

MAYARA FERNANDA PEREIRA

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE ABRASIVO DO REBOLO E
DO FLUIDO DE CORTE NA RETIFICAÇÃO PLANA
TANGENCIAL DO AÇO INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO
VP420**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

MAYARA FERNANDA PEREIRA

**INFLUÊNCIA DO TIPO DE ABRASIVO DO REBOLO E DO FLUIDO DE
CORTE NA RETIFICAÇÃO PLANA TANGENCIAL DO AÇO
INOXIDÁVEL MARTENSÍTICO VP420**

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

2018

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

P436i
2018 Pereira, Mayara Fernanda, 1992-
Influência do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte na retificação plana tangencial do aço inoxidável martensítico VP420 [recurso eletrônico] / Mayara Fernanda Pereira. - 2018.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.

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

Modo de acesso: Internet.

Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.29>

Inclui bibliografia.

Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. 2. Aço inoxidável martensítico. 3. Processos de fabricação. 4. Abrasivos. 5. Fluidos de corte. 6. Rebolos. I. Silva, Rosemar Batista da, 1974-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Rejâne Maria da Silva – CRB6/1925

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica
Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902
Telefone: (34) 3239-4282 - www.posgrad.mecanica.ufu.br - secposmec@mecanica.ufu.br

**ATA****ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO****NÚMERO DE ORDEM: 529****DATA: 24/08/2018**

Às oito horas do dia vinte e quatro de agosto de dois mil e dezoito, no Anfiteatro A do Bloco 5O, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos Professores Dr. Rosemar Batista da Silva (orientador) e, Dr. Arthur Alves Fiocchi da Universidade Federal de Uberlândia e, Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez da Universidade Estadual Paulista/Campus Bauru para, sob a presidência do primeiro, desenvolver o processo de avaliação da dissertação intitulada **“Influência do Tipo de Abrasivo do Rebolo e do Fluido de Corte na Retificação Plana Tangencial do Aço Inoxidável Martensítico VP420”**, apresentada pela aluna **MAYARA FERNANDA PEREIRA**, matrícula número **11622EMC014**, em complementação aos requisitos determinados pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Mestre. Após discorrer sobre seu trabalho, a candidata foi arguida pelos membros da Banca, em sessão privada. Em seguida, a dissertação foi avaliada em seção privada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram-na:

- () Aprovada
(x) Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador.
() Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca.
() Reprovada

conferindo ao aluno, em caso de aprovação, o título de Mestre em Engenharia Mecânica, **Área de Concentração: Materiais e Processo de Fabricação, Linha de Pesquisa: Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)**. As demandas complementares observadas pelos examinadores deverão ser satisfeitas no prazo máximo de 30 dias, para dar validade a esta aprovação. Para constar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelo presidente e demais membros da Banca.

Membros:

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva (orientador) - UFU

Prof. Dr. Arthur Alves Fiocchi - UFU

Prof. Dr. Luiz Eduardo de Angelo Sanchez - UNESP

Uberlândia, 24 de agosto de 2018



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/08/2018, às 11:57, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Arthur Alves Fiocchi, Professor(a) do Magistério Superior**, em 24/08/2018, às 11:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Luiz Eduardo de Angelo Sanchez, Usuário Externo**, em 24/08/2018, às 12:11, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site

[https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0)

[acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **0660367** e o código CRC **0E63F49E**.

DEDICATÓRIA

À minha mãe Eleci Pereira e à minha
tia Idê Pereira por todo amor, apoio
e compreensão.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu agradeço a Deus por ter abençoado meus caminhos e os meus estudos permitindo que esse trabalho fosse concretizado.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva pela orientação, suporte, incentivo, ensinamentos e amizade, essenciais para a realização deste trabalho.

À minha mãe Eleci Pereira e à minha tia Idê Pereira pelo amor, compreensão, carinho e apoio em todos os momentos, sempre me incentivando a persistir nos meus estudos.

Ao meu companheiro e melhor amigo Bruno Souza Abrão que sempre esteve ao meu lado a todo instante me amparando e me auxiliando ao longo da realização deste trabalho.

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

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado e apoio financeiro ao projeto.

A todos os professores, técnicos e alunos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pela amizade, apoio e contribuição ao longo do desenvolvimento do trabalho, em especial aos doutorandos Antonio Vitor de Mello, Henrique Butzlaff Hübner, Leonardo Rosa Ribeiro da Silva, Leandro Carvalho Pereira e Rodrigo de Souza Ruzzi.

A empresa Saint-Gobain Abrasivos da América do Sul pelo fornecimento das ferramentas utilizadas nos ensaios.

Aos Srs. Marcelo Kuroda e Claus Hirschmann, funcionários da empresa Blaser Swisslube, por gentilmente terem doado os fluidos de corte.

PEREIRA, M. F. **Influência do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte na retificação plana tangencial do aço inoxidável martensítico VP420**. 2018. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

RESUMO

Em um panorama industrial onde há uma crescente demanda por materiais que atendam às exigências de projeto, aliado a um alto desempenho, baixos custos de manufatura e sustentabilidade, a classe dos aços inoxidáveis ganha destaque, em virtude de suas propriedades específicas e de sua empregabilidade. Definidos como ligas metálicas a base de ferro-cromo, com um percentual mínimo de 10,5 % de cromo e outros elementos de liga como Ni e Mo, os aços inoxidáveis apresentam-se em diferentes tipos, sendo que um dos mais versáteis é o aço inoxidável martensítico VP420 temperado e revenido, comumente empregado na indústria de cutelaria, na fabricação de instrumentos cirúrgicos e de alta precisão, bem como na fabricação de moldes e matrizes para injeção plástica. Logo, a fim de atender às demandas de fabricação impostas, é necessário o emprego de um processo de fabricação capaz de conferir tolerâncias dimensionais estreitas aliadas à uma elevada qualidade superficial, como é o caso do processo de retificação. Nesse sentido, o presente trabalho tem por finalidade investigar a influência do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte na integridade superficial e subsuperficial em amostras do aço inoxidável martensítico VP420 submetidas ao processo de retificação plana tangencial. As variáveis de entrada empregadas foram: dois tipos de rebolos abrasivos (alumina monocristalina e alumina branca convencional), dois fluidos de corte (sintético e semissintético) e duas penetrações de trabalho a_e (10 μm e 25 μm). As variáveis de saída analisadas foram os parâmetros de rugosidade R_a , R_t e R_z , imagens das superfícies retificadas (MEV), microdureza Vickers abaixo da superfície e potência de retificação. A partir dos resultados alcançados observou-se que a combinação entre o rebolo monocristalina o uso do fluido sintético, à penetração de trabalho a_e mais baixa proporcionou os menores valores de rugosidade, microdureza e potência de retificação. Mas, quando o mesmo rebolo foi empregado na presença do fluido semissintético a uma penetração $a_e = 25 \mu\text{m}$, as amostras de aço VP420 apresentaram a pior qualidade da superfície, que refletiu nos maiores valores de rugosidade, maior variação na microdureza, além de ter exigido a maior potência para o corte.

Palavras chave: Retificação plana tangencial. Aço inoxidável martensítico VP420. Tipo de abrasivo. Fluido de corte sintético. Integridades superficial e subsuperficial. Potência de retificação.

PEREIRA, M. F. **Influence of the type of abrasive wheel and the coolant on the peripheral surface grinding of the VP420 martensitic stainless steel.** 2018. Master's Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia – MG.

ABSTRACT

In an industrial landscape where there is a growing demand for materials which meet project requirements combined with high performance, low manufacturing costs, and sustainability, stainless steel class is highlighted due specific properties and application. Defined as iron-chromium alloys with a minimum percentage of 10,5 % chromium and other alloy elements such as Ni and Mo, stainless steels have different types and one of the most versatile one is martensitic stainless steel VP420, commonly used in cutlery industry, in the manufacture of surgical and high precision instruments, as well as in the manufacture of molds and dies for plastic injection. Therefore, in order to meet the manufacturing demand, it is necessary to employ a machining process capable to ensure tight tolerances combined to high surface quality, such as grinding process. In this sense, the purpose of the research is to investigate the influence of the type of abrasive grinding wheel and coolant on surface and subsurface integrity of the VP420 martensitic stainless steel submitted to peripheral surface grinding process. The input variables employed were: two types of abrasive wheels (monocrystalline aluminum oxide and conventional white aluminum oxide), two types of cutting fluids (synthetic and semi-synthetic) and two depth of cut values, a_e (10 μm and 25 μm). The output parameters were to the surface roughness parameters R_a , R_t and R_z surface images (SEM) and Vickers microhardness of the machined surfaces, as well as grinding power. Results showed that grinding with combination between monocrystalline aluminum oxide grinding wheel and synthetic coolant, at $a_e = 10 \mu\text{m}$, provided the lowest values of roughness, microhardness and grinding power. However, when the same grinding wheel was employed with the semi synthetic fluid and $a_e = 25 \mu\text{m}$, the worse surface texture, that adversely affected the surface roughness, the highest variation in microhardness and lower grinding power.

