vermicular (HEISSER et al., 2003); f) ferro fundido nodular austemperado (KEOUGH et al., 2010).....	39
Figura 2.17 - Vida de ferramenta para diferentes classes de ferros fundidos vermiculares (DORÉ, 2007).....	42

Figura 2.18 - Desvio de forma após a retificação de ferro fundido nodular com diferentes quantidades de nódulos de grafita e penetrações de trabalho (SOSA et al., 2007).....	45
Figura 2.19 - Rugosidade após a retificação de ferro fundido nodular com diferentes quantidades de nódulos: a) e em função da penetrações de trabalho; b) em função da velocidade da peça (SOSA et al., 2007).....	46
Figura 3.1 - Fluxograma das etapas para o desenvolvimento desta pesquisa.....	48
Figura 3.2 - Retificadora plana tangencial Mello.....	49
Figura 3.3 - Rebолос de SiC montados no cabeçote da retificadora a) 36C46KVK; b) 39C100KVK (Detalhe para a diferença visual do tamanho do grão).....	49
Figura 3.4 - Imagem da montagem para fresamento das amostras de ferros fundidos: a) sistema ferramenta-peça e acessórios, b) detalhe da ferramenta de corte e porta ferramenta.....	51
Figura 3.5 - Microestrutura do ferro fundido cinzento FC 250 a) sem ataque químico, b) com ataque químico Nital 2%.....	52
Figura 3.6 - Microestrutura do ferro fundido vermicular FV 450 a) sem ataque químico, b) com ataque químico Nital 2%.....	53
Figura 3.7 - Microestrutura do ferro fundido nodular FE 45012 a) sem ataque químico, b) com ataque químico Nital 2%.....	54
Figura 3.8 - Avanço transversal da mesa magnética (MELLO et al., 2015).....	56
Figura 3.9 - Montagem do dressador na mesa magnética para operação de dressagem: a) vista geral da montagem, b) detalhes do dressador (cortesia e foto autorizada - Saint Gobain Abrasives)	57
Figura 3.10 - Posicionamento do bocal com o fluido de corte.....	57
Figura 3.11 - Esquema de montagem do rugosímetro para medição da rugosidade na superfície após o processo de retificação.....	59
Figura 3.12 - Regiões de medição da rugosidade na superfície da peça.....	60
Figura 3.13 - Esquema de medição de microdureza com detalhamento das distâncias das indentações nas direções horizontal e vertical.....	61
Figura 3.14 - Microscópio eletrônico de varredura utilizado na pesquisa.....	62
Figura 4.1 - Rugosidade Ra para o ferro fundido cinzento FC 250 em função da velocidade da peça (v_w), granulometria mesh do rebolo e da penetração de trabalho (a_e).....	64
Figura 4.2 - Rugosidade Rz para o ferro fundido cinzento FC 250 em função da velocidadade da peça (v_w), granulometria mesh do rebolo e penetração de trabalho (a_e)....	64

Figura 4.3 - Rugosidade Ra para o ferro fundido vermicular FV 450 em função da velocidade da peça (v_w), granulometria mesh do rebolo e diferentes valores de penetração de trabalho (a_e).....	68
Figura 4.4 - Rugosidade Rz para o ferro fundido vermicular FV 450 em função da velocidade da peça (v_w) e granulometria mesh do rebolo e penetração de trabalho (a_e).....	68
Figura 4.5 - Rugosidade Ra para o ferro fundido nodular FE 45012 em função da velocidade da peça (v_w) e granulometria mesh do rebolo e penetração de trabalho (a_e).....	71
Figura 4.6 - Rugosidade Rz para o ferro fundido nodular FE 45012 em função da velocidade da peça (v_w) e granulometria mesh do rebolo e penetração de trabalho (a_e).....	71
Figura 4.7 - Valores de rugosidade, Ra, para os três ferros fundidos estudados (FFC, FFV e FFN) obtidos após a retificação plana tangencial com rebolo de SiC e em diferentes condições de corte.....	74
Figura 4.8 - Valores de microdureza abaixo da superfície do ferro fundido cinzento FC 250 após a retificação em diferentes condições de corte e rebolos com granas: a) 46; b) 100...	81
Figura 4.9 - Valores de microdureza abaixo da superfície do ferro fundido vermicular FV 450 após a retificação em diferentes condições de corte e rebolos com granas: a) 46; b) 100...	82
Figura 4.10 - Valores de microdureza abaixo da superfície do ferro fundido nodular FE 45012 após a retificação em diferentes condições de corte e rebolos com granas: a) 46; b) 100.	84
Figura 4.11 - Imagens das superfícies do ferro fundido cinzento FC 250 após retificação nas varias condições de corte.	86
Figura 4.12 - Imagens da subsuperfície das amostras de ferro fundido cinzento FC 250 retificadas com: a) $a_e = 15 \mu\text{m}$; b) $a_e = 30 \mu\text{m}$	88
Figura 4.13 - Imagens das superfícies do ferro fundido vermicular FV 450 após retificação nas várias condições de corte.....	89
Figura 4.14 - Amostras de ferro fundido vermicular FV 450 retificadas com rebolo: a) 39C46KVK; b) 39C100KVK.	90
Figura 4.15 - Imagens da subsuperfície das amostras de ferro fundido vermicular FV 450 retificadas com: a) $a_e = 15 \mu\text{m}$; b) $a_e = 30 \mu\text{m}$	91
Figura 4.16 - Imagens das superfícies do ferro fundido nodular FE 45012 após retificação nas várias condições de corte.....	93
Figura 4.17 - Imagens das superfícies de ferro fundido nodular FE 45012 após retificação com rebolo 39C100KVK e penetrações de trabalho: a) 15 μm ; b) 30 μm	94
Figura 4.18 - Imagens da subsuperfície das amostras de ferro fundido nodular FE 45012 retificadas com: a) $a_e = 15 \mu\text{m}$; b) $a_e = 30 \mu\text{m}$	94

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Propriedades dos principais materiais abrasivos empregados em rebolos para retificação (adaptada de MALKIN; GUO, 2008)	24
Tabela 2.2 - Classificação da granulometria em <i>mesh</i> (DINIZ et al., 2010).....	25
Tabela 2.3 - Os principais parâmetros de rugosidade empregados para avaliar superfícies usinadas (MACHADO et al., 2009)	32
Tabela 2.4 - Características dos fluidos (1 - ruim; 2 - bom; 3 - ótimo; 4 - excelente) (IRANI et al., 2005).....	37
Tabela 2.5 - Principais propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, vermiculares e nodulares (Adaptado de Dawson et al., 2014).	41
Tabela 2.6 - Composições químicas do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento (Adaptado de MOCELLIN, 2002).....	43
Tabela 2.7 - Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT P-EB-595 apud CHIAVERINI (2002).....	44
Tabela 3.1 - Composição química das classes de ferros fundidos (cinzento, vermicular e nodular) investigados neste trabalho (TUPY, 2014).....	50
Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos estudados neste trabalho (TUPY, 2014).	50
Tabela 3.3 - Condições de usinagem utilizadas	55
Tabela 3.4 - Variáveis de entrada a dois níveis.....	58
Tabela 3.5 - Planejamento Fatorial 2^4 utilizado para a comparação entre dois materiais por vez.....	58
Tabela 4. 1 – Variação percentual dos parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) obtidos após a retificação do ferro fundido cinzento FC 250 ao aumentar a penetração de trabalho nas diversas condições de corte.....	66
Tabela 4.2 – Variação percentual dos parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) obtidos após a retificação do ferro fundido cinzento FV 450 ao aumentar a penetração de trabalho nas diversas condições de corte.....	69
Tabela 4.3 – Variação percentual dos parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) obtidos após a retificação do ferro fundido nodular FE 45012 ao aumentar a penetração de trabalho nas diversas condições de corte.....	72

Tabela 4.4 - Análise de significância do Planejamento 2^4 para a rugosidade Ra comparando os ferros fundidos FC 250 e FV 450.	77
Tabela 4.5 - Análise de significância do Planejamento 2^4 para a rugosidade Ra comparando os ferros fundidos FV 450 e FE 45012.....	78
Tabela 4.6 Análise de significância do Planejamento 2^4 para a rugosidade Ra comparando os ferros fundidos FC 250 e FE 45012.	78

LISTA DE ABREVIASÕES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_d (μm)	Profundidade de dressagem
a_e (μm)	Penetração de trabalho
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al_2O_3	Óxido de alumínio
a_p (μm)	Profundidade de corte
b_d	Largura de atuação do dressador
CBN	Nitreto cúbico de boro
CGI	<i>Compacted Graphite Iron</i>
D_s (mm)	Diâmetro do rebolo
F_n (N)	Força normal
F_t (N)	Força tangencial
Fe_3C	Cementita
h_{eq} (μm)	Espessura de corte equivalente
HRc	Dureza <i>Rockwell "c"</i>
HV	Dureza Vickers
IF	Índice de friabilidade
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
l_c (μm)	Comprimento de contato rebolo-peça
Mn	Manganês
MnS	Sulfeto de Manganês
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
MQL	Mínima quantidade de lubrificante
MoS_2	Bissulfeto de molibdênio
NBR	Norma Brasileira
n_s	Rotação do rebolo
Ra (μm)	Desvio médio aritmético
Rz (μm)	Altura máxima do perfil
S_d	Avanço por volta do dressador
SiC	Carbeto de silício
SiO_2	Sílica

T_μ (μm)	Profundidade de corte crítica
U_d	Grau de recobrimento de dressagem
v_s (m/s)	Velocidade de corte
v_w (m/min)	Velocidade da peça

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - Introdução	1
CAPÍTULO II - Revisão Bibliográfica	4
2.1 Usinagem com Ferramentas Abrasivas	4
2.1.1 Processo de retificação	5
2.1.2 Mecanismo de formação de cavaco na retificação	7
2.1.3 Parâmetros de corte em retificação plana tangencial	12
2.2 Rebolos	17
2.2.1 Definição	17
2.2.2 Propriedades e composição dos rebolos	18
2.2.3 Material abrasivo	21
2.2.4 Granulometria	24
2.2.5 Dureza de rebolo	25
2.2.6 Estrutura	25
2.2.7 Ligante de rebolo	26
2.2.8 Operação de dressagem do rebolo	27
2.3 Qualidade de superfícies de ferros fundidos retificadas	29
2.3.1 Danos de origem térmica	29
2.3.2 Rugosidade de superfícies retificadas	31
2.4 Fluidos de corte	33
2.4.1 O emprego de fluidos de corte na retificação	33
2.4.2 Classificação dos fluidos de corte	34
2.5.1. Ferro Fundido Cinzento	40
2.5.2. Ferro Fundido Vermicular	40
2.5.3. Ferro Fundido Nodular	43
CAPÍTULO III - Metodologia	47
3.1 Máquina-ferramenta	48
3.2 Rebolos utilizados	49
3.3 Materiais das peças	50
3.4 Parâmetros de corte	54
3.5 Parâmetros de saída	59
3.5.1 Medição da rugosidade	59
3.5.2 Medição da microdureza	60

3.5.2 Análise das superfícies e subsuperfície das peças usinadas	61
CAPÍTULO IV - Resultados e Discussões	63
4.1 Rugosidade	63
4.1.1 Ferro fundido cinzento FC 250	63
4.1.2 Ferro fundido vermicular FV 450	67
4.1.3 Ferro fundido nodular FE 45012.....	70
4.1.4 Comparativo geral da rugosidade entre os ferros fundidos estudados	73
4.2 Microdureza	79
4.2.1 Ferro fundido cinzento FC 250	79
4.2.2 Ferro fundido vermicular FV 450	81
4.2.3 Ferro fundido nodular FE 45012.....	82
4.3 Imagens das superfícies retificadas.....	85
4.3.1 Ferro fundido cinzento FC 250	85
4.3.2 Ferro fundido vermicular FV 450	88
4.3.3 Ferro fundido nodular FE 45012.....	91
CAPÍTULO V - Conclusões e sugestões para trabalhos futuros	95
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	99

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A retificação é um dos processos de usinagem mais antigos que se tem conhecimento. O homem primitivo foi o primeiro a utilizar o processo de retificação ao usar uma pedra para afiar sua ferramenta e obter um melhor “acabamento”. O conhecimento adquirido possibilitou ao homem aprimorar constantemente a forma de usar os abrasivos (NUSSBAUM, 1988). Atualmente, com as exigências de redução de custos e da garantia de melhor qualidade das peças, tem-se empregado técnicas mais modernas de retificação com o intuito de tornar mais eficiente o processo de fabricação (IRANI et al., 2005).

O processo de retificação é considerado um processo de usinagem de precisão, muito empregado na indústria metal mecânica e que vem recebendo cada vez mais atenção dos pesquisadores e empresários da indústria de fabricação devido ao alto valor agregado que ele confere às peças. Com isso, é preciso garantir o controle da operação, evitando prejuízos. O avanço tecnológico permitiu o desenvolvimento de máquinas, abrasivos e rebolos mais modernos e que apresentam um melhor desempenho, permitindo assim que a retificação seja utilizada em substituição de outras operações de usinagem, na obtenção de peças cada vez mais próximas da sua forma final (MAGNANI, 2013). Apesar dos progressos, ainda é considerado um processo complexo, em vista do grande número de variáveis que podem afetar o resultado esperado, bastando apenas o desvio de um único parâmetro para que todo o processo seja comprometido (MALKIN; GUO, 2008).

A maioria dos trabalhos na literatura sobre retificação contempla estudos e investigações realizados em aços, mas ainda são poucos os trabalhos que apresentam resultados e análises em termos de acabamento, microestrutura da peça, forças de corte, desgaste do rebolo, dentre outros, de ensaios realizados em ferros fundidos, principalmente aqueles que são empregados na indústria automobilística, por exemplo. Os ferros fundidos são os principais materiais utilizados para a fabricação de componentes de motores de combustão interna, como blocos, cabeçotes e virabrequins (GUESSER, 2009). A tecnologia de ferros fundidos tem recebido, continuamente, importantes desenvolvimentos, resultantes

de necessidades nas áreas de aplicação ou ainda de redução de custos, o que gera a atualização tecnológica de um material bastante comum na indústria automobilística (VIDAL, 2013).

Segundo dados da ANFAVEA (2015), nos últimos cinco anos foram produzidos no Brasil, em média, 3.220.000 (três milhões e duzentos e vinte mil) veículos, incluindo automóveis, comerciais leves, caminhões e ônibus. Para cada automóvel é necessário um motor de combustão interna e, considerando que os automóveis com o uso necessitam de reparos e manutenção, o número de motores produzidos anualmente excede ao número de veículos produzidos. Além disso, ao chegarem ao fim da vida, muitos motores dos automóveis devem ser restaurados, dependendo do uso e desgaste das peças. Em geral, este limite é determinado, sobretudo, pela quantidade de material que pode ser retirado do eixo virabrequim, um dos principais componentes que transmitem potência. Uma parcela destes veículos possui eixos virabrequim e de comando de válvulas que são fabricados em ferros fundidos (principalmente da classe nodular sem tratamento térmico). Este procedimento é popularmente conhecido como “retífica”. Embora a retífica de um motor envolva vários processos de usinagem em diferentes componentes, apenas os eixos virabrequim e comando de válvulas são usinados pelo processo de retificação cilíndrica. As laterais das bielas em geral são também retificadas pelo processo de retificação plana frontal.

Embora a indústria automobilística absorva grande parte dos componentes produzidos em ferros fundidos, constata-se que ainda são escassas as informações técnicas e científicas sobre a influência de parâmetros de corte do processo de retificação na qualidade das superfícies usinadas de ferros fundidos. Neste contexto, esta pesquisa visou avaliar a rugosidade (R_a e R_z) e integridade subsuperficial de três classes de ferros fundidos (cinzento, vermicular e nodular) e realizar comparações entre eles após o processo de retificação plana tangencial. Para isso, foram variadas a penetração de trabalho ($15 \mu m$ e $30 \mu m$), a velocidade da mesa (v_w) (5 e 10 m/min) e o tamanho do grão abrasivo médio do rebolo. Os resultados gerados desta pesquisa poderão ser utilizados por usuários de usinagem que realizam retificação destes materiais e, consequentemente permitir o aumento a produção do setor metal mecânico. Portanto, este trabalho foi dividido em seis capítulos a saber:

CAPÍTULO II – contém a revisão bibliográfica que contempla os tópicos relacionados ao processo de retificação, propriedades dos rebolos, principais parâmetros de corte envolvidos no processo, formação de cavacos, fluidos de corte para retificação,

propriedades e aplicações dos principais ferros fundidos, como também aborda os principais aspectos para avaliação da qualidade de superfícies usinadas.

CAPÍTULO III - descreve o procedimento experimental empregado para a condução desta pesquisa, equipamentos e materiais utilizados, tanto para a preparação das amostras, quanto para realização dos ensaios de retificação. Além disso, descreve também os parâmetros de corte utilizados, bem como as técnicas e instrumentos utilizados para caracterização dos corpos de prova. São apresentados ainda os instrumentos de medição e detalhes da metodologia empregada para a obtenção dos resultados e avaliação dos parâmetros de saída;

CAPÍTULO IV - neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos no capítulo anterior;

CAPÍTULO V – neste capítulo são apresentadas as conclusões retiradas desta pesquisa e também as sugestões para trabalhos futuros.

Por fim, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nessa sessão será apresentada a revisão bibliográfica abordando os tópicos relacionados com o escopo desta pesquisa, que envolve a usinagem com ferramentas abrasivas utilizadas no processo de retificação, as propriedades dos rebolos, aplicações, qualidade de superfícies usinadas (acabamento e integridade subsuperficial), fluidos de corte e, por fim, uma breve revisão sobre as classes e propriedades dos principais ferros fundidos.

2.1 Usinagem com Ferramentas Abrasivas

Os processos de usinagem com ferramentas abrasivas (cujas as arestas não possuem geometria) representam grande importância para indústria metal mecânica, pois conferem às peças usinadas tolerâncias dimensionais e geométricas mais apertadas que aquelas proporcionadas pelos processos convencionais com ferramenta de geometria definida. Na Figura 2.1 são mostrados alguns processos de usinagem por abrasão, com destaque para aquele que será utilizado neste estudo.

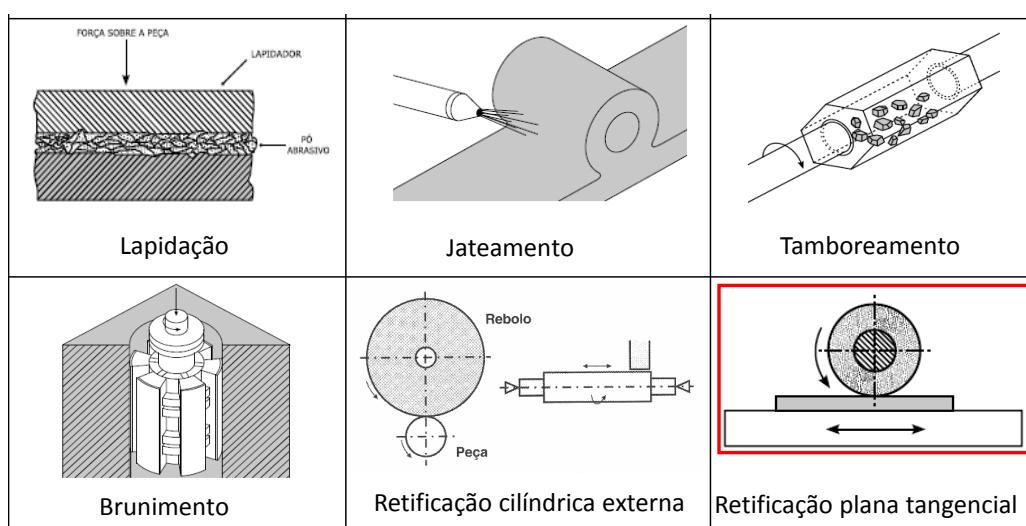


Figura 2.2 – Processos de usinagem por abrasão com destaque para a retificação plana tangencial (SOUZA, 2007).

2.1.1 Processo de retificação

Por retificação entende-se como o processo de usinagem mecânica em que a remoção de cavaco do material é estabelecida pelo contato entre a peça e uma ferramenta abrasiva, denominada rebolo, que gira em alta rotação (MALKIN; GUO, 2008) e resulta em altas velocidades de corte em relação aos processos convencionais de usinagem com ferramenta de geometria definida (normalmente acima de 30 m/s). Os rebolos são constituídos por aglomerantes e grãos abrasivos com múltiplas arestas (multicortantes) que removem pequenas quantidades de material, motivo pelo qual o acabamento superficial da peça na retificação é melhor que o obtido nos demais processos de usinagem, como por exemplo, torneamento e fresamento (MARINESCU et al., 2007). Diferentemente das operações executadas com ferramentas de geometria definida, no processo de retificação o material da peça é removido por meio da ação de grãos abrasivos, os quais são partículas não-metálicas, muito duras, com arestas afiadas e que apresentam forma e orientação irregular (MARINESCU et al., 2007). A ilustração esquemática do contato dos grãos abrasivos presentes em um rebolo e em contato com a peça pode ser observada na Fig. 2.2.

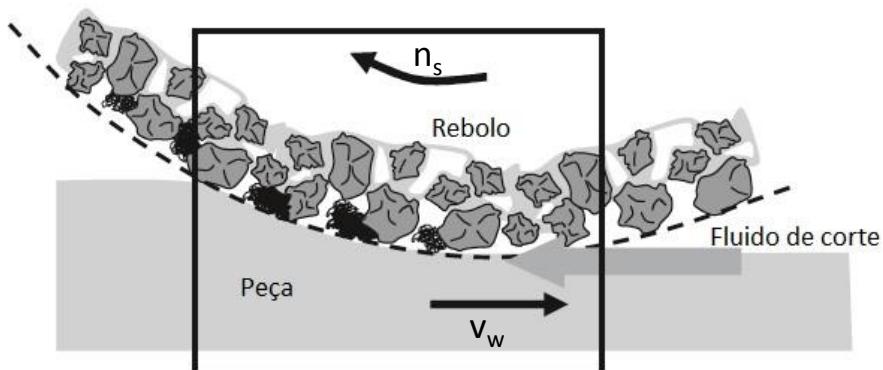


Figura 2.2 - Zona de contato dos grãos abrasivos na retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).

O processo de retificação é o carro chefe destes processos e assim ocupa posição de destaque no setor de manufatura e dentre as principais vantagens são obtenção de tolerâncias estreitas (IT3-IT6) e melhores acabamentos (menor rugosidade) que, dependendo das condições corte, podem variar entre 0,02 e 1,6 μm (MALKIN; GUO; 2008). Além disso, a maioria das aplicações do processo de retificação é na usinagem de materiais de média a elevada dureza ($> 42 \text{ HRc}$) ou ainda de materiais frágeis que não podem ser usinados pelos processos convencionais com ferramentas de geometria definida, como o

torneamento, furação, fresamento, por exemplo (KLOCKE, 2009). Este processo ainda visa conferir maior exatidão dimensional em peças que passaram por outros processos de usinagem como também proporcionar propriedades superficiais que geralmente não poderiam ser feitas por outros processos convencionais ou não convencionais de usinagem (SHAW, 1996).

A sua aplicação também é destinada a usinagem de materiais de média e elevada dureza que encontram limitações em processos como o torneamento e fresamento, por exemplo. Na maioria das vezes, este processo é empregado como a última operação na sequência de fabricação de uma peça e, assim, requer um controle rigoroso de parâmetros de corte como a velocidade do rebolo (v_s), velocidade da peça (v_w), rebolo (tipo do abrasivo, estrutura e dureza), estabilidade da máquina-ferramenta e fluido de corte (vazão, forma de aplicação, posicionamento do bocal), dentre outros, para que se alcance as tolerâncias desejadas. Além da preocupação com as tolerâncias dimensionais, o controle das condições operacionais é importante para evitar problemas com a integridade das peças, alterações metalúrgicas, perda da dureza e trincas, dentre outros, durante a usinagem (GÂMBARO, 2006).

Por outro lado, a retificação é considerada um processo pouco eficiente, pois nela há um elevado consumo de energia específica para remover um pequeno volume de material, ou seja, baixa taxa de remoção de material, quando comparada às operações com ferramentas de geometria definida (MACHADO et al., 2009).

Outros problemas comuns decorrentes do processo de retificação são citados por Malkin e Guo (2008):

- As peças são suscetíveis a danos de origem térmica e mecânica quando os parâmetros de corte não são corretamente ajustados. O principal dano de origem térmica é a queima da peça (ou queima de retificação), além de outras alterações microestruturais. Além disso, pode haver formação de trincas perpendiculares às marcas de avanço do rebolo o que pode comprometer a funcionalidade das peças; (Mais detalhes sobre estes problemas oriundos de retificação serão apresentados na sessão 2.3)
- Por ser geralmente um dos últimos processos na cadeia de produção de componentes metálicos, erros na retificação podem comprometer todo trabalho acumulado na peça;
- É normalmente o processo de fabricação de custo mais elevado em relação ao fresamento, torneamento e furação, por exemplo, pois as penetrações de trabalho

são na ordem de micrometros (10 e 1000 vezes menores que aquelas empregadas no fresamento, por exemplo) o que prolonga o tempo de usinagem, hora máquina e exige presença do operador próximo a máquina por um tempo mais longo.

Na Figura 2.3 são ilustradas as principais diferenças entre o processo de remoção de material de uma ferramenta com aresta de geometria definida e um grão abrasivo com aresta de geometria não definida. Desta figura observa-se que, diferentemente da aresta de corte de uma ferramenta de geometria convencional, a aresta do grão abrasivo em geral assume características com ângulos de saída negativo, espessura de corte que varia com as sucessivas voltas do rebolo (uma aresta afiada em uma volta do rebolo pode ter perdido a ação cortante na volta seguinte). Com isso, a alteração constante nas etapas de formação do cavaco pode interferir no acabamento, topografia ou ainda nas dimensões da peça.

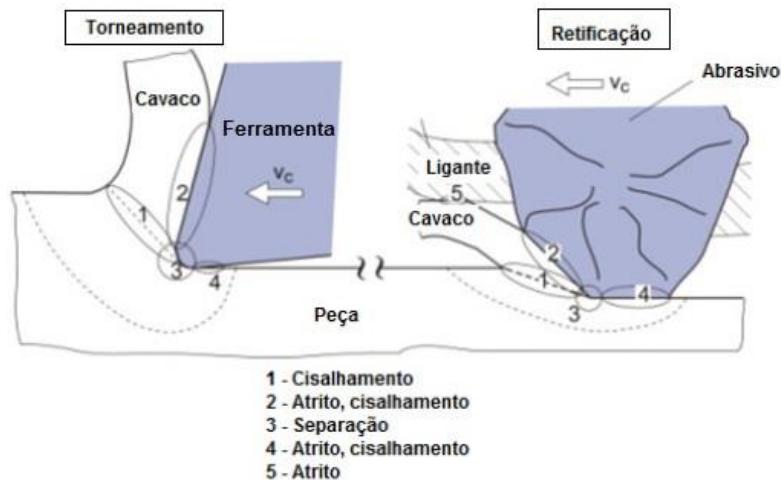


Figura 2.3 - Formação de cavaco com ferramentas de arestas com ângulos definidos e não definidos (Adaptado de NEUGEBAUER et al., 2011).

2.1.2 Mecanismo de formação de cavaco na retificação

De acordo com Marinescu et al. (2007), a investigação dos mecanismos de remoção de material durante o processo de retificação exige mais atenção que em outros processos por envolver um número maior de parâmetros a serem controlados, como aqueles já citados anteriormente, levando alguns autores a caracterizá-lo como um processo complexo.

Para auxiliar no entendimento da formação do cavaco, Marinescu et al. (2007) dividiram a formação do cavaco no processo de retificação em três fases ou regiões (Fig. 2.4) que serão comentadas a seguir.

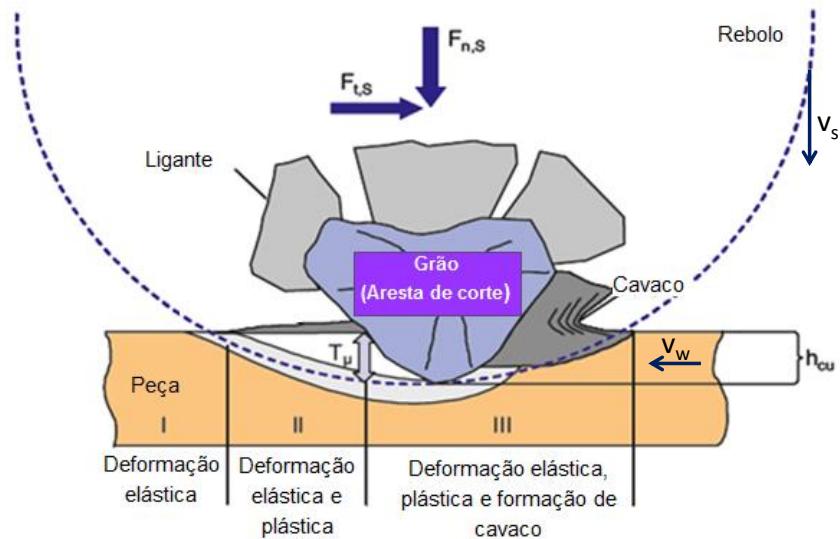


Figura 2.4 - Ilustração das etapas de formação do cavaco na retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).

- Região I: ao primeiro contato do grão com a peça, inicia-se a fase de deformação, no qual ocorre somente à deformação elástica do material à medida que o grão passa pela superfície da peça;
- Região II: à medida que o grão abrasivo penetra na peça, a espessura de cavaco não deformado (h_{cu}) também aumenta, de forma que as tensões compressivas se elevam. Com isso o material da peça é empurrado à frente e para as laterais do grão abrasivo, promovendo assim, a deformação plástica em uma porção do material. Esta etapa também é referida em retificação como riscamento. Assim, à medida que os grãos adentram mais na peça, maior será a área de contato e com isso maior atrito será gerado. Com as forças de atrito sendo elevadas, maiores serão as taxas de deformações e assim, grande parte da energia continua sendo dissipada por deformações, atrito e calor;
- Região III: nesta região, a aresta de corte do grão atinge um valor de penetração crítica, que por consequência gera uma pressão também crítica, definida como a pressão mínima para que ocorra a ruptura do material. Neste momento inicia-se a formação do cavaco e grande parte da energia passa a ser consumida no cisalhamento do material. Marinescu et al. (2007) afirmam que esta situação somente ocorre se a aresta de corte do grão penetra na peça a uma profundidade

onde a espessura de cavaco não deformado h_{cu} , seja igual à profundidade de corte crítica $T\mu$.

Considerando que existem milhares de grãos na periferia de um rebolo e que somente alguns estão em contato com a peça, os aspectos relacionados com a formação do cavaco devem ser extrapolados para estes grãos que estão em um curto período de tempo em contato com a peça (JACKSON; DAVIM, 2011). E neste sentido é importante fazer uma breve descrição dos comportamentos dos grãos abrasivos durante a usinagem.

Como já comentado anteriormente, a geometria irregular dos grãos, altura e orientação aleatória dentro do rebolo fazem com que apenas uma pequena porcentagem deles seja capaz de usinhar, enquanto outros podem apenas atritam-se e/ou riscar a superfície da peça. Se algumas arestas dos grãos não estão afiadas (se os grãos estão arredondados ou com forma achatada, por exemplo), maior será a área de contato com a superfície da peça e assim grande gradiente de calor é gerado (KLOCKE, 2009). Em função das características refratárias dos abrasivos convencionais e pequenas seções dos cavacos gerados, este calor será em sua grande parte transferido para peça, diferentemente do que ocorre com processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, como o fresamento, por exemplo, em que grande parte do calor é transferida para o cavaco (MARINESCU et al., 2007; KLOCKE, 2009). Outro aspecto está relacionado com os valores de velocidade do rebolo que são bem superiores aos empregados no fresamento, por exemplo. Uma velocidade típica da maioria das máquinas de retificação é em torno de 30m/s, mas em certas máquinas mais modernas esta velocidade pode alcançar 300 m/s. Já no torneamento ou fresamento, estas velocidades estão na faixa de 40 a 250 m/min utilizando ferramentas de metal duro indicadas para aços e ferros fundidos (0,7 a 4,2 m/s).

É importante destacar também que, além da geometria do grão, o tipo de material da peça também afeta o processo de formação do cavaco e assim o processo de remoção é classificado para materiais dúcteis e para materiais frágeis. Entretanto, como o foco deste trabalho é investigar a usinabilidade ou aqui chamada de retificabilidade entre as diferentes classes de ferros fundidos (dos quais duas classes são consideradas materiais frágeis) e observar o comportamento da rugosidade, microdureza e observar as superfícies das peças após a retificação, a seguir serão descritas as características da formação de cavaco de materiais frágeis.

O processo de remoção de material para materiais dúcteis e materiais frágeis possui certa semelhança em relação às fases de formação do cavaco, porém, devido à baixa ductilidade dos materiais frágeis, a região de deformação elástica e plástica é bem pequena.

Desta forma, ao invés de inicialmente apenas se deformar com a penetração da aresta de corte, tais materiais se fraturam, resultando em lascamento e formação de cavacos fragmentados (MARINESCU et al., 2007). A ilustração esquemática da formação de cavaco para materiais frágeis é apresentada na Fig. 2.5.

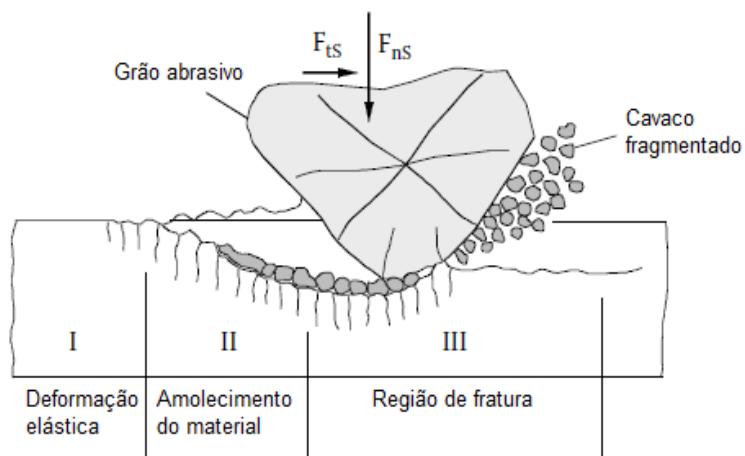


Figura 2.5 - Formação do cavaco para materiais frágeis durante o processo de retificação (Adaptado de MARINESCU et al., 2007).

De acordo com Nussbaum (1988), os cavacos produzidos durante a operação alojam-se nos poros do rebolo e podem, em grande parte, serem removidos pela ação do jato do fluido que é direcionado contra o rebolo e também sobre a peça sendo usinada. Contudo, se o cavaco atinge uma dimensão relativamente maior do que o poro do rebolo, ele será comprimido contra este, e assim irá incrustar-se na superfície do rebolo com tal força que o jato do líquido refrigerante não terá condições para removê-lo. Isto pode provocar vários problemas tanto para o rebolo quanto para a peça, especialmente perda do poder de corte, aumento da rugosidade, queimaduras, entre outros.