Keywords: *Peripheral surface grinding. VP420 stainless steel. Abrasive type. Synthetic coolant. Surface and subsurface integrities. Grinding power.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2. 1 - Usinabilidade entre as principais classes de aços inoxidáveis (Adaptado de MACHADO et al., 2015).....	5
Figura 2. 2 - Rugosidade R_a em função da penetração de trabalho a_e após a retificação no aço inoxidável austenítico AISI 316 (Adaptado de MANIMARAN; KUMAR, 2013).....	7
Figura 2. 3 - Imagens superficiais das amostras de aço inoxidável AISI 316 na após a retificação nas condições: (a) a seco, (b) com fluido semissintético e (c) criogênica (Adaptado de MANIMARAN; KUMAR, 2013).	7
Figura 2. 4 - Efeito do tamanho do abrasivo (a) e da técnica de lubrificação (b) na rugosidade R_a de amostras do aço inoxidável duplex UNS S2304 após a retificação (Adaptado de ZHOU et al., 2016).....	8
Figura 2. 5 - Efeito do tamanho do abrasivo (a_1 , a_2 e a_3) e da lubrificação (b_1 e b_2) nas amostras retificadas do aço inoxidável duplex UNS S2304 (Adaptado de ZHOU et al., 2016).	8
Figura 2. 6 - Efeito do tamanho da partícula abrasiva (a) e da condição de lubrificação na rugosidade R_a das amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304 após a retificação (Adaptado de ZHOU et al., 2017).....	10
Figura 2. 7 - Efeito da concentração de fluido de corte sobre a rugosidade superficial R_a , para as penetrações de trabalho a_e adotadas (Adaptado de PAIVA et al., 2017).....	10
Figura 2. 8 - Dureza (a) e Perda de massa (b) em função da temperatura de revenimento para o aço inoxidável martensítico VP420 (Adaptado de VILLARES METALS, 2005).	12
Figura 2. 9 - Esquema de representação das interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça em processos que envolvem ferramenta de geometria definida (a) e ferramenta com geometria não definida (b) (NEUGEBAUER et al., 2011).....	15
Figura 2. 10 - Elementos básicos do processo de retificação (Adaptado de MARINESCU et al., 2016).....	15
Figura 2. 11 - Classificação referente aos tipos básicos de retificação (Adaptado de MARINESCU et al., 2016).....	16
Figura 2. 12 - Esquema com as etapas de formação do cavaco em retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).	17
Figura 2. 13 - Cavacos formados nas condições a seco (a), com fluido de corte (b) e criogênica (MANIMARAN; KUMAR, 2013).	19
Figura 2. 14 - Cavacos obtidos nas condições a seco (a), com fluido de corte (b) e criogênica (c) após a retificação do aço endurecido AISI D3 (MANIMARAN et al., 2015).	20
Figura 2. 15 - Ilustração das grandezas físicas do processo de retificação plana tangencial (Adaptado de MALKIN; GUO, 2008).	22
Figura 2. 16 - Componentes das forças de corte no processo de retificação (Adaptado de MALKIN; GUO, 2008).	24
Figura 2. 17 - Forças tangencial F_t (a) e normal F_n (b) em função da penetração de trabalho a_e , após a retificação de amostras do aço inoxidável austenítico AISI 316 (Adaptado de MANIMARAN; KUMAR, 2013).	26
Figura 2. 18 - Classificação dos fluidos de corte aplicados em retificação (Adaptado de DINIZ et al., 2010).....	29
Figura 2. 19 - Esquema para ilustração dos principais componentes do reboło durante a retificação (Adaptado de DING et al., 2017).....	34
Figura 2. 20 - Nomenclatura para rebolos abrasivos (Adaptado de KLOCKE, 2009).	36

Figura 2. 21 - Principais tipos de materiais abrasivos (convencionais e superabrasivos) para operações de retificação (Adaptado de JACKSON; DAVIM, 2011).	39
Figura 2. 22 - Partículas abrasivas de alumina branca (a) e de alumina monocristalina (b) (SAINT GOBAIN, 2017).	41
Figura 2. 23 - Dureza X Friabilidade referente a algumas partículas abrasivas (Adaptado de SAINT GOBAIN, 2017).	42
Figura 2. 24 - Ilustração de estruturas de rebolo: fechada (a) e aberta (b) abrasivo (Adaptado de GREENE, 2016).	45
Figura 2. 25 - Esquema de atuação de uma das pontas de diamante do dressador tipo fliesen no rebolo ao longo da operação de dressagem (BIANCHI et al., 199).	47
Figura 2. 26 - Custos percentuais para os vários processos de usinagem convencionais em função da rugosidade superficial R_a requerida (Adaptado de KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).	49
Figura 2. 27 - Queima de retífica após retificação no aço inoxidável martensítico VP420 (a) (Fonte: própria autora). Gráfico de tensões residuais de compressão após retificação no aço inoxidável austenítico AISI 304 (b) (DOS REIS et al., 2010). Microestrutura de aço AISI 1045 com evidência de tempera causada por retificação (c) (LIU et al., 2016). Trincas superficiais no aço inoxidável austenítico AISI 304L após o processo de retificação (d) (ZHOU et al., 2016).	53
Figura 3. 1 - Fluxograma para o planejamento experimental realizado ao longo dos ensaios de retificação (Fonte: própria autora).	55
Figura 3. 2 - Posicionamento da amostra de aço inoxidável martensítico VP420 na máquina retificadora (Fonte: própria autora).	56
Figura 3. 3 - Posicionamento dos rebolos de alumina na máquina retificadora plana tangencial a) monocristalina (65A120K8V40W) e (b) branca convencional (AA120K8V40W).	57
Figura 3. 4 - Microestruturas do aço inoxidável martensítico VP420 após ataque com o reagente Villela.	60
Figura 3. 5 - Posicionamento do bocal de fluido de corte em relação ao rebolo.	61
Figura 3. 6 - Posicionamento do dressador do tipo fliesen na máquina retificadora (Fonte: própria autora).	62
Figura 3. 7 - Dimensões da amostra e regiões de medição de rugosidade superficial (Fonte: própria autora).	64
Figura 3. 8 - Posicionamento das amostras de VP420 no microdurômetro (a), medições de microdureza obtidas nas amostras, a partir da superfície (b) (Fonte: própria autora).	65
Figura 3. 9 - Gráfico com a composição química do aço inoxidável martensítico VP420 obtido através do EDS (Fonte: própria autora).	67
Figura 4. 1 - Rugosidade R_a para o aço inoxidável martensítico VP420 em função da penetração de trabalho (a_e), atmosfera de lubrificação e tipo de abrasivo do rebolo.	70
Figura 4. 2 - Rugosidade R_t para o aço inoxidável martensítico VP420 em função da penetração de trabalho (a_e), atmosfera de lubrificação e tipo de abrasivo do rebolo.	70
Figura 4. 3 - Rugosidade R_z para o aço inoxidável martensítico VP420 em função da penetração de trabalho (a_e), atmosfera de lubrificação e tipo de abrasivo do rebolo.	71
Figura 4. 4 - Valores de microdureza abaixo da superfície do aço inoxidável martensítico VP420 após a retificação com rebolos de (a) alumina monocristalina e (b) alumina branca convencional, com fluido de corte sintético.	76

Figura 4. 5 - Valores de microdureza abaixo da superfície do aço inoxidável martensítico VP420 após a retificação com rebolos de a) alumina monocristalina e (b) alumina branca convencional, com fluido de corte semissintético.	77
Figura 4. 6 - Perfis de microdureza do aço VP 420 após a retificação em diferentes condições de retificação.	80
Figura 4. 7 - Influência estatística do tipo de abrasivo do rebolo e da atmosfera de lubrificação nos valores de microdureza do aço VP 420 após a retificação em diferentes condições de corte.	81
Figura 4. 8 - Imagens das superfícies via MEV do aço inoxidável martensítico VP420 após a retificação com diferentes rebolos e com o fluido sintético.	83
Figura 4. 9 - Imagens das superfícies (MEV) de aço inoxidável martensítico VP420 após a retificação com o fluido de corte semissintético VASCO 7000 em diferentes penetrações de trabalho.	85
Figura 4. 10 - Imagens das superfícies retificadas do aço VP420 nas diversas condições de corte empregadas.	87
Figura 4. 11 - Curvas de potência durante a retificação do aço inoxidável martensítico sob com o fluido de corte sintético, diferentes penetrações de trabalho e com diferentes rebolos: (a) alumina monocristalina e (b) alumina branca convencional.	90
Figura 4. 12 - Curvas de potência durante a retificação do aço inoxidável martensítico sob com o fluido de corte sintético, diferentes penetrações de trabalho e com diferentes rebolos: (a) alumina monocristalina e (b) alumina branca convencional.	91
Figura 4. 13 - Potência máxima de retificação do aço inoxidável martensítico VP420 nas diversas condições de corte empregadas.	92
Figura 4. 14 - Influência do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte na potência máxima de retificação do aço VP420.	93

LISTA DE TABELAS

Tabela 2. 1 - Elementos principais e algumas propriedades do aço inoxidável martensítico VP420 (Adaptado de VILLARES METALS, 2005).....	11
Tabela 2. 2 - Comparação entre as principais características entre processos de usinagem com geometria definida e não definida (MACHADO et al., 2015).....	18
Tabela 2. 3 - Propriedades dos fluidos (1 - ruim; 2 - bom; 3 - ótimo; 4 - excelente) (Webster et al., 1995 apud Irani et al., 2005).	32
Tabela 2. 4 - Principais propriedades dos abrasivos sintéticos (Adaptado de MALKIN; GUO, 2008).	41
Tabela 2. 5 - Principais parâmetros de rugosidade das superfícies (MACHADO et al., 2015).	50
Tabela 3. 1 - Propriedades das partículas de alumina monocristalina e branca convencional (SAINT GOBAIN, 2017).	58
Tabela 3. 2 - Propriedades mecânicas e físicas típicas do aço inoxidável martensítico VP420 temperado e revenido (Adaptado de VILLARES METALS, 2014).	59
Tabela 3. 3 - Características dos fluidos de corte sintético (Grindex 10) e semissintético (VASCO 7000) (Adaptado de BLASER SWISSLUKE, 2011 (a) e (b)).	61
Tabela 3. 4 - Parâmetros de corte nos ensaios de retificação.	63
Tabela 3. 5 - Planejamento experimental fatorial 2 ³ dos ensaios de retificação.	63
Tabela 3. 6 - Percentual em massa e percentual atômico dos elementos químicos presentes no aço inoxidável martensítico VP420 obtidos através de EDS (Fonte: própria autora).	67
Tabela 4. 1 - Variações percentuais (%) médias de rugosidade R_a , R_t e R_z em função do aumento na penetração de trabalho (a_e), do tipo de abrasivo do rebolo e atmosfera de lubrificação.	71
Tabela 4. 2 - Valores de p-valor obtidos após a análise de variância (ANOVA) para os valores de rugosidade R_a , R_t e R_z em função do tipo de abrasivo do rebolo e da atmosfera de lubrificação.	73
Tabela 4. 3 - Influência do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte nos valores de rugosidade R_a , R_t e R_z nas amostras retificadas do aço inoxidável martensítico VP420.	74
Tabela 4. 4 - Reduções percentuais máximas nos valores de microdureza Vickers em relação à referência média.	80
Tabela 4. 5 - Valores de p-valor obtidos após a análise de variância (ANOVA) para os valores de microdureza Vickers em função do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte.	81
Tabela 4. 6 - Análise de variância (ANOVA) para a potência máxima em função do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte, após a retificação das amostras de aço inoxidável martensítico VP420.	93

LISTA DE ABREVIações 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	Alumínio
Al_2O_3	Alumina
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>
a_p (μm)	Profundidade de corte
A_{sd}	Área de dressagem
ASM	<i>American Society for Metals</i>
b_d (μm)	largura de atuação do dressador
C	Carbono
Ca	Cálcio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CCC	Cúbico de corpo centrado
CFC	Cúbico de face centrada
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	Alumínio
Al_2O_3	Alumina
ANSI	<i>American National Standards Institute</i>

a_p (μm)	Profundidade de corte
A_{sd}	Área de dressagem
ASM	<i>American Society for Metals</i>
b_d (μm)	largura de atuação do dressador
C	Carbono
Ca	Cálcio
Co	Cobalto
Cr	Cromo
Cu	Cobre
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CCC	Cúbico de Corpo Centrado
CFC	Cúbico de Face Centrada
°C	Grau Celsius
D	Diamante
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
d_s (mm)	Diâmetro do rebolo
Fe	Ferro
F_n (N)	Força normal
F_t (N)	Força tangencial
h_{eq} (mm)	Espessura de corte equivalente
HB	Dureza Brinell
HRC	Dureza Rockwell “C”
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Índice de Tolerância
J	Joules
l_c (μm)	Comprimento de contato rebolo – peça
m	metros

mm	milímetros
m/s	metros por segundo
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
Mn	Manganês
MPa	Mega Pascal
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
Nb	Nióbio
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
Ni	Níquel
N _s	Rotação do rebolo
Ni	Níquel
P	Fósforo
P (W)	Potência de retificação
PCD	Diamante Sintético Policristalino
R _a (μm)	Desvio médio aritmético
R _{ku} (μm)	Fator de achatamento do perfil (<i>Kurtosis</i>)
R _q (μm)	Desvio médio quadrático
R _{sk} (μm)	Fator de assimetria do perfil (<i>Skewness</i>)
R _t (μm)	Altura total do perfil
R _z (μm)	Altura máxima do perfil
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Se	Selênio
Sd	Passo de dressagem
Si	Silício
SiC	Carboneto de Silício
Ti	Titânio

U_d	Grau de recobrimento de dressagem
UNS	<i>Unified Numbering System</i>
V	Vanádio
V_j (L/min)	Vazão dos fluidos de corte
V_s (m/s)	Velocidade de corte
V_w (m/min)	Velocidade da peça
W	Tungstênio
W_t	Ondulação teórica
μm	micrometros

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	4
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 Aços inoxidáveis	4
2.1.1. Usinabilidade de aços inoxidáveis	4
2.1.2. Retificação de aços inoxidáveis	6
2.1.3. Aço inoxidável martensítico VP420	11
2.2 Processos de usinagem por abrasão	13
2.2.1 Retificação	13
2.2.2 Tipos de retificação	15
2.2.3 Mecanismos de formação de cavaco	17
2.2.4 Grandezas físicas no processo de retificação	20
2.2.5 Forças de corte e potência de retificação	24
2.3 Fluidos de corte em retificação	28
2.3.1 Funções dos fluidos de corte	28
2.3.2 Classificação dos fluidos de corte	29
2.3.3 Fluidos de corte para retificação de aços inoxidáveis	33
2.4 Rebolos abrasivos	34
2.4.1 Composição dos rebolos	34
2.4.2 Propriedades dos rebolos	37
2.4.3 Tipos de abrasivos	38
2.4.4 Ligantes	42
2.4.5 Grau de dureza do rebolo	43
2.4.6 Estrutura do rebolo	44
2.4.7 Operação de dressagem	45
2.5 Qualidade superficial das peças retificadas	48
2.5.1 Rugosidade	48
2.5.2 Danos térmicos	51
CAPÍTULO III	54
METODOLOGIA	54
3.1 Máquina-ferramenta	56
3.2 Rebolos abrasivos	57

3.3	Material das amostras	58
3.4	Fluidos de corte	60
3.5	Parâmetros de corte	61
3.6	Parâmetros de saída	64
3.6.1	<i>Rugosidade.....</i>	64
3.6.2	<i>Microdureza.....</i>	65
3.6.3	<i>Imagens das superfícies retificadas (MEV)</i>	66
3.6.4	<i>Potência de retificação</i>	68
CAPÍTULO IV		69
RESULTADOS E DISCUSSÕES.....		69
4.1	Rugosidade da superfície	69
4.2	Microdureza	75
4.3	Imagens das superfícies retificadas	82
4.4	Potência de retificação	87
CAPÍTULO V.....		94
CONCLUSÕES.....		94
SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.....		96
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		97

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A retificação é um processo abrasivo que vem sendo empregado na indústria metal mecânica há mais de 100 anos, muito embora haja registros de remoção de material através de abrasivos, desde o período neolítico (MARINESCU et al., 2016). No entanto, o uso de máquinas retificadoras em fabricação iniciou-se por volta de 1860, as quais eram destinadas a produzir peças para máquinas de costura e componentes de bicicletas (MACHADO et al., 2015).

Ao contrário das operações que empregam ferramentas de geometria definida, a retificação exige o uso de um disco abrasivo, conhecido como rebolo, que rotaciona a altas velocidades de corte (em geral acima de 30 m/s), para a remoção de material da peça a ser usinada. O rebolo é composto por milhões de partículas abrasivas, não metálicas e extremamente duras, de orientação irregular, que são unidas por meio de aglomerante (ligante), sendo que cada uma dessas partículas exerce o papel de uma ferramenta de corte (MACHADO et al., 2015; MARINESCU et al., 2016).