A formação de cavacos nos ferros fundidos é diretamente afetada pela forma com que o carbono livre (grafita) se apresenta, que possui pouca resistência mecânica e gera descontinuidades e efeitos de entalhe na matriz, auxiliando o processo de remoção de material. Na Figura 2.6 é ilustrado o mecanismo de formação de cavacos para ferros fundidos cínteztos e nodulares.

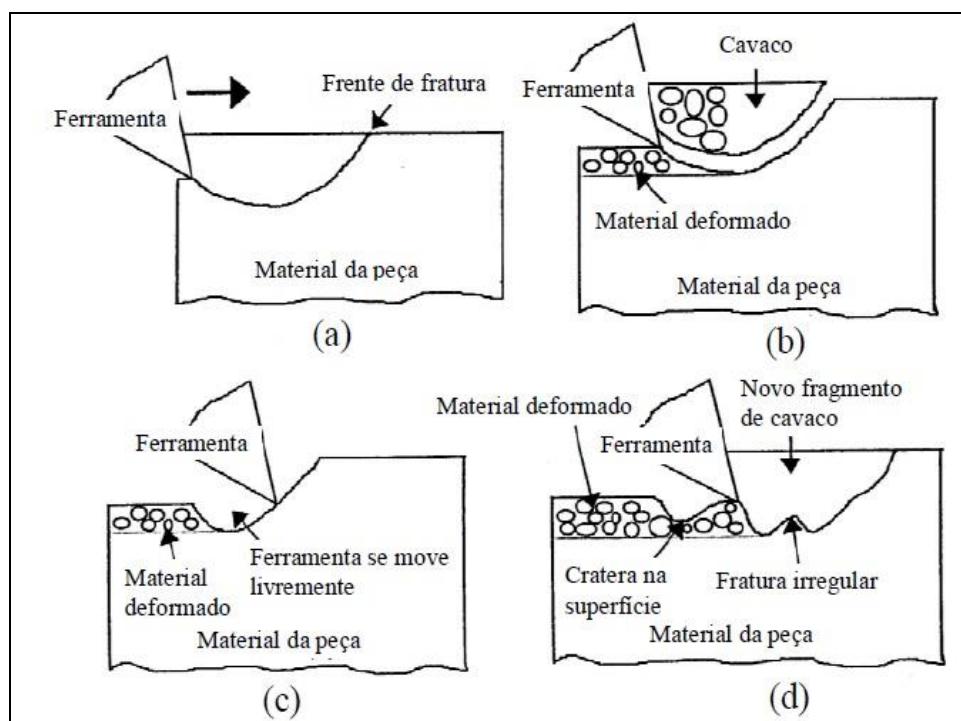


Figura 2.6 - Ilustração esquemática da formação de cavacos em ferros fundidos (Cohen et al. apud Mocellin et al, 2004).

Particularmente sobre o processo de formação de cavaco na usinagem de ferro fundido nodular (considerado um material de comportamento mecânico relativamente dúctil em relação aos outros ferros fundidos), é importante destacar algumas características que fazem deste material um substituto potencial do aço fundido em aplicações que são exigidas propriedades de alta resistência e boa tenacidade (por exemplo, em montantes de suspensão de automóveis). Em contrapartida com usinagem do aço, ocorrem menores solicitações mecânicas e, respectivamente, menores solicitações térmicas. Porém, estas solicitações são distribuídas em uma pequena zona e oscilam com a frequência da segmentação dos cavacos (KLOCKE e KLOPPER, 2006). Na Figura 2.7 são apresentadas algumas diferenças entre a formação de cavacos dos aços e dos ferros fundidos no processo de torneamento.

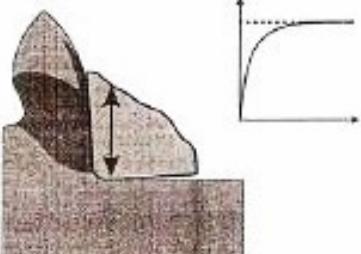
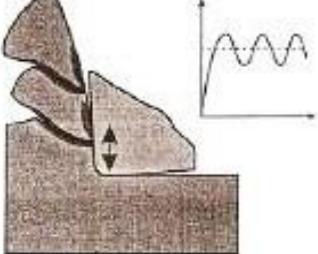
FORMAÇÃO DE CAVACO CONTÍNUOS	FORMAÇÃO DE CAVACOS NÃO-CONTÍNUOS
<p>Observada durante a usinagem de materiais dúcteis (aços comum ao carbono):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Processo de cisalhamento contínuo; • Solicitação térmica e mecânica uniforme; • Transmissão de força através da zona de cisalhamento e distribuição sobre toda a zona de contato do cavaco. 	<p>Observada durante a usinagem de ferros fundidos nodulares:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Compressões descontínuas e processo de formação de trincas (grafita: defeito interno); • Solicitação mecânica oscilante; • Pouca transmissão de força através da zona de cisalhamento e, portanto, a região de contato do cavaco é pequena.
	

Figura 2.7 - Diferenças entre a formação de cavacos dos aços e ferros fundidos (Adaptado de KLOCKE; KLÖPPER, 2006).

2.1.3 Parâmetros de corte em retificação plana tangencial

A retificação é um processo complexo que envolve diversas variáveis que podem influenciar no desempenho da operação. Dessa forma, é importante buscar a melhor combinação dos parâmetros de corte, tornando o processo de retificação mais eficiente (Durgumahanti et al., 2010). Youssef e El Hofy (2008) afirmam ainda que as variáveis do processo de retificação devem ser bem compreendidas, inclusive a seleção correta do rebolo de forma a conciliar os requisitos de qualidade das peças com produtividade. Como o foco deste trabalho é realizar ensaios em retificação plana tangencial, serão apresentadas a seguir as principais grandezas físicas em usinagem relativas a este processo que permitem facilitar a compreensão de alguns fenômenos característicos.

Na Figura 2.8 são apresentadas esquematicamente as principais grandezas físicas em usinagem para os processos de retificação plana:

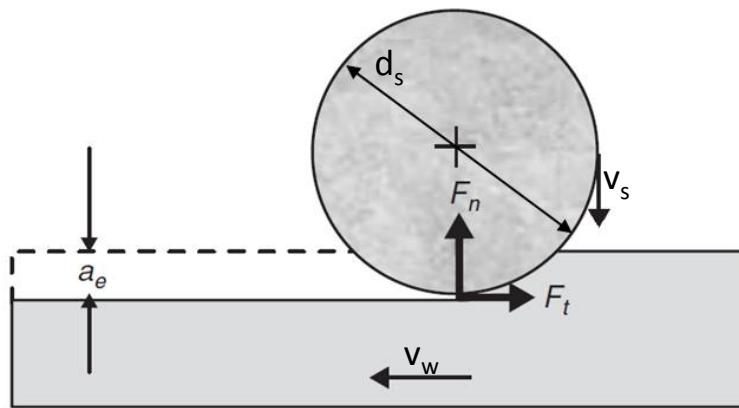


Figura 2.8 - Parâmetros de corte do processo de retificação (Adaptada de ROWE, 2010).

A seguir serão apresentados os conceitos e características de cada uma das principais grandezas físicas em retificação:

- Velocidade de corte (v_s): é representada pelo deslocamento de um ponto (grão) na superfície de corte do rebolo em certo espaço de tempo. De acordo Bianchi et al. (1997), ao aumentar a velocidade de corte aumenta-se também a frequência de contato rebolo-peça e, então, um mesmo grão abrasivo passa a remover um menor volume de cavacos. Com isso, o número de grãos ativos se torna maior. A espessura dos cavacos removidos é menor, o que contribui para a redução nas forças de corte, melhoria da rugosidade da peça e redução da taxa de desgaste do rebolo, pela menor solicitação sobre cada grão abrasivo. Entretanto, pelo aumento da intensidade de contato dos grãos com a peça pode ocorrer uma elevação da temperatura na região de contato entre grãos e peça que, se não for amenizado pelo poder refrigerante de um fluido de corte pode ocasionar a queima de retificação. A velocidade de corte pode ser determinada em (m/s) através da Equação (2.1):

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (2.1)$$

Onde:

n_s : rotação do rebolo (rpm)

d_s : diâmetro externo do rebolo (mm)

- Velocidade periférica da peça (v_w): também conhecida como apenas velocidade da peça é a velocidade tangencial considerando um ponto de contato com o rebolo.

Para o processo de retificação plana, a velocidade da peça coincide com a velocidade da mesa.

A velocidade da peça também altera a taxa de remoção de material, pois assim como a velocidade de corte, determina a espessura do cavaco ou ainda se relaciona com a espessura de corte equivalente. Assim, ao alterar a espessura do cavaco, as condições tribológicas em retificação são também alteradas que por sua vez, influenciam nas forças de corte. O efeito da velocidade da peça é o contrário da velocidade de corte, assim ao reduzir a velocidade da peça haverá um aumento da espessura de corte e, por conseguinte, das forças de retificação. Quando as forças de retificação se elevam o rebolo estará mais propenso a perder seus grãos e, consequentemente, irá sofrer maior desgaste, e, portanto, diminuindo a sua vida. Ao contrário, quando se reduz a velocidade da peça, a espessura do cavaco também será reduzida, portanto diminuindo os esforços de corte e, consequentemente, aumentando a vida do rebolo (MARINESCU et al., 2004). Porém, é importante ressaltar que a velocidade da mesa deverá ser selecionada em função do material da peça, material e estrutura do rebolo e também das condições da máquina ferramenta buscando sempre atender as tolerâncias dimensionais e geométricas exigidas.

A prática em retificação demonstra que a combinação de baixos valores de velocidade da peça com valores mais elevados de penetração de trabalho induz menores impactos dos grãos abrasivos do rebolo sobre a peça, o que promove a geração de cavacos alongados. Com isso, o tempo de contato rebolo/peça é mais longo e o número de grãos ativos é maior, o que promove menor força por grão abrasivo à medida que o rebolo se desloca sobre a peça. O tempo de contato dos grãos do rebolo com a peça será prolongado, levando a uma maior taxa de desgaste. Com isso, as forças de retificação (componentes normal e tangencial) tendem a aumentar com a progressão da usinagem, pelo desgaste das arestas dos abrasivos. Quando ocorre o contrário, o emprego de maiores velocidades da peça com uma menor penetração de trabalho há um aumento do impacto dos grãos abrasivos sobre a peça, favorecendo a formação de cavacos mais curtos. A força suportada por cada grão abrasivo se torna maior, pois o tempo de contato grão/peça é menor e, com isso, o número de grãos ativos também é menor. Portanto, os grãos abrasivos tendem a se desprender da superfície do rebolo, gerando uma constante renovação dos grãos, mas por outro lado acelerando o desgaste rebolo (BIANCHI et al., 1997).

Alves et al. (2008) avaliaram a integridade superficial de aço endurecido ABNT D6 (62 HRc) após ensaios de retificação cilíndrica externa com rebolo de CBN

vitrificado. Estes autores variaram a velocidade de mergulho (0,25 a 2 mm/min) e o fluido de corte (solução com óleo vegetal e emulsão) e observaram que o acabamento piorou com o aumento da velocidade de avanço, como esperado (Fig. 2.9). Maiores taxas de remoção de material implicam em maior quantidade de grãos abrasivos em contato com a peça e, consequentemente, em maiores deformações que, por sua vez, refletem no acabamento. Eles relataram ainda que não houve danos na microestrutura da peça e, em geral, o óleo solúvel de base vegetal DMS 3200 F1 resultou em piores valores de rugosidade em relação à emulsão Agecool 939/B. Segundo os autores, esse resultado foi atribuído à maior capacidade refrigerante da emulsão que garantiu menor variação dimensional na peça e que também refletiu positivamente no acabamento.

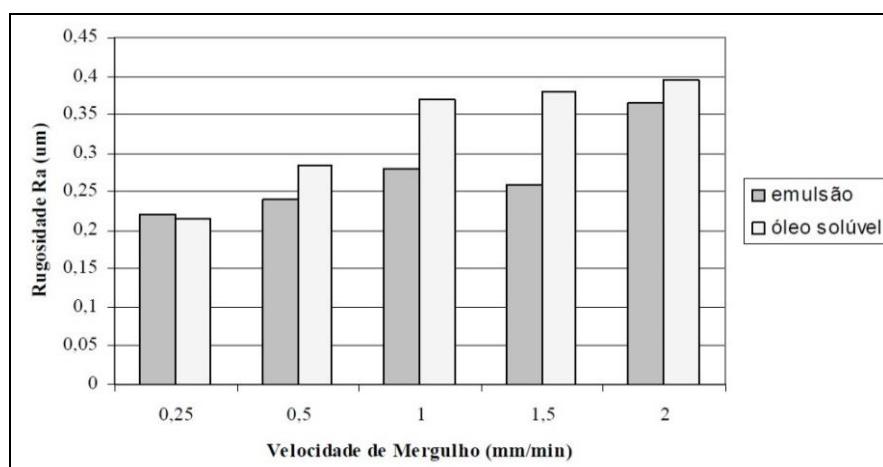


Figura 2.9 - Rugosidade média após retificação de aço ABNT D6 com óleo solúvel de base vegetal e emulsão em função da velocidade de mergulho (ALVES et al., 2008).

- Profundidade de usinagem (a_p): é a profundidade axial do rebolo na peça ou a largura de penetração da ferramenta na peça e é medida na direção perpendicular ao plano de trabalho. Ele é normalmente selecionado de acordo com a largura do rebolo, sendo que o indicado é que a profundidade varie de 1/4 a 4/5 do valor da largura do rebolo (MACHADO et al., 2011);
- Penetração de trabalho (a_e): este parâmetro representa o quanto o rebolo penetra na peça em relação ao plano de trabalho (μm) e é medida perpendicularmente à direção de avanço da peça ou rebolo. Segundo Bianchi et al. (1997), a deflexão entre o rebolo e a peça aumenta quando a área de contato e, consequentemente, o número de grãos em contato com a peça aumentam. Dessa forma, um aumento na

penetração de trabalho provoca um aumento no número de grãos ativos e no tempo de contato. Com isso, cada grão abrasivo será responsável por remover uma menor quantidade de material e os cavacos serão mais finos e alongados. Nestas condições, haverá uma maior parcela de atrito e riscamento, desde o início da formação do cavaco até a sua expulsão, o que resultará na elevação da temperatura na região de corte, das forças de retificação e, portanto, levando à deterioração do acabamento da peça. Vale ressaltar que a penetração de trabalho real será sempre menor que aquela ajustada na máquina devido a fatores como o desgaste do rebolo, deflexão do sistema, expansão térmica do rebolo e da peça (MARINESCU et al., 2004);

- Comprimento de contato rebolo-peça (l_c): é definido como a extensão média de grãos ativos que entram em contato com a peça durante a operação de retificação. Este parâmetro pode ser determinado com base na penetração de trabalho e diâmetro do rebolo e é expressa pela Equação (2.2).

$$l_c = \sqrt{a_e \cdot d_s} \quad (2.2)$$

Onde:

a_e : penetração de trabalho

d_s : diâmetro do rebolo

O conhecimento do comprimento de contato rebolo-peça é importante, pois servirá como indicativo da integridade superficial da peça (QI; ROWE; MILLS, 1997). De acordo com Souza (2007), quanto maior for a área de contato rebolo-peça, mais difícil será remover o grão do rebolo, pois dessa forma, mais grãos estarão em contato com a peça, portanto, reduzindo o esforço e a pressão suportados por cada um deles durante o processo. Conforme se pode observar também da Eq. (2.2), a área de contato aumenta com a penetração de trabalho, por isso, os valores de a_e não podem ser muito elevados como nos processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, uma vez que o aumento do a_e resulta em um número maior de grãos em contato com a superfície da peça. Assim, o atrito entre os grãos e a peça será maior o que, consequentemente, provocará aumento na geração de calor na zona de corte. Conforme será comentado em sessão específica nesta pesquisa, esta

geração de calor é a responsável pelos principais problemas que podem ocorrer em superfícies retificadas;

- Espessura de corte equivalente (h_{eq}): é o parâmetro que representa teoricamente a espessura de material que os grãos abrasivos removem da peça (Fig. 2.4) e pode ser calculada pela Equação (2.3):

$$h_{eq} = a_e \cdot \frac{v_w}{v_s} \quad (2.3)$$

O aumento na espessura de corte equivalente, seja pelo aumento de “ a_e ” ou de “ v_w ”, ou ainda pela diminuição de “ v_s ”, eleva as forças de corte e também dos valores de rugosidade da peça, como também reduz a vida do rebolo. Por isso é sempre recomendado empregar rebolos cujos ligantes suportem altas velocidades de corte, pois, teoricamente, quanto maior a velocidade do rebolo, maior a sua vida, melhor a rugosidade e menores os esforços de corte (SOUZA, 2007).

2.2 Rebolos

Neste tópico será apresentada uma breve revisão sobre os rebolos abrasivos e seus elementos, como também as suas propriedades.

2.2.1 Definição

O rebolo é a ferramenta de corte constituída de grãos abrasivos não metálicos, de elevada dureza, os quais são unidos por ligantes (vitrificados ou resinóide). Esses grãos possuem arestas de corte de geometria não definida, com orientação irregular, e são responsáveis pela remoção de material. São vários os tipos de grãos abrasivos que compõem um rebolo, como também são vários os tamanhos.

Os tipos e formas de rebolos disponíveis comercialmente são selecionados em função da aplicação, operação e material da peça a ser usinado. Na Figura. 2.10 são apresentadas esquematicamente as principais formas de rebolos com as suas respectivas aplicações.

Forma	Aplicação	Forma	Aplicação
	Afiação de brocas e ferramentas diversas.		Afiação de fresas frontais; fresas de topo; fresas cilíndricas; machos.
	Peças perfiladas.		Afiação de fresas angulares; rebaixadores; fresas frontais; fresas de topo.
	Afiação de machos, brocas.		Retificação plana de ataque frontal no faceamento de superfícies.
	Afiação de fresas de forma, fresas cilíndricas, fresas frontais, fresas de disco.		Ferramenta de corte e estampos em geral.

Figura 2.10 - Formas e aplicações dos rebolos (SOUZA, 2007).

2.2.2 Propriedades e composição dos rebolos

Os grãos abrasivos que compõem o rebolo devem ser constituídos de materiais cristalinos, com dureza superior ao material a ser retificado. Esses materiais são frágeis e quebram ou se rompem ao longo do processo de usinagem e assim dão origem a novas arestas afiadas.

Além dos grãos abrasivos e do ligante (liga aglutinante), os rebolos possuem poros, como é mostrado na Fig. 2.11. Os poros permitem o alojamento do fluido de corte e cavacos, o que pode formar uma nova camada de material e entrar em contato com a peça a ser retificada. Dessa forma, o desempenho de um rebolo, depende do tipo e tamanho do grão abrasivo, bem como das propriedades do ligante e quantidade de poros presente (MALKIN; GUO, 2008).

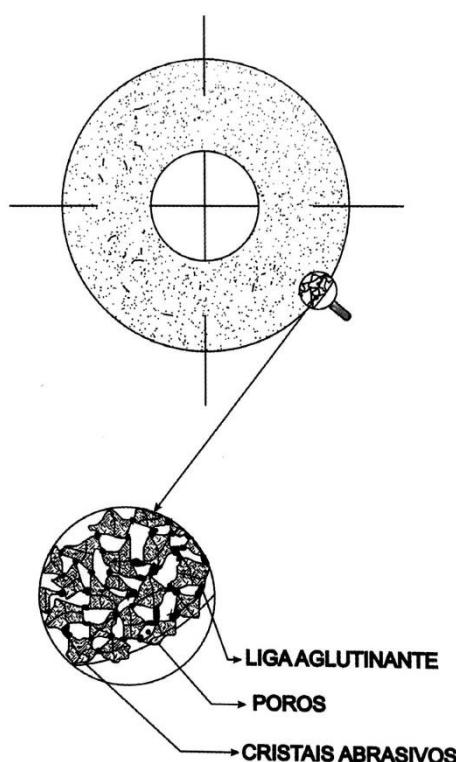


Figura 2.11 - Composição do rebolo (MELLO, 2011).

De acordo com Klocke (2009) e ASM (2004), para que os grãos abrasivos possam remover material, eles devem possuir as seguintes propriedades:

- Dureza elevada para resistir ao riscamento da peça e remover material com o menor desgaste possível;
- Friabilidade, que corresponde à facilidade de um grão se fragmentar e apresentar novas arestas afiadas;
- Tenacidade, que é a capacidade que um grão abrasivo tem de suportar tensões provocadas por impacto, sem se fraturar, ou seja, quanto maior o esforço necessário para produzir ruptura do grão, maior será sua tenacidade;
- Estabilidade térmica quando submetidos à usinagem em que são desenvolvidas elevadas temperaturas na zona de corte. Por exemplo, durante a retificação de aços com rebolos diamantados, com as temperaturas e pressões de contato típicas do processo de retificação, o diamante perde a estabilidade e cede carbono para o ferro pelo mecanismo de difusão, e, consequentemente, levando a um desgaste prematuro do rebolo;
- Resistência ou estabilidade química em operações sujeitas a pressões e temperaturas mais elevadas, principalmente quando há maior afinidade entre o grão

abrasivo e a peça, ou com o ar e ainda com tipo de fluido de corte empregado. Os abrasivos em geral são cerâmicos e ao entrarem em contato com a peça, devido às elevadas temperaturas de usinagem alcançadas, poderá haver predominância do mecanismo de desgaste por difusão, fazendo com que material da peça e rebolo sejam transferidos um para o outro ou destes para o meio. Com isso, assim como já comentado, o rebolo estará sujeito a desgaste prematuro (MARINESCU et al., 2007). O outro mecanismo de desgaste mais comum é a abrasão devido à própria natureza dos grãos abrasivos (partículas não metálicas muito duras).

Durante a retificação, os grãos abrasivos do rebolo se desgastam e podem assumir forma arredondada ou plana e assim perdem sua capacidade de corte. Dessa maneira, haverá uma maior área de contato entre cada grão e a porção da peça, o que implica no aumento da força de corte necessária para manter o corte ou ainda para causar a quebra ou arrancamento dos grãos gastos. Esta característica do rebolo é conhecida como auto afiação (MARINESCU et al., 2007). Em alguns casos, dependendo das condições tribológicas do sistema, esta força poderá fazer com que mais material da peça adentre no rebolo, causando o seu empastamento. Se isso ocorre, é preciso fazer a dressagem para limpar os poros do rebolo e conferir novamente as arestas afiadas.

A seguir são detalhadas as características importantes que determinam a correta especificação de rebolos convencionais (Fig. 2.12), tais como: material abrasivo, granulometria, dureza, estrutura e ligante.

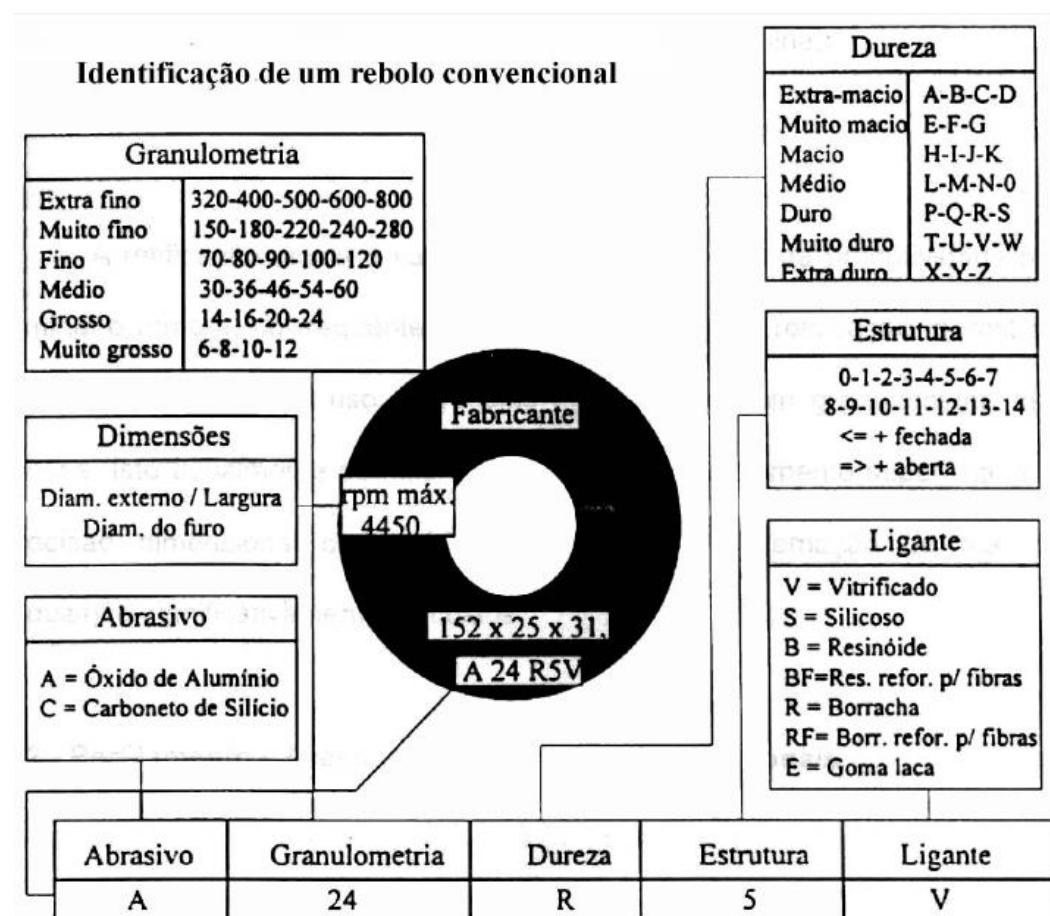


Figura 2.12 - Especificação de rebolos com abrasivos convencionais (adaptada de STEMMER, 1995).

2.2.3 Material abrasivo

A dureza de um abrasivo é geralmente determinada por meio da medição de dureza Knoop, que consiste em realizar uma microindentação na amostra com uma ponta de diamante lapidada na forma piramidal sob cargas que podem variar de 25 a 300 gramas. O valor da dureza é definido pela medição da diagonal da marca produzida pelo diamante e relacionando-a com a carga utilizada (STEMMER, 1995).

Os abrasivos empregados no processo de retificação são classificados em duas classes: naturais e sintéticos. Aqueles da primeira classe são extraídos diretamente da natureza, como coríndon, esmeril e diamante. Já os abrasivos sintéticos são produzidos em laboratório e podem ainda ser subdivididos em convencionais ou superabrasivos, sendo que os mais utilizados industrialmente são: abrasivos convencionais - óxido de alumínio (Al_2O_3) e carbeto de silício (SiC) e os superabrasivos - nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante

sintético (ASM, 2004; KLOCKE, 2009). A seguir serão feitas algumas considerações sobre estes materiais.

- O óxido de alumínio é o abrasivo convencional mais versátil, pois dependendo da pureza e do tipo de ligante pode-se obter tanto um grão com alta tenacidade quanto um grão altamente friável. Dentre os tipos de óxidos de alumínio convencionais estão o cinza, o branco e o rosa e o *Seeded Gel* (SG), que significa gel de semente. O abrasivo na forma de gel de semente é fabricado por um processo químico em que as partículas são sinterizadas para formar abrasivos microcristalinos. Por não serem moídos após a sinterização conseguem manter a sua nitidez maior que o óxido de alumínio fundido convencional e como, consequência, eles garantem vida cerca de 3 a 5 vezes maior (MARINESCU et al., 2004).

Além dos abrasivos convencionais, existem ainda os óxidos de alumínio cerâmicos de última geração como o Norton Quantum e Targa, que conferem maior dureza e resistência aos grãos abrasivos e aumentam a sua faixa de aplicação. Estes abrasivos são em geral recomendados para retificação de aços em geral, incluindo os aços rápidos (HSS), madeira e plástico. Além destes, mais recentemente foram introduzidos no mercado os rebolos Vitrium3 que conferem boa resistência mecânica ao rebolo, o que permite construções mais leves e emprego de altas velocidades de corte, proporcionando, portanto, aumento da produtividade (NORTON, 2016.). Dentro desta classe, merecem destaque os abrasivos de óxido de alumínio branco (designados pelas letras AA) que são empregados na afiação e retificação de aços em geral e as mais diversas ferramentas de corte (como brocas, fresas, bits). O rebolo de especificação FE 38A é em geral o mais recomendado (NORTON, 2011);

- O carbeto de silício (SiC) é um material sintético que é formado pela fusão em fornos elétricos de areia de sílica (SiO_2) com coque (carbono). Estes abrasivos são resistentes a altas temperaturas e estáveis quimicamente com a maioria dos metais e por isso são recomendados para operações com corte rápido e desbastes de metais de alta dureza como, por exemplo, na afiação de ferramentas de corte de metal duro. Este tipo de abrasivo está disponível no mercado apresentando três variedades e são diferenciados pela cor: verde, verde escuro e preto. E as cores estão relacionadas com a composição e as propriedades que por sua vez estão vinculadas ao tipo e quantidade de impurezas. Os rebolos de SiC verde são aqueles abrasivos com maior pureza e portanto mais friável (é o mais friável dentre todos os rebolos abrasivos com grãos cerâmicos convencionais); o SiC preto possui um grau maior de impureza e por isso é mais tenaz que o SiC verde.

Já os rebolos SiC na cor verde escuro apresentam características intermediárias entre o SiC verde e SiC preto (NUSSBAUM, 1988). Estes últimos são designados por GC (sigla do Inglês *Green Carbide*). Os abrasivos de SiC são em geral recomendados para a retificação de ferros fundidos, de ligas de titânio, materiais não ferrosos (bronze, latão, alumínio dentre outros), assim como não metálicos. Contudo, tem sido relatado na literatura que estes abrasivos podem reagir quimicamente com materiais ferrosos e a base de níquel quando em operações de trabalho em que as temperaturas são superiores a 750°C (MARINESCU et al., 2007);

- O nitreto cúbico de boro (CBN) é o material sintético que mais se aproxima da dureza do diamante, com a vantagem de possuir maior estabilidade térmica e serem utilizados para a retificação de materiais ferrosos. Os rebolos de CBN são mais resistentes ao desgaste em comparação com os rebolos de abrasivos convencionais e são utilizados na retificação de materiais duros, como aços rápidos e aços liga temperados;
- Diamante: é o abrasivo de maior dureza e pode ser utilizado na sua forma natural ou sintética. O diamante sintético é o mais empregado na atualidade por causa da sua extrema dureza, elevada condutividade térmica um coeficiente de atrito muito baixo. Estes abrasivos são recomendados para aplicação em materiais não ferrosos (como já comentado, em temperaturas superiores a 736°C, será favorecida difusão atômica entre o rebolo e a peça, acelerando o desgaste do rebolo) e não metálicos, como quartzo, cristal, pedras preciosas, mármore, granito, materiais cerâmicos. Tanto os rebolos de CBN quanto aqueles de diamante são empregados em situações que exigem melhor acabamento e tolerâncias dimensionais mais estreitas. Devido ao elevado custo, a aquisição destes rebolos é justificada quando são empregadas velocidades de corte superiores a 60 m/s.

Como nesta pesquisa serão empregados rebolos de abrasivos convencionais de SiC, o enfoque das aplicações será restrinido apenas para os rebolos com abrasivos convencionais. Na Tabela. 2.1 são apresentadas algumas propriedades desses materiais abrasivos.

Tabela 2.1 - Propriedades dos principais materiais abrasivos empregados em rebolos para retificação (adaptada de MALKIN; GUO, 2008).

Material						
	Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃)	Óxido de alumínio branco (Al ₂ O ₃)	Óxido de alumínio rosa (Al ₂ O ₃)	Carboneto de silício (SiC)	Nitreto cúbico de boro (CBN)	Diamante (C)
Estrutura cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (g/mm ³)	3,98	3,85	3,89	3,22	3,48	3,52
Ponto de fusão (°C)	2040	2040	2030	~ 2830	~320000 a 10500 MPa (ponto triplo)	~370000 a 13000 MPa (ponto triplo)
Dureza Knoop (kg/mm ²)	2100	1970	2100 - 2150	2400	4700	8000

2.2.4 Granulometria

Nussbaum (1988) afirma que é importante estabelecer um controle rigoroso da granulometria dos grãos de um rebolo, principalmente durante a fabricação, a fim que o sucesso desejado na retificação seja alcançado.

O tamanho do grão abrasivo é determinado por uma série de peneiras, com certo número de malhas por polegada linear e que são identificadas por uma escala numérica, denominada “*mesh*” (MELLO, 2011). Um grão de tamanho igual a 60, por exemplo, é obtido através de uma peneira cuja malha tem 1/60 de polegada (aproximadamente 0,42 mm). Este grão indicado por 60, portanto, é classificado como grana ou granulometria *mesh* 60. Assim, o tamanho do grão está relacionado com a granulometria *mesh*. Quanto maior a granulometria *mesh*, menor será o tamanho do grão, e vice-versa. A classificação dos abrasivos de acordo com sua escala granulométrica está representada conforme a Tab. 2.2.

A escolha do tamanho do grão abrasivo dependerá do material a ser usinado e bem como dos parâmetros de corte a serem empregados, principalmente da penetração de trabalho. Os grãos mais grossos são indicados para usinrar materiais moles, dúcteis e fibrosos, em operações de desbaste onde o acabamento não é a prioridade (como aços, bronze, latão e outros). Já os grãos mais finos (maior grana *mesh*) são recomendados para a usinagem de materiais mais duros e/ou frágeis, em que são exigidos outras tolerâncias

geométricas (rugosidade, cilindricidade, circularidade, dentre outras) e dimensionais mais estreitas (DINIZ et al. (2010) e MARINESCU et al. (2004)).

Tabela 2.2 - Classificação da granulometria em *mesh* (DINIZ et al., 2010).

Muito grosso	Grosso	Médio	Fino	Muito fino	Pó
6	16	36	100	280	600
8	20	46	120	320	700
10	24	54	150	400	800
12	30	60	180	500	1000
14		70	220		1200
		80	240		1600
		90			

2.2.5 Dureza de rebolo

Diferentemente da dureza do abrasivo, a dureza de um rebolo está relacionada à capacidade do ligante de reter seus grãos abrasivos. Essa propriedade depende de vários fatores, dentre eles, o tipo e volume de ligante utilizado, o tamanho do grão abrasivo, a quantidade de poros presentes no rebolo (KLOCKE, 2009).

A classificação da dureza de um rebolo é representada pelas letras que vão de A a Z, onde a letra A representa materiais de menor dureza e a letra Z materiais de dureza mais elevada. Quanto maior a dureza de um rebolo, maior a sua resistência ao desgaste e arranque dos grãos (MALKIN; GUO, 2008). Os rebolos de menor dureza (macios) são recomendados para a retificação de materiais duros, ou seja, aqueles resistentes a deformações plásticas, onde se exige mais da capacidade de corte dos abrasivos e estes se desgastam mais rapidamente, permitindo a exposição de novos grãos ativos. Já os rebolos de maior dureza são indicados para retificar materiais mais “moles” (MACHADO et al. , 2009).