Pertencente à classe de processos de usinagem por abrasão, em que a remoção de material é feita através de ferramentas de geometria não definida, a retificação ganha destaque por ser majoritariamente empregada em componentes que já passaram previamente por algum processo de usinagem, tal como fresamento, torneamento, furação, dentre outros, conferindo à peça uma melhor qualidade de trabalho (MACHADO et al., 2015; DIN 8589, 2003). Segundo KLOCKE (2009) o processo de retificação possui grande relevância na engenharia, sendo preferencialmente empregado na fabricação de peças e de componentes que exigem tolerâncias dimensionais estreitas aliadas a baixos valores de rugosidade e por ainda ser uma opção na usinagem de materiais como aços endurecidos (acima de 55 HRC) que em muitos casos não conseguem ser usinados pelos processos convencionais realizados com ferramentas de geometria definida (MARINESCU et al., 2004). E, sobretudo, com os avanços tecnológicos e técnicas modernas de retificação, são vários os materiais e que podem ser usinados por meio deste processo (ROWE, 2010).

Apesar dessas vantagens, a retificação é considerada por alguns especialistas como uma operação pouco eficiente, uma vez que uma pequena parcela da energia consumida no

processo é revertida em remoção efetiva de material (KLOCKE, 2009; MACHADO et al., 2015; MARINESCU et al., 2016). Além disso, há várias peculiaridades do processo de retificação que exigem muita atenção dos usuários de usinagem no sentido de garantir que as peças usinadas estejam livres de problemas que podem comprometer a funcionalidade delas. Vários destes problemas são resultantes do calor gerado durante o processo e que, em grande parte, é direcionado para a peça, em especial nas condições onde os parâmetros de corte empregados não são devidamente selecionados. Um dos problemas mais comuns é conhecido como queima de retificação, definida como uma oxidação na superfície retificada, em virtude do gradiente de temperatura na zona de corte (MARINESCU et al., 2004).

Desta forma, para cada par rebolo-peça é necessário identificar os parâmetros de corte que garantam a eficiência do processo em termos de preservação da integridade da superfície da peça e levando em conta os fatores custo e critérios de sustentabilidade.

Embora sejam vários os trabalhos disponíveis na literatura com resultados e sugestões de parâmetros de corte para a retificação de aços das mais variadas classes, até o momento de início deste trabalho notou-se que eram poucos trabalhos sobre retificação de aços inoxidáveis disponíveis na literatura específica. Os aços inoxidáveis que possuem uma grande gama de aplicações em engenharia que se estende desde os setores automobilístico e petroquímico, por causa de sua elevada resistência mecânica e resistência à corrosão, até as indústria médico-odontológica e de cutelaria (DUDA, 2016). Entretanto, os aços inoxidáveis, de uma forma geral, possuem baixa usinabilidade e, mais especificamente, baixa retificabilidade, em virtude da presença de elementos de liga em sua composição que aumentam a taxa de encruamento, reduzem a condutividade térmica e elevam a dureza desses materiais (COTELL, 2004).

Em relação à operação de retificação dos aços inoxidáveis, ainda são poucas as informações disponíveis na literatura acerca dos parâmetros de corte mais adequados a serem empregados. Dentre eles, destaca-se o estudo realizado por Zhou et al. (2016) que relataram que o tamanho da partícula abrasiva influencia sensivelmente na qualidade superficial do aço inoxidável duplex 2304 e que as tensões residuais medidas após o processo foram diferentes para cada fase do material. No trabalho de retificação do aço inoxidável austenítico 304L SS, Kumar et al. (2017) observaram uma significativa transformação superficial da peça, e algumas situações houve transformação de austenita em martensita.

Neste contexto, esta pesquisa visa contribuir para o setor de usinagem com informações e resultados obtidos durante o processo de retificação plana de aço inoxidável martensítico VP420 com rebolo convencional. As principais variáveis de entrada a serem testadas são o tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte, cuja influência é o escopo deste trabalho, além da penetração de trabalho. A escolha do aço inoxidável martensítico VP420

deveu-se ao fato de ele ser amplamente empregado na indústria de cutelaria, principalmente de facas, e na fabricação de moldes e matrizes para injeção plástica. A produção diária em uma das maiores empresas de fabricação deste item no Brasil é superior a 1 500 000 peças e é um material muito suscetível a danos térmicos.

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho serão apresentadas uma revisão bibliográfica para nortear o tema do trabalho, a metodologia e o planejamento experimental adotado para os ensaios, os consequentes resultados experimentais e, por fim, as conclusões obtidas.

Nesse sentido, o presente trabalho foi dividido em capítulos, a saber:

CAPÍTULO I – contém a introdução para contextualizar o tema de estudo com a definição e importância do processo de retificação e algumas de suas peculiaridades, como também a importância do estudo de aços inoxidáveis, além do objetivo do trabalho.

CAPÍTULO II – seção em que é apresentada a revisão bibliográfica que abrange os principais tópicos relacionados ao trabalho, como aços inoxidáveis, processos abrasivos, fluidos de corte, rebolos abrasivos e qualidade superficial das peças retificadas, descrevendo-os com base em um estudo sistemático em livros, periódicos, catálogos, patentes e normas técnicas acerca do tema em estudo.

CAPÍTULO III – contém informações sobre a metodologia adotada para a realização do trabalho, descrevendo todo o procedimento experimental dos ensaios de retificação, os materiais e equipamentos empregados, a preparação das amostras, os instrumentos e equipamentos de medição bem como o processo de análise de resultados obtidos.

CAPÍTULO IV – contempla a apresentação dos resultados obtidos e as discussões sempre buscando confrontá-los com a literatura específica.

CAPÍTULO V – seção onde são apresentadas as conclusões acerca dos resultados alcançados no capítulo anterior, bem como sugestões para os trabalhos futuros.

Para finalizar, são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas neste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Ao longo deste capítulo da dissertação serão apresentados os principais tópicos envolvidos na pesquisa, no que tange aos aços inoxidáveis, principais parâmetros envolvidos no processo de retificação, fluidos de corte, propriedades dos rebolos, operação de dressagem e qualidade superficial.

2.1 Aços inoxidáveis

Nesta seção do trabalho, serão apresentadas informações acerca da usinabilidade de aços inoxidáveis, com ênfase em sua retificabilidade, bem como as propriedades referentes ao aço inoxidável martensítico VP420, objeto de estudo nessa pesquisa.

2.1.1. Usinabilidade de aços inoxidáveis

Quando se trata do termo usinabilidade, há diferentes opiniões entre autores, pesquisadores e profissionais do setor de usinagem. Para alguns é levada em consideração somente a rapidez com a qual é possível remover material, enquanto que para outros, o tempo de vida da ferramenta para uma determinada velocidade de corte. Ainda segundo outros autores, são os parâmetros como acabamento superfície e integridade da peça que determinam a usinabilidade de um material (SURPI, 2011; OUTOKUMPU, 2013). Contudo, a definição mais aceita entre os pesquisadores de usinagem, é aquela proposta por Ferraresi (2014), em que a usinabilidade deve ser analisada como uma grandeza tecnológica que, por meio de um índice comparativo, apresenta um conjunto de propriedades da usinagem de um metal, tendo como referência um padrão. Dessa forma, é possível expressar o grau de dificuldade ao se usinar um material.

De acordo com Diniz et al. (2010) a usinabilidade está relacionada não somente com o processo de fabricação adotado, mas também com as propriedades mecânicas da peça (dureza, tenacidade, ductilidade e resistência mecânica), composição química, microestrutura, tendência de empastamento do cavaco na superfície de saída da ferramenta,

inclusões, aditivos, percentual de partículas duras, operações previamente realizadas sobre o material (a frio ou a quente) e o seu grau de encruamento.

Na Figura 2.1 é apresentada de forma gráfica uma comparação entre a usinabilidade relativa entre as principais classes de aços inoxidáveis. A partir deste gráfico, é possível observar que os aços inoxidáveis ferríticos possuem uma melhor usinabilidade dentre todas as classes, sendo seguidos pelos martensíticos, austeníticos e por fim, os aços inoxidáveis duplex, que apresentam a pior usinabilidade dentre todas as classes de aços inoxidáveis (MACHADO et al., 2015).