2.2.6 Estrutura

A estrutura do rebolo refere-se ao espaçamento entre os grãos abrasivos. Usualmente, é representada por uma série de números inteiros, podendo variar de 1 a 12, sendo que 1 se refere a uma superfície fechada com bastante abrasivos e 12 uma estrutura muito aberta com poucos grãos (DINIZ et al., 2010). Há ainda na literatura classificações

que se referem à estrutura de um rebolo como variando de 1 a 16 ou ainda 1 a 14, como aquela mostrada na Fig. 2.12.

De acordo com Malkin e Guo (2008), o uso de rebolos com estrutura fechada é indicado para materiais duros aliado ao critério de ótimo acabamento. Nesta estrutura há uma elevada densidade de arestas cortantes que garantem um corte mais uniforme. Já os rebolos de estrutura aberta são recomendados para operações de desbaste, onde há elevada geração de calor. Eles possuem um menor número de grãos e mais poros, o que favorece o alojamento de cavacos, passagem do fluido de corte, portanto aumentando a refrigeração do sistema. No entanto, estão sujeitos a um maior empastamento do rebolo que, se não for devidamente dressado, poderá levar a problemas como queima e outras alterações metalúrgicas.

Magnani (2013) avaliou o comportamento de duas classes de rebolo à base de óxido de alumínio (convencional - 38A120K4VH - e na forma de SG - 5SG120K8VH) na retificação cilíndrica externa do aço ABNT 1045 com diferentes velocidades do rebolo. O autor constatou que para a menor velocidade (12 m/s), o rebolo convencional proporcionou menores valores de rugosidade, mas ao aumentar a velocidade para 24 m/s o rebolo SG resultou em menores valores de rugosidade das peças em relação ao rebolo convencional. Este fato pode ser explicado devido a maior capacidade do rebolo na forma SG de renovar suas arestas de corte com a progressão do processo de retificação, mantendo as arestas afiadas.

2.2.7 Ligante de rebolo

Os ligantes ou aglomerantes são utilizados para fazer a união entre os grãos abrasivos do rebolo. Dentre suas características, estes compostos devem resistir às forças e temperaturas de retificação sem se desintegrarem. Além disso, os ligantes devem possuir boa inércia química tanto com a peça como também com os fluidos de corte durante a usinagem (MALKIN; GUO, 2008). Os ligantes conferem resistência aos abrasivos de forma a evitar o desprendimento deles durante o corte. Desta forma, eles exercem influência sobre o comportamento elástico dos grãos abrasivos e sobre a vida do rebolo, e, portanto, assim como os abrasivos, a sua correta seleção irá garantir o bom desempenho de retificação, seja em termos de qualidade da superfície retificada (WANG, 2008) ou ainda em outros parâmetros como agressividade do rebolo, forças de corte, dentre outros.

Os principais materiais ligantes são basicamente: vitrificado, resinóide e metálico. A seguir são apresentadas algumas propriedades e características de cada um deles de acordo com Malkin e Guo (2008) e Klocke (2009).

- Ligante vitrificado: é constituído por uma mistura de argila, caolim e feldspato, que são misturados aos abrasivos em proporções que variam com as propriedades que se deseja obter. É recomendado para rebolos a serem utilizados em operação de retificação de elevada exatidão, devido a sua alta rigidez. Devem ser utilizados em velocidades mais moderadas, 30 m/s, mas podem atingir até 120 m/s. Eles possuem alta estabilidade quando em contato com ácidos, água, fluidos de corte, óleo e gases. De acordo com Jackson e Davim (2011), este tipo de ligante é recomendado para rebolos de carbeto de silício que são empregados na retificação de mergulho de ferros fundidos utilizados na fabricação de eixos virabrequins e de comando de válvulas;
- Ligante resinóide: é constituído de resinas sintéticas, normalmente fenólicas termofixas, que podem ou não apresentar material de enchimento. É empregado na fabricação de rebolos para operações de desbaste devido à sua elevada resistência e capacidade de suportar choques. Com isso os rebolos com estes ligantes, quando reforçados com fibra de vidro, podem ser empregados em condições com velocidades superiores a 100 m/s. Entretanto, este tipo de ligante é suscetível ao ataque químico causado por fluidos de corte alcalinos, que causam o enfraquecimento das ligações entre ligante e grão abrasivo, provocando, portanto, a deterioração do rebolo com a progressão da usinagem.
- Ligante metálico: são materiais sinterizados, depositados galvanicamente sobre um suporte, ou inseridos em uma matriz porosa de abrasivo. Este tipo de ligante pode ser à base de metais como o bronze, o ferro ou ainda níquel, sendo que o mais comum é o bronze produzido por metalurgia do pó. Contudo, para a fabricação de rebolos de CBN e PCD o níquel é o ligante mais empregado para unir os abrasivos ao corpo do rebolo, normalmente de alumínio ou aço (MARINESCU et al. (2004) e NORTON (2011)).

2.2.8 Operação de dressagem do rebolo

Durante o processo de retificação, o atrito e os elevados esforços de corte modificam a topografia dos grãos abrasivos e reduzem a capacidade de remoção de material do rebolo. Quando isso ocorre é necessário realizar uma operação de dressagem no rebolo, em

intervalos frequentes, para remover os grãos gastos da superfície e restaurar a sua eficiência de corte (MALKIN; GUO, 2008).

Existem diversos tipos de dressagem, dentre elas a mais comum é a que se utiliza um dressador de ponta única de diamante. Durante a operação de dressagem, o rebolo se assemelha a uma peça sendo usinada por torneamento enquanto que o dressador é a ferramenta de corte. Dessa forma, o rebolo gira enquanto a ponta de diamante se desloca pela espessura do rebolo, retirando uma pequena camada superficial. Com isso, os grãos são afiados e as partículas de material aderidas no rebolo são removidas (SOUZA, 2007). Na Figura 2.13 é representado o mecanismo de dressagem com seus principais parâmetros.

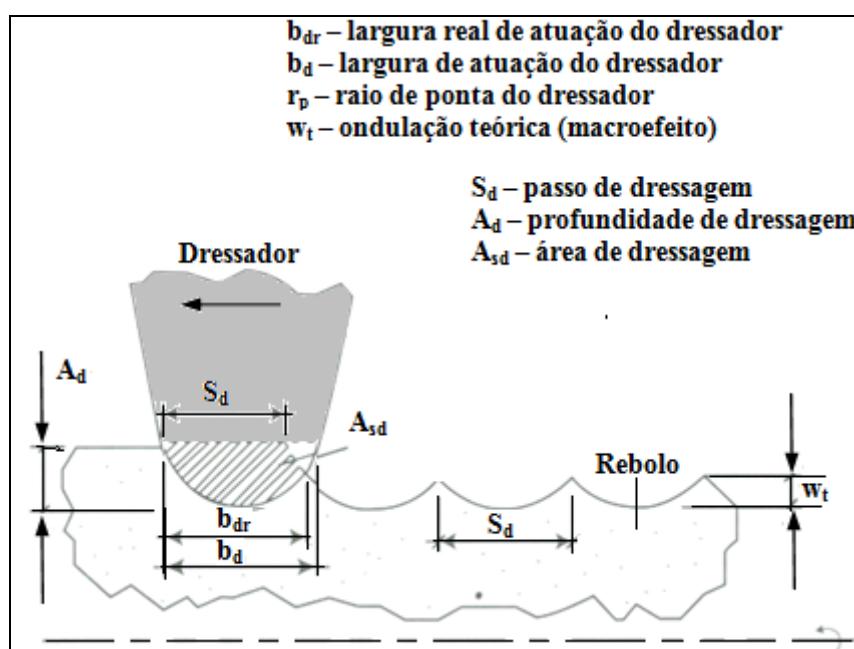


Figura 2.13 - Mecanismo de dressagem dos rebolos (MACHADO et al., 2009).

De acordo com Machado et al. (2009), a operação de dressagem pode ser melhor quantificada em função do grau de recobrimento (U_d) do rebolo. Esse parâmetro estabelece a relação que existe entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o avanço por volta do dressador (S_d), conforme mostrado na Equação (2.4):

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (2.4)$$

Onde:

b_d : largura de atuação do dressador

S_d : avanço por volta do dressador

As condições de dressagem influenciam diretamente na forma do grão abrasivo, na taxa de remoção de material da peça e, portanto, interferem na rugosidade da peça. Em operações de dressagens de desbaste (conhecidas popularmente como dressagens grossas), com grau de recobrimento pequeno e número de arestas atuantes reduzido, há um aumento na profundidade dos sulcos que provoca valores mais elevados de rugosidade. Já em operações finas, em que se utiliza um maior grau de recobrimento e um maior número de arestas atuantes, os esforços de corte são reduzidos e cada grão abrasivo penetra menos na peça, reduzindo dessa forma os valores de rugosidade (HELLMEISTER, 2004).

2.3 Qualidade de superfícies de ferros fundidos retificadas

Ao realizar o processo de retificação objetiva-se garantir que, além da forma final da peça e as tolerâncias geométricas e dimensionais mais apertadas, a peça tenha suas integridades superficial e subsuperficial preservadas. De acordo com Malkin e Guo (2008), a qualidade superficial de peças usinadas consiste de dois aspectos: integridade superficial e textura superficial. A integridade superficial está associada com as alterações mecânicas e metalúrgicas, evidenciados por danos térmicos, alterações de dureza e modificações estruturais. A textura superficial, por sua vez, se refere à topografia das superfícies usinadas, as quais são usualmente caracterizadas pela rugosidade, embora existam outros parâmetros que também podem ser de interesse. A seguir serão comentados os principais problemas que podem ocorrer nas peças após o processo de retificação de aços e ferros fundidos.

2.3.1 Danos de origem térmica

Como já comentado, em retificação são desejadas peças de preferência sem danos térmicos. Estes danos são causados pelo elevado gradiente de temperatura gerado durante operações de retificação e que provocam modificações na superfície abaixo da superfície retificada. Eles são representados pelas tensões residuais, trincas, alteração na dureza do material, como também, redução da resistência à fadiga (MALKIN; GUO, 2008).

Os principais danos causados pelo aumento demasiado da temperatura em retificação são:

- Queima: é um processo de oxidação da superfície da peça induzido pelo aumento da temperatura, geralmente, que começa a existir a partir dos 450°C e é caracterizado pela presença de tons azulados na superfície (MARINESCU et al., 2004). Na Figura 2.14 é apresentado um cilindro de ferro fundido cinzento que foi retificado a baixa velocidade da peça e no qual foi detectada visualmente a queima de retificação. Para os autores, esta marca de coloração azul escura é característica de maior tempo de contato do rebolo com a peça proporcionado pela baixa velocidade da peça. Além disso, as marcas igualmente espaçadas são evidências da ocorrência de vibração e *chattering* durante o processo de retificação.

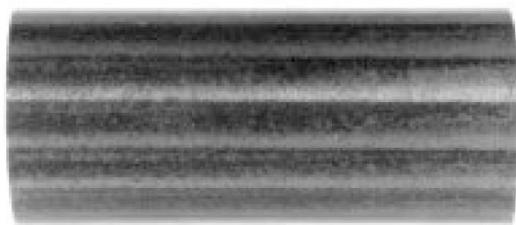


Figura 2.14 - Queima de retificação de aspecto visual detectada em um cilindro de ferro fundido cinzento após o processo de retificação centerless (MARINESCU et al., 2004).

Malkin e Guo (2008) afirmam que a queima superficial da peça influencia negativamente na microestrutura do material retificado. Durante a retificação de aços temperados e revenidos, a queima superficial provoca um aumento na microdureza superficial em função da retêmpera do material, a qual é consequência da reaustenitização do mesmo, seguida da formação da martensita não-revenida. Ao contrário, mesmo não ocorrendo queima de aspecto visual, pode haver um amolecimento do material próximo à superfície, uma vez que foram atingidas temperaturas inferiores às de austenização. Esta microestrutura em aços é conhecida como camada revenida;

- Têmpera superficial: durante a retificação de aços, dependendo do gradiente de temperatura que leva ao maior aquecimento da área de corte durante o processo e da taxa de resfriamento imposta à peça pela ação do fluido de corte, pode ocorrer alteração na dureza do material. A elevação da temperatura acima daquela considerada crítica de revenimento ou de austenitização do material, seguido de um processo de resfriamento rápido, leva à formação de estruturas martensíticas não-revenidas frágeis, suscetível a rachaduras e que podem comprometer as

características mecânicas do material e, por conseguinte, a sua funcionalidade (MALKIN;GUO, 2008).

- Tensão residual: é induzida por deformações plásticas não-uniformes que ocorrem próximas da superfície da peça durante processos de fabricação que envolvam deformação do material, como tratamento termo-químico, usinagem e outras operações que causam alteração nas propriedades de um material (ROSSINI et al.,2012). As tensões residuais de compressão são provenientes de deslocamentos plásticos localizados que ocorrem nas interações mecânicas dos grãos abrasivos, enquanto as tensões residuais de tração são causadas, principalmente, por tensões induzidas termicamente e deformações associadas às temperaturas de retificação (MARINESCU et al. 2004).
- Trincas: é resultado da brusca variação térmica durante a retificação. As trincas podem ser superficiais ou internas, quando a superfície da peça é submetida à elevadas tensões residuais de tração. Em geral, a presença delas reduz o limite de resistência à fadiga do material e aumenta a possibilidade da superfície ser atacada por processos corrosivos, como também de ocorrência de falhas dos componentes em serviço (SILVA et al., 2000).

2.3.2 Rugosidade de superfícies retificadas

A rugosidade exerce influência no custo de fabricação das peças e desempenha um papel importante no comportamento de componentes mecânicos, pois está relacionada com as condições de contato - atrito entre superfícies - e, portanto, com capacidade de deslizamento entre eles, como também influencia nas resistências ao desgaste e fadiga (MALKIN; GUO, 2008). Na Tabela 2.3 são apresentados os principais parâmetros empregados na quantificação da rugosidade de acordo com a ABNT NBR ISO 4287 (2002).

Tabela 2.3 - Os principais parâmetros de rugosidade empregados para avaliar superfícies usinadas (MACHADO et al., 2009).

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_q	Desvio médio quadrático	Raiz quadrática da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem.
R_t	Altura total do perfil	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade de vale do perfil no comprimento de avaliação
R_z	Altura máxima do perfil	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem.
R_{sk}	Fator de assimetria do perfil (skewness)	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e R_q ao cubo, no comprimento de amostragem.
R_{ku}	Fator de achatamento do perfil	Quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor de R_q à quarta potência no comprimento de amostragem

Diferentemente dos processos de usinagem com ferramentas de geometria definida, em retificação a determinação do parâmetro de rugosidade não é tão simples, principalmente devido à aleatoriedade na distribuição dos grãos abrasivos no rebolo e por causa dos aspectos tribológicos resultados da combinação de vários parâmetros de corte peculiares, como as propriedades do material da peça (em geral de dureza elevada), características do rebolo, cinemática do processo (velocidades de corte elevadas), entrada e saída do rebolo, condições de dressagem, presença da cortina de ar entre o fluido de corte e o rebolo (que impede o fluido de corte de alcançar a zona de corte ou a peça), entre outros (Malkin e Guo, 2008). Além desses fatores, como já mencionado anteriormente, à medida que a penetração de trabalho e/ou profundidade de corte aumentam, há o aumento da área de contato dos grãos abrasivos com a peça, elevando a geração de calor e da temperatura na região de corte. Com isso, dependendo da intensidade de calor que vai para a peça, na maioria das vezes, irá ocorrer a diminuição da resistência mecânica da peça ao cisalhamento e abrasão, devido ao amolecimento naquela região em contato com o abrasivo. Em alguns casos haverá deformação plástica sem cisalhamento. Estes materiais

da peça deformados, juntamente com os cavacos, poderão adentrar nos poros do rebolo e assim comprometer a ação de corte dos abrasivos, prejudicando o acabamento superficial.

Segundo Machado et al. (2009), o parâmetro Ra é o mais utilizado dentre os parâmetros de amplitude. No entanto, como se trata de um valor médio, pode não ser suficiente para identificar algumas características importantes da superfície. Benini e Weingaertner (2015) utilizaram os parâmetros de rugosidade Ra e Rz para avaliar a qualidade da superfície amostras de ferro fundido dúctil austemperado durante o processo de retificação com rebolo de óxido de alumínio e registraram valores de Ra entre 2 e 2,5 μm e Rz de 8 a 12 μm . Já Taborga (2002) utilizou apenas o parâmetro Ra para avaliar a rugosidade após a retificação do ferro fundido nodular com dois rebolos (óxido de alumínio Al_2O_3 e carbeto de silício (SiC). Este autor obteve valores que variaram no intervalo de 0,5 a 2 μm para o rebolo de Al_2O_3 e de 0,3 a 1,4 para o rebolo de SiC.

2.4 Fluidos de corte

Nesta sessão serão abordados temas referentes ao uso de fluidos de corte no processo de retificação, como a função dos fluidos, classificação e formas de aplicação.

2.4.1 O emprego de fluidos de corte na retificação

O processo de retificação é acompanhado por um elevado consumo de energia durante as etapas de formação do cavaco. Grande parte desta energia é convertida em calor, o que acarreta em elevadas temperaturas na região de corte e pode comprometer a integridade da superfície retificada, pois os rebolos convencionais são pobres condutores de calor e os cavacos são pequenos. Desta forma, os fluidos de corte são aplicados na zona de retificação para diminuir a temperatura, principalmente na peça, reduzindo assim o atrito na interface peça-rebolo devido à ação refrigerante e lubrificante do fluido (HRYNIEWICZ et al., 2000).

Segundo Ebbrell et al. (2000), os fluidos de corte possuem três funções principais quando aplicados no processo de retificação. A primeira delas é a refrigeração da zona de corte, através da remoção de calor gerado. A segunda é a lubrificação da região de contato peça e ferramenta, reduzindo o atrito e minimizando o desgaste prematuro do grão abrasivo. Já a terceira função refere-se ao auxílio na remoção de cavacos para fora da região de

corte, evitando desta forma um “empastamento” do rebolo, como também de limpeza de regiões próximas a área de corte, como mesa eletromagnética e outros.

A lubrificação e refrigeração inadequadas do fluido de corte pode provocar maior taxa de desgaste do rebolo e obstrução dos seus poros, com o excesso de cavaco alojado. Além disso, podem surgir danos térmicos na superfície da peça retificada, como mudanças microestruturais, erros de forma, trincas, queima da peça e de tensões residuais de tração. Dessa forma, deve-se selecionar um tipo de fluido e sua técnica de aplicação adequados, o que dependerá de cada situação (peça, condições de corte e tolerâncias requeridas) de forma a contribuir para a manutenção adequada da temperatura na zona de corte (MALKIN; GUO, 2008).

Apesar das vantagens que os fluidos de corte para a retificação, muitos tipos de fluidos possuem alguns aspectos negativos, como impacto do seu descarte feito de forma inadequada no meio ambiente (como contaminação de solo e água) e riscos oferecidos à saúde de operadores de máquinas expostos ao contato direto que podem levar a problemas como dermatites e outras doenças respiratórias (OLIVEIRA e ALVES, 2007). Por estes motivos, as pesquisas na área de lubri-refrigerantes intensificaram-se com o objetivo de aperfeiçoar ao máximo o uso de fluidos de corte na indústria metal-mecânica (OLIVEIRA et al., 2011; MARCELINO et al., 2013; LIMA et al., 2013; SILVA et al., 2011). Os fatores que são levados em conta na maioria dos estudos de caso e pesquisas em usinagem são a análise dos custos relacionados aos fluidos de corte, questões ecológicas e preservação da saúde do ser humano (DINIZ et al., 2010).

2.4.2 Classificação dos fluidos de corte

Existem diversas formas de se classificar os fluidos de corte e não há uma padronização ou consenso entre pesquisadores de modo a estabelecer uma única classificação. Diniz et al. (2010) classificam os diversos fluidos de corte conforme mostrado na Fig. 2.15. Estes autores dividem os fluidos de corte basicamente em óleo integral (não miscíveis em água) e aqueles miscíveis em água.

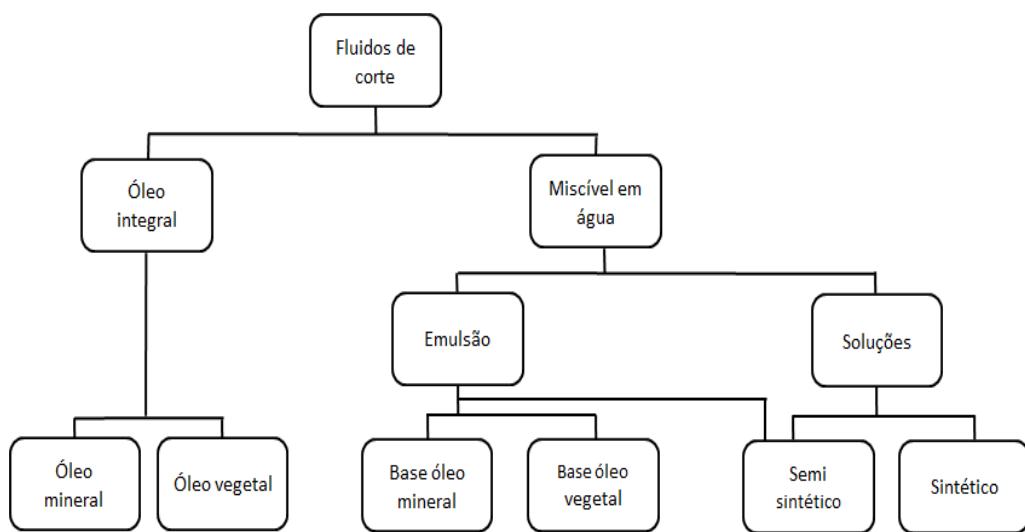


Figura 2.15 - Classificação dos fluidos de corte de acordo com DINIZ et al. (2010).

De acordo com Machado et al. (2009), os óleos vegetais e animais foram os primeiros lubrificantes empregados como óleos integrais na usinagem dos metais. A utilização destes como fluidos de corte tornou-se inviável devido ainda ao alto custo deles, à rápida deterioração e risco oferecido ao operador. Entretanto, eles são empregados como aditivos nos fluidos minerais, a fim de melhorar as suas propriedades lubrificantes. Embora sejam eficientes na redução de atrito, sua baixa condutividade térmica e seu baixo calor específico os tornam ineficientes na condução de calor para fora da região de corte.

Os óleos minerais podem ser utilizados em seu estado puro ou aditivado com compostos polares ou aditivos químicos. Eles são de base parafínica com compostos aromáticos policíclicos que podem causar câncer ou dermatites. Embora possuam excelentes propriedades lubrificantes, anticorrosivas e longa vida útil, eles não possuem boas propriedades refrigerantes quando comparados aos fluidos hidrossolúveis (BIANCHI et al., 2004).

No que se referem aos fluidos solúveis em água, eles são recomendados para processos que há elevada geração de calor, logo devem possuir maior ação refrigerante e uma moderada lubrificação e por isso são aqueles empregados com maior frequência em operações de retificação. Estes fluidos são misturados com água em diferentes proporções formando emulsões e soluções (EL BARADIE, 1996). Em retificação a proporção de diluição normalmente é 1:10, 1:20 ou até 1:40.

As emulsões são compostos bi-fásicos de óleos minerais ou vegetais adicionados à água em um proporção que varia de 1:10 a 1:100. Em geral são adicionadas pequenas

porcentagens de óleo emulsificável, emulsificadores e outros ingredientes os quais são dispersos em pequenas gotículas na água. Os emulsificadores são tensoativos polares que reduzem a tensão superficial da água e, com isso, facilitam a dispersão do óleo na água, mantendo-o finamente disperso como uma emulsão estável (MACHADO et al., 2009; DINIZ et al., 2010).

Segundo El Baradie (1996), as emulsões combinam as propriedades de lubrificação e anti-corrosão dos óleos com a excelente propriedade refrigerante da água. As vantagens em relação aos óleos de corte são: a melhor extração de calor da interface peça/ferramenta, melhor limpeza da superfície de trabalho, economia resultante da diluição em água, e condições de trabalho mais saudável e segura. Como desvantagem, estes fluidos apresentam menor poder de lubrificação, logo não são capazes de reduzir de forma eficiente o atrito entre peça e ferramenta, diferentemente dos fluidos semissintéticos.

Pelo fato de tais fluidos serem compostos essencialmente de água, eles podem levar à formação de corrosão do material e favorecer o crescimento de bactérias, responsáveis principalmente pela queda da qualidade do fluido de corte. Para evitar estes efeitos nocivos, utilizam-se aditivos anticorrosivos e biocidas compatíveis com a pele humana e não tóxicos (DINIZ et al., 2010).

Os fluidos semissintéticos são uma combinação de fluidos sintéticos e emulsões de óleo em água. Eles são constituídos em sua maioria por compostos sintéticos, complementados por óleos emulsionáveis numa proporção que varia na faixa entre 5 e 30% do total do fluido, que confere a estes fluidos característica translúcida, composta por minúsculas partículas de óleo. Estes fluidos combinam algumas das melhores qualidades dos sintéticos com os óleos emulsionáveis. Eles possuem alto poder lubrificante e são mais transparentes em relação aos fluidos sintéticos. Além disso, eles possuem maior resistência à corrosão e são menos susceptíveis ao ataque por micro-organismos quando comparados às emulsões com maior quantidade de óleo (EL BARADIE, 1996). Esta classe de fluidos venham ganhando cada vez mais espaço em processos de retificação pelo fato de oferecerem boa refrigeração aliada com lubrificação.

As soluções por sua vez são compostos monofásicos de substâncias químicas dissolvidas em água. Neste caso, não há necessidade de adição de agentes emulsificantes, pois os compostos reagem quimicamente, formando uma fase única. Estes compostos, também chamados de fluidos sintéticos, caracterizam-se por serem isentos de óleo mineral. Eles possuem em sua composição sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão entre outros, quando adicionados à água. Por isso, são

soluções transparentes e, por serem menos atacáveis por bactérias, apresentam vida mais longa e reduzem o número de trocas da máquina (DINIZ et al., 2010).

Na Tabela 2.4 são listadas algumas características dos principais fluidos de corte utilizados na retificação.

Tabela 2.4 - Características dos fluidos (1 - ruim; 2 - bom; 3 - ótimo; 4 - excelente) (IRANI et al., 2005).

	Sintético	Semi-sintético	Óleo solúvel	Óleo mineral
Calor removido	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Filtrabilidade	4	3	2	1
Danos - meio ambiente	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1

É importante ressaltar que a escolha de um fluido de corte dependerá de suas características, do material da peça, do rebolo (abrasivo, tamanho do grão, estrutura, ligante, dureza), do bocal e, sobretudo, das condições de corte a serem empregadas. No caso da retificação de ferros fundidos, recomenda-se utilizar emulsões e soluções à base de água a fim de evitar o acúmulo de cavacos no rebolo, como também para resfriar a peça e assim evitar danos térmicos e alterações dimensionais (empenamentos, distorções etc). Quando se trata de uma operação de acabamento, ou seja, com pequenos valores de a_e , e para peças de pequenas dimensões, um fluido de corte emulsionável com taxa de diluição menor que 1/10 poderá ser empregado. Outra opção é utilizar o fluido integral de base vegetal para proteger a superfície de ferros fundidos após a retificação contra oxidação (ASM, 2004).

2.5 Ferros fundidos

Em um cenário de crescente competitividade do setor industrial aliado a um mercado consumidor cada vez mais exigente, há um aumento da demanda por novos materiais, que, por sua vez, impulsiona novas pesquisas e avanços tecnológicos no desenvolvimento de

novos métodos de fabricação ou no aprimoramento daqueles já existentes. No caso dos ferros fundidos, novas classes também foram desenvolvidas desde o final do último século de forma que suas propriedades mecânicas foram aprimoradas, tornando-os ainda mais competitivos em relação aos aços, ampliando as aplicações e, portanto, representando grande ganho econômico para os setores de metalurgia e de fabricação. Além disso, tem sido notada a expansão da utilização dos ferros fundidos em diversos segmentos industriais, que buscam produtos com uma melhor relação resistência/peso, um adequado conjunto de propriedades e com um menor custo de produção (VIDAL, 2013). Dentre as principais aplicações, eles são empregados na fabricação de motores, eixos virabrequim, engrenagens, válvulas, cabeçotes, cilindros, montantes de suspensão, bases de máquinas ferramentas, entre outros.

Ferro fundido é definido com uma liga ternária contendo, ferro em sua maior parte, silício e teor de carbono acima de 2,11%. (CHIAVERINI, 2002). Os ferros fundidos são classificados de acordo com a composição química e microestrutura, mais especificamente quanto à existência e a forma da grafita, em ferros fundidos cinzentos, brancos, maleáveis, nodulares, mesclados e de grafita compactada.

As características gerais das diferentes classes de ferros fundidos são apresentadas a seguir (Chiaverini, 2002):

- Ferro fundido cinzento: principal classe dos ferros fundidos empregados no setor metal-mecânico. Ele apresenta estrutura com uma parcela relativamente grande de carbono no estado livre na forma de grafita lamelar e outra parcela na forma combinada de Fe_3C , o que lhe confere boa usinabilidade com relação aos demais ferros fundidos;
- Ferro fundido branco: sua estrutura apresenta o carbono quase inteiramente na forma de Fe_3C , devido às condições de fabricação e menor teor de silício, resultando em um material de elevada dureza, resistente ao desgaste e de difícil usinabilidade;
- Ferro fundido mesclado: caracterizado por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e cinzento;
- Ferro fundido maleável: é obtido a partir do ferro fundido branco por meio tratamento térmico especial, que resulta na transformação de praticamente todo Fe_3C em grafita na forma de nódulos, conferindo a liga elevada ductilidade e tenacidade em relação aos ferros fundidos cinzento e branco;

- Ferro fundido nodular: possui carbono livre na forma de grafita esferoidal, que confere ao material boa ductilidade e boa usinabilidade. É aquele que mais se aproxima dos aços em relação a resistência mecânica aliada a ductilidade;
- Ferro fundido de grafita compacta (vermicular): caracterizado por apresentar a grafita em forma de “escamas ou vermículos”, ou seja, em forma de plaquetas ou estrias. É considerado um material intermediário entre o ferro fundido cinzento e o nodular, possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento, com melhor resistência mecânica e alguma ductilidade;
- Ferro fundido nodular austemperado: conhecido como ADI (Austempered Ductile Iron), possui uma estrutura grafítica do tipo esferoidal, tratado termicamente pelo processo de austêmpera. Ele possui uma combinação de boas propriedades, como elevada resistência mecânica, resistência ao impacto, tenacidade, ductilidade, resistência ao desgaste, substituindo peças de aço forjado ou aços com superfícies temperadas (SAHIN; DURAK, 2008).

Na Figura 2.16 são ilustradas as principais microestruturas das classes de ferros fundidos.

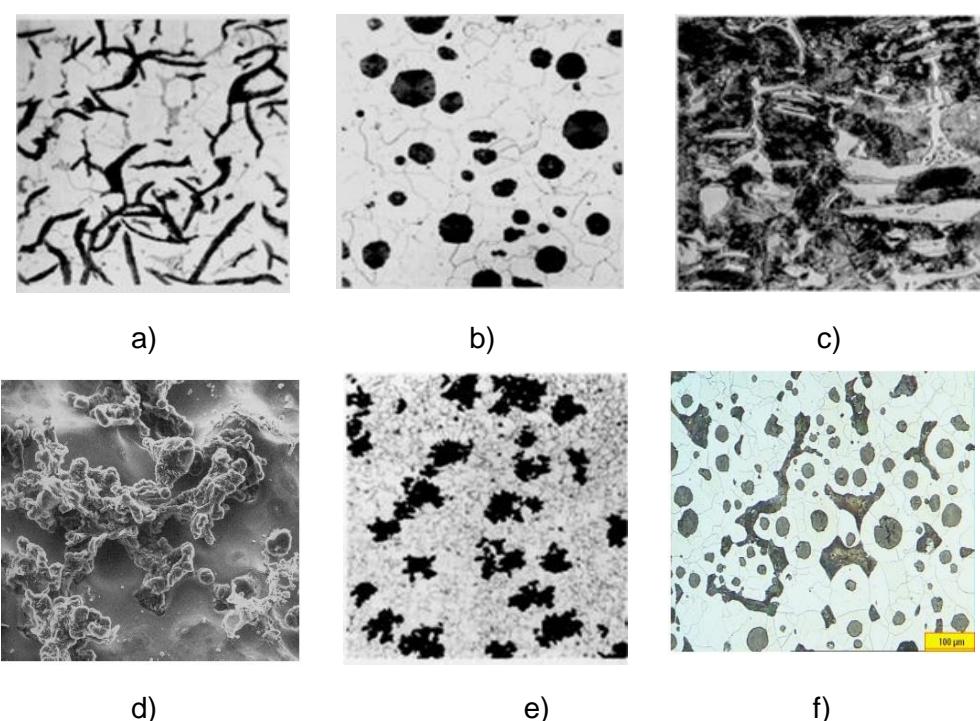


Figura 2.16 - Microestrutura das principais classes de ferros fundidos: a) ferro fundido cinzento, b) ferro fundido nodular, c) ferro fundido branco, d) ferro fundido maleável

(CALLISTER, 2002); e) ferro fundido vermicular (HEISSER et al., 2003); f) ferro fundido nodular austemperado (KEOUGH et al., 2010).

Nesta pesquisa a ênfase será dada as classes de ferros fundidos cinzento, nodular e vermicular. Por isso, a seguir serão apresentadas as principais características e propriedades destes materiais.

2.5.1. Ferro Fundido Cinzento

De acordo com Chiaverini (2002), o ferro fundido cinzento é aquela classe mais empregada no setor industrial de processamento de metais devido às várias propriedades que não são normalmente encontradas em outros materiais, além de custos competitivos em relação aos aços comuns. Nesta classe de ferro fundido, a grafita assume a forma de veios, conferindo ao material bons valores de condutividade térmica, tornando-os os mais indicados para fabricação de componentes sujeitos à fadiga térmica, como cabeçotes de motor, tambores e discos de freios (GUESSER, 2009). Outra propriedade de destaque desses materiais é a sua capacidade de amortecimento de vibrações, importante para aplicações com restrição de ruídos, como bloco de motor, carcaças e discos de freios.

A resistência mecânica dos ferros fundidos cinzentos depende da grafita e da matriz metálica, que pode ser ferrítica ou mais comumente perlítica (GUESSER, 2009). Se a ferrita predominar, a usinabilidade do material é melhorada, mas sua resistência mecânica e resistência ao desgaste são comprometidas. Por outro lado, se a perlita for a microestrutura predominante, o material apresentará melhor resistência mecânica. (CHIAVERINI, 2002). Estes materiais possuem, de modo geral, boa usinabilidade. O enxofre, juntamente com o manganês, formam o sulfeto de manganês (MnS) que age como uma camada protetora sobre a superfície do material, evitando a oxidação e a difusão, além de atuar como lubrificante da ferramenta de corte durante a usinagem do material (MOCELLIN, 2002).

2.5.2. Ferro Fundido Vermicular

O ferro fundido vermicular, também conhecido como CGI, da terminologia em Inglês, *Compacted Graphite Iron* (que significa ferro fundido com grafia compactada) foi obtido por acaso durante a fabricação do ferro fundido nodular, devido a erros de composição química, onde ao invés de produzir uma microestrutura em forma esférica, produziu-se na forma de vermes (JÚNIOR; GUESSER, 2011). Mocellin et al. (2004) relataram que a grafita neste material se apresenta mais arredondada e mais grosseira, de modo que a sua forma e distribuição conferem ao vermicular um ganho substancial de propriedades mecânicas,

destacando-se as resistências mecânica e à fadiga, com uma perda pouco significativa de condutividade térmica e de amortecimento. As propriedades deste material são intermediárias entre aquelas dos ferros fundidos cinzentos e nodulares, conforme mostrado na Tab. 2.5.

Tabela 2.5 - Principais propriedades físicas e mecânicas dos ferros fundidos cinzentos, vermiculares e nodulares (Adaptado de 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

A combinação das características desejáveis, tanto do ferro fundido cinzento, quanto do nodular, confere ao ferro fundido vermicular uma significativa e crescente importância na aplicação industrial. O emprego deles na indústria automobilística, por exemplo, significa reduções de espessura de parede e aumento de pressões de trabalho, devidos às suas boas propriedades mecânicas, e assim proporcionando uma combustão mais completa como também reduzindo a emissão de poluentes. Além disso, implicará na produção de um motor com menor massa e, portanto, mais econômico sob o ponto de vista de exigir menos matéria-prima e de menor consumo de combustível (MOCELLIN et al., 2004).

De acordo com Mocellin (2002) e Guesser et al. (2001), dentre os métodos pesquisados para obtenção de ferro fundido vermicular, dois deles proporcionaram bons resultados e por isso são utilizados em aplicações na indústria metal-mecânica. Estes métodos são comentados a seguir:

- Tratamento da liga adicionando elementos nodulizantes, como o magnésio, em quantidade insuficiente para gerar o ferro fundido nodular, mas suficiente para assegurar uma faixa estável do ferro fundido vermicular sem a formação de grafita em floco;
- Tratamento da liga com elementos nodularizantes (magnésio), assegurando que a grafita não cresça na forma lamelar, e antinodularizantes (titânio), que impede o crescimento da grafita em forma de nódulos.

Doré (2007) desenvolveu um trabalho experimental em torneamento para verificar a influência do teor de nodularização no ferro fundido vermicular na sua usinabilidade. O autor usinou três diferentes ligas da mesma classe de ferro fundido vermicular (com diferentes porcentagens de nodularidade, 6%, 26% e 36%, que foram identificadas pelo autor como VER-1, VER-2 e VER-3, respectivamente). Ele testou três tipos de ferramentas de metal-duro e cinco de ferramentas cerâmicas. A vida da ferramenta foi o parâmetro utilizado para avaliar a usinabilidade dos materiais, apresentados na Fig. 2.17. Conforme observado nesta figura, os maiores valores de vida das ferramentas cerâmicas foram obtidos na usinagem da liga VER-1 (liga com menor porcentagem de nodularidade) o que é atribuído à maior abrasividade da liga, pela presença de carbonetos e pela maior dureza. Já na usinagem da liga VER-3 (liga de maior porcentagem de nodularidade), a adesão do cavaco tende a ser maior, dificultando a sua quebra pela ferramenta e, consequentemente, aumentando o desgaste e implicando em menor vida. Nessa condição, o cavaco tende a prolongar o tempo em contato com a ferramenta, aumentando as solicitações térmicas e ocasionando desgaste da ferramenta por abrasão. Com isso, observa-se que a variação na microestrutura das três classes de ferros fundidos exerce influência na usinabilidade do material.

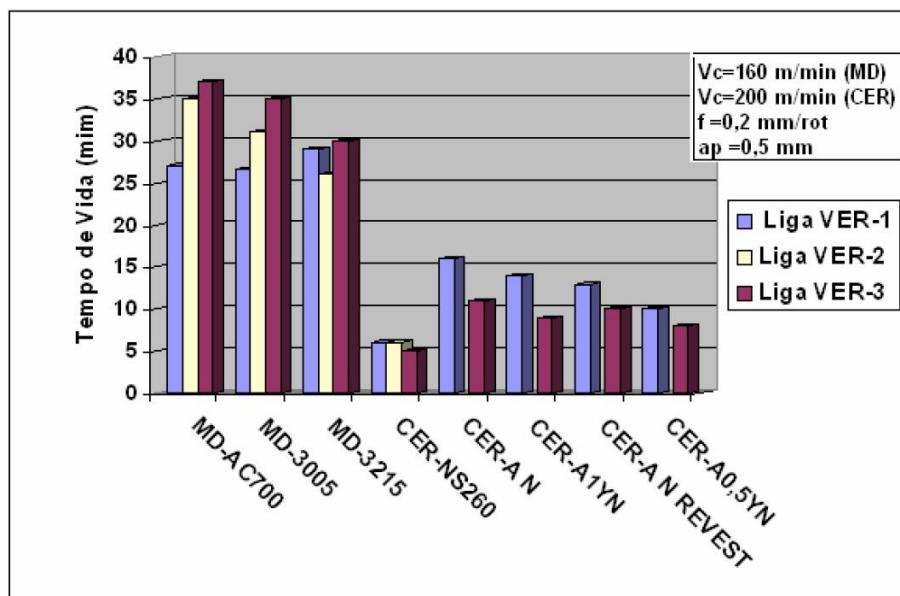


Figura 2.17 - Vida de ferramenta para diferentes classes de ferros fundidos vermiculares (DORÉ, 2007).

Além dos cuidados com as concentrações de elementos nodulizantes e antinodulizantes, são necessários ainda cuidados com teores de elementos químicos, velocidade de resfriamento, espessura de parede, entre outros (MOCELLIN, 2002). Para Dawson et al.(2001), as principais variáveis envolvidas na usinabilidade do ferro fundido vermicular são: a forma da grafita, o tipo e a proporção de perlita, o efeito dos elementos químicos (Sb, Mn, Si, S, Ti, Cr) e o efeito das inclusões. A Tabela 2.6 mostra a composição química do ferro fundido vermicular comparado com o ferro fundido cinzento.

Tabela 2.6 - Composições químicas do ferro fundido vermicular e do ferro fundido cinzento (Adaptado de MOCELLIN, 2002).

Ferro Fundido	Elemento Químico	% em peso						
		C	Si	Mn	P	S	Mg	Cu _{eq} ⁶
	Vermicular	3,1 a 4,0	1,7 a 3,0	0,1 a 0,6	máx 0,065	0,007 a 0,012	0,08 a 0,14	0,6 a 1,5
	Cinzento	3,4 a 3,6	2,3 a 2,5	0,50 a 60	máx 0,065	0,05 a 0,12	-	0,70 a 0,90

Esta classe de ferro fundido abrange uma grande faixa de aplicações, e as principais são: bloco de motores a diesel, alojamentos de caixas de engrenagens, alojamentos para turbo alimentadores, suportes de rolamentos, rodas dentadas para correntes articuladas, engrenagens excêntricas, moldes para lingotes, coletores de descarga de motores e discos de freio de automóveis em geral (MACHADO et al., 2009).

2.5.3. Ferro Fundido Nodular

A grafita do ferro fundido nodular apresenta-se na forma esferoidal, a qual não interrompe a continuidade da matriz, o que lhe confere ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. O limite de escoamento do ferro fundido nodular é mais elevado do que o do ferro fundido cinzento, do maleável e até mesmo dos aços-carbono comuns (CHIAVERINI, 2002).

Na Tabela 2.7 são apresentadas algumas das principais classes e suas respectivas propriedades mecânicas dos ferros fundidos nodulares.

Tabela 2.7 - Classificação do ferro fundido nodular, segundo a ABNT P-EB-595 apud CHIAVERINI (2002).

Classe	Limite de resistência à tração, min. kgf/mm ³ (MPa)	Limite de escoamento (0,2%) min. kgf/mm ³ (MPa)	Alongamento (5d), min. (%)	Faixa de dureza aproximada Brinell (HB)	Estruturas predominantes
FE 3817	38,0 (370)	24,0 (240)	17	140-180	Ferrítica
FE 4212	42,0 (410)	28,0 (270)	12	150-200	Ferrítica-perlítica
FE 5007	50,0 (490)	35,0 (340)	7	170-240	Perlítica-ferrítica
FE 6002	60,0 (590)	40,0 (390)	2	210-280	Perlítica
FE 7002	70,0 (690)	45,0 (440)	2	230-300	Perlítica
FE 3817 RI*	38,0 (370)	24,0 (240)	17	140-180	Ferrítica

*Classe com requisito de resistência ao choque

De acordo com Boehs et al. (2000), a grafita presente na microestrutura dos ferros fundidos contribui para melhorar usinabilidade deles, tanto pelo fato de atuar como agente lubrificante, reduzindo o atrito entre a peça e a ferramenta, quanto pela geração de descontinuidades na micro-estrutura, que provoca a ruptura do cavaco em pequenos segmentos, independentemente do processo de usinagem. A usinabilidade destes materiais sob o aspecto de usinagem com ferramenta de geometria definida que é relatada na literatura, assim como a dos aços, está fortemente ligada à composição química, aos elementos de liga e aos microconstituintes como ferrita, perlita, martensita, austenita, carbeto e densidade de grafita. Mas quanto ao aspecto de retificação, ainda não há relatos sobre a sua usinabilidade.

Segundo Chiaverini (2002), para se alterar a forma da grafita e obter o ferro fundido nodular é preciso introduzir pequenas quantidades de magnésio ou cério no metal fundido, a fim de conferir a forma desejada de grafita e contrabalancear o efeito de elementos prejudiciais, como titânio, chumbo, bismuto e arsênio que interferem no processo de nodulização. A nodulização com magnésio, que está contido nos principais agentes nodularizantes, é uma das etapas importantes na produção de ferros fundidos, devido a sua propriedade desoxidante (LABRECQUE; GAGNÉ, 1998).

Na usinagem de ferro fundido nodular, destacam-se trabalhos como o de Sosa et al.(2007) que avaliaram os efeitos da variação da velocidade da peça, penetração de

trabalho e número de nódulos do material na retificação de placas fabricadas em ferro fundido nodular, com paredes finas. Estes autores testaram três materiais que possuíam três diferentes números de nódulos ($600, 1200$ e 1500 nódulos/ mm^2). Eles empregaram três penetrações de trabalho ($0,01$; $0,03$; $0,07$ mm), duas velocidades da peça (16 e 21 m/min) e um rebolo de óxido de alumínio na forma de gel de semente (*seeded gel SG*). A velocidade de corte foi mantida constante igual a 20 m/s. As variáveis de saída analisadas foram os desvios de forma (incluindo a rugosidade), tensões residuais e a microestrutura das peças. Como resultados, os autores observaram que desvio de forma cresceu proporcionalmente com a penetração de trabalho e o número de nódulos, conforme apresentado na Fig. 2.18. Eles atribuíram este comportamento ao aumento de deformação plástica e de temperatura na área de contato rebolo/peça.

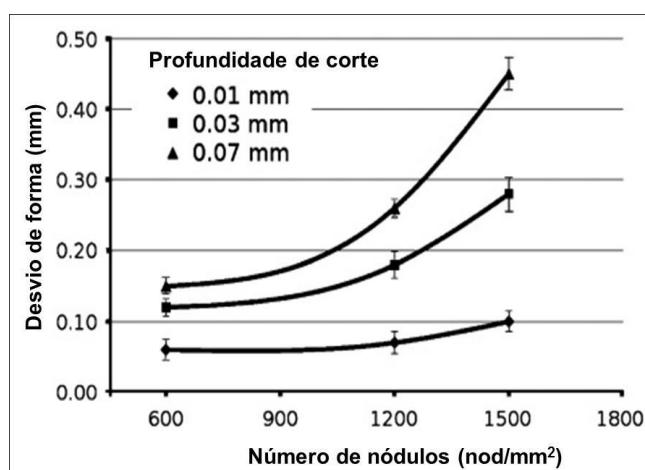


Figura 2.18 - Desvio de forma após a retificação de ferro fundido nodular com diferentes quantidades de nódulos de grafita e penetrações de trabalho (SOSA et al., 2007).

Ainda em relação aos resultados obtidos por SOSA et al., (2007), no que se refere à rugosidade, os autores observaram que ela diminuiu ligeiramente com o aumento do número de nódulos. Eles relataram ainda que houve uma queda nos valores de rugosidade com o aumento da velocidade da peça. Em relação à penetração de trabalho, ao elevar o valor de $0,01$ para $0,03$ mm, houve maior deformação plástica do material, geração de marcas mais profundas de retificação e deterioração do acabamento devido, já que houve aumento na área de contato entre os grãos abrasivos e a peça. No entanto, quando a penetração de trabalho se elevou para $0,07$ mm, maiores foram as forças de corte. Estas por sua vez provocaram o desprendimento de grãos gastos do rebolo, favorecendo assim o corte e resultando na melhoria do acabamento. Os autores atribuíram estes resultados ao

encolhimento do material durante o rápido resfriamento após atingir altas temperaturas. Estas tendências podem ser observadas na Fig. 2.19.

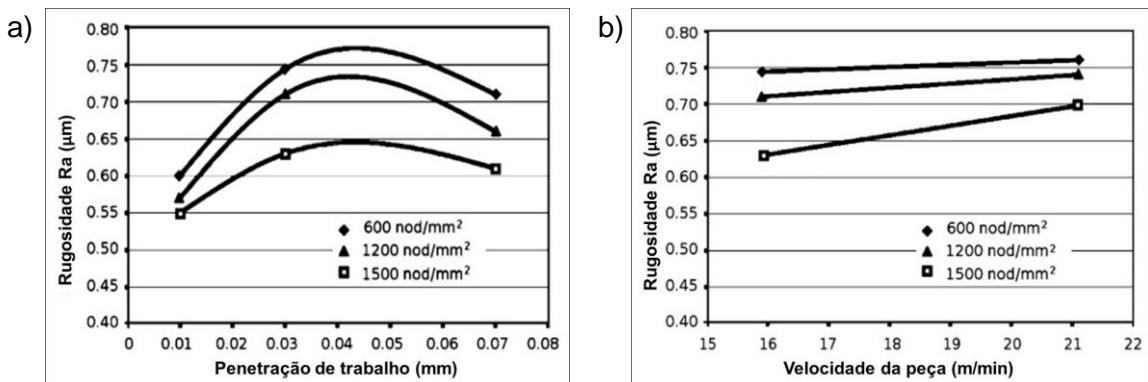


Figura 2.19 - Rugosidade após a retificação de ferro fundido nodular com diferentes quantidades de nódulos: a) e em função da penetrações de trabalho; b) em função da velocidade da peça (SOSA et al., 2007).

Em relação ao parâmetro tensões residuais, Sosa et al. (2007) constataram que em todos os casos elas foram do tipo trativas e, ao contrário das tendências observadas para os desvios, as tensões superficiais não mostraram tendências bem definidas em relação ao número de nódulos, penetração de trabalho e velocidade de corte.

Em outro trabalho experimental de investigação de retificabilidade do ferro fundido nodular, Taborga et al. (2003) empregaram diferentes rebolos e utilizaram o acabamento da superfície com parâmetro de saída. Eles testaram rebolos de SiC verde e Al₂O₃ branco nas mesmas condições de retificação e constataram que o rebolo de SiC foi aquele que apresentou desempenho superior. Eles atribuíram este melhor desempenho ao maior índice de friabilidade (IF) do rebolo de SiC, que é 62,7, contra IF igual a 56,6 do rebolo de alumina branco. O índice de friabilidade maior indica maior capacidade do grão se fraturar e de renovar as suas arestas durante o corte, garantindo um melhor acabamento.

As propriedades peculiares do ferro fundido nodular o tornam apropriado para serem utilizados em aplicações na indústria automobilística, principalmente para componentes de motores de combustão interna, como eixos virabrequins, pistões, eixo comando de válvulas, como também para válvulas e articulações de direção, cubo de roda, coletor de exaustão, (GUESSER, 2009; TOKTAS et al., 2006) como também de braço de suspensão de automóveis da indústria brasileira.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados o procedimento experimental e a metodologia adotados para o desenvolvimento dos ensaios de usinagem, as condições de corte e monitoramento das variáveis de saída investigadas. Inicialmente são apresentados os equipamentos utilizados e em seguida os materiais (peça e ferramentas) e o fluido de corte. Por último serão descritos os instrumentos de medição utilizados na pesquisa e a metodologia empregada para a condução dos ensaios e medição dos parâmetros de saída.

A fim de determinar os parâmetros de corte para avaliar a retificabilidade entre as três classes de ferros fundidos, foram realizados ensaios preliminares. Todos os ensaios, preliminares e definitivos, foram realizados na mesma máquina-ferramenta que será descrita na sessão 3.1. Nesta etapa, foram selecionadas duas amostras de ferro fundido vermicular e adotados os seguintes parâmetros no processo de retificação plana tangencial:

- duas penetrações de trabalho :15 μm e 30 μm , que resultaram em valores de espessura de corte equivalente iguais a 0,08 μm e 0,16 μm , respectivamente;
- velocidade de corte igual a 32 m/s;
- velocidade da peça de 10 m/min.

Ressalta-se que estes valores são aqueles recomendados para a retificação plana de aços com dureza próxima a do ferro fundido, realizada em máquina semiautomática com rebolos abrasivos convencionais, como é o caso desta pesquisa. Estes ensaios também visaram verificar o comportamento da rugosidade e de avaliar se as condições de corte selecionadas iriam resultar em valores de rugosidade Ra inferiores a 1,6 μm .

Concluída esta etapa, iniciou-se a execução da etapa seguinte que foi a realização dos ensaios definitivos. No Fluxograma da Fig. 3.1 são apresentadas as etapas desenvolvidas na metodologia para a condução dos ensaios definitivos, com informações da máquina- ferramenta utilizada, material da peça, ferramentas abrasivas e parâmetros de corte estabelecidos.

As variáveis de saída utilizadas para determinar o desempenho do processo de retificação para os três materiais analisados foram: a rugosidade superficial (parâmetros Ra e Rz) e a microdureza abaixo da superfície usinada. Além disso, foram adquiridas imagens das superfícies retificadas via Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV). Os ensaios de retificação foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU.

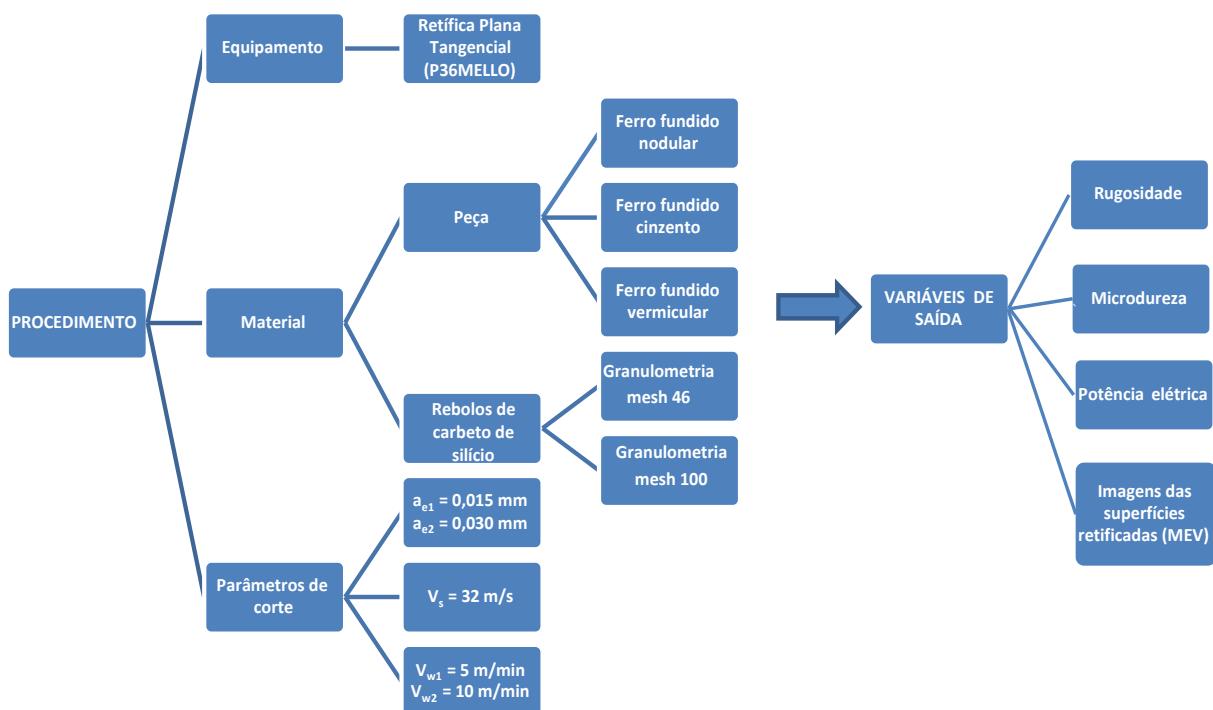


Figura 3.9 - Fluxograma das etapas para o desenvolvimento desta pesquisa.

3.1 Máquina-ferramenta

Os ensaios de retificação foram realizados em uma retificadora plana tangencial modelo P36, com rotação constante de 2400 rpm e potência de 3HP, do fabricante Mello S.A Máquinas e Equipamentos. Ela é do tipo semiautomática, com resolução no eixo Z de 5 μm (Fig. 3.2) e está instalada no Laboratório de Usinagem Convencional da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Esta máquina é composta por uma mesa magnética que realiza movimentos horizontais e verticais e por um cabeçote no qual o rebolo é acoplado e onde se realiza a regulagem da penetração radial do rebolo e da profundidade de corte.



Figura 3.10 - Retificadora plana tangencial Mello.

3.2 Rebolos utilizados

Nos ensaios de retificação foram utilizados dois rebolos de carbeto de silício (SiC) com ligante vitrificado e com abrasivos de diferentes granulometrias mesh, 46 e 100, cuja especificações são 36C46KVK e 39C100KVK, respectivamente. Os rebolos foram fornecidos pela empresa Saint-Gobain Abrasivos da América do Sul, com sede em Vinhedo – SP. Eles possuem as seguintes dimensões: 254 mm de diâmetro externo de x 25 mm de largura x 76 mm de diâmetro interno. Antes de montar o rebolo na máquina, foi feito o seu balanceamento para evitar vibrações indesejáveis durante a retificação. Na Fig. 3.3 estão as fotos dos dois rebolos já balanceados e fixados no cabeçote da retificadora.

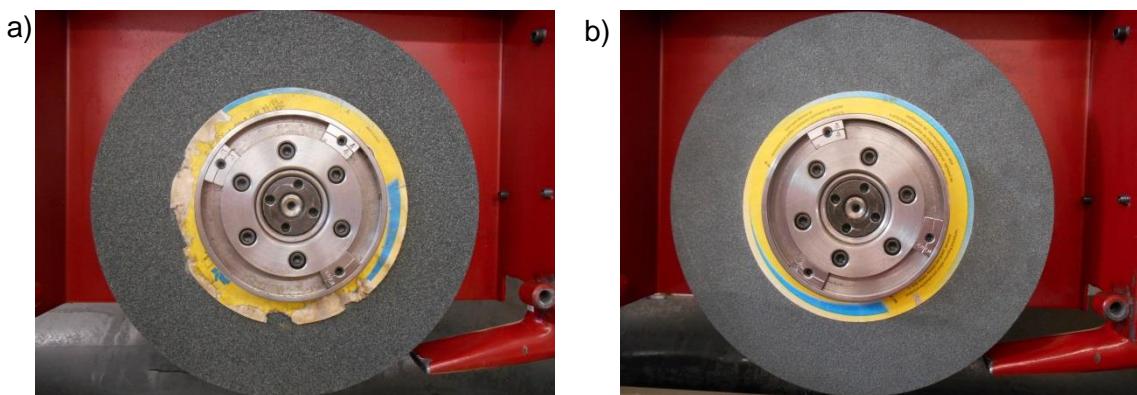


Figura 3.11 - Rebolos de SiC montados no cabeçote da retificadora a) 36C46KVK; b) 39C100KVK (Detalhe para a diferença visual do tamanho do grão).

3.3 Materiais das peças

Para esta pesquisa foram selecionados três materiais de peças: cinzento FC 250, vermicular FV 450 e nodular FE 45012 cujas composições químicas e propriedades mecânicas são apresentadas nas Tabs. 3.1 e 3.2, respectivamente. Estes materiais foram fornecidos pela empresa Tupy S.A.

Tabela 3.1 - Composição química das classes de ferros fundidos (cinzento, vermicular e nodular) investigados neste trabalho (TUPY, 2014).

Ferro Fundido	Elemento Químico	% em peso											
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Ti	Sn	Mg	Cu _{eq} ⁶	Mo	Ni
Cinzento	3,4 a 3,6	1,67	0,42	0,026	0,076	0,087	0,01	0,086	-	0,984	0,284	-	-
Vermicular	3,1 a 4,0	1,7 a 3,0	0,1 a 0,6	máx 0,065	0,007 a 0,012				0,08 a 0,14	0,6 a 1,5			-
Nodular	2,81 a 3,85	1,19 a 1,67	0,68 a 0,98	máx 0,02	máx 0,05	0,77 a 1,15	-	-	0,03 a 0,09	-	0,68 a 0,98	2,47 a 3,45	

Tabela 3.2 - Propriedades mecânicas dos ferros fundidos estudados neste trabalho (TUPY, 2014).

Propriedade	FC 250	FV 450	FE 45012
Resistência à Tração (MPa)	259	524	420
Módulo de Elasticidade (MPa)	105 - 120	379	280
Alongamento (%)	-	1,54	12
Dureza (HB)	207	229	150 - 200

Para cada material foram devidamente preparados vários corpos de provas. Eles foram inicialmente cortados em uma máquina serra de fita semiautomática, fabricante Franho - modelo FM 20, que resultaram em uma barra retangular de base quadrada com as dimensões de 48 mm de comprimento x 17 mm de altura x 20 mm largura. Em seguida as amostras foram fresadas no centro de Usinagem Vertical CNC Discovery, modelo 760, com potência do motor principal de 11 KW, rotação máxima de 10.000 RPM. Para esta etapa

foram utilizadas pastilhas de metal duro, classe ISO K, revestidas com TiN, recomendadas para usinagem de ferros fundidos cinzentos, com o objetivo de retirar as marcas deixadas pelo processo anterior e minimizar o desvio de paralelismo entre as faces inferior e superior. O procedimento e equipamentos utilizados nesta etapa podem ser mais bem visualizados na Fig. 3.4

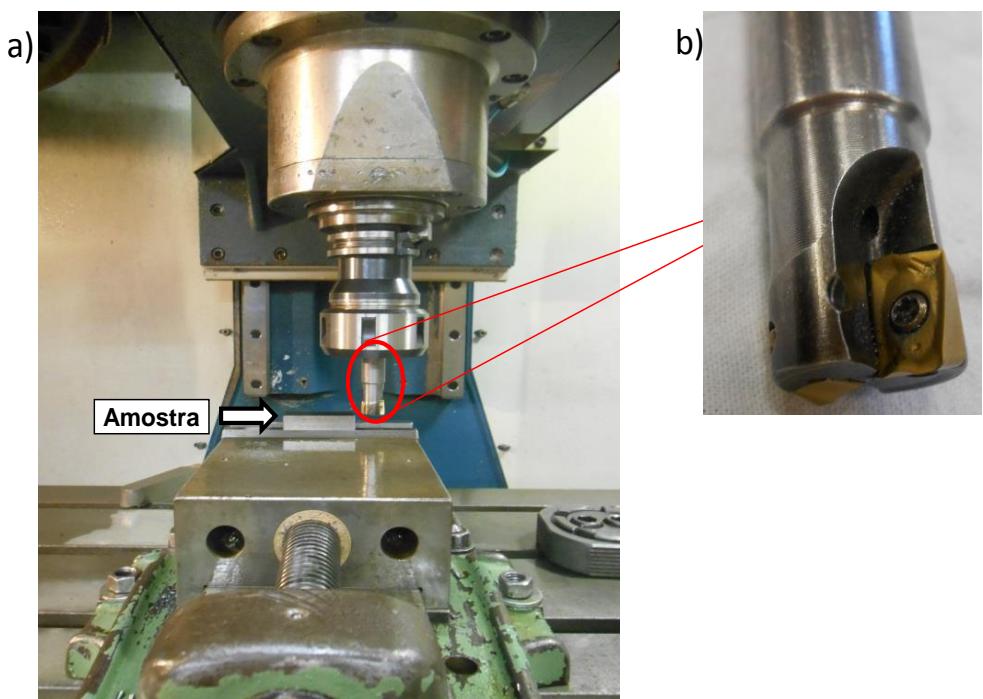


Figura 3.12 - Imagem da montagem para fresamento das amostras de ferros fundidos: a) sistema ferramenta-peça e acessórios, b) detalhe da ferramenta de corte e porta ferramenta.

Antes do início dos ensaios de retificação, foram retiradas amostras de cada um dos três materiais para realizar a caracterização metalográfica. Tais amostras foram embutidas, lixadas e, por fim, polidas, de forma que a microestrutura pudesse ser analisada e fotografada. As amostras foram levadas inicialmente ao microscópio óptico Olympus, modelo BX51 para analisar a forma e distribuição da grafita. Em seguida as amostras foram atacadas quimicamente com Nital 2% por 5 segundos e levadas ao Microscópio Eletrônico de Varredura – MEV para caracterização metalográfica. As micrografias obtidas para os três materiais, ferro fundido cinzento, vermicular e nodular, são apresentadas nas Figs. 3.5 a 3.7, respectivamente. A micrografia de cada material revela as suas principais características.

Observa-se através da Fig 3.5a que o ferro fundido cinzento FC 250 possui a grafita em forma de lamelas e que a sua matriz é 100% perlítica (Fig. 3.5b), enquanto que no ferro

fundido vermicular FV 450 a grafita apresenta-se na forma de veios (Fig. 3.6a) e a estrutura predominante do material é a perlita, com algumas concentrações de ferrita no contorno da grafita (Fig. 3.6b). Já na Fig. 3.7, para o ferro fundido nodular FE 45012, a grafita assume a forma esferoidal ou em nódulos (Fig 3.7a), com uma matriz essencialmente ferrítica, e neste caso pode ter até 25% de perlita e no máximo 5% de carbonetos dispersos.

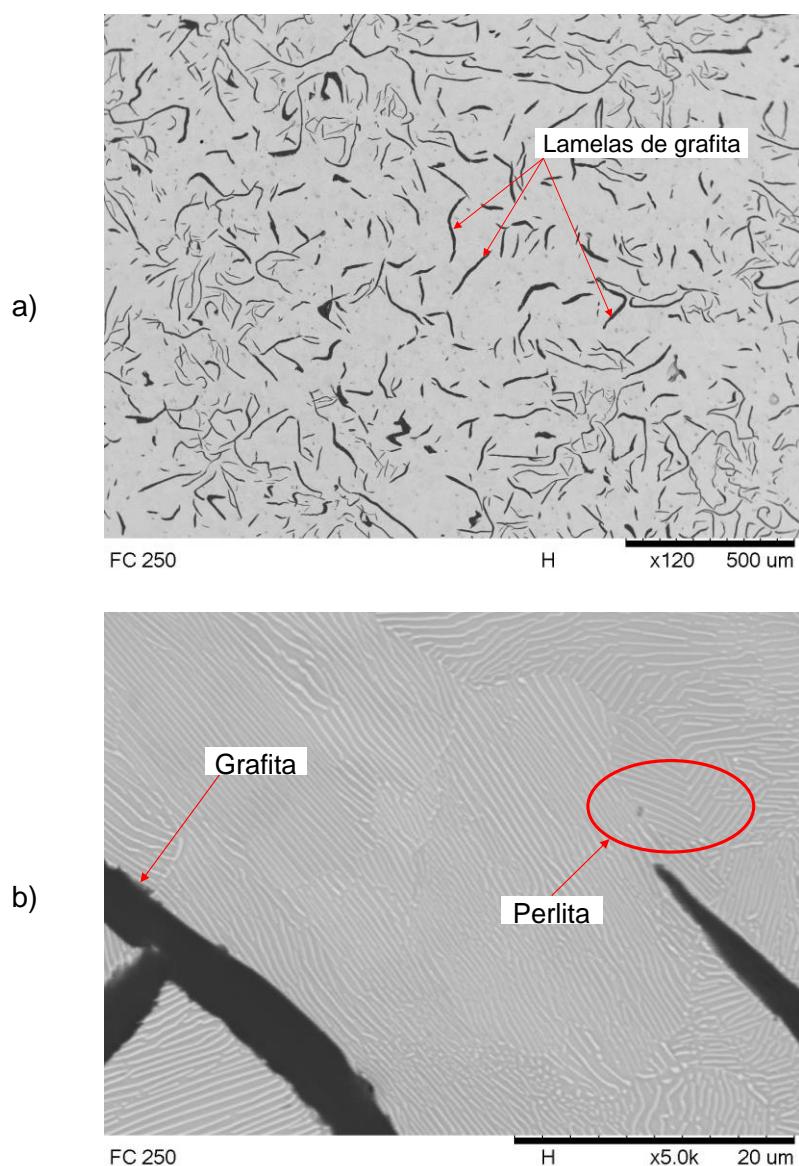


Figura 3.13 - Microestrutura do ferro fundido cinzento FC 250 a) sem ataque químico, b) com ataque químico Nital 2%.

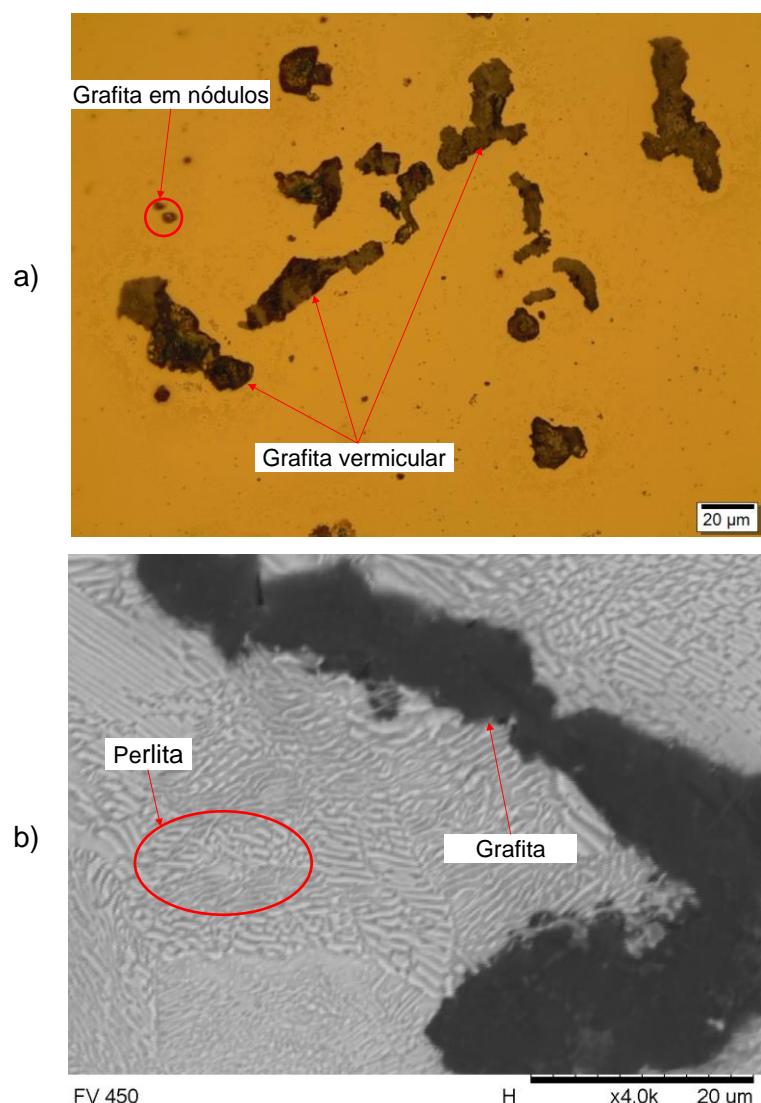


Figura 3.14 - Microestrutura do ferro fundido vermicular FV 450 a) sem ataque químico, b) com ataque químico Nital 2%.