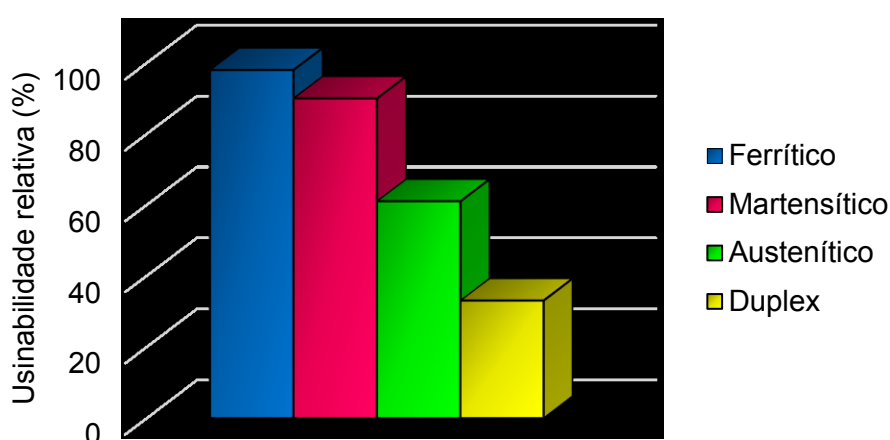


Figura 2. 1 - Usinabilidade entre as principais classes de aços inoxidáveis (Adaptado de MACHADO et al., 2015).

De acordo com SURPI (2011) e MACHADO et al. (2015) a usinabilidade dos aços inoxidáveis diminui com o aumento do teor de elementos de liga em sua composição, que geram assim uma maior taxa de desgaste nas ferramentas e, na maior parte das vezes, comprometem o acabamento superficial das peças em relação àquelas de aços comum ao carbono (não inoxidáveis). Além disso, de acordo com Outokumpu (2013), nos aços inoxidáveis, algumas das características que exercem maior influência na usinabilidade são: baixa condutividade térmica, elevada ductilidade e alta taxa de encruamento.

Dentre todos os tipos de aços inoxidáveis, os austeníticos são uns dos mais difíceis de usar, em virtude da elevada taxa de encruamento e baixa condutividade térmica, que promovem um desgaste acelerado das ferramentas de corte, elevadas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, além da formação de longos cavacos que prejudicam o acabamento superficial da peça usinada (TRENT; WRIGTH, 2000; MACHADO et al., 2015). E neste sentido, uma maneira para melhorar a usinabilidade dos aços inoxidáveis é a adição de elementos de liga que formam inclusões frágeis, reduzindo a ductilidade do material e

promovendo a quebra dos cavacos, sendo que o enxofre é o elemento de liga mais usualmente empregado (MACHADO et al., 2015; SURPI, 2011). Além do enxofre, outros elementos como o selênio também melhoram a usinabilidade (CHIAVERINI, 2012; OUTOKUMPU, 2013).

2.1.2. Retificação de aços inoxidáveis

Até o momento de desenvolvimento desta pesquisa foram encontrados poucos trabalhos na literatura que abordam o comportamento dos aços inoxidáveis ao serem submetidos ao processo de retificação, bem como os parâmetros de corte mais adequados para a usinagem com rebolos convencionais. A seguir serão apresentados e comentados os trabalhos mais relevantes nesta área a fim de contextualizar o tema do trabalho.

Um estudo realizado por Manimaran e Kumar (2013) buscou avaliar o desempenho do uso do rebolo de alumina *Sol Gel* (SG) em comparação com um rebolo de alumina convencional, durante a retificação do aço inoxidável austenítico AISI 316 com as seguintes condições de corte: penetração de trabalho ($a_e = 10 \mu\text{m}$, $20 \mu\text{m}$, $30 \mu\text{m}$ e $40 \mu\text{m}$), diferentes condições de lubrificação (a seco, na presença de fluido de corte semissintético e na condição criogênica) e velocidade de corte $V_s = 31,4 \text{ m/s}$. Estes autores relataram que o rebolo *Sol Gel* possui uma friabilidade maior em comparação com o rebolo de alumina convencional e que, quando combinado com condição de lubrificação criogênica, em alternativa aos fluidos de corte convencionais, proporcionou uma melhora significativa no acabamento superficial das amostras de aço inoxidável. Como resultados, os autores observaram uma redução na rugosidade superficial entre 30 % e 49 %, respectivamente, para as condições de uso de fluido de corte e criogênica em relação à condição a seco, Fig. 2. 2, bem como uma diminuição na presença de defeitos superficiais das amostras retificadas, Fig. 2. 3 (a), (b) e (c), nas mesmas condições.

Em outro trabalho, Zhou et al. (2016) realizaram ensaios de retificação do aço inoxidável duplex UNS S2304 e verificaram o efeito do tamanho da partícula abrasiva alumina *Sol-gel* e da técnica de lubrificação na integridade superficial e subsuperficial das peças. Os parâmetros de corte empregados foram: Velocidade de corte $V_s = 23 \text{ m/s}$, velocidade periférica da peça de $V_w = 8 \text{ m/min}$ e granulometria dos rebolos igual a 60#, 180# e 400#. Alguns dos resultados obtidos pelos autores são apresentados nas Figuras 2. 4 e 2. 5. A partir da Fig. 2. 4 (a) observa-se que o aumento da grana (*mesh*), ou seja, redução do tamanho da partícula abrasiva do rebolo, implicou na redução dos valores de rugosidade R_a , como também foi observado de acordo com a presença do fluido de corte, Fig. 2. 4 (b). Na Figura 2.5 estão

representadas as imagens das superfícies retificadas, nas mesmas condições de corte adotadas.

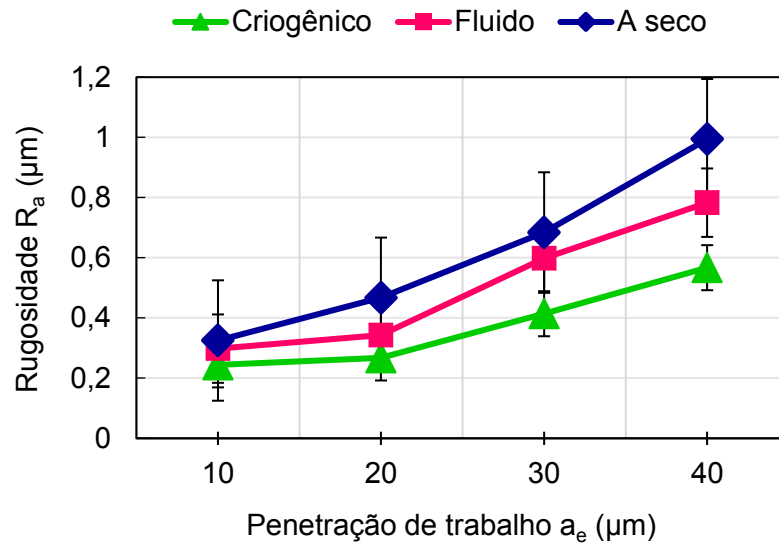


Figura 2. 2 - Rugosidade R_a em função da penetração de trabalho a_e após a retificação no aço inoxidável austenítico AISI 316 (Adaptado de MANIMARAN; KUMAR, 2013).

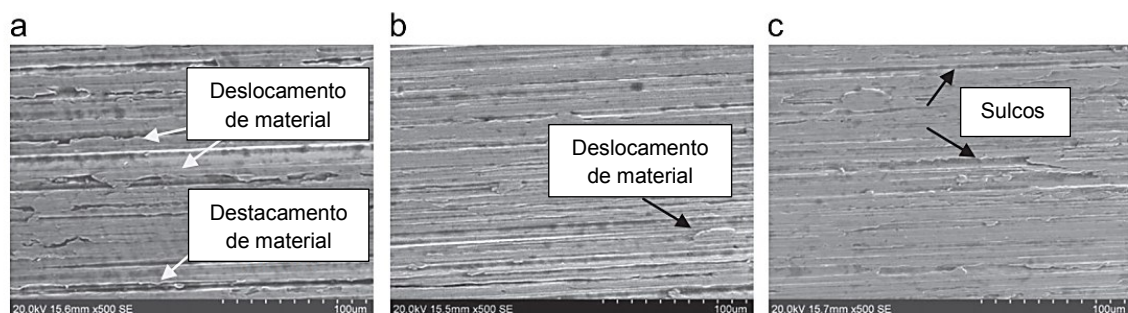


Figura 2. 3 - Imagens superficiais das amostras de aço inoxidável AISI 316 na após a retificação nas condições: (a) a seco, (b) com fluido semissintético e (c) criogênica (Adaptado de MANIMARAN; KUMAR, 2013).

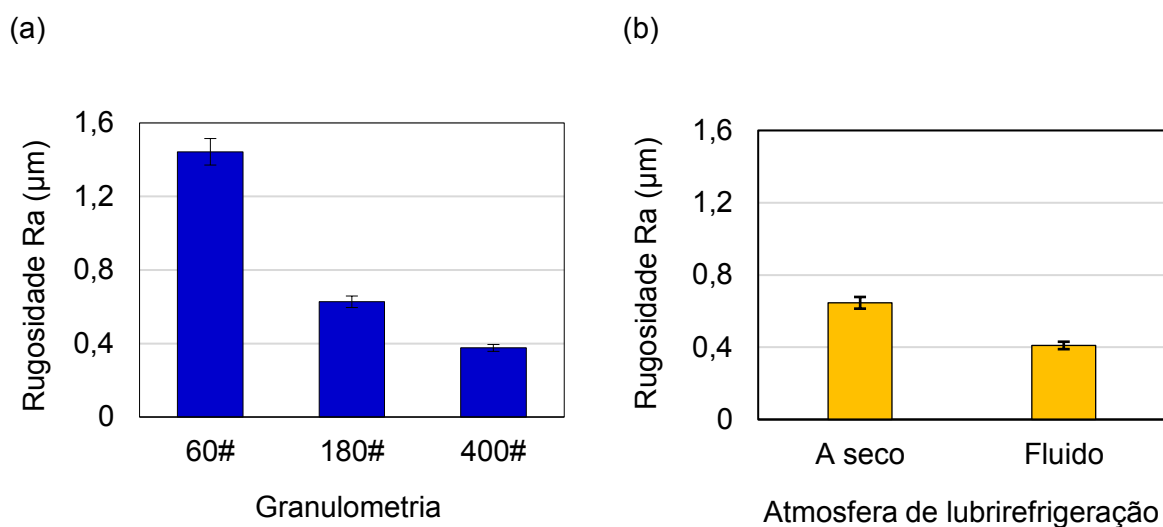


Figura 2. 4 - Efeito do tamanho do abrasivo (a) e da técnica de lubrificação (b) na rugosidade Ra de amostras do aço inoxidável duplex UNS S2304 após a retificação (Adaptado de ZHOU et al., 2016).

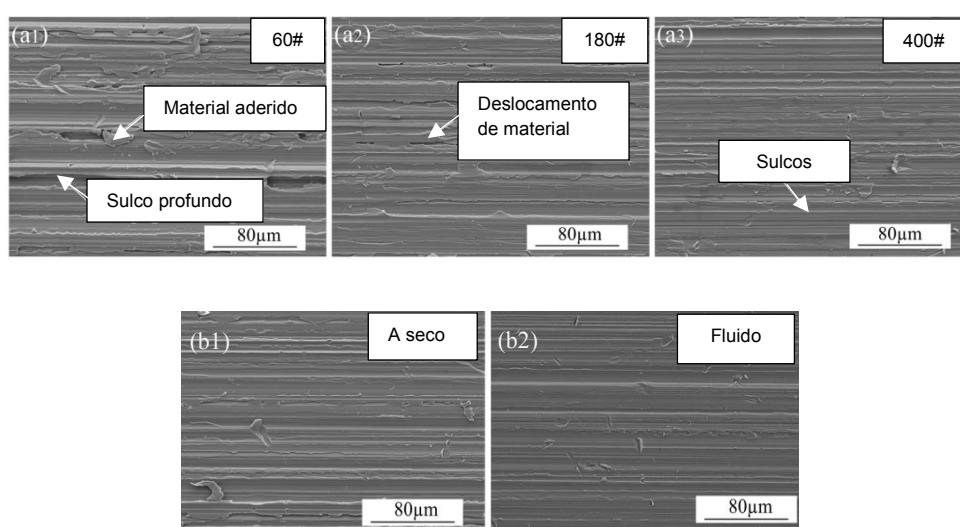


Figura 2. 5 - Efeito do tamanho do abrasivo (a1, a2 e a3) e da lubrificação (b1 e b2) nas amostras retificadas do aço inoxidável duplex UNS S2304 (Adaptado de ZHOU et al., 2016).

Em um estudo mais recente desenvolvido por Zhou et al. (2017), os autores visaram determinar os parâmetros de corte mais adequados à retificação do aço inoxidável austenítico AISI 304, a partir das seguintes condições de corte: velocidade de corte $V_s = 23 \text{ m/s}$, velocidade periférica da peça $V_w = 8 \text{ m/min}$ e granulometria dos rebolos de alumina convencional granulometria 60#, 180# e 400#.

Para tanto, os autores realizaram ensaios na condição a seco e na presença de um fluido de corte sintético avaliando a rugosidade superficial das amostras como variável de

saída do processo. Os resultados obtidos por eles são mostrados nas Fig. 2. 6 (a) e (b), onde é possível verificar, respectivamente, que a diminuição no tamanho das partículas abrasivas proporcionou uma redução na rugosidade superficial R_a na presença do fluido de corte, em comparação com os ensaios realizados a seco.

De acordo com Outokumpu (2013), é recomendável para a retificação de aços inoxidáveis evitar o uso de rebolos com partículas com granulometria mesh pequenas (ex: 36#, 46#), que implica em tamanhos de partículas grandes, pois a probabilidade de ocorrência de danos térmicos nesses casos é maior. Partículas abrasivas maiores implicam em maior área de contato com a peça, maior deformação plástica durante a retificação, elevação da temperatura em regiões localizadas e conseqüentemente, um aumento da geração de calor na região de corte. Dessa maneira, ainda de acordo com Outokumpu (2013), o ideal é empregar rebolos com uma granulometria mais fina (ex: granas superiores a 60#), a fim de reduzir os danos térmicos.

Além disso, o estudo da condição de dressagem para cada caso representa um papel fundamental na eficiência do processo de retificação, uma vez que rebolos com partículas abrasivas desgastadas não permitem a adequada remoção de material, em muitos casos só atitam e elevam as temperaturas na peça, conseqüentemente comprometendo a qualidade superficial dos aços inoxidáveis ao longo do processo de retificação.

Paiva et al. (2017) realizaram ensaios de retificação plana tangencial do aço inoxidável endurecido por precipitação VP80 com rebolo de alumina branca convencional (AA46K6V) e verificaram a influência da concentração de fluido de corte sobre a rugosidade das peças. Como resultados, os autores observaram que o aumento na concentração do fluido de 3 % para 8 % para as penetrações de trabalho empregadas (5 μm , 15 μm e 25 μm) resultou em uma diminuição na influência sobre a rugosidade R_a das peças, conforme demonstrado na Fig. 2. 7.

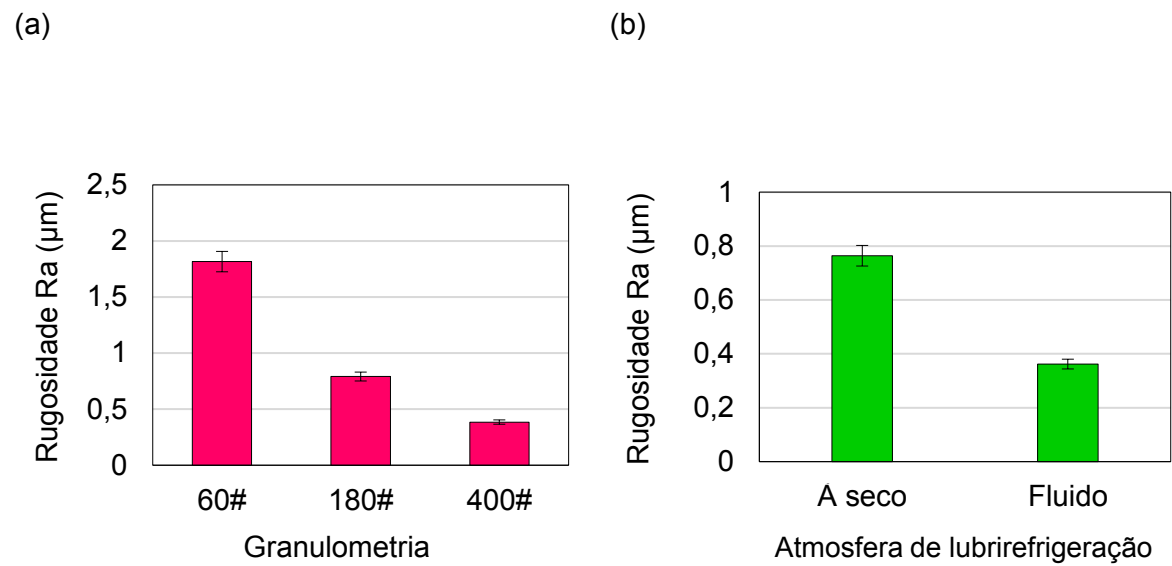


Figura 2. 6 - Efeito do tamanho da partícula abrasiva (a) e da condição de lubrificação na rugosidade R_a das amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304 após a retificação (Adaptado de ZHOU et al., 2017).