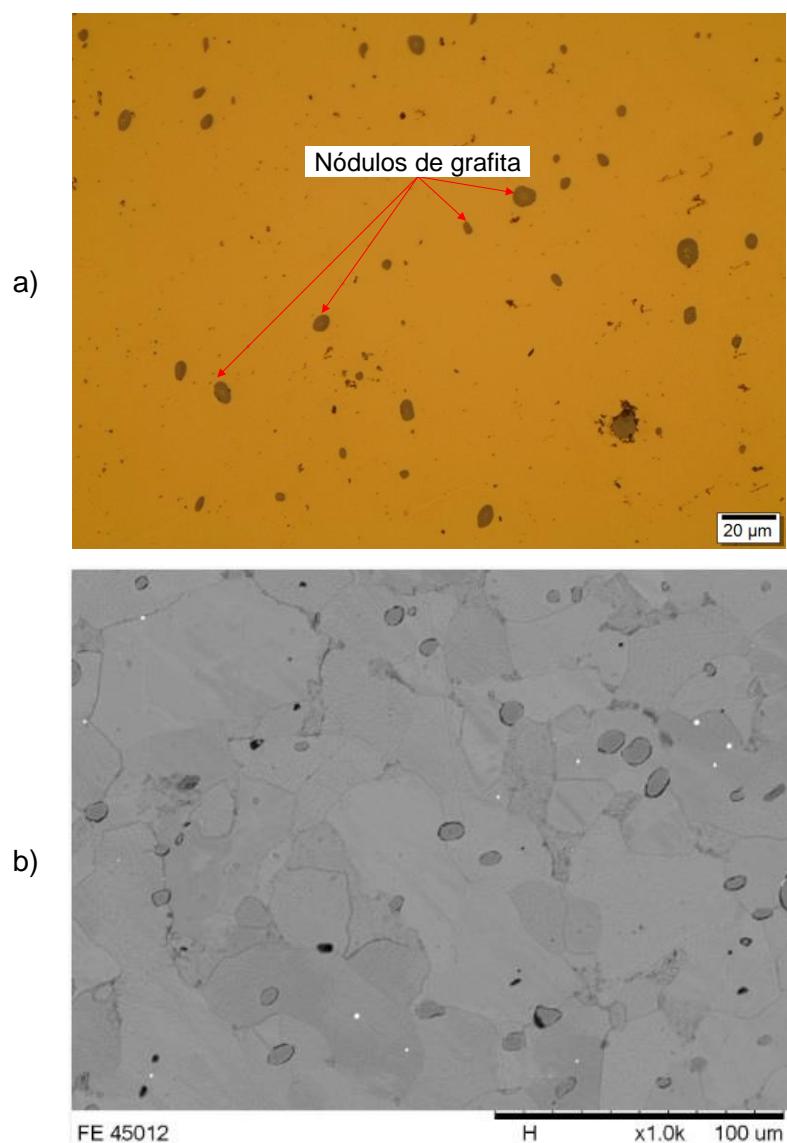


Figura 3.15 - Microestrutura do ferro fundido nodular FE 45012 a) sem ataque químico, b) com ataque químico Nital 2%.

3.4 Parâmetros de corte

Como já comentado, antes realizar os ensaios de retificação definitivos, foram realizados ensaios preliminares com o objetivo de identificar as condições de usinagem que permitissem obter respostas quanto à rugosidade consistentes para os três materiais investigados, e sem provocar queima de retificação, e desta forma servirem de referência para os ensaios com variação principalmente da penetração de trabalho. Todos os parâmetros de corte selecionados estão apresentados na Tab. 3.3.

Dentre os parâmetros utilizados, com exceção da velocidade longitudinal da peça e a penetração de trabalho, todos foram mantidos constantes durante os ensaios. No que se refere à operação de dressagem, esta foi realizada no início de cada ensaio utilizando um dressador de ponta única de diamante preso a um suporte, como mostrado na Fig. 3.9. A cada operação de dressagem, o dressador se deslocava junto com a mesa magnética por toda a espessura do rebolo a uma profundidade constante (a_d) 10 μm e utilizando fluido de corte.

Tabela 3.3 - Condições de usinagem utilizadas

PARÂMETRO	UNIDADE
Velocidade de corte (v_s)	32 m/s
Rotação da máquina	2400 rpm
Velocidade da peça (v_w)	5 e 10 m/min
Penetração de trabalho (a_e)	15 e 30 μm
Avanço transversal da mesa (a_p)	0,72 mm / fim de curso do avanço longitudinal
Volume de material removido (VMR)	55,9 mm^3
Vazão do fluido de corte (V_f)	545 L/h
Profundidade de dressagem (a_d)	10 μm
Grau de recobrimento do rebolo (U_d)	3

O critério de parada dos ensaios foi determinado pela remoção na altura da peça com valor de 60 μm . Assim, como foram empregadas dois diferentes valores de penetração de trabalho, foram inicialmente realizados ensaios com quatro ciclos de retificação para penetração de trabalho (a_e) de 15 μm ; em seguida ensaios foram realizados com dois ciclos de retificação com $a_e = 30 \mu\text{m}$, portanto resultando em um volume de material removido igual a 55,9 mm^3 . Como a mesa da retificadora possui movimento intermitente, a cada fim de curso longitudinal ela realiza um avanço transversal em média de 0,72 mm até que toda a largura do rebolo percorra a superfície da peça e complete um ciclo de retificação, assim como mostrado no esquema da Fig. 3.8.

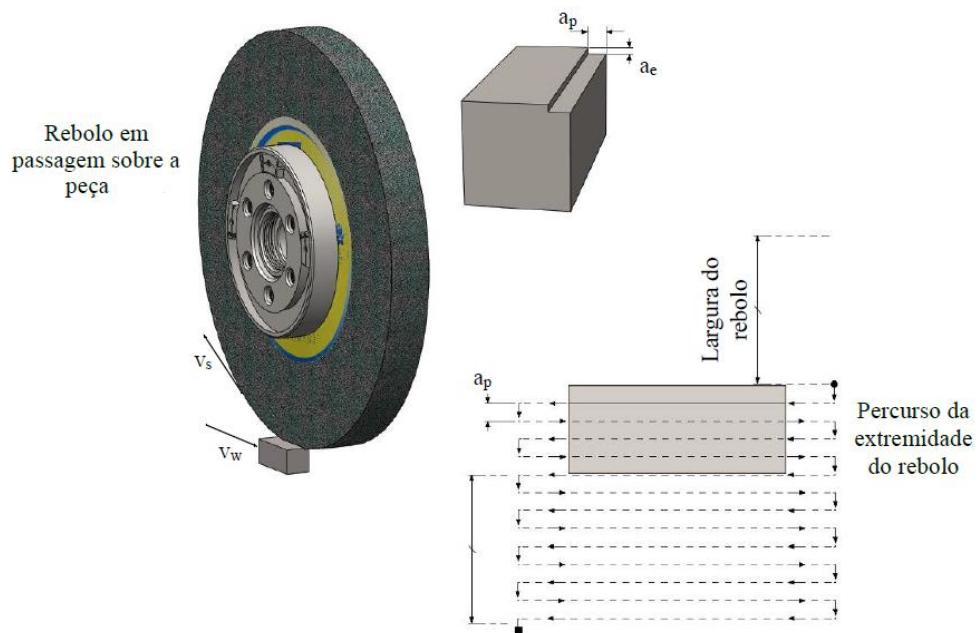


Figura 3.16 - Avanço transversal da mesa magnética (MELLO et al., 2015).

No que se refere à operação de dressagem do rebolo, esta foi realizada no início de cada ensaio com o auxílio de um dressador de ponta única de diamante 0,5 ct, modelo PU-0.3-MK1-50, fornecido pela empresa Saint Gobain Abrasives. Este dressador foi preso a um suporte, como mostrado na Fig. 3.9a, cujos detalhes de projeto estão na Fig. 3.9b. A cada operação de dressagem, o conjunto suporte-dressador se deslocava junto com a mesa magnética por toda a espessura do rebolo a uma profundidade constante (ad) 10 μm e utilizando fluido de corte.

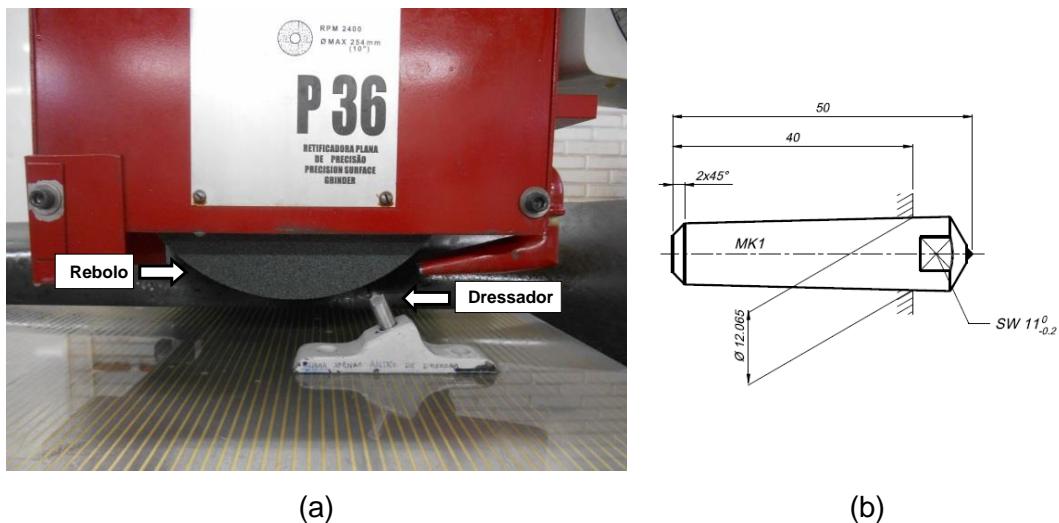


Figura 3.9 - Montagem do dressador na mesa magnética para operação de dressagem: a) vista geral da montagem, b) detalhes do dressador (cortesia e foto autorizada - Saint Gobain Abrasives)

Todos os ensaios foram realizados com fluido de corte, inclusive as operações de dressagem do rebolo. Utilizou-se um fluido de corte semissintético de base vegetal Vasco 7000, da fabricante Blasser Swisslube, em solução com água na proporção de 1:19. O bocal foi posicionado de forma que o fluido fosse aplicado tangente ao rebolo, a uma vazão de 545 L/h (Fig. 3.10). Este bocal é do tipo sapata e que acompanha a máquina-ferramenta.

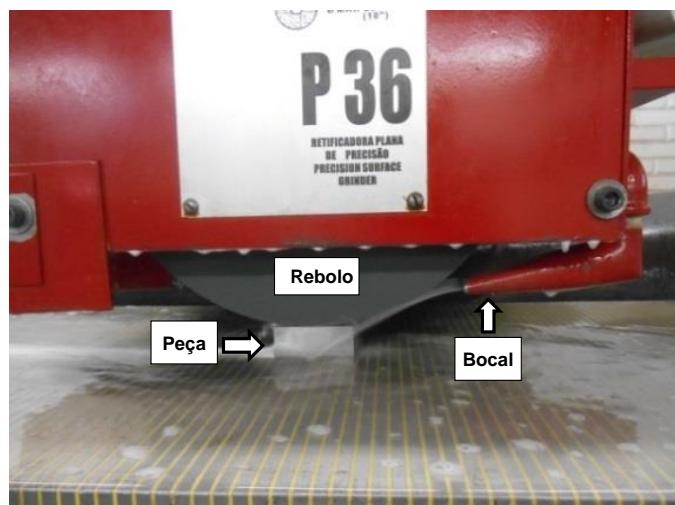


Figura 3.10 - Posicionamento do bocal com o fluido de corte.

Os ensaios foram realizados com base em planejamentos fatoriais 24, que consiste de quatro parâmetros de entrada (material, velocidade longitudinal, penetração de trabalho e

granulometria mesh do rebolo), dos quais três são quantitativos (velocidade longitudinal, penetração de trabalho e granulometria do rebolo) e um qualitativo (material). Cada ensaio sofreu uma réplica, logo foram realizados quarenta e oito (48) ensaios de retificação no total. Foram realizadas três análises comparando os materiais dois a dois, ou seja, primeiramente para o ferro fundido cinzento (-1) e ferro fundido vermicular (+1), em seguida uma nova sequência considerando o ferro fundido vermicular (-1) comparado ao ferro fundido nodular (+1), e por fim, comparando o ferro fundido cinzento (-1) com o ferro fundido nodular. Os fatores foram avaliados em dois níveis (um alto e outro baixo), fazendo uma comparação entre os três materiais. Na Tabela 3.4 são mostrados os fatores agrupados com os níveis empregados e na Tab. 3.5 é apresentada a configuração do planejamento utilizado.

Tabela 3.4 - Variáveis de entrada a dois níveis.

Variável	Nível (-1)	Nível (+1)
Material	Fofo cinzento/ Fofo vermicular	Fofo vermicular / Fofo nodular
Velocidade longitudinal da peça (m/min)	5	10
Penetração de trabalho (μm)	15	30
Granulometria do rebolo (mesh)	46	100

Tabela 3.5 - Planejamento Fatorial 2^4 utilizado para a comparação entre dois materiais por vez.

Ordem	Material	Velocidade longitudinal da peça	Penetração de trabalho	Granulometri a do rebolo
01	-	-	-	-
02	+	-	-	-
03	-	+	-	-
04	+	+	-	-
05	-	-	+	-
06	+	-	+	-
07	-	+	+	-
08	+	+	+	-
09	-	-	-	+
10	+	-	-	+
11	-	+	-	+
12	+	+	-	+
13	-	-	+	+
14	+	-	+	+
15	-	+	+	+
16	+	+	+	+

3.5 Parâmetros de saída

A avaliação do desempenho do processo de retificação das três classes de ferros fundidos foi baseada nas variáveis de saída: acabamento das superfícies usinadas por meio da rugosidade, microestrutura e microtureza e por meio das análises das superfícies e subsuperfícies das peças após a usinagem.

3.5.1 Medição da rugosidade

A rugosidade da superfície foi definida pelos parâmetros de amplitude rugosidade média (R_a) e rugosidade total (R_z). A medição da rugosidade foi realizada com o auxílio de um rugosímetro portátil modelo SJ201P, do fabricante Mitutoyo, com resolução de 0,01 μm . O comprimento de onda do filtro (cut-off) foi de 0,8 mm o comprimento de avaliação de 4,0 mm. As medições foram realizadas perpendicularmente à direção de avanço longitudinal da peça e equidistantes de 10 mm, como ilustrado na Fig. 3.11.

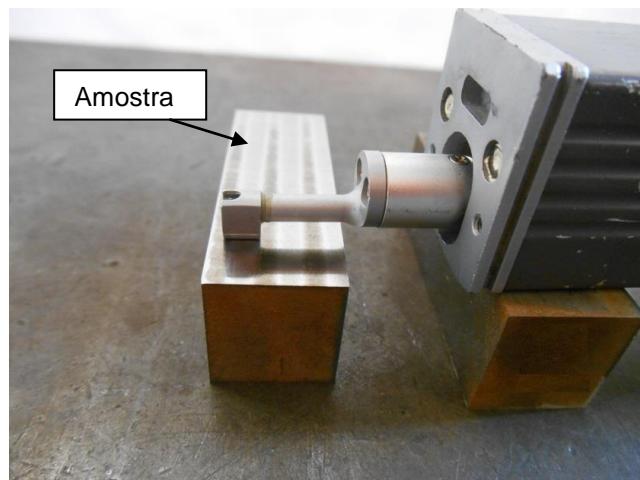


Figura 3.11 - Esquema de montagem do rugosímetro para medição da rugosidade na superfície após o processo de retificação.

O rugosímetro foi posicionado sobre uma superfície de apoio, de mesma altura dos corpos de prova, para garantir menor desvio de paralelismo entre o apalpador e a superfície da peça e, assim, melhor utilização do apalpador. Os valores de rugosidade apresentados correspondem aos resultados da média aritmética de quatro (4) medições realizadas em pontos diferentes da peça, após cada ensaio de usinagem realizado (Fig. 3.12). Os resultados de rugosidade foram também analisados com base na análise de significância do

planejamento 2k e para o tratamento estatístico e para isso foram calculados a média e o desvio padrão dos resultados obtidos.

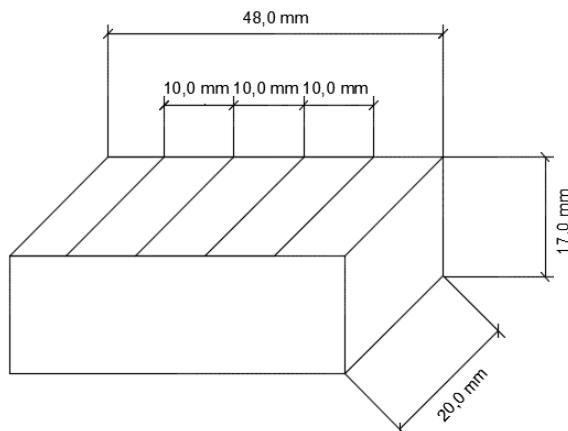


Figura 3.12 - Regiões de medição da rugosidade na superfície da peça.

3.5.2 Medição da microdureza

Após a realização dos ensaios de retificação as amostras foram preparadas para medição da microdureza. Sendo assim, todas as amostras foram lixadas com lixas d'água de alumina (do fabricante 3M) de diferentes granulometrias mesh (80, 180, 220, 320, 600 e 1200) e polidas na sequência com pasta de óxido de cromo seguida da pasta de alumina com 1 μm e 0,3 μm . O polimento foi realizado em uma máquina politriz rotativa automática com rotação de 600 rpm. Sempre após cada uma das etapas de lixamento e de polimento, as amostras foram limpas com acetona PA em um equipamento conhecido como limpador por vibração ultrassônica (ultrasonic cleaner) para remover os grãos abrasivos da etapa anterior.

A microdureza das peças retificadas foi avaliada por meio do microdurômetro SHIMADZU HMV-2 Series, pertencente ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. A carga aplicada para cada teste foi de 255,2 mN (HV 0,025) por um período de 15 s. Este valor foi estabelecido com base em pré-testes para ajuste de carga. Durante os ensaios foram realizadas oito (8) medições em três (3) regiões distintas da amostra. As medições foram iniciadas a 30 μm da superfície retificada, com uma distância horizontal entre as indentações de 30 μm e espaçamento entre indentações de 20 μm (de forma a respeitar a distância mínima de duas vezes o comprimento da indentação) para se obter valores de microdureza em diferentes profundidades, como mostrado na Fig. 3.13. O objetivo deste ensaio foi

identificar se houve alteração na microdureza abaixo das superfícies das três classes de ferros fundidas após o processo de retificação.

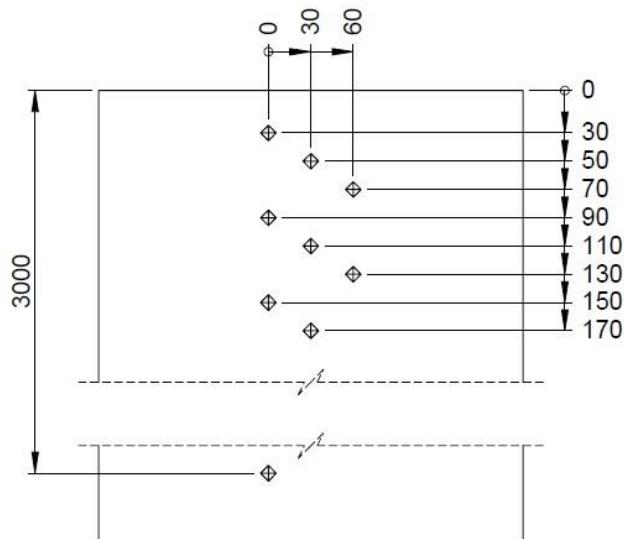


Figura 3.13 - Esquema de medição de microdureza com detalhamento das distâncias das indentações nas direções horizontal e vertical.

3.5.2 Análise das superfícies e subsuperfície das peças usinadas

A análise das superfícies usinadas e também das microestruturas de todas as amostras após o processo de retificação foi realizada com o auxílio do Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo TM 3000, do fabricante Hitachi (Fig. 3.14). Nesta etapa foram aplicadas ampliações de 250, 500 e 1000 vezes em todas as amostras. O objetivo dessa análise foi identificar a ocorrência de danos na superfície (tais como queima e microtrincas) e abaixo da superfície de cada um dos materiais usinados. No caso da análise microestrutural, todas as amostras foram polidas com Sílica Coloidal 0,05 μm . Na sequência elas foram atacadas quimicamente com Nital 2% por 5 segundos e, finalmente, levadas ao microscópio óptico Olympus, modelo BX51, com uma ampliação de 10x para observação e captura das imagens.



Figura 3.14 - Microscópio eletrônico de varredura utilizado na pesquisa.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta sessão serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após a retificação das três classes de ferros fundidos (cinzento FC 250, vermicular FV 450 e nodular FE 45012), com rebolo de carbeto de silício e nas várias condições de corte empregadas nesta pesquisa. Inicialmente serão apresentados os resultados de rugosidade, com a análise de significância do planejamento 2^k , seguidos pelos perfis de microdureza e, por fim, as imagens das superfícies e subsuperfície retificadas com as devidas análises.

4.1 Rugosidade

Os resultados de rugosidade (parâmetros Ra e Rz) serão apresentados separadamente para cada classe de ferro fundido e vale ressaltar que, após cada ensaio de retificação, foram efetuadas quatro medições na superfície da peça, possibilitando deste modo a determinação da média aritmética dos valores obtidos.

4.1.1 Ferro fundido cinzento FC 250

Os resultados médios de rugosidade para os parâmetros de amplitude Ra (rugosidade média) e Rz (rugosidade média máxima) obtidos para o ferro fundido cinzento FC 250 são apresentados nas Figs. 4.1 e 4.2, respectivamente. Estes valores foram obtidos em quatro posições diferentes na superfície retificada, utilizando duas penetrações de trabalho, duas velocidades da peça e duas diferentes granulometrias mesh para o rebolo de carbeto de silício, conforme já informado no Capítulo 2. Os valores apresentados são resultados da média aritmética entre o ensaio principal e a réplica.

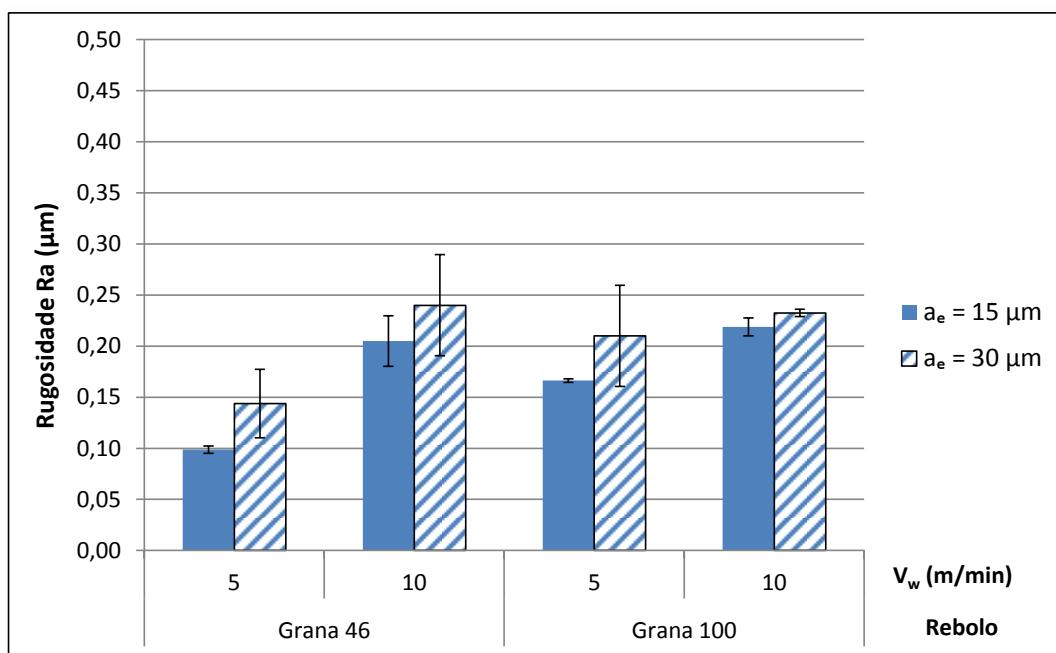


Figura 4.1 - Rugosidade Ra para o ferro fundido cinzento FC 250 em função da velocidade da peça (v_w), granulometria mesh do rebolo e da penetração de trabalho (a_e).

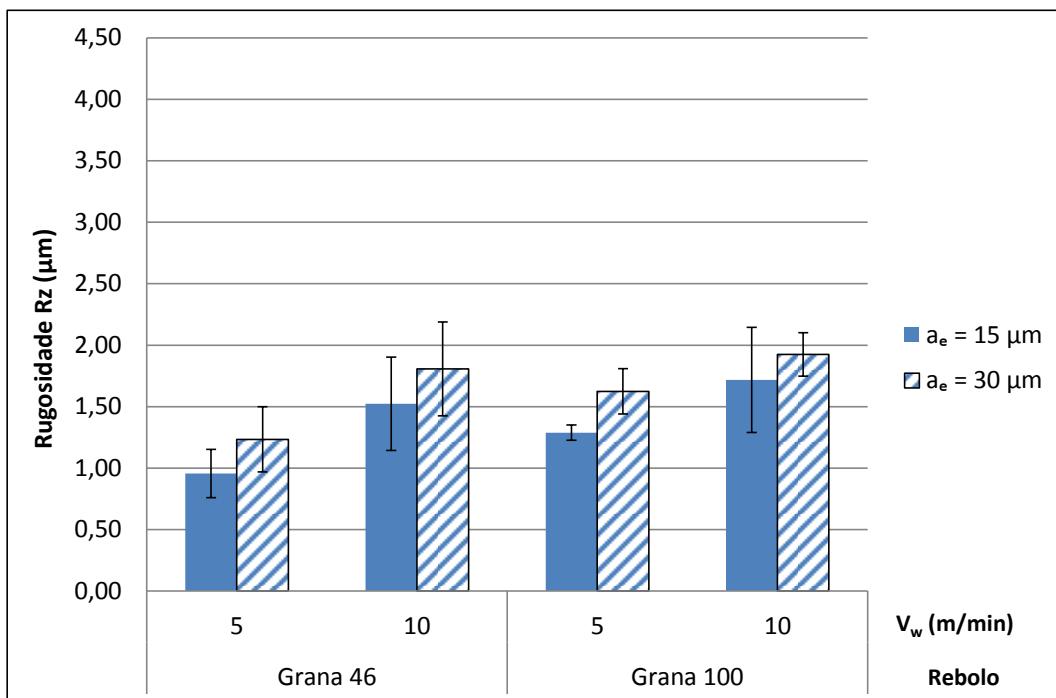


Figura 4.2 - Rugosidade Rz para o ferro fundido cinzento FC 250 em função da velocidade da peça (v_w), granulometria mesh do rebolo e penetração de trabalho (a_e).

Das Figuras 4.1 e 4.2 observa-se que, para ambos os parâmetros de rugosidade avaliados, a rugosidade em geral aumenta com a penetração de trabalho, tendência já esperada de acordo com a literatura. Estudos realizados por Bianchi et al. (1996) relevaram que este fenômeno ocorre porque, inicialmente, com uma menor penetração do rebolo na peça, um número reduzido de grãos atuam para a remoção de material com um menor tempo de contato. Progressivamente, com a elevação dos valores de penetração de trabalho, a taxa de remoção de material e a área de contato aumentam na mesma proporção do número de grãos na região de contato, o que aumenta os esforços de corte da ferramenta sobre a peça e elevam a temperatura de corte, consequentemente, afetando de forma negativa a qualidade da superfície retificada.

Da Figura 4.1 observa-se ainda que os valores de Ra situam-se abaixo de 0,30 μm , valores estes bem inferiores ao limite máximo de Ra igual a 0,63 μm , valor usualmente adotado como referência para processos de retificação de semi-acabamento (KALPAKJIAN; SCHMID, 2009). Normalmente ao se empregar rebolos com granas na faixa de 36 a 80 são alcançados acabamento para operações de semi-acabamento com tolerâncias medianas, enquanto que as granas na faixa de 60 a 150 permitem alcançar melhores acabamentos e tolerâncias mais apertadas (MARINESCU et al., 2007).

Na Tabela 4.1 são apresentados os valores percentuais calculados para os parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) após a retificação do ferro fundido cinzento FC 250 quando se aumentou a penetração de trabalho de 15 para 30 μm nas diferentes velocidades da peça e granulometrias mesh do rebolo. Observa-se que em todas as condições houve elevação nos valores de rugosidade, independente da velocidade da peça e granas empregadas. Os aumentos percentuais mais expressivos foram em geral observados para o parâmetro Ra após a usinagem com a menor velocidade da peça, 40% e 23% para as granas 46 e 100, respectivamente. Tendência semelhante foi observada para o parâmetro Rz para o qual os aumentos percentuais resultaram em 29% e 27% para as granas 46 e 100, respectivamente. Destes resultados pode-se afirmar que, à medida que a velocidade da peça aumenta, a penetração de trabalho exerce menos influência nos valores de rugosidade nas condições investigadas. A explicação para estes resultados está relacionada com a espessura de corte equivalente (Eq. 2.4). Como tanto a penetração de trabalho quanto a velocidade da peça estão nos numeradores da equação, há uma relação direta de proporcionalidade entre estes dois e a espessura de corte equivalente. Entretanto, ao dobrar o valor da velocidade de corte (normalmente um valor inteiro) a magnitude da espessura de corte equivalente será muito maior que aquela resultante do dobro da penetração de trabalho (normalmente fração ou décimos de milímetros). Desta forma, um

maior valor de espessura de corte equivalente implica em maior quantidade de cavaco sendo removida, maior interação entre os grãos e a peça que eleva os esforços de corte e, consequentemente, piorando a qualidade da superfície retificada. Além disso, como relatado por Marinescu et al. (2007), o aumento na velocidade da peça (vw) resulta em maior vibração da máquina-ferramenta e, consequentemente, elevando os valores de rugosidade.

Tabela 4. 1 – Variação percentual dos parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) obtidos após a retificação do ferro fundido cinzento FC 250 ao aumentar a penetração de trabalho nas diversas condições de corte.

Rebolo	Velocidade da peça (m/min)	Parâmetro de rugosidade	Variação percentual (%)
Grana 46	5	Ra	40
		Rz	29
	10	Ra	14
		Rz	19
Grana 100	5	Ra	23
		Rz	27
	10	Ra	5
		Rz	11

Damasceno (2010), ao realizar ensaios de retificação do aço ABNT 4340 (dureza média de 54 HRc) em diferentes condições de corte, também verificou um comportamento semelhante ao observado nesta pesquisa, em que o parâmetro de Ra aumentou com a penetração de trabalho. O autor atribuiu esta tendência ao aumento da espessura do cavaco, consequência do aumento da penetração de corte, ou seja, a rugosidade aumenta à medida que o cavaco remove uma maior quantidade de material da peça. O aumento da penetração de trabalho implica ainda em cavacos com maiores dimensões, os quais, com a progressão do corte, se agrupam e podem causar o empastamento do rebolo. Dessa forma, o cavaco alojado no rebolo diminui a eficiência na retificação, aumenta os esforços de corte da ferramenta sobre a peça e, consequentemente, compromete a superfície retificada.

Mendes (2011), ao realizar ensaios de retificação de uma placa de cobre, observou que o acabamento piorou com o aumento da penetração de trabalho de 10 para 20 μm , em que os valores de rugosidade passaram de uma faixa de 0,8 a 0,85 μm para 1 a 1,35 μm . Paula (2007) também relatou a variação no parâmetro de rugosidade média Ra com a

penetração de trabalho (ae) durante a retificação do aço ABNT 1020 no seu estado recozido. O autor verificou que o aumento mais significativo da rugosidade ocorreu após a usinagem com $ae = 30 \mu\text{m}$ e que nesta condição ocorreu queima da peça.

Em relação à influência da grana do rebolo, observa-se das Figs. 4.1 e 4.2 que em todas as condições testadas, o rebolo com grana mesh 100 proporcionou maiores valores de rugosidade Ra e Rz em relação aquele de grana 46, contrariando a expectativa com base na literatura sobre usinagem por abrasão. Estes resultados não são esperados, pois é relatado por Klocke (2009) que quanto menor for o tamanho do grão, menor será o espaçamento entre eles e também menor a quantidade de cavaco removido, o que proporciona um melhor acabamento. No entanto, rebolos com grãos muito finos são indicados para operações de acabamento, no qual se utilizam valores de penetração de trabalho muito pequenos ($< 15 \mu\text{m}$). Como as penetrações de trabalho utilizadas são na ordem de 15 e 30 μm , tanto a espessura de corte equivalente quanto à espessura dos cavacos são maiores. Com isso, o rebolo estará sujeito a maiores forças de corte, e, portanto, resulta em maiores valores de rugosidades. Em alguns casos, quando o rebolo e/ou as condições de corte não estão devidamente ajustados, o processo se torna mais severo e assim, e com isso será gerado mais calor na zona de corte. Se o fluido de corte sendo entregue não for suficiente para auxiliar na remoção do calor, este será direcionado em grande quantidade parte para a peça e, desta forma, elevando a temperatura a ponto de causar alteração na microestrutura da peça, culminando com a queima de retificação. Isso levará ao descarte da peça e em prejuízos (MARINESCU et al., 2004).

4.1.2 Ferro fundido vermicular FV 450

Nas Figuras 4.3 e 4.4 são mostrados os resultados de rugosidade dos parâmetros de amplitude Ra e Rz, respectivamente obtidos após a retificação do ferro fundido vermicular FV 450 com distintas condições de corte. Os valores apresentados nestas figuras são resultados do cálculo da média aritmética para os ensaios principal e réplica.