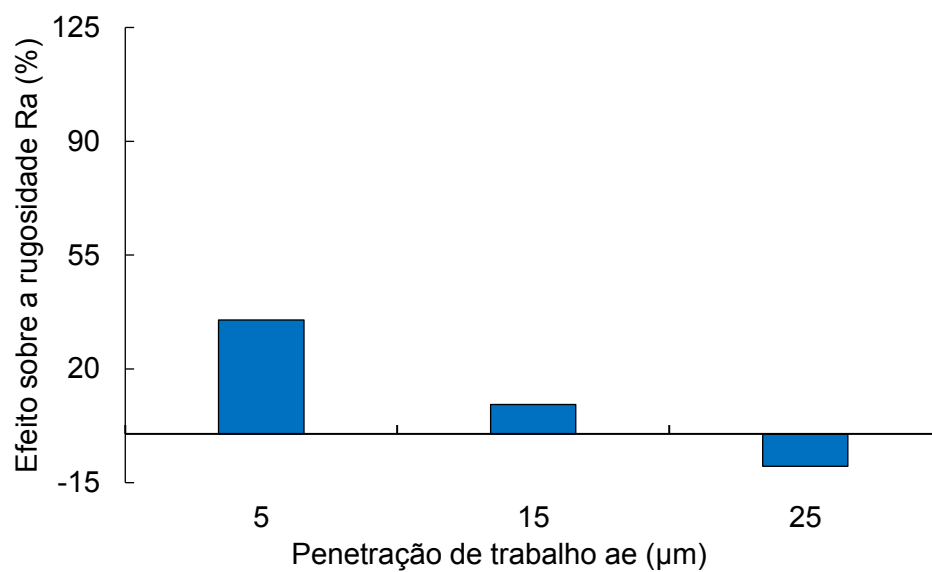


Figura 2. 7 - Efeito da concentração de fluido de corte sobre a rugosidade superficial R_a , para as penetrações de trabalho a_e adotadas (Adaptado de PAIVA et al., 2017).

2.1.3. Aço inoxidável martensítico VP420

O aço inoxidável martensítico VP420 (AISI 420 ou UNS S42000) tem como características um elevado teor de carbono (máximo 0,40 % em massa) e uma quantidade de cromo que varia entre 12 % e 14 % em massa (OUTOKUMPU, 2013) e assim como os outros aços inoxidáveis pertencentes à classe martensítica, ele pode ser endurecido através de um tratamento térmico, como a têmpera seguida por um revenimento (SURPI, 2011). Esses tratamentos térmicos são fundamentais no aço VP420, tendo em vista que, através da formação e precipitação intergranular e intragranular de carbonetos do tipo $M_{23}C_6$, ocorre uma melhora significativa na resistência à corrosão, característica fundamental desse material.

O aço inoxidável martensítico VP420 é comumente empregado na fabricação de itens de cutelaria, instrumentos de medição, instrumentos cirúrgicos e odontológicos, além de ser empregado na fabricação de lâminas de corte e discos de freio, correntes de algumas máquinas e maquinários da área de siderurgia e mineração, o que faz deste um aço de relevante importante na indústria metal mecânica, em aplicações que requerem uma elevada resistência à corrosão (PRIETO et al., 2014; BRÜHL et al., 2008). E por causa da sua alta resistência a corrosão, esse aço vem ganhando destaque para aplicações em ambientes que contém água, vapor bem como em meios ácidos. Ele ainda é bastante empregado na fabricação de moldes e matrizes para injeção de termoplásticos, assegurando elevada estabilidade dimensional, mesmo quando se trata de fabricação de componentes com geometria complexa (ZHAO et al., 2015).

Os principais elementos químicos encontrados neste aço bem como algumas de suas propriedades encontram-se listadas na Tabela 2. 1.

Tabela 2. 1 - Elementos principais e algumas propriedades do aço inoxidável martensítico VP420 (Adaptado de VILLARES METALS, 2005).

Elementos químicos principais					Dureza (HRC)	Limite de escoamento (MPa)	Condutividade térmica (W. (m.°C) ⁻¹)
C	Mn	Cr	Si	V			
0,40	0,50	13,50	0,80	0,25	51	1,344. 10 ⁻⁹	24,9

Em geral, para a maioria das aplicações do aço inoxidável martensítico VP420, por exemplo para a fabricação de facas utilizadas em cozinhas, ele deve estar na condição temperado e revenido com dureza em torno de (51 ± 2) HRC, e recomenda-se que este tratamento térmico seja feito de forma uniforme a uma taxa de 100 °C/h até atingir a

temperatura de 400 °C e, em seguida, aumentar a temperatura a uma taxa de 300 °C/h até atingir-se o ponto de austenitização, entre 1 000 °C e 1 040 °C. Essa temperatura deve ser mantida até a completa homogeneização da peça. O resfriamento deve ser realizado em óleo apropriado para têmpera e agitado e aquecido entre 40 °C e 70 °C, até que a temperatura da peça atinja 100 °C. Em seguida, o material deve ser resfriado em ar parado entre 50 °C e 70 °C.

Imediatamente após a têmpera, o aço deve ser revenido tão logo atinjam 60 °C. Ressalta-se que entre cada revenimento, o material deve ser resfriado até a temperatura ambiente. A temperatura de revenimento varia entre 550 °C e 650 °C, de acordo com a dureza desejada. Todavia, a melhor combinação entre resistência à corrosão, resistência mecânica e tenacidade é verificada para revenimento realizados entre 250 °C e 300 °C, sendo que o tempo dentre cada revenimento deve ser de no mínimo duas horas (VILLARES METALS, 2005).

Na Figura 2. 8 (a) é apresentada uma relação entre a dureza (*Rockwell C*) alcançada pelo aço inoxidável VP420 em função da temperatura de revenimento à qual o material é submetido, enquanto que na Fig. 2. 8 (b), é apresentada uma relação entre a perda de massa em função da temperatura de revenimento, para o aço em questão (VILLARES METALS, 2005).

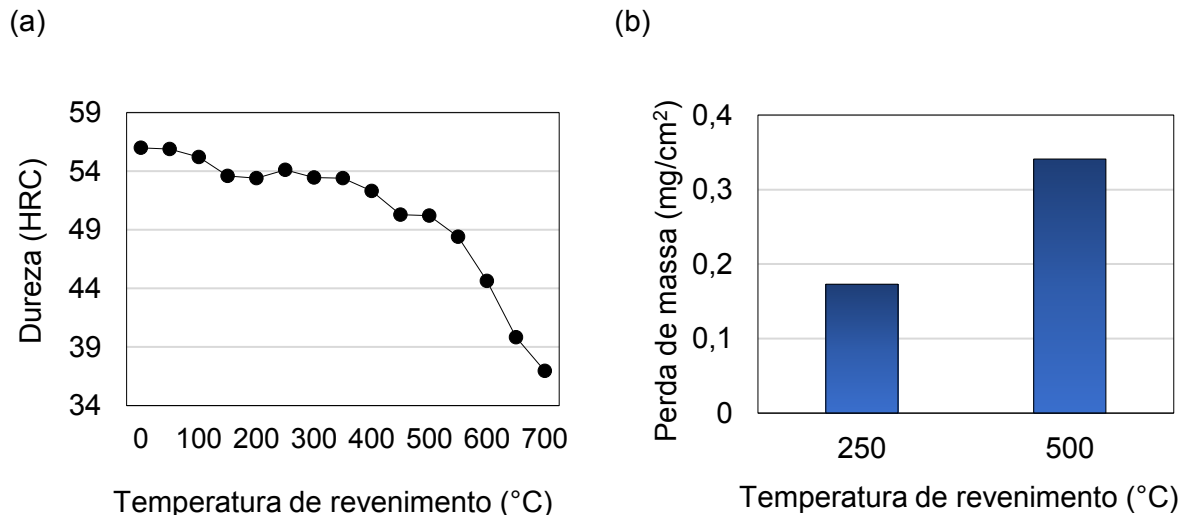


Figura 2. 8 - Dureza (a) e Perda de massa (b) em função da temperatura de revenimento para o aço inoxidável martensítico VP420 (Adaptado de VILLARES METALS, 2005).

2.2 Processos de usinagem por abrasão

No âmbito industrial as operações de usinagem convencional que empregam ferramentas com geometria definida não são suficientes para assegurar correções de formas às peças e aos componentes. Além disso, muitas vezes o material a ser usinado apresenta elevada dureza ou possui uma microestrutura e propriedades mecânicas que comprometem sua usinabilidade (MALKIN; GUO, 2008 apud LI et al., 2017). Nesse sentido, a usinagem por abrasão ganha destaque, pois abrange processos mecânicos nos quais são empregadas partículas abrasivas não metálicas de elevada dureza e geometria irregular, que são unidas entre si por um material ligante ou que se apresentam soltas, para a remoção de material da peça (KLOCKE, 2009; ROWE, 2010).

Muitas peças e componentes com as mais diversas aplicações são submetidos aos processos abrasivos após serem previamente usinados por processos convencionais, podendo-se citar: mancais de rolamentos de rolos de esferas, pistões, válvulas, cilindros, estampos de corte, moldes, matrizes, cames, engrenagens, componentes de precisão empregados em instrumentações, itens cirúrgicos e de cutelaria, que exigem tolerâncias dimensionais estreitas, bem como um bom acabamento superficial (KLOCKE, 2009; JACKSON; DAVIM, 2010).