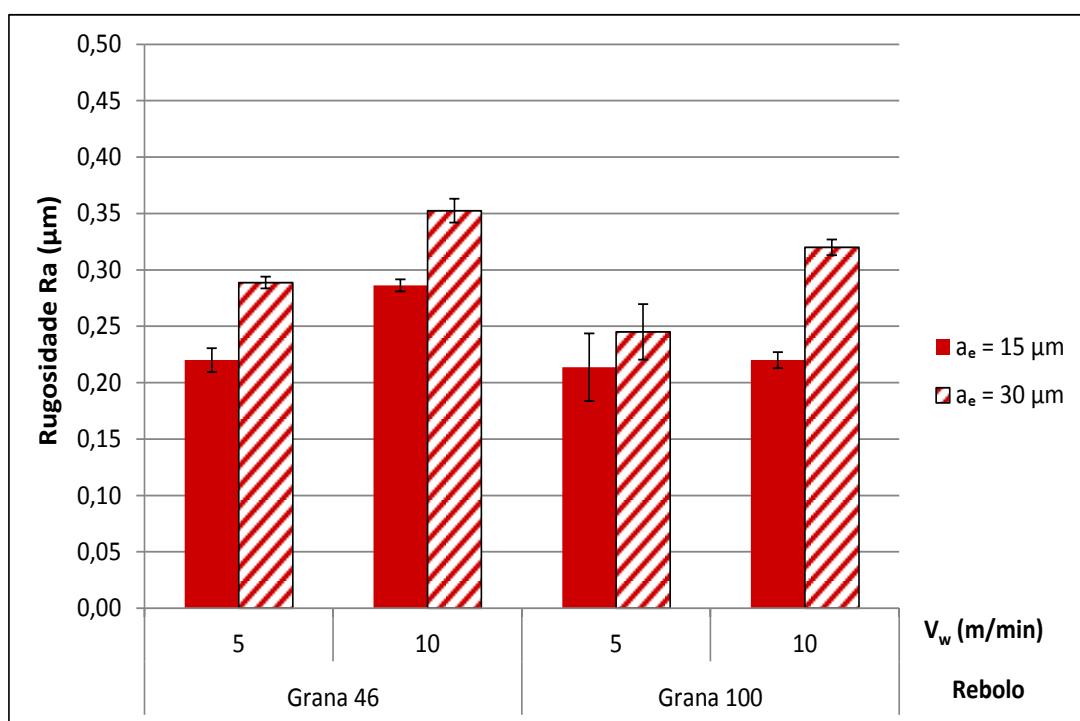


Figura 4.3 - Rugosidade Ra para o ferro fundido vermicular FV 450 em função da velocidade da peça (v_w), granulometria mesh do rebolo e diferentes valores de penetração de trabalho (a_e).

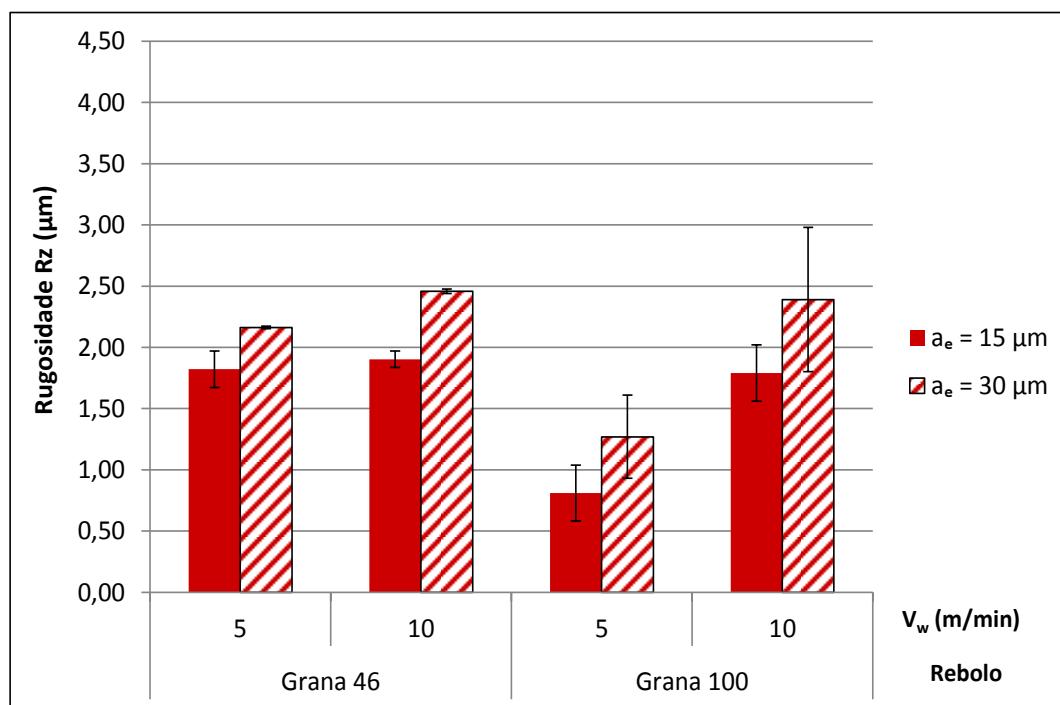


Figura 4.4 - Rugosidade Rz para o ferro fundido vermicular FV 450 em função da velocidade da peça (v_w) e granulometria mesh do rebolo e penetração de trabalho (a_e).

Da Figura 4.3 observa-se que, de forma semelhante aos resultados encontrados para o ferro fundido cinzento FC 250, a rugosidade Ra para o ferro fundido vermicular FV 450 também aumentou com a penetração de trabalho e que eles situam-se abaixo de 0,40 μm , valores estes também inferiores ao limite máximo para operações de semi-acabamento. Já os valores de Rz situaram-se abaixo de 3,00 μm .

A fim de facilitar a comparação e análise dos resultados de acabamento, os resultados da variação percentual para os parâmetros de rugosidade ao aumentar a penetração de trabalho de 15 para 30 μm foram agrupados em função da velocidade da peça e granulometria mesh e são apresentados na Tabela 4.2. Nota-se que a maior variação dentre as medições foram observadas para o rebolo de grana 100. Em termos percentuais, o parâmetro Ra foi o mais expressivo, com um aumento de 32% e 19% para as granas 46 e 100, utilizando uma menor velocidade da peça. De forma semelhante, foi observado um aumento percentual do parâmetro Rz de 19% e 57% para as granas 46 e 100, respectivamente.

Tabela 4.2 – Variação percentual dos parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) obtidos após a retificação do ferro fundido cinzento FV 450 ao aumentar a penetração de trabalho nas diversas condições de corte.

Rebolo	Velocidade da peça (m/min)	Parâmetro de rugosidade	Variação percentual (%)
Grana 46	5	Ra	32
		Rz	19
	10	Ra	21
		Rz	29
Grana 100	5	Ra	19
		Rz	57
	10	Ra	45
		Rz	34

De forma semelhante aos resultados encontrados para o ferro fundido cinzento, o aumento da velocidade da peça (v_w) de 5 para 10 m/min afetou de forma negativa o acabamento, independente da granulometria e penetração de trabalho empregados. Para a maior penetração de trabalho ($a_e = 30 \mu\text{m}$), notou-se que houve em torno de 20,7% de

aumento na rugosidade Ra para o rebolo com grana 46 e 28% para o rebolo com grana 100. Já com relação à granulometria mesh, que representa o tamanho do grão do rebolo, os resultados mostram que, diferentemente do observado para o ferro fundido cinzento FC 250, a redução no tamanho do grão (aumento da grana) provoca uma queda nos valores de rugosidade Ra de 13,8% e 8,6% para $v_w = 5$ e 10 m/min respectivamente, ressaltando que para ambos foi considerada a penetração de trabalho com o aumento mais expressivo, ou seja, $a_e = 30 \mu\text{m}$.

Demir et al. (2010) também observaram essa mesma tendência após realizarem a retificação do aço AISI 1050, com dureza média de 50 HRc, com quatro rebolos com diferentes granas (36, 46, 60, 80) e seis penetrações de trabalho (10, 20, 30, 40, 50 e 60 μm), em que a rugosidade diminuiu proporcionalmente com o aumento da grana (redução do tamanho do grão) e também da penetração de trabalho. Klocke (2009) afirma que, em comparação com os aços endurecidos, os ferros fundidos são mais favoráveis à usinagem por abrasão, devido às suas inclusões de grafita e sua microestrutura ferrítica e perlítica.

4.1.3 Ferro fundido nodular FE 45012

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são mostrados os resultados de rugosidade dos parâmetros de amplitude Ra e Rz, respectivamente obtidos após a retificação do ferro fundido nodular FE 45012 para as diferentes condições de usinagem.

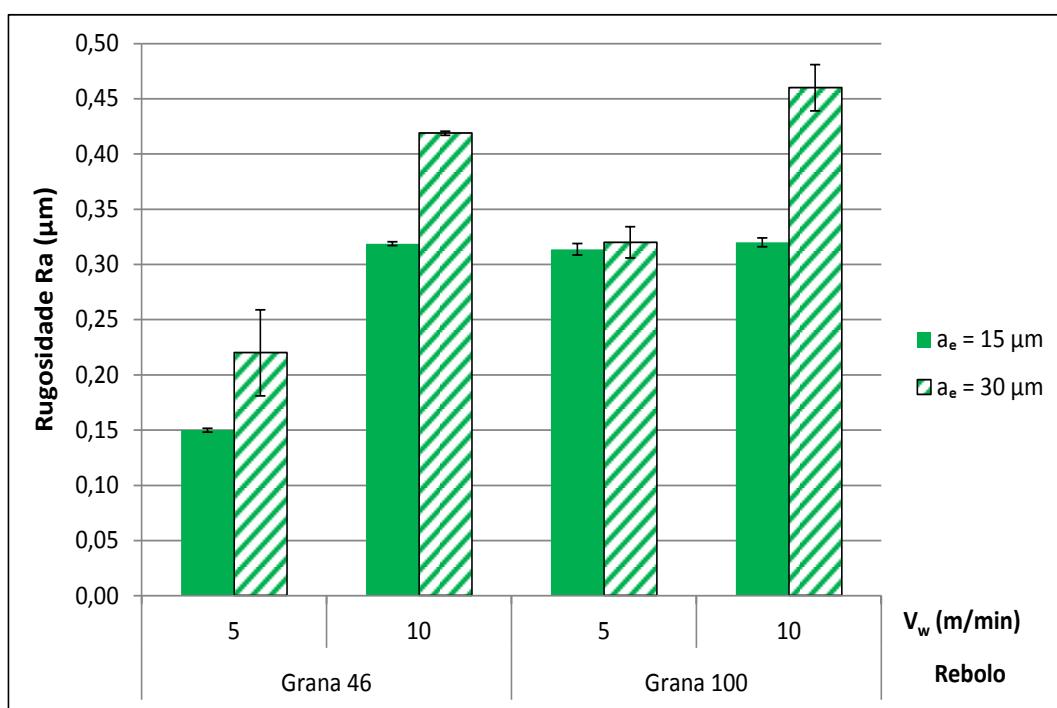


Figura 4.5 - Rugosidade Ra para o ferro fundido nodular FE 45012 em função da velocidade da peça (v_w) e granulometria mesh do rebolo e penetração de trabalho (a_e).

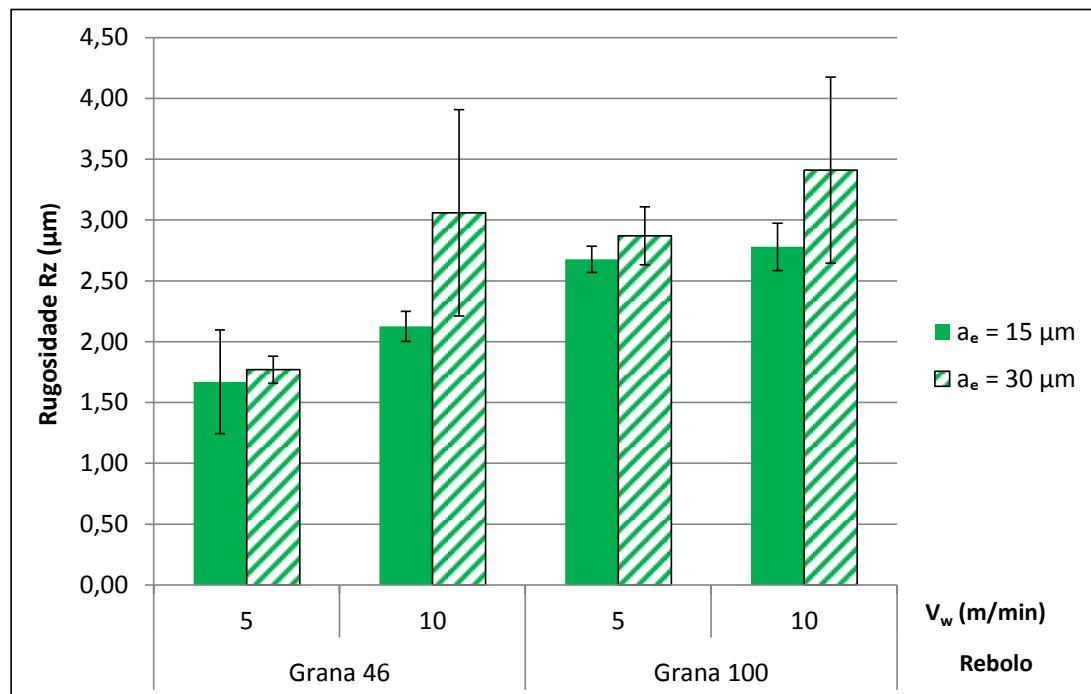


Figura 4.6 - Rugosidade Rz para o ferro fundido nodular FE 45012 em função da velocidade da peça (v_w) e granulometria mesh do rebolo e penetração de trabalho (a_e).

Ao comparar os resultados nas Figs. 4.5 e 4.6 com aqueles das Figs. 4.1 a 4.4 (para ferro fundido cinzento e ferro fundido vermicular), observa-se uma tendência semelhante de aumento da rugosidade com a penetração de trabalho, para ambos parâmetros de rugosidade, após a retificação do ferro fundido nodular FE 45012. No entanto, desta comparação entre os três materiais, observa-se que os valores de Ra para o ferro fundido nodular foram bem superior aqueles encontrados para os outros dois materiais, principalmente na condição mais severa ($a_e = 30 \mu\text{m}$) e rebolo com grana 100, mas ainda assim com valores de Ra inferiores a 0,50 μm .

Na Tabela 4.3 são apresentados, em termos percentuais, o aumento dos parâmetros de rugosidade Ra e Rz quando se utilizou uma condição mais severa ($a_e = 30 \mu\text{m}$), para as duas velocidades da peça e granas do rebolo. Observa-se desta tabela que os maiores valores percentuais foram obtidos após a usinagem com o rebolo de grana 46, com 47% e 31% para as velocidades da peça de 5 e 10 m/min, respectivamente. Como já comentando anteriormente, os valores de rugosidade são mais sensíveis à variação da velocidade da peça do que em relação a penetração de trabalho, devido a ordem de grandeza destes parâmetros; a velocidade da peça aumentou duas vezes, 5 para 10 m/min, enquanto que a penetração de trabalho também foi dobrada, porém de 15 para 30 μm . Com isso, o maior valor de velocidade da peça aumenta a quantidade de material removido e, portanto, deteriora o acabamento.

Tabela 4.3 – Variação percentual dos parâmetros de rugosidade (Ra e Rz) obtidos após a retificação do ferro fundido nodular FE 45012 ao aumentar a penetração de trabalho nas diversas condições de corte.

Rebolo	Velocidade da peça (m/min)	Parâmetro de rugosidade	Variação percentual (%)
Grana 46	5	Ra	47
		Rz	-6
	10	Ra	31
		Rz	44
Grana 100	5	Ra	3
		Rz	7
	10	Ra	44
		Rz	23

Sosa e Echeverría (2015) realizaram ensaios de retificação do ferro fundido nodular austemperado em diferentes condições de corte e observaram que o acabamento também piorou quando a velocidade da peça foi elevada de 16 m/min para 28 m/min, mantendo os demais parâmetros constantes. Taborga (2002) realizou ensaios de retificação do ferro fundido nodular GGG70 e também relatou que os valores de rugosidade Ra aumentaram quando a velocidade da peça foi aumentada de 27 m/min para 36,3 m/min. Ele atribuiu este resultado a relação de velocidades que ele denominou de q , ($q = v_s/v_w$). Segundo o autor, quanto maior esta relação, menor será a espessura de corte equivalente e, consequentemente, resultando em menor força de usinagem o que reflete de forma positiva na rugosidade. Marinescu et al. (2004) afirmam que no processo de retificação, o parâmetro rugosidade R_t depende inicialmente da relação de velocidades (q) e, em segundo lugar, a penetração de trabalho.

Com relação à grana do rebolo, os valores de rugosidade Ra para o ferro fundido nodular FE 45012 seguem o mesmo comportamento observado após a retificação do ferro fundido cinzento com rebolo de SiC, em que os valores de rugosidade aumentam com a grana do rebolo, ou sob o ponto de vista do tamanho do grão (relação inversa da grana) o menor tamanho de grão do rebolo proporcionou os piores valores de rugosidade (Ra e R_z), o que vai na direção contrária aquela que é normalmente relatado na literatura. É importante atentar-se para o tipo de cavaco produzido durante a retificação de materiais dúcteis, principalmente com baixa dureza que tendem a formar cavacos longos. Com isso, a recomendação é selecionar rebolos de grãos abrasivos maiores (menor grana).

Outra possível explicação para esta relação de aumento de Ra com a grana deve-se ao fato de que grãos com dimensões menores (maior grana) possuem teoricamente arestas de corte menores, e assim estando mais sujeitas a quebras e desgaste acelerado durante a retificação. Além disso, rebolos contendo grãos menores em geral possuem também mais materiais ligantes distribuídos entre os grãos. Assim tanto os grãos quanto o ligante são forçados a passar sobre a superfície das peças. Quando o grão perde aderência com o ligante, ele estará mais propenso a se desprender do rebolo e, portanto, vários grãos se desprendendo irão afetar negativamente o acabamento. Mas esta afirmação ganharia mais peso se fosse realizada uma investigação mais detalhada da topografia do rebolo após os vários passes de retificação, que não foi o foco desta pesquisa.

4.1.4 Comparativo geral da rugosidade entre os ferros fundidos estudados

Devido à maior sensibilidade do parâmetro Ra com os parâmetros de corte analisados nesta pesquisa, na Figura 4.7 são apresentados os resultados de rugosidade Ra para todos

os materiais e agrupados em função da penetração de trabalho (a_e), velocidade da peça (v_w) e a grana do rebolo de SiC. Por FFC entende-se ferro fundido cinzento FC 250, por FFC ferro fundido vermicular FV 450 e por FFV ferro fundido nodular FE 45012.

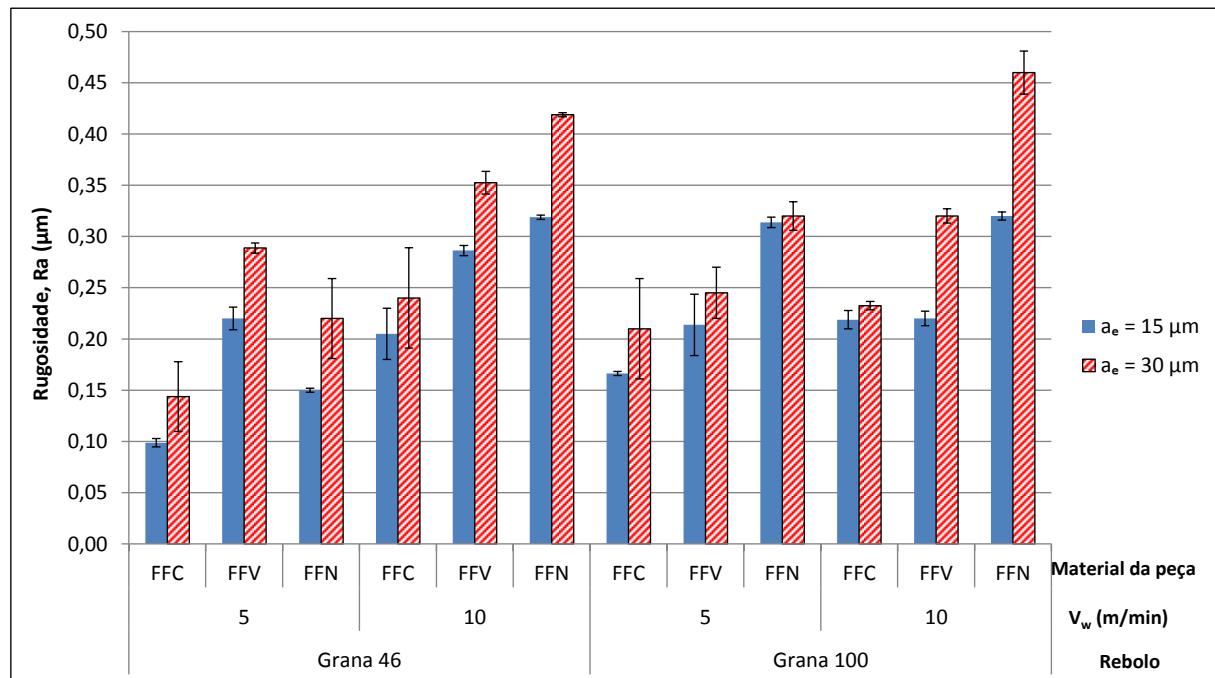


Figura 4.7 - Valores de rugosidade, Ra, para os três ferros fundidos estudados (FFC, FFV e FFN) obtidos após a retificação plana tangencial com rebolo de SiC e em diferentes condições de corte.

Da Figura 4.7 pode-se observar que para todos os materiais e condições de corte, os valores médios de rugosidade foram menores quando se utilizou uma menor penetração de trabalho ($a_e = 15 \mu\text{m}$). Esse comportamento se manteve após a usinagem com a menor velocidade da peça ($v_w = 5 \text{ m/min}$), consequência da menor espessura de corte equivalente e maior tempo de contato entre o rebolo e a superfície da peça. Com relação à grana do rebolo, o aumento deste parâmetro (redução do tamanho do grão abrasivo), ocasionou aumento da rugosidade tanto para a classe de ferro fundido cinzento FC 250 quanto para a classe do ferro fundido nodular FE 45012, diferentemente do observado após a usinagem da classe de ferro fundido vermicular FV 450. De forma geral, o intervalo dos valores médios de rugosidade Ra, considerando o desvio padrão, foi de aproximadamente 0,11 a 0,48 μm .

É possível observar ainda que, para as condições utilizadas, os valores de rugosidade obtidos para o ferro fundido vermicular FV 450 foram superiores aqueles registrados para o ferro fundido cinzento FC 250. O comportamento dúctil ou frágil exerce grande influência na

formação do cavaco em processos de retificação, como também no acabamento e outros parâmetros de integridade de superfície e subsuperfícies de peças usinadas. Desta forma, a diferença nos valores de rugosidade para estas duas classes, pode ser atribuída à maior resistência mecânica do ferro fundido vermicular, que é quase o dobro do cinzento. Além disso, as grafitas lamelares do ferro fundido cinzento promovem o início de fratura e sua propagação, fazendo com que o ferro fundido cinzento assuma um comportamento frágil, enquanto a grafita vermicular não favorece a clivagem e nem a propagação de trincas (JÚNIOR; GUESSER, 2011). A melhor usinabilidade do ferro fundido cinzento em relação às outras classes quando submetidos a processos de usinagem convencionais com ferramentas de geometria definida (torneamento e fresamento, por exemplo) também é relatada na literatura.

Outro fator a ser considerado em relação à composição química destes dois materiais é a formação de sulfeto de manganês no ferro fundido cinzento FC 250, composto químico ausente no ferro fundido vermicular FV 450. No ferro fundido cinzento o enxofre reage com o manganês (Mn) e forma inclusões de sulfeto de manganês (MnS). Em operações de usinagem com ferramentas de geometria definida, estas inclusões durante a usinagem se depositam na superfície da ferramenta e assim formando uma camada protetora. Esta camada ou película irá atuar como lubrificante sólido local, o que, consequentemente, irá favorecer a redução do coeficiente de atrito na interface cavaco/ferramenta, servindo como barreira contra o desgaste da ferramenta (ASTAKHOV; JOKSCH, 2012; PEREIRA et al., 2006). Sabe-se que as velocidades de corte em processos de retificação são bem mais elevadas que nos processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida, como o fresamento, por exemplo, e que grãos dos abrasivos convencionais possuem reduzidas áreas de contato, o que dificulta a permanência das inclusões de MnS sobre as superfícies dos grãos abrasivos. Mas mesmo assim, acredita-se que estas inclusões podem ter se alojado entre os grãos, preenchendo os vazios dos poros, e atuando também como lubrificantes na interface rebolo peça, promovendo também redução do atrito e melhorando as condições tribológicas que por sua vez resultaram em melhor acabamento. Já no ferro fundido vermicular FV 450, devido a ausência do MnS, não houve a formação de camada lubrificante, devido ao baixo valor residual de enxofre presente no material e ao fato deste combinar-se preferencialmente com o magnésio - elemento nodulizante - não restando quantidade suficiente para combinar o manganês e formar a camada protetora de MnS (DAWSON et al., 2001). Com isso, o acabamento das peças neste material foi ligeiramente inferior.

Como já comentando no capítulo 1, no ferro fundido nodular FE 45012, a presença de nódulos (em vez de veios) de grafita confere a este material relativa ductilidade e outras propriedades mecânicas que se aproximam daquelas do aço. E dentre os ferros fundidos estudados neste trabalho, foi para esta classe que os valores de rugosidade se apresentaram mais elevados, o que pode ser atribuído a esta relativa ductilidade. Durante a retificação de materiais com comportamento dúctil, como é o caso de aços comum ao carbono no estado recocido ou de outros materiais não metálicos, há a tendência de formação de cavacos longos. Estes por sua vez, podem ocupar os espaços vazios no rebolo e reduzem a capacidade de corte dos grãos abrasivos, como também podem obstruir a passagem do fluido de corte na superfície do rebolo. Com isso, tantos os grãos abrasivos quanto o material da peça aderido nas camadas mais externas do rebolo irão atritar-se contra e peça, o que irá prejudicar o acabamento. Além disso, na retificação de materiais dúcteis, devido à maior área do regime plástico, o material da peça também é empurrado para as laterais dos grãos abrasivos, fenômeno este conhecido com fluxo de material lateral que foi traduzido da terminologia Inglesa “*side material flow*”, e podendo permanecer na superfície da peça mesmo após a usinagem.

De acordo com Marwanga et al. (2010), no processo de formação do cavaco do ferro fundido nodular ocorre deformação plástica da matriz entre os nódulos e as forças de compressão fazem com que os nódulos se desprendam da matriz. A deformação plástica causa o alongamento dos nódulos na direção de corte, ocasionando fratura dúctil. Dessa forma, há uma maior tendência das partículas metálicas serem comprimidas e se aderirem aos poros do rebolo, causando o seu empastamento. Com a progressão da usinagem, os cavacos alojados atritam-se com a superfície da peça, ocasionando apenas deformação elástica e plástica do material e diminuindo a qualidade superficial do material. Acredita-se que tal fenômeno tenha ocorrido durante o processo de retificação do ferro fundido nodular FE 45012 nas condições investigadas neste trabalho.

Para garantir maior confiabilidade estatística nos resultados de rugosidade Ra obtidos nesta pesquisa, foi realizada uma análise de significância sempre comparando as classes dos ferros fundidos duas a duas. Adotaram-se a confiabilidade de 95% e nível de significância (p ou p-valor) igual a 5% para todas as análises. Estes resultados são apresentados nas Tabs. 4.4 a 4.6.

Da Tabela 4.4 observa-se que existe diferença significativa entre os resultados obtidos para o FC 250 (cinzento) e o FV 450 (vermicular) e que a velocidade da peça, penetração de trabalho e as interações entre material com a grana do rebolo e velocidade da peça com grana influenciaram significativamente os resultados. No caso do ferro fundido vermicular

(FV 450) a rugosidade aumentou em média 0,08 µm, como pode ser observado na coluna de efeito. Ao aumentar a velocidade da peça de 5 para 10 m/min, a rugosidade aumentou em média 0,06 µm, enquanto o aumento da penetração de trabalho de 15 para 30 µm provocou um aumento médio de 0,05 µm. As interações tanto do material e a grana do rebolo quanto da velocidade da peça e grana também ocasionaram um aumento nos valores de rugosidade Ra, ao passar de um nível (-1) para um nível (+1), conforme estabelecido na Tab. 3.4.

Tabela 4.4 - Análise de significância do Planejamento 2^4 para a rugosidade Ra comparando os ferros fundidos FC 250 e FV 450.

	Efeito	p-valor
Material	0,077500	0,000241
v_w	0,060000	0,000803
a_e	0,051562	0,001604
Grana	-0,001875	0,830803
Material x v_w	-0,009375	0,311458
Material x a_e	0,017188	0,094010
Material x Grana	-0,036875	0,006846
$v_w \times a_e$	0,002188	0,803313
$v_w \times Grana$	-0,023750	0,035764
$a_e \times Grana$	-0,001562	0,858570

Ao observar os dados a Tabela 4.5, nota-se também que existe diferença significativa entre os resultados de rugosidade Ra obtidos para os ferros fundidos FV 450 (vermicular) e o FE 45012 (nodular) e que tanto as variáveis de entrada (velocidade da peça e penetração de trabalho) quanto às interações do material com a velocidade da peça e o material com a grana do rebolo influenciaram significativamente as respostas. Com o aumento da velocidade da peça e penetração de trabalho, os valores de rugosidade Ra também se elevaram em média de 0,09 µm e 0,08 µm, respectivamente. No que se refere às interações, a interação do material com a velocidade da peça causou uma elevação média de 0,04 µm em Ra, enquanto a interação entre o material e a grana do rebolo ocasionou um aumento médio de 0,06 µm na rugosidade, quando se passou de um nível (-1) para um nível (+1), conforme estabelecido na Tab. 3.4.

Tabela 4.5 - Análise de significância do Planejamento 2⁴ para a rugosidade Ra comparando os ferros fundidos FV 450 e FE 45012.

	Efeito	p-valor
Material	0,047812	0,023281
v_w	0,089375	0,001802
a_e	0,075000	0,003893
Grana	0,018750	0,261448
Material x v_w	0,038750	0,047538
Material x a_e	-0,006250	0,690662
Material x Grana	0,057500	0,011631
$v_w \times a_e$	0,027187	0,125952
$v_w \times Grana$	-0,035937	0,059704
$a_e \times Grana$	-0,002188	0,888392

Na Tabela 4.6 são apresentados os resultados para a análise de significância entre os valores de rugosidade Ra obtidos para os ferros fundidos FC 250 (cinzento) e o FE 45012 (nodular). Observa-se que os parâmetros velocidade da peça e penetração de trabalho também exerceram influência significativa, assim como observado para as outras análises (Tabelas 4.4 e 4.5).

Tabela 4.6 Análise de significância do Planejamento 2⁴ para a rugosidade Ra comparando os ferros fundidos FC 250 e FE 45012.

	Efeito	p-valor
Material	0,125312	0,000452
v_w	0,098750	0,002358
a_e	0,057812	0,013155
Grana	0,055625	0,015253
Material x v_w	0,029375	0,114300
Material x a_e	0,023438	0,187918
Material x Grana	0,020625	0,237469
$v_w \times a_e$	0,015000	0,374061
$v_w \times Grana$	-0,044406	0,035164
$a_e \times Grana$	-0,006250	0,701185

Contudo, para esta análise da Tabela 4.6, a grana do rebolo e a interação entre ela e a velocidade da peça também influenciaram significativamente as respostas, de forma que ao passar do nível material FC 250 para o FE 45012, os valores de rugosidade Ra se elevaram em torno de 0,12 μm . Ao aumentar a velocidade da peça, a resposta média de Ra foi em torno de 0,10 μm , enquanto que o aumento tanto na penetração de trabalho e alteração na grana do rebolo resultaram em uma elevação de Ra igual a 0,06 μm . Com relação à interação da velocidade da peça com a grana do rebolo, o valor de rugosidade (Ra) sofreu uma queda média de 0,04 μm , quando se passou de um nível (-1) para um nível (+1), conforme estabelecido na Tab. 3.4.

Com base nos resultados e análises de significância para a rugosidade Ra apresentadas anteriormente, observa-se que eles comprovaram estatisticamente os resultados apresentados anteriormente nas Figs. 4.1, 4.3, 4.5 e 4.7.

4.2 Microdureza

Nas Figuras 4.8 a 4.10 são mostrados os valores de microdureza das três classes de ferros fundidos FC 250 (cinzento), FV 450 (vermicular) e FE 45012 (nodular), respectivamente, após a retificação plana tangencial com rebolo de SiC (diferentes granas), com duas penetrações de trabalho, 15 e 30 μm , e duas velocidades da mesa, 5 e 10 m/min. A linha pontilhada indica o valor de referência da dureza da amostra antes do processo de retificação enquanto que as demais linhas representam a média dos três valores obtidos para cada profundidade abaixo da superfície retificada.

4.2.1 Ferro fundido cinzento FC 250

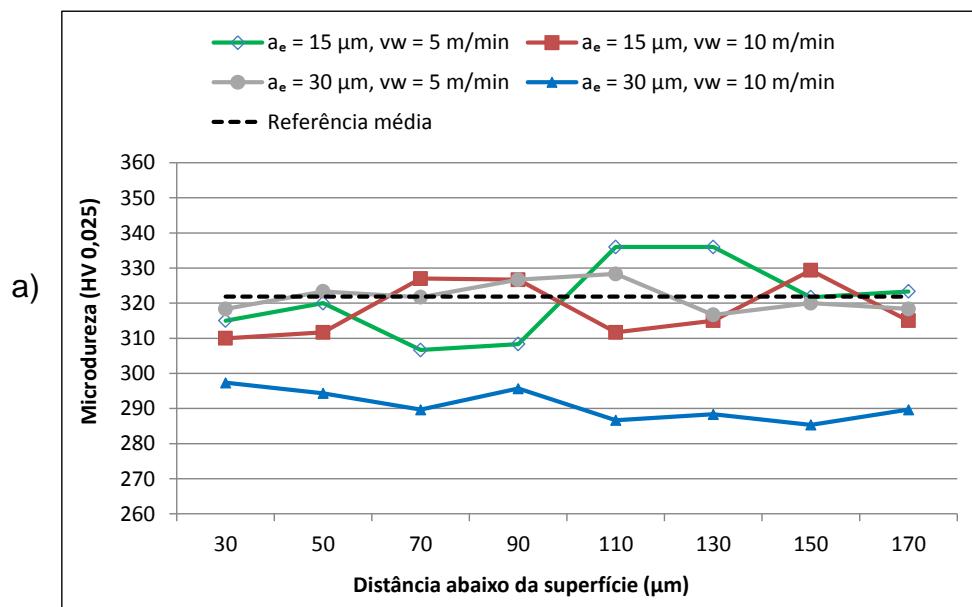
Nas Figuras 4.8a e 4.8b são mostrados os resultados de microdureza obtidos após a retificação do ferro fundido cinzento nas diversas condições de corte e com os rebolos de granas 46 e 100, respectivamente.

Observa-se da Fig. 4.8a que, em geral, os resultados de microdureza se mantiveram em torno da média do valor do material antes da usinagem. Além disso, observa-se uma leve queda de microdureza superficial do material retificado, cerca de 8,6%, após a retificação nas condições mais severas de usinagem ($a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 10 \text{ m/min}$) até o valor próximo a 170 μm abaixo da superfície. Contudo, nenhuma conclusão pode ser retirada para esta observação, pois é sabido da literatura que a microestrutura de ferros fundidos

cinzentos, em geral, é não homogênea devido a fatores relacionados com o processo de fundição, dentre outros. Esta não homogeneidade implica em áreas que apresentam dureza inferior aquela da matriz. Desta forma, acredita-se que a amostra selecionada para este experimento seja parte de região da barra de ferro fundido cinzento com as características de não homogeneidade, portanto não sendo possível afirmar que tenha havido queda na dureza do material em função do processo de retificação nas condições empregadas neste trabalho.

Este fato vem ao encontro de estudos em retificação realizado por Fathallah et al. (2009), que também constaram uma leve queda de microdureza em consequência do aumento do a_e . A possível causa da queda na dureza, de acordo com Damasceno (2010), pode estar associada aos vários ciclos de aquecimento, seguido de rápido resfriamento que ocorrem na superfície da peça durante a retificação, gerando estruturas com dureza menor que a inicial. Malkin e Guo (2008) afirmam ainda que, quando não há queima, é normal que ocorra esse amolecimento do material, devido a um revestimento próximo à superfície retificada.

Na Figura 4.8b são mostrados os resultados de microdureza para o ferro fundido cinzento FC 250 após a retificação com o rebolo de grana 100. Embora os valores de microdureza obtidos para as condições mais severas de usinagem (maior v_w) sugerem que houve queda deste parâmetro, não é possível afirmar que houve diferença significativa entre os valores de microdureza nas condições investigadas para o ferro fundido cinzento FC 250.



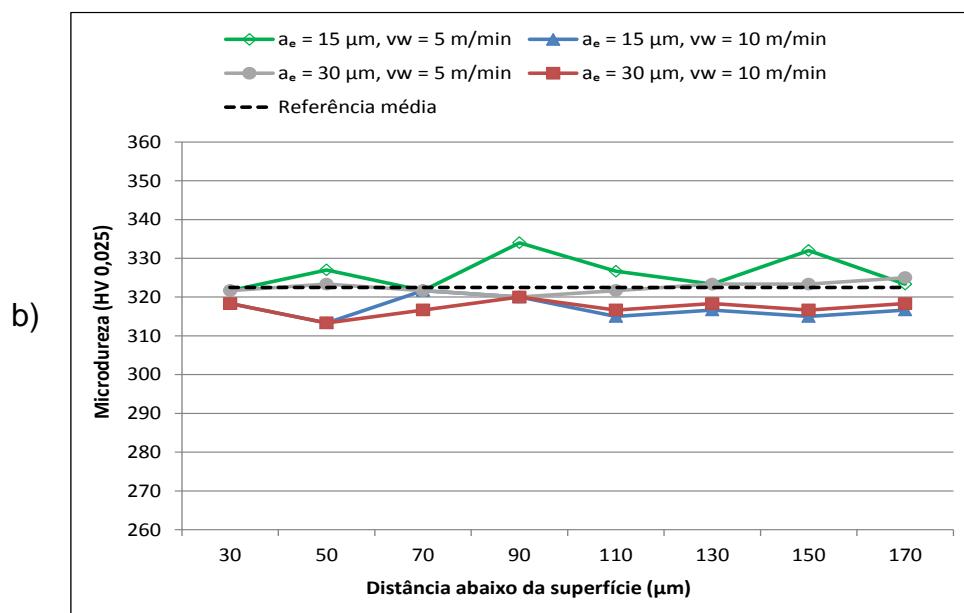


Figura 4.8 - Valores de microdureza abaixo da superfície do ferro fundido cinzento FC 250 após a retificação em diferentes condições de corte e rebolos com granas: a) 46; b) 100.

4.2.2 Ferro fundido vermicular FV 450

Nas Figuras 4.9a e 4.9b são apresentados os resultados de microdureza obtidos após a retificação do ferro fundido vermicular nas diversas condições de corte e com os rebolos de grana 46 e 100, respectivamente. Observa-se da Fig. 4.9a que houve queda na microdureza ao retificar o FV 450, e esta foi em torno de 1,7 %, em relação ao valor de referência. Para o rebolo de grana 100 (Fig. 4.9b) e a uma maior velocidade da peça ($v_w = 10$ m/min) a porcentagem de queda foi em torno de 1,8%. Santana et al. (2007) também observaram um comportamento semelhante ao retificar um aço ABNT 1020. Eles relataram uma leve queda de microdureza em função do aumento da penetração de trabalho (a_e).

De maneira geral, a utilização de uma velocidade da mesa maior ($v_w = 10$ m/min) gerou menores valores de microdureza em relação ao valor de referência, com uma redução média de 1,8%.

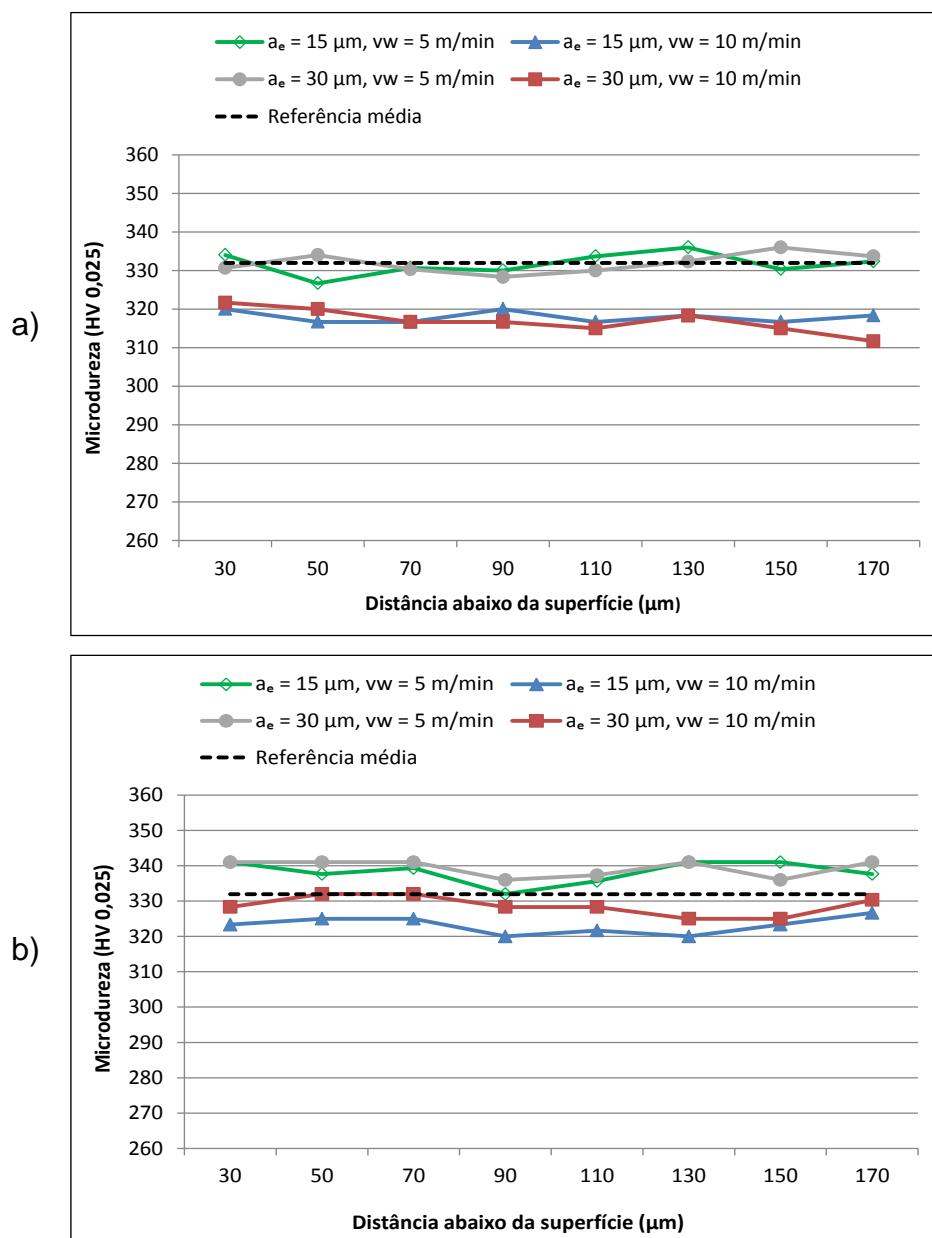


Figura 4.9 - Valores de microdureza abaixo da superfície do ferro fundido vermicular FV 450 após a retificação em diferentes condições de corte e rebolos com granas: a) 46; b) 100.

4.2.3 Ferro fundido nodular FE 45012

Na Figura 4.10a e 4.10b são mostrados os resultados da microdureza obtidos após a retificação do ferro fundido nodular FE 45012 com rebolos com granas 46 e 100, respectivamente, e em diversas condições de corte. Observa-se em ambas as figuras que houve aumento considerável nos valores microdureza medidos abaixo da superfície do ferro fundido nodular FE 45012 em todas as condições investigadas, comportamento diferente

daqueles observados para os ferros fundidos cinzento e vermicular. Os maiores valores foram registrados em regiões mais próximas da superfície e foram decrescendo à medida que se afastou dela e até alcançar a distância de 170 μm . O maior aumento na dureza foi observado após a usinagem com rebolo com a grana 46 (Fig 4.10a) a uma distância de 30 μm da superfície retificada, e que este foi superior a 30% em relação à referência quando se empregou a condição severa de usinagem ($v_w = 10 \text{ m/min}$ e $a_e = 15 \mu\text{m}$). Nesta mesma região, para a condição mais severa de usinagem ($v_w = 10 \text{ m/min}$ e $a_e = 30 \mu\text{m}$) o aumento na dureza foi de 24%. Já para a grana 100, também houve aumento dos valores de dureza detectado inicialmente em regiões abaixo de 30 μm e que também decresceram para todas as condições, mas de uma maneira menos acentuada em relação a grana 46. Além disso, o aumento percentual foi inferior aquele observado para a grana 46 na região a 30 μm da superfície retificada, situando em torno de 20%. Mas, com exceção da condição já comentada na qual foi empregada grana 46, $v_w = 10 \text{ m/min}$, $a_e = 15 \mu\text{m}$ (Fig 4.10a), os valores de microdureza para a grana 46 situaram-se mais próximos da linha de referência (dureza do material antes do processo de retificação) quando comparados com aqueles registrados após a usinagem com o rebolo de maior grana (menor tamanho de grão abrasivo). Com base nestas observações e ao comparar estes resultados com os valores de rugosidade obtidos após a retificação do ferro fundido nodular FE 45012 é possível estabelecer correlação direta entre estas variáveis para esta classe de ferro fundido. Os maiores valores de rugosidade e maior aumento percentual na microdureza foram obtidos após a usinagem com a maior grana.

Em relação ao aumento nos valores de microdureza registrados para esta classe de ferro fundido em comparação as outras classes investigadas neste trabalho, ele pode ser atribuído à menor condutividade térmica do ferro fundido nodular FE 45012, em virtude das grafitas presentes não serem conectadas, e também ao seu maior coeficiente de atrito, que tendem a elevar a temperatura durante a retificação. Além disso, pode acontecer dos cavacos se alojarem no rebolo durante a retificação, fazendo com que material da peça presente no rebolo seja atritado contra a peça, reduzindo a eficiência dos grãos abrasivos e aumentando a geração de calor na zona de corte. Por último, o fluido de corte pode ter dificuldade de chegar à zona de corte para auxiliar na remoção de calor da peça, principalmente. Todos estes fatores atuando de forma combinada induzem a geração de maior gradiente de temperatura na superfície da peça. Este calor provoca, por sua vez, alterações metalúrgicas em regiões próximas a superfície retificada. No caso do ferro fundido nodular usinado nesta pesquisa, acredita-se que tenha havido formação de uma

estrutura martensítica não-revenida na superfície da peça a qual possui dureza superior à microestrutura original (antes da retificação).

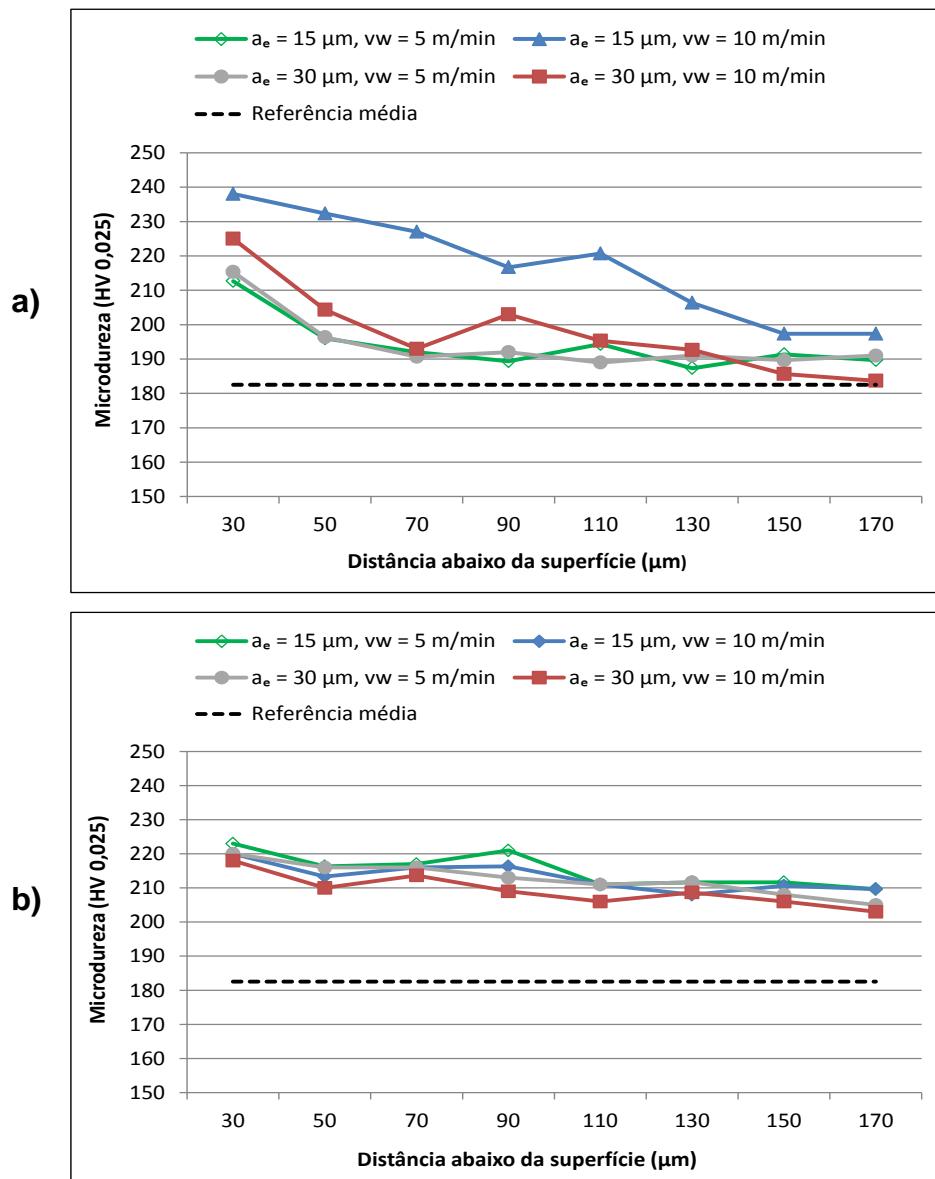


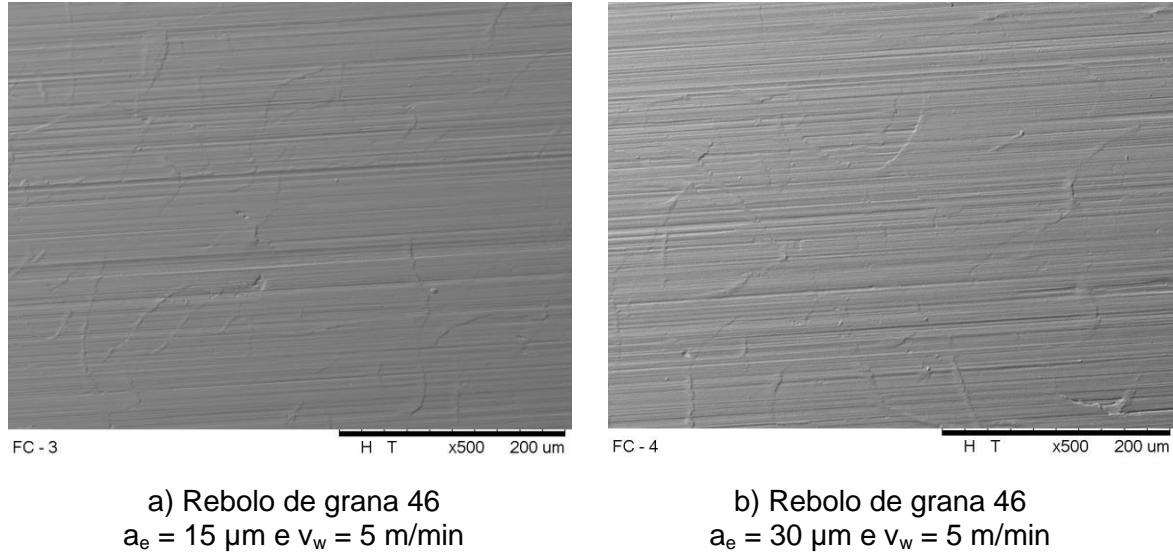
Figura 4.10 - Valores de microdureza abaixo da superfície do ferro fundido nodular FE 45012 após a retificação em diferentes condições de corte e rebolos com grana: a) 46; b) 100.

4.3 Imagens das superfícies retificadas

A fim de obter mais informações sobre a qualidade das superfícies retificadas, todas as amostras de ferros fundidos usinadas neste trabalho foram conduzidas até o Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) (com uma ampliação de 500 vezes) para análise e comparações. Foram coletadas também imagens da subsuperfície das amostras de todas as classes de ferros fundidos que foram usinadas somente nas condições de corte: $v_w = 10$ m/min, rebolo com grana 100 e as duas penetrações de trabalho ($a_e = 15$ e $30 \mu\text{m}$). Esta condição de corte foi aquela considerada a mais severa e por isso o intuito foi de identificar se houve de fato camada afetada pelo calor gerado durante o processo de retificação e confirmar os resultados de microdureza registrados para estas condições.

4.3.1 Ferro fundido cinzento FC 250

Nas Figuras. 4.11a a 4.11h são mostradas as imagens das superfícies das amostras de ferro fundido cinzento FC 250 após a retificação em várias condições de corte.



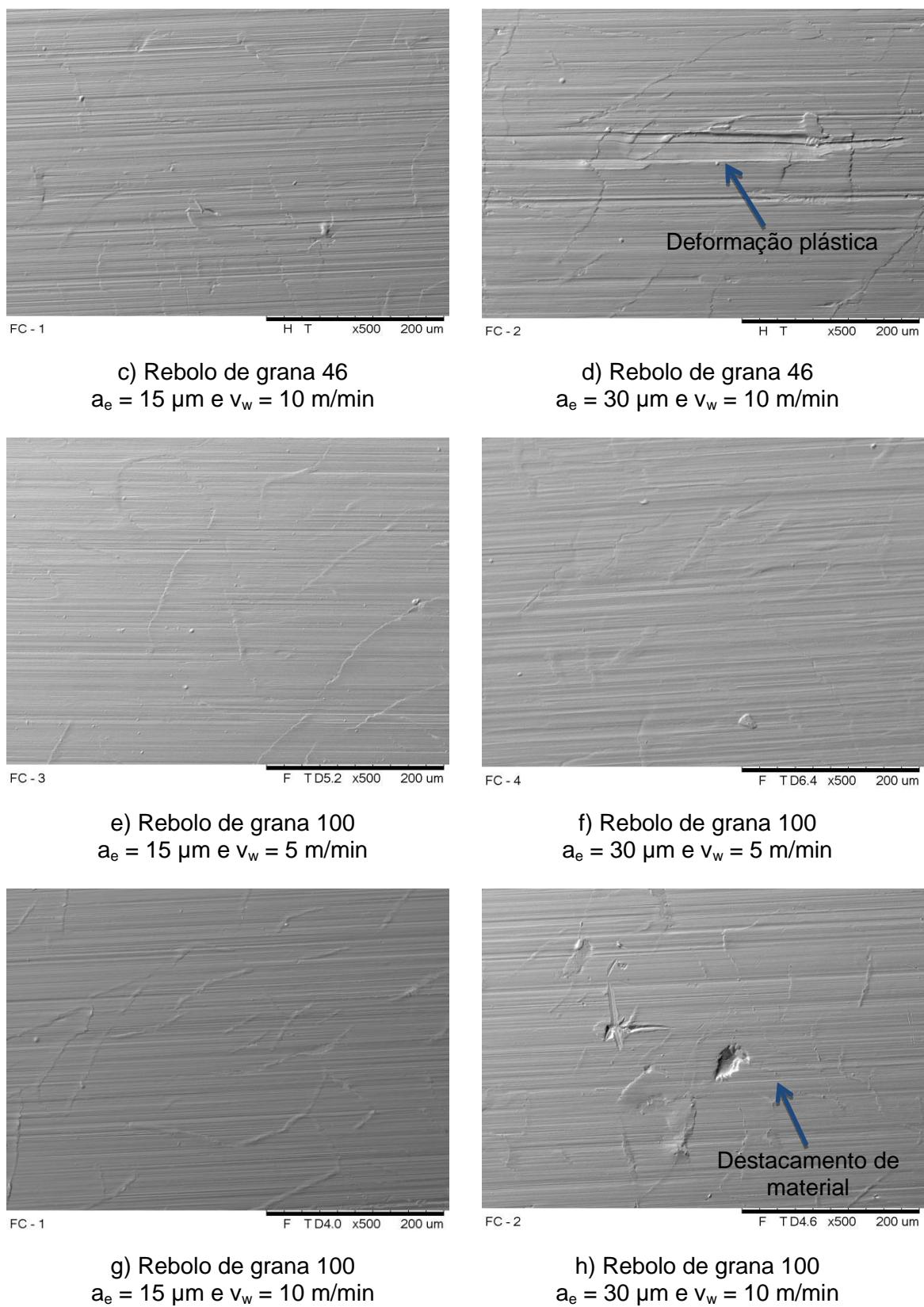


Figura 4.11 - Imagens das superfícies do ferro fundido cinzento FC 250 após retificação nas varias condições de corte.

Ao observar as imagens apresentadas nas Figs. 4.11 constatou-se que, independente das condições de corte utilizadas, não ocorreram alterações na estrutura, ou qualquer dano à superfície e nem presença de trincas após a retificação do ferro fundido cinzento FC 250. Contudo, notou-se a presença de algumas áreas com deformação plástica e de fluxo lateral de material causado pela passagem dos abrasivos. Elas são bem semelhantes em todas as condições, embora as marcas de avanço dos grãos sejam mais evidentes nas condições onde se utilizou o rebolo de grana 46, com visíveis riscos ao longo da direção de avanço da ferramenta.

Nas condições mais severas de usinagem, com maior penetração de trabalho e maior velocidade da peça (Figs. 4.11d e 4.11h), é possível observar que as marcas longitudinais nas superfícies são mais largas e não que elas não apresentam a mesma continuidade como aquelas observadas após a usinagem em condições mais brandas, consequência do maior esforço para remoção de material e maior penetração dos grãos na peça, que reflete no perfil de rugosidade. Nota-se também a evidência de destacamento de material, principalmente na utilização do rebolo com grana 100, o que está relacionado ao fato de se tratar de um material frágil, com pequeno regime plástico. Com isso, há uma maior tendência ao destacamento quando uma ferramenta entra em contato. Além disso, como os cavacos são descontínuos, há variação nas forças de corte, o que reflete de forma negativa o acabamento.

Nas Figuras 4.12a e 4.12b são mostradas as imagens da subsuperfície de duas amostras de ferro fundido cinzento FC 250 que foram geradas após a retificação com $a_e = 15 \mu\text{m}$ e $a_e = 30 \mu\text{m}$, respectivamente, e com as condições de corte $v_w = 10 \text{ m/min}$, e grana 100 mantidos fixos. Observa-se de ambas as imagens que não há evidência de alteração microestrutural das amostras que possa comprometer a integridade do material e que não houve diferença significativa ao utilizar duas penetrações de trabalho diferentes.

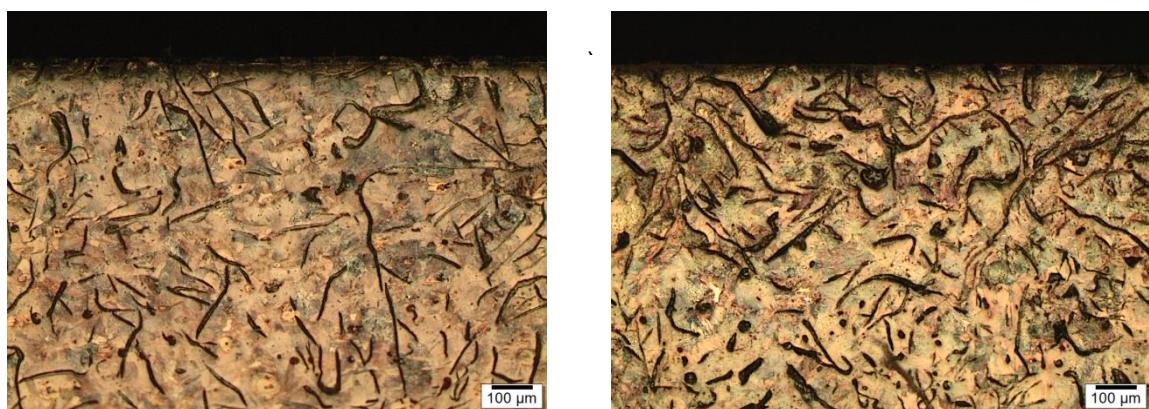
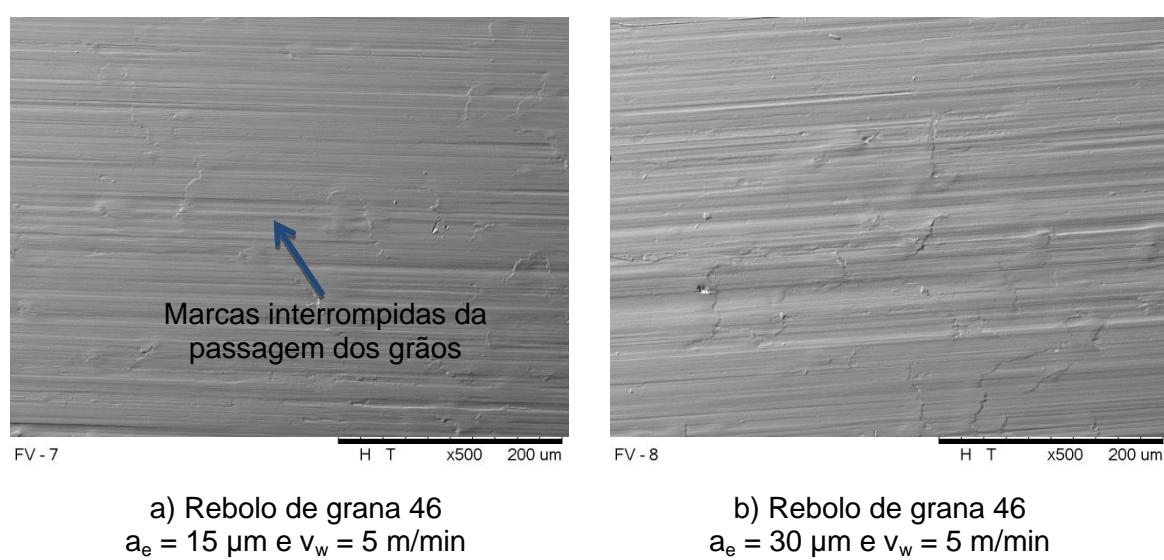


Figura 4.12 - Imagens da subsuperfície das amostras de ferro fundido cinzento FC 250 retificadas com: a) $a_e = 15 \mu\text{m}$; b) $a_e = 30 \mu\text{m}$.

4.3.2 Ferro fundido vermicular FV 450

Nas Figuras 4.13a a 4.13h são mostradas as imagens das superfícies retificadas das amostras de ferro fundido vermicular FV 450. De forma análoga ao ocorrido para o ferro fundido cinzento FC 250, pelas imagens obtidas via MEV, não foi possível identificar danos superficiais presentes nas amostras de ferro fundido vermicular após a retificação plana tangencial nas condições testadas. Das Figs. 4.13a a 4.13d observa-se que as superfícies retificadas apresentam marcas interrompidas da passagem dos grãos, com mais material deformado que nas outras condições, o que é comprovado pelo aumento de rugosidade. Além disso, nota-se através da Fig. 4.13d, que esta foi aquela condição em que os grãos abrasivos produziram os sulcos mais pronunciados com deformação de material.



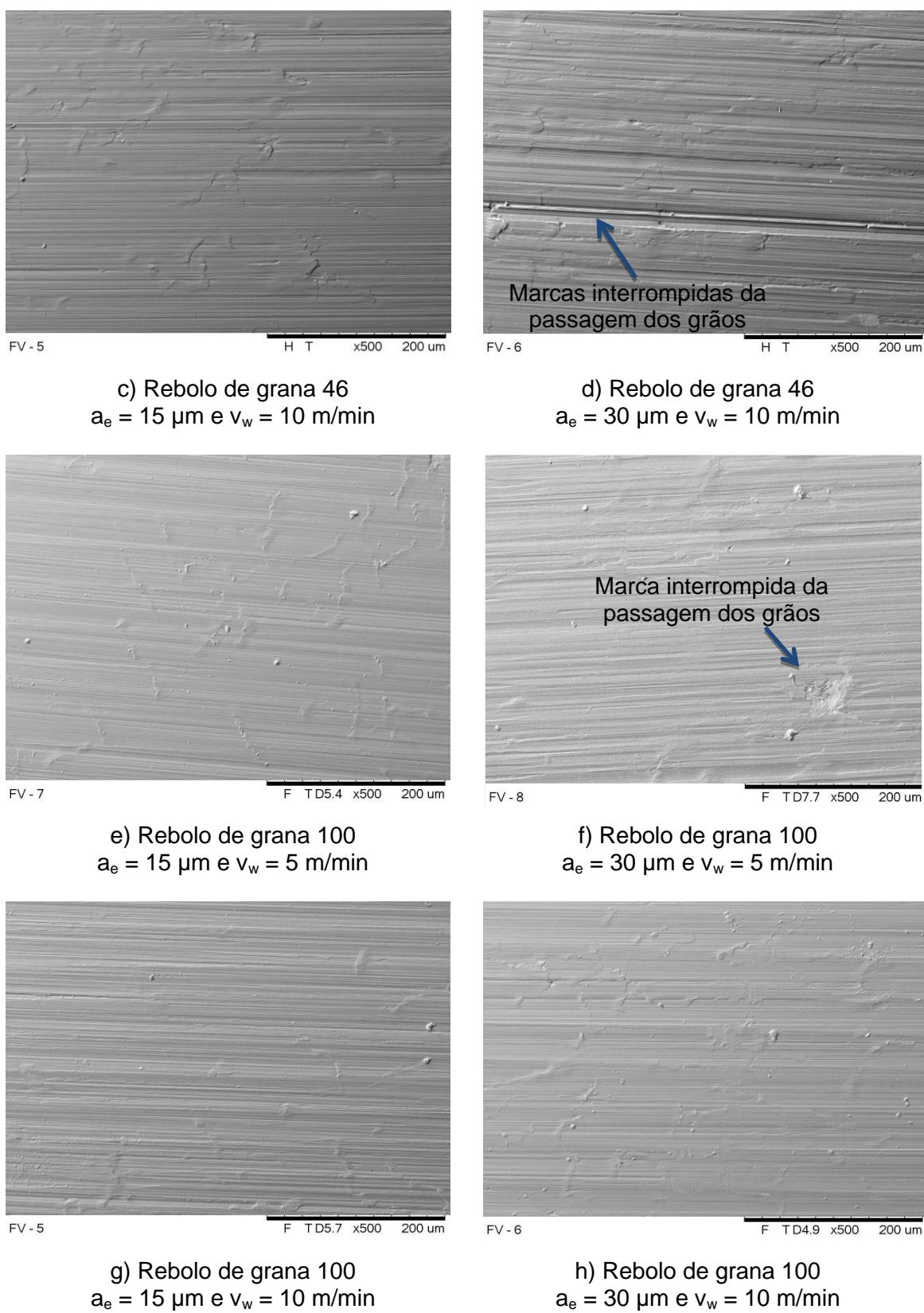


Figura 4.13 - Imagens das superfícies do ferro fundido vermicular FV 450 após retificação nas várias condições de corte.

Sobre estes resultados para o ferro fundido vermicular FV 450, notou-se que, desde o primeiro passe do rebolo de grana 100 sobre a superfície ao retificar esta classe de ferro fundido, havia a presença marcas profundas e interrompidas nas superfícies das peças retificadas que eram visíveis a olho nu, indicando que este tipo de rebolo não é adequado para retificar este material nas condições de corte utilizadas nesta pesquisa. No entanto, embora mesmo com estas marcas, o rebolo com grana 100 resultou em melhor acabamento em todas as condições testadas para o ferro fundido vermicular FV 450 como também não gerou variação significativa de microdureza abaixo da superfície do material.

Na Fig. 4.14 são mostradas duas amostras de ferro fundido vermicular FV 450 retificadas com a mesma penetração de trabalho e mesma velocidade da mesa, porém com rebolos contendo granas diferentes. Desta figura, nota-se claramente a presença de marcas de aspecto visual com coloração azul-acobreada apenas na superfície após retificação com o rebolo de grana 100 (Fig. 4.14b). Estes resultados mostram a importância em avaliar diferentes parâmetros de saída em retificação, como rugosidade, microdureza, observação das superfícies retificadas como também de estar bem atento durante o processo de retificação para anotar qualquer ocorrência. A utilização de mais de uma variável auxilia nas análises e permite estabelecer correlação entre elas para explicar os fenômenos envolvidos no processo de retificação.

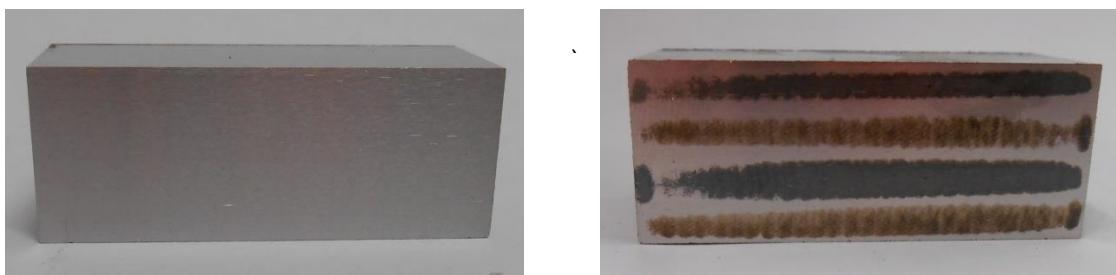


Figura 4.14 - Amostras de ferro fundido vermicular FV 450 retificadas com rebolo: a) 39C46KVK; b) 39C100KVK.

Nas Figuras 4.15a e 4.15b são mostradas as imagens da subsuperfície de duas amostras de ferro fundido vermicular FV 450 que foram obtidas após a retificação com $a_e = 15 \mu\text{m}$ e $a_e = 30 \mu\text{m}$, respectivamente, e nas condições de corte $v_w = 10 \text{ m/min}$ e rebolo de grana 100. Observa-se que há alteração na microestrutura bem próxima a superfície da peça. Essa alteração é mais evidente na Fig. 4.15a, com a utilização de uma penetração de trabalho igual a $15 \mu\text{m}$, o que condiz com os resultados encontrados para a microdureza, em

que este a_e gerou uma maior variação de microdureza próximo a superfície, em relação ao $a_e = 30 \mu\text{m}$. Isto pode ter ocorrido devido à microestrutura deste material e à sua maior dureza (229 HB) em relação aos demais ferros fundidos. Além disso, esta classe de ferro fundido FV 450 (vermicular) possui uma elevada resistência à tração (524 MPa), o que exige maior força de corte e consequente maior potência da máquina para garantir a remoção da mesma quantidade de material.

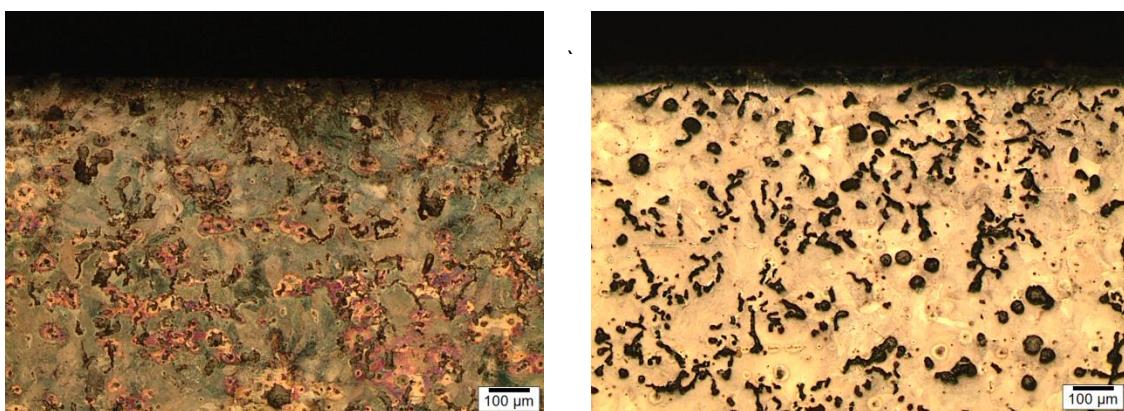
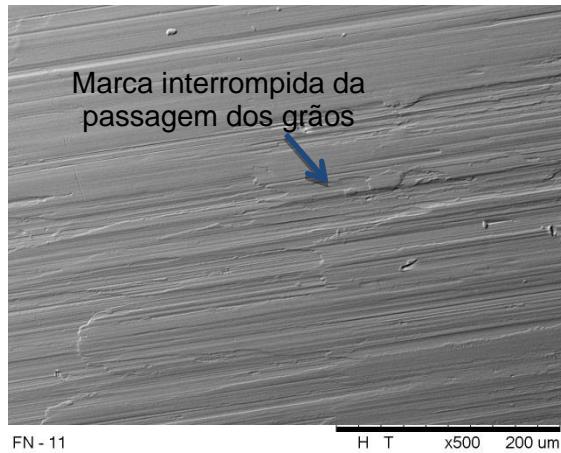


Figura 4.15 - Imagens da subsuperfície das amostras de ferro fundido vermicular FV 450 retificadas com: a) $a_e = 15 \mu\text{m}$; b) $a_e = 30 \mu\text{m}$.

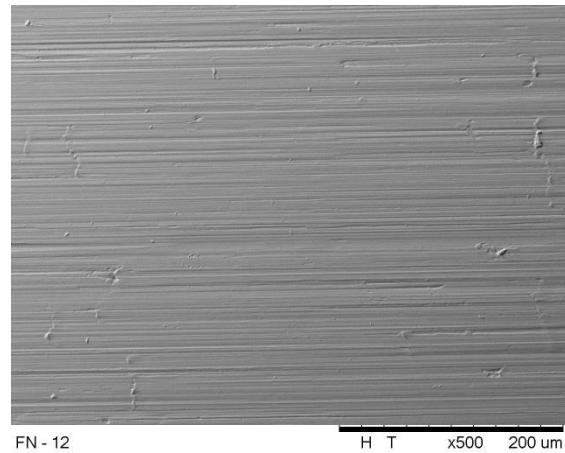
4.3.3 Ferro fundido nodular FE 45012

Nas Figuras 4.16a a 4.16h são mostradas as imagens das superfícies das amostras de ferro fundido nodular FE 45012 após retificação em várias condições de corte. Observa-se que, assim como foi observado para as superfícies das demais classes de ferros fundidos estudadas nesta pesquisa, em geral, pelas imagens das superfícies via MEV não foi possível observar alguma evidência de trincas perpendiculares à superfície e nenhum outro dano que pudesse comprometer a integridade do material. Nas superfícies que foram usinadas em condições mais severas de retificação (Fig. 4.16d e Fig. 4.16h) podem ser observados sulcamentos, conhecido também como “plowing”. Segundo Malkin e Guo (2008), o “plowing” é caracterizado como um mecanismo no qual ocorre deformação plástica sem remoção de material, evidenciado pelo escoamento lateral de material ao longo do caminho de corte do grão abrasivo, ao invés de ser removido em forma de cavaco (por cisalhamento). Este mecanismo está relacionado às características do ferro fundido nodular, como sua elevada ductilidade e tenacidade em relação às outras classes aqui testadas, dificultando o processo de remoção de material, principalmente em condições mais

agressivas. Estas marcas de avanço afetam o perfil de rugosidade e a aparência da superfície retificada.



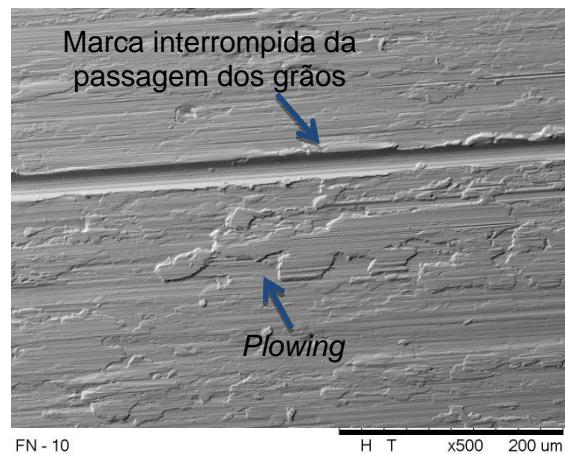
a) Rebolo de grana 46
 $a_e = 15 \mu\text{m}$ e $v_w = 5 \text{ m/min}$



b) Rebolo de grana 46
 $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 5 \text{ m/min}$



c) Rebolo de grana 46
 $a_e = 15 \mu\text{m}$ e $v_w = 10 \text{ m/min}$



d) Rebolo de grana 46
 $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $v_w = 10 \text{ m/min}$

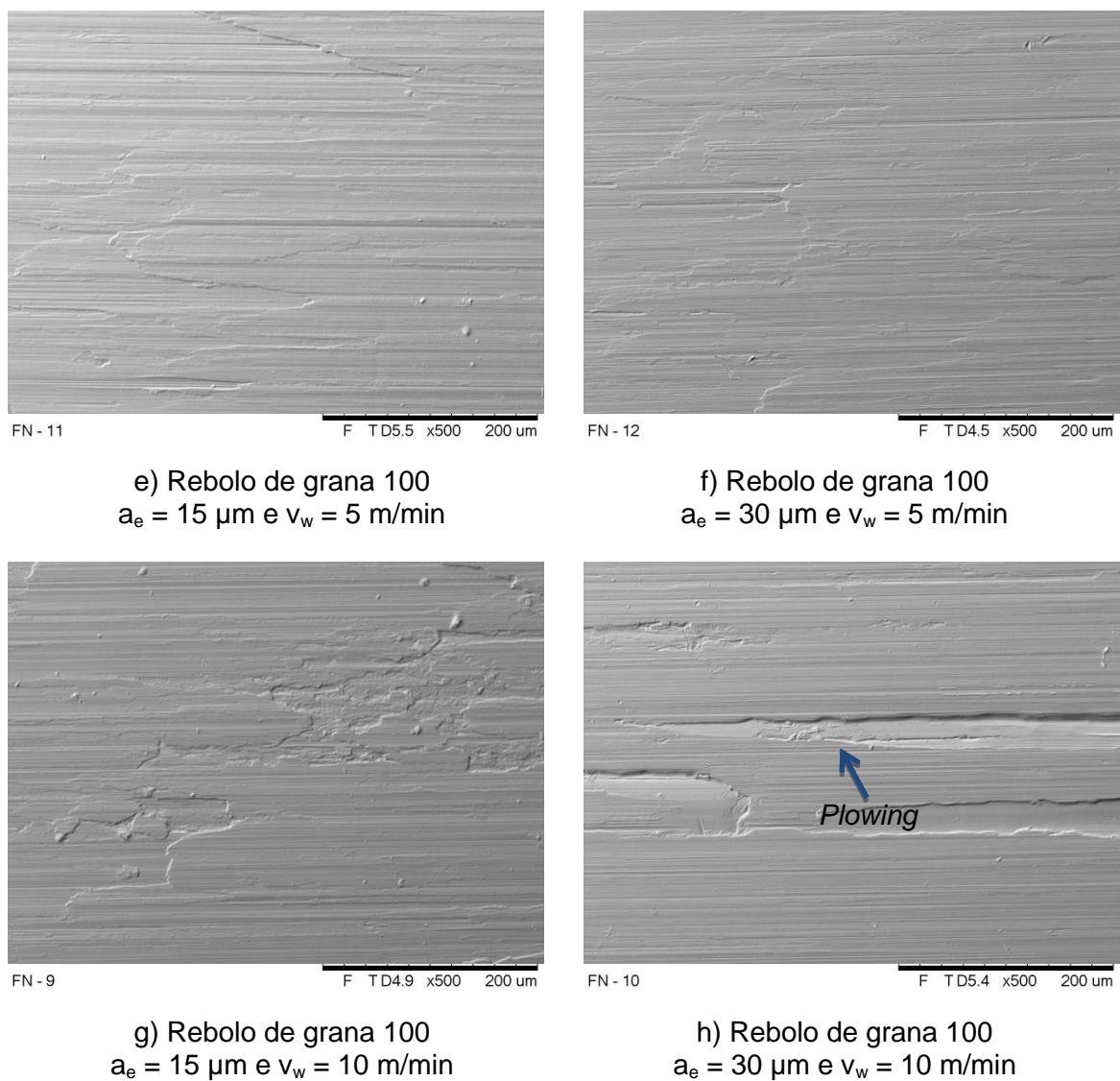


Figura 4.16 - Imagens das superfícies do ferro fundido nodular FE 45012 após retificação nas várias condições de corte.

Ainda em relação as imagens da Figura 4.16, o aumento da temperatura na peça, em consequência da elevação de calor, provavelmente ocorrido durante a retificação com rebolo de grana 100 também ocasionou marcas com coloração acobreada em todos as amostras, assim como ocorreu para o ferro fundido vermicular FV 450. Estas marcas ficaram mais evidentes quando foi os ensaios foram realizados com maiores penetrações de trabalho (a_e) e maiores velocidades da peça (v_w), o que condiz com os resultados encontrados para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z , em que as condições mais severas de usinagem produziram um pior acabamento superficial.

Na Fig. 4.17 são apresentadas imagens de duas amostras de ferro fundido nodular FE 45012 que foram retificadas com duas penetrações de trabalho diferentes, mas como a mesma velocidade ($v_w = 10$ m/min) e mesmo rebolo (grana 100). Em ambas são observadas marcas, ou queima, provenientes do processo de retificação as quais são bem evidentes e que tornaram mais severas à medida que se aumentou a penetração de trabalho (Fig. 4.17b).

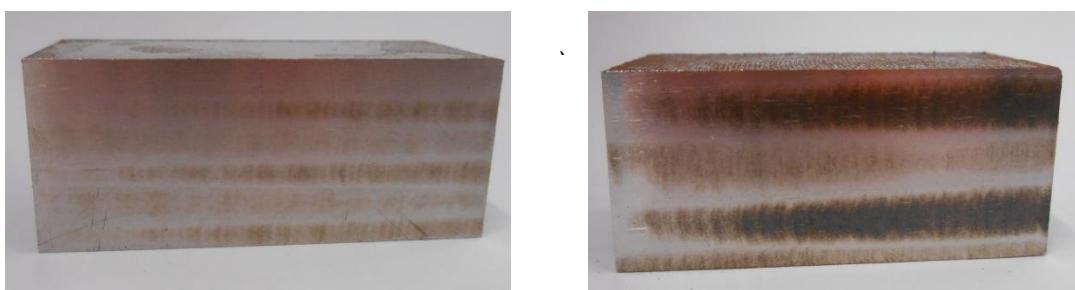


Figura 4.17 - Imagens das superfícies de ferro fundido nodular FE 45012 após retificação com rebolo 39C100KV e penetrações de trabalho: a) 15 μm ; b) 30 μm .

Nas Figuras 4.18a e 4.18b são mostradas as imagens da subsuperfície das duas amostras de ferro fundido nodular FE 45012 que foram retificadas com $a_e = 15$ μm e $a_e = 30$ μm , respectivamente, e com $v_w = 10$ m/min e grana 100. Observa-se que em ambas as imagens, assim como ocorreu para o ferro fundido cinzento FC 250, não foi possível observar formação de camadas afetadas pelo calor, mesmo tendo sido detectado o aumento de microdureza na superfície do material retificado (Fig. 4.10) e queima de aspecto visual utilizando as duas penetrações de trabalho como já comentando anteriormente.

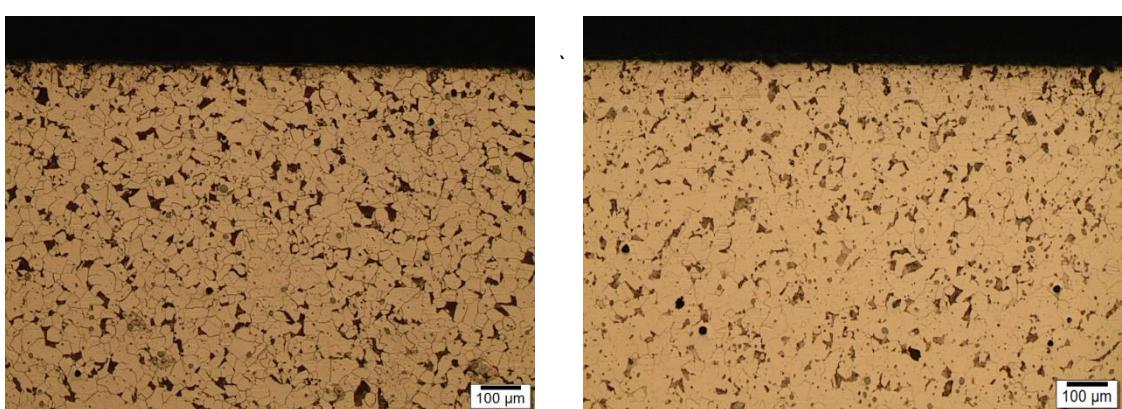


Figura 4.18 - Imagens da subsuperfície das amostras de ferro fundido nodular FE 45012 retificadas com: a) $a_e = 15$ μm ; b) $a_e = 30$ μm

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

De acordo com os resultados experimentais de retificação plana das classes de ferros fundidos cinzento FC 250, vermicular FV 450 e nodular FE 45012, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- Os parâmetros de rugosidade Ra e Rz para os três materiais estudados aumentaram com a penetração de trabalho de 15 μm para 30 μm , como esperado;
- Em geral todos os valores de rugosidade para o parâmetro Ra e Rz situaram-se abaixo de 0,46 e 3,40 respectivamente, sendo que os valores obtidos para o parâmetro Ra se situam dentro da faixa de rugosidade aceitável para o processo de retificação de semi-acabamento, que é de 0,63 μm ;
- Dentre os ferros fundidos estudados nesta pesquisa, o cinzento foi aquele apresentou os menores valores de rugosidade Ra e Rz em todas as condições de corte empregadas neste trabalho;
- A ductilidade do ferro fundido nodular FE 45012 refletiu negativamente no acabamento e textura das superfícies após a retificação em todas as condições de corte empregadas;
- O parâmetro de rugosidade Ra foi aquele que se apresentou mais sensível à variação da velocidade da peça do que à penetração de trabalho, de tal forma que, independente da penetração de trabalho e grana do rebolo empregados, o aumento na velocidade resultou no aumento dos valores de rugosidade, consequentemente deteriorando o acabamento. Mas a combinação da maior velocidade da peça e maior penetração de trabalho, em geral, resultou nos maiores valores de rugosidade, tanto parâmetro Ra quanto Rz, com exceção do ferro fundido vermicular FV450;
- A grana no rebolo exerceu influência tanto nos valores de rugosidade obtidos, quanto na textura das superfícies dos materiais retificados. No geral, a retificação com o rebolo com grana 100 produziu um pior acabamento na superfície de todas as classes de ferros fundidos estudadas nesta pesquisa. Além disso, foram observadas

queimas de aspecto visual nos ferros fundidos vermicular e nodular após a usinagem com esta grana;

- Os parâmetros de corte velocidade da peça e penetração de trabalho foram de fato significativos para alterações nos valores de rugosidade nas três classes de ferro fundido. Apenas para o ferro fundido nodular FE 45012 a variável grana do rebolo exerceu influência significativa sobre os valores de rugosidades obtidos;
- Quanto ao parâmetro microdureza, em geral, os valores de microdureza para o ferro fundido cinzento FC 250 se mantiveram em torno da média do valor do material antes da retificação, sem alterações significativas. Já para o ferro fundido vermicular FV 450 houve uma leve queda percentual de microdureza em regiões bem próximas à superfície retificada, com uma redução média de 1,8% ao utilizar uma velocidade da peça maior ($v_w = 10$ m/min). Já para ferro fundido nodular FE 45012 foi observado um aumento percentual nos valores de microdureza em torno de 30% após a usinagem com $v_w = 10$ m/min e $a_e = 15$ μm e cerca de 24% quando foram empregados os parâmetros de corte $v_w = 10$ e $a_e = 30$ μm , ambos com o rebolo de grana 46, enquanto que os resultados para o rebolo de grana 100 o aumento foi de cerca de 20%. Em geral, no que se refere ao ferro fundido nodular FE 45012, os valores de microdureza obtidos após a retificação com rebolo de grana 46 situaram-se mais próximos da linha de referência quando comparados com aqueles registrados após a usinagem com o rebolo de maior grana;
- No que refere às superfícies e topografias das peças, nas três classes de ferros fundidos foram observadas regiões com deformação plástica e fluxo lateral de material resultantes da passagem dos grãos abrasivos na peça, principalmente em condições mais severas, com $a_e = 30$ μm e $v_w = 10$ m/min, mas não foi observada a presença de trincas;
- Com base nas medições de microdureza, é possível afirmar que não houve alterações microestruturais das amostras de ferro fundido cinzento FC 250 e nodular, até mesmo nas condições mais severas de retificação. Porém, para o ferro fundido vermicular FV 450, quando se utilizou um rebolo de grana 100, $v_w = 10$ m/min e $a_e = 30$ μm (condições mais severas de usinagem), foi observada uma alteração na microestrutura bem próxima a superfície;
- Com base nas análises dos resultados de rugosidade, microdureza e imagens da superfície e subsuperfície obtidos nesta pesquisa, pode-se concluir que, em geral, o emprego de menores valores de penetração de trabalho e de velocidade da peça,

aliado ao rebolo de carbeto de silício com menor grana (maior tamanho de grão) geram bons resultados de acabamento e integridade superficial para a retificação das classes de ferro fundido estudados;

- A ordem de classificação de desempenho dos ferros fundidos quanto ao acabamento e microdureza nas condições investigadas neste trabalho é: 1º ferro fundido cinzento FC 250, 2º ferro fundido vermicular FV 450 e 3º ferro fundido nodular FE 45012.

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para dar continuidade a este trabalho são propostos alguns temas que complementariam a importância desta pesquisa:

- Monitorar a potência fornecida pela máquina e os sinais de vibração durante o processo de retificação, como também realizar a medição de tensões residuais das peças nas mesmas condições de corte empregadas nesta pesquisa;
- Usinar os mesmos materiais testados nesta pesquisa empregando uma faixa maior de penetrações de trabalho, como também maiores velocidades de corte;
- Fazer um estudo sobre a influência do posicionamento do bocal de aplicação do fluido de corte no acabamento das peças;
- Usinar os mesmos materiais em retificação cilíndrica em condições de corte semelhantes àquelas utilizadas na retificação de eixos virabrequim fabricados em aços e também ferro fundido nodular.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R. Influência da velocidade de avanço do rebolo nos danos de aços endurecidos retificados. *Máquinas e Metais*, São Paulo, v. 13, n. 4, 2008, pp. 636 – 642.

ASM. Metals Handbook Machining. v.16. ASM International, 2004.

ANFAVEA. Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. Estatísticas - Séries temporais. Disponível em: <<http://www.anfavea.com.br/tabelas.html>>. Acesso em 12 fev. 2015

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS, NRB ISO 4287. Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade. Rio de Janeiro, 2002. 18p.

ASTAKHOV, V. P.; JOKSCH, S. Metalworking fluids (MFWs) for cutting and grinding – Fundamentals and recent advances. Woodhead, Cambridge, 2012. 413 p.

BIANCHI, E. C.; VALARELL, I. D.; FERNANDES, O. C.; MOGAMI, O.; SILVA JR,C. E. & AGUIAR, P. R. Análise do comportamento de rebolos convencionais na retificação de aços frágeis e dúcteis. *Journal of the Brazilian Society of Mechaical Sciences*. v. 19, pp. 410-425, 1997.

BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; PIUBELI, B.A. Aplicação e Utilização dos Fluidos de Corte nos Processos de Retificação. São Paulo: Artliber, 2004, 112p.

BENINI, L.;WEINGAERTNER, W.L. Influência da classe de dureza de rebolos convencionais de Al_2O_3 sinterizados na retificação do ferro fundido dúctil austemperado. 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2015, Salvador - BA, 8 p.

BOEHS, L.; AGUIAR, C. G.; FERREIRA, J.C. A Usinagem do ferro fundido nodular de fundição contínua. *Máquinas e Metais*, São Paulo, jul. 2000, pp. 58-72.

CALLISTER JR., W. D. Ciência e engenharia de materiais: uma introdução. 5ª.ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 589p.

DAMASCENO, R. F. Análise da influência da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação plana de aço ABNT 4340. 2010. 162p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista, UNESP, Bauru, SP.

DAWSON, S.; HOLLINGER, I.; ROBBINS, M.; DAETH, J.; REUTER, U.; SCHULZ, H. The effect of metallurgical variables on the machinability of compacted graphite iron. Society of Automotive Engineers, 2001.

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.

DEMIR, H.; GULLU, A.; CIFTCI, I.; SEKER, U. An investigation into the influences of grain size and grinding parameters on surface roughness and grinding forces when grinding. Journal of Mechanical Engineering, v.56, p. 447- 454, 2010.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. Tecnologia da usinagem dos materiais. 7^a ed. Campinas, SP: Artiliber Editora Ltda, 2010. 286p.

DORÉ, C. Influência da variação da modularidade na usinabilidade do ferro fundido vermicular. 2007. 131p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis, SC.

DURGUMAHANTI, U. S. P.; SINGH, P.V.; RAO, V.A. A new model for grinding force prediction and analysis. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.50, p. 231 - 240, 2010.

EBBRELL, S.; WOOLEY, N. H.; TRIDIMAS, Y. D.; ALLANSON, D. R.; ROWE, W. B. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. International Journal of Machine Tools & manufacture: Design, Research and Application, v.40, p. 209-223, 2000.

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: Part I. Characterization. Journal of Materials Processing Technology. v. 56, p. 786-797, 1996.

FATHALLAH, B. B.; FREDJ, N. B.; SIDHOM, H. BRAHAM, C. ICHIDA, Y. Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.49, p. 261 – 272, 2009.

FERREIRA, M. C. Apostila de Preparo de amostras para a realização do teste de microdureza. UFSC, Florianópolis, 2004.

GÂMBARO, L. S. Proposta de otimização de processo de fabricação de peças cilíndricas por meio da têmpera por retificação. 2006. 106p. Dissertação de Mestrado - Universidade Metodista de Piracicaba/UNIMEP , Santa Barbara d'Oeste, SP.

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

GUESSER, W. L., SCHROEDER, T., DAWSON, S. Production Experience With Compacted Graphite Iron Automotive Components. AFS Transactions, American Foundry Society, Des Plaines, USA: Paper 01-071, 2001, p.1-11.

HEISSER, C.; STURM, J.C. Casting process simulation of compacted graphite Iron. American Foundry Society, Des Plaines, USA, 2003, p.1-8.

HELLMEISTER, C.F.L.P. Monitoramento da dressagem na retificação através do sinal puro de emissão acústica. 2004. 104p. Dissertação de mestrado – Universidade Estadual Paulista, Bauru, SP.

HRYNIEWICZ, P.; SZERI, A.Z.; JAHANMIR, S. Coolant flow in surface grinding with non-porous wheels. International Journal of Mechanical Sciences, v.42, p. 2347-2367, 2000.

IRANI, R. A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. International Journal of Machine Tools & manufacture: Design, Research and Application, v.45, p. 1696–1705, 2005.

JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. Machining with abrasives. Nova York: Springer, 2011, 439p.

JÚNIOR, E. M.; GUESSER, W. L. Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular através de ensaios de furação. VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2011, Caxias do Sul – RS, 10 p.

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R. Manufacturing Processes for Engineering Materials. Pearson Education: 5th ed. PE; International Edition, 2009.

KEOUGH, J.R.; HAYRYNEN, K.L.; PIOSZAK, G.L. Designing with Austempered Ductile Iron (ADI). AFS Proceedings, 2010.

KLOCKE, F. Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping. Ed Springer, 2009. 433p.

KLOCKE, F.; KLÖPPER, C. Característica da usinagem do ferro fundido nodular austemperado. Máquinas e Metais, São Paulo, jul. 2006, p.148-165.

LABRECQUE, C.; GAGNÉ, M. Review ductile iron: fifty years of continuous development. Canadian Metallurgical Quarterly, v.37, p. 343 – 378, 1998.

LIMA, H.V.; SILVA, L.R.; CALADO, C.R.; MARCELINO, L.I.O.; ÁVILA, R.F.; OLIVEIRA, F.A.; GUIMARÃES, P.P.; DUARTE, J.B.; MOREIRA, M.R. Avaliação do desempenho do fluido de corte comercial e recuperado no processo de retificação. VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2013, Itatiaia – RJ, 10 p.

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T. Teoria da usinagem dos materiais. São Paulo: Editora Blucher, 2009. 371 p.

MAGNANI, E. G. Retificação cilíndrica externa do aço ABNT 1045 temperado e revenido utilizando diferentes rebolos e condições operacionais. 2013. 91 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.

MALKIN, S., GUO, C. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining With Abrasives. 2^a ed. New York: Industrial Press, 2008. 372p.

MARCELINO, L.I.O.; SILVA, L.R.; CALADO, C.R.; LIMA, H.V.; MOREIRA, M.R.; ROSA, J.B.D.; MORAIS, H.L.O. Caracterização da degradação do fluido de corte mineral emulsionável no processo de retificação. VII CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2013, Itatiaia – RJ, 7 p.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. Handbook of machining with grinding wheels. Nova Iorque : CRC Press, 2007. 596 p.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. Tribology of abrasive machining processes. 1.ed. Norwich, William Andrew Inc, 2004.

MARWANGA, R. O.; VOGT, R. C.; COHEN, P. H. Influence of graphite morphology and matrix structure on chip formation during machining of continuously cast ductile irons. AFS Transactions, 2000, p. 651- 661.

MELLO S.A Máquinas e Equipamentos. Princípios de retificação e afiação na indústria metal - mecânica. São Paulo: Servidéias Comunicação Ltda, 2011. 322p.

MELLO, A.V.; SILVA, R.S.; GUIMARÃES, C.; HASSUI, A.; FREITAS, F.M.C. Avaliação do acabamento e microdureza da liga de titânio Ti-6Al-4V após a retificação plana tangencial. 8º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2015, Salvador - BA, 10p.

MENDES, A. A. A. Estudo de processo de retificação aplicado à recuperação de placas de molde de máquinas de lingotamento contínuo de placas de aço. 2011. 101p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Espírito Santo, UFES, Vitória, ES.

MOCELLIN, F. Avaliação da usinabilidade do ferro fundido vermicular em ensaios de furação. 2002. 97 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

MOCELLIN, F.; MELLERAS, E.; BOEHS, L.; GUESSER, W. L. Study of the machinability of compacted graphite iron for drilling process. II BRAZILIAN MANUFACTURING CONGRESS, Vol. XXVI, nº 1, 2004, Uberlândia – MG, p. 22-27.

NEUGEBAUER R.; BOUZAKIS K.D.; DENKENA B.; KLOCKE F.; STERZING A.; TEKKAYA A.E.; WERTHEIM R. Velocity effects in metal forming and machining processes, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.60, p. 627 - 650, 2011.

NORTON – Saint Gobain 2016, Norton Abrasivos – Vitrium 3. Disponível em <http://www.norton-abrasivos.com.br/nortonvitrium3.aspx>. Acesso em 03/01/2016.

NORTON – Saint Gobain Abrasives, 2011. Catálogo Geral, 149 p. Disponível em <https://www.importecferramentas.com.br/uploads/catalogos/Norton-GERAL.pdf>. Acesso em 10/01/2016.

NUSSBAUM, G. CH. Rebолос e Abrasivos: tecnologia Básica, Vols.: I, II e III. São Paulo: Editora Ícone, 1988.

OLIVEIRA, D. J.; GUERMANDI, L. G.; PEREIRA, M.G.; BIANCHI, E.C.; DINIZ, A.E.; AGUIAR, P.R. Aprimoramento das condições de lubri-refrigeração na retificação de aços endurecidos. VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 2011, Caxias do Sul – RS, 13 p.

OLIVEIRA, J. D.; ALVES, S. M. Adequação dos processos de usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. Produção, v.17, 2007, p. 129-138.

PAULA, W. C. F. Análise de superfícies de peças retificadas com o uso de redes neurais artificiais. 2007. 168p. Dissertação de Mestrado - Universidade Estadual Paulista, UNESP, Bauru, SP.

PEREIRA, A.A.; BOEHS, L.; GUESSER, W.L. The Influence of Sulfur on the Machinability of Grey Cast Iron FC25. *Journal of Materials Processing Technology*, v.179, 2006, p. 165-171.

QI, H. S.; ROWE, W. B.; MILLS, B. Contact length in grinding - Part 1: Contact length measurement. *Journal of Engineering Tribology*, v.211, jan. 1997, p. 67-76.

ROSSINI, N. S.; DASSISTI, M.; BENYOUNIS, K. Y.; OLABI, A. G. Methods of measuring residual stresses in components. *Materials and Design*. v.35, p. 572-588, 2012.

ROWE, W. B. *Modern Grinding Techniques*. Scrivener Publishing LLC, 2010. 51p.

SANTANA, L. R. S.; PAULA, W. C. F.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. LIMA, A. J. B. Redes neurais na predição da microdureza no processo de retificação. *IV CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 2007, Estância de São Pedro Caxias, 10 p.

SAHIN Y.; DURAK O. Abrasive wear behaviour of austempered ductile iron. *Materials and Design*. v.28 p. 1844 - 1890, 2008.

SHAW, M. C. *Principles of abrasives processing*. Oxford Science on Advanced Manufacturing. New York, USA, 1996. 565p.

SILVA, E. J.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. Danos térmicos na retificação decorrentes do par fluido-ferramenta adotado. *I CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA*, 2000, Natal – RS.

SILVA, L.R.; MATTOS, M.F.; AMARAL, L.V.; CORRÊA, E.C.S.; BRANDÃO, J.R.; ÁVILA, R.F. Manufatura ecologicamente correta: análise do comportamento da mínima quantidade de lubrificante – MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho. *VI CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO*, 2011, Caxias do Sul – RS, 10 p.

SOSA, A. D.; ECHEVERRÍA, M. D.; MONCADA, O. J.; SIKORA, J. A. Residual stresses, distortion and surface roughness produced by grinding thin wall ductile iron plates. *International Journal of Machine Tools & manufacture*. v.47, p. 229–235, 2007.

SOSA, A. D.; ECHEVERRÍA, M. D. Surface alterations produced in grinding of austempered ductile iron. International Congress of Science and Technology of Metallurgy and Materials, SAM – CONATEC 2013. Procedia Materials Science, v.8, p.155-161, 2015.

SOUZA, A. J. Fundamentos da usinagem de acabamento por abrasão mecânica. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo - RS, 2007. 46 p. Apostila.

STEMMER, C. E. Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995, 314 p.

TABORGA, A. R. M. Análise e monitoramento da retificação do ferro fundido nodular com rebolos convencionais. 2002. 147 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC.

TABORGA, A. R. M.; TABORGA, J. D. M.; WEINGAERTNER, W. L. Análise da rugosidade obtida na retificação de ferro fundido nodular utilizando rebolos de SiC e Al₂O₃. 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação. Uberlândia, 2003.

TOKTAS, G.; TAYANÇ, M.; TOKTAS, A. Effect if matrix structure on the impact properties of an alloyed ductile iron. Materials Characterization. v.57, p. 290-299, fev. 2006.

TUPY, S.A. Perfis fundidos – Catálogo Técnico. 2014. 52 p.

VIDAL, D. F. Análise de estrutura e propriedades mecânicas de um ferro fundido nodular em processo de fundição produzido pela técnica de imersão de sino. 2013. 172f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro, Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro.

WANG, P. J. Avaliação da retificação com rebolo CBN vitrificado aplicado em ligas de alto desempenho. 2008. 163f. Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Carlos.

YOUSSEF, A. H; EL HOFY, H. Machining technology: Machine tools and operations. Taylor e Francis group, 2008, 633p.