2.2.1 Retificação

Dentre os processos abrasivos, a retificação merece maior destaque em virtude da sua importância na indústria metal mecânica, por assegurar a produção de componentes com desvios dimensionais e geométricos inferiores àqueles obtidos com as operações convencionais de usinagem que empregam ferramentas com geometria definida (MALKIN; GUO, 2008; MACHADO et al., 2015).

A retificação é um processo de usinagem em que a remoção de cavaco é estabelecida pelas várias partículas abrasivas que penetram na peça, e esta ferramenta é denominada rebolo. El é constituído por inúmeras partículas abrasivas ligadas entre si por um material ligante ou aglomerante. (MALKIN; GUO, 2008). E um diferencial é que ele rotaciona a altas velocidades de corte, geralmente acima de 30 m/s.

Cada partícula abrasiva possui arestas cortantes que exercem a função de uma ferramenta corte, da mesma forma com o que ocorre em operações convencionais de usinagem que empregam ferramentas com geometria definida, como o fresamento por exemplo (ROWE, 2014).

De acordo com Neugebauer et al. (2011), as etapas que envolvem o mecanismo remoção de material da peça sob a forma de cavaco são semelhantes tanto em processos convencionais de usinagem que empregam ferramentas com geometria definida, torneamento por exemplo, Fig. 2. 9 (a), quanto em processos abrasivos (como a retificação e afiação, por exemplo), Fig. 2. 9 (b), nos quais as partículas abrasivas, que possuem geometria irregular, mas que são caracterizadas por apresentarem arestas afiadas e multicortantes, exercem o papel de ferramenta de corte. Alguns pontos que diferenciam em geral os processos de usinagem com ferramenta de geometria definida do processo de retificação, quanto às interfaces abrasivo-peça e abrasivo-cavaco, são o ângulo de saída da partícula abrasiva, Fig. 2. 9 (b), que é predominantemente negativo e o fato de que são vários abrasivos em contato com a peça durante a usinagem, e como se sabe, algumas partículas abrasivas apenas atiram-se sem remover material, fazendo com que alta quantidade de energia mecânica seja dispendida sem a efetiva remoção de cavaco (MALKIN; GUO, 2008).

Em geral, as peças produzidas pelo processo de retificação apresentam tolerâncias dimensionais muito estreitas (na faixa de IT6 a IT3) e valores de rugosidade que podem variar de 0,02 μm a 1,60 μm , dependendo das condições de corte empregadas, combinação esta que dificilmente pode ser conseguida por meio de operações com ferramentas de corte de geometria definida (MALKIN; GUO, 2008).

Entretanto, a retificação é considerada um processo de baixa eficiência, tendo em vista que demanda muita energia que é revertida em baixa remoção de material, em comparação com operações que utilizam ferramentas de geometria definida, como o torneamento por exemplo (KLOCKE, 2009 apud AZARHOUSHANG; ZAHEDI, 2017).

Além disso, uma excessiva quantidade de calor é gerada na zona de corte, ou seja, na interface rebolo – peça o que, de acordo com Malkin e Guo (2008), pode ocasionar danos térmicos na peça, tais como queimas superficiais, tensões residuais de tração, alterações microestruturais, além da geração de micro ou macro trincas. Ainda de acordo com Malkin e Guo (2008), a expansão ou contração da peça ocasionada por efeitos termodinâmicos durante a retificação, contribui para as alterações nas tolerâncias desejadas na peça, bem como distorções no produto. Dessa forma, torna-se indispensável um eficiente sistema de lubrificação ao longo do processo de retificação, a fim de se evitar danos térmicos à peça usinada (YIN; MARINESCU, 2013; AZARHOUSHANG et al., 2017).

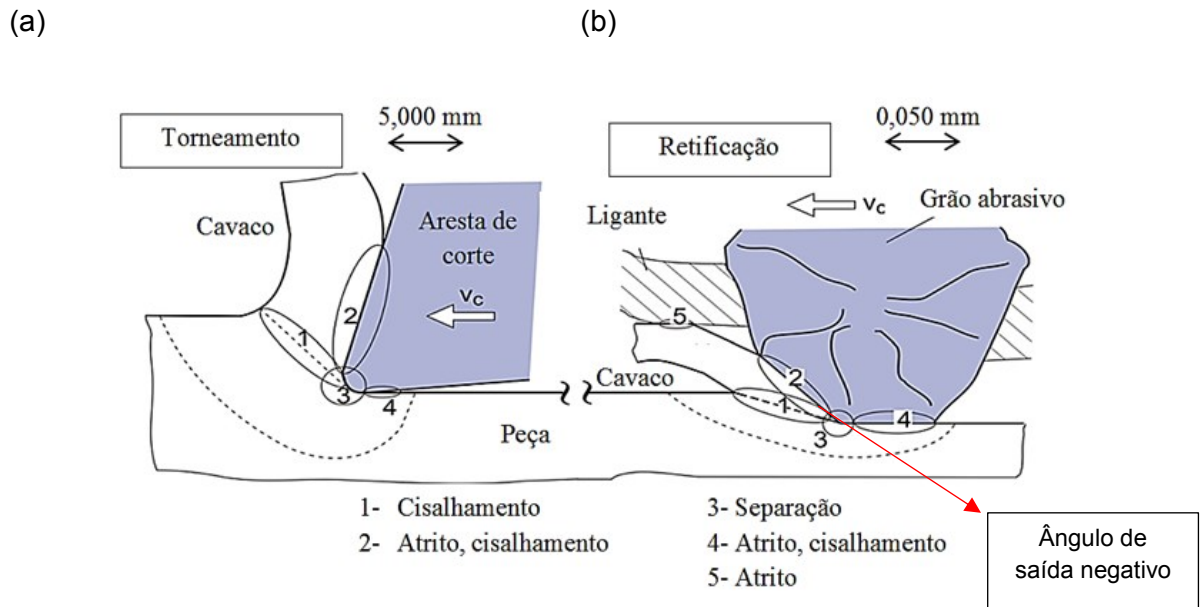


Figura 2. 9 - Esquema de representação das interfaces cavaco-ferramenta e ferramenta-peça em processos que envolvem ferramenta de geometria definida (a) e ferramenta com geometria não definida (b) (NEUGEBAUER et al., 2011).

2.2.2 Tipos de retificação

Por definição, o processo de retificação abrange seis elementos básicos: máquina retificadora, rebolo, peça a ser retificada, bocal, fluido de corte e cavaco ou resíduos provenientes do processo, Fig. 2. 10 (MARINESCU et al., 2016).

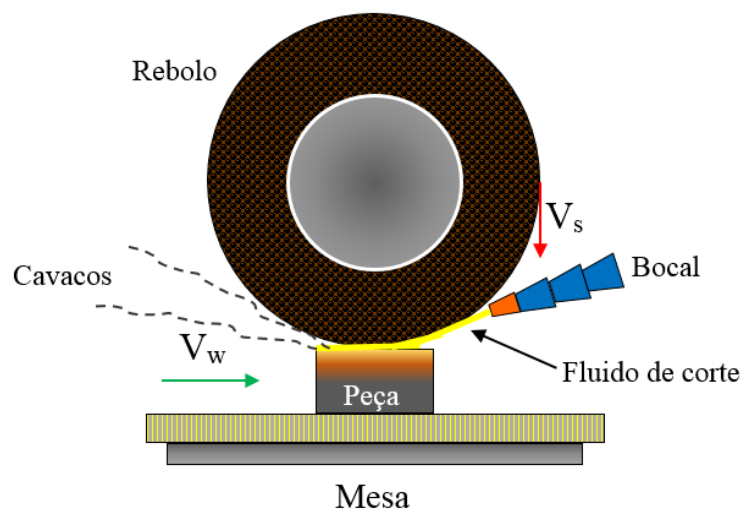


Figura 2. 10 - Elementos básicos do processo de retificação (Adaptado de MARINESCU et al., 2016).

Diante disso, pode-se classificar a operação de retificação em vários tipos, que diferem entre si de acordo com a forma do rebolo, a peça a ser usinada e o movimento cinemático entre a peça e o cabeçote (MALKIN; GUO, 2008). Essas classificações têm por finalidade transmitir uma melhor compreensão acerca das características de cada processo, além de permitir orientar na escolha da operação de retificação mais adequada, para atender às demandas de fabricação (KLOCKE, 2009).

Há ainda na literatura outra classificação para os tipos de retificação que é proposta por (MARINESCU et al., 2016) e que são ilustradas esquematicamente na Fig. 2.11. Estes autores classificam os processos em apenas retificação plana e retificação cilíndrica e em relação à geometria da peça a ser usinada.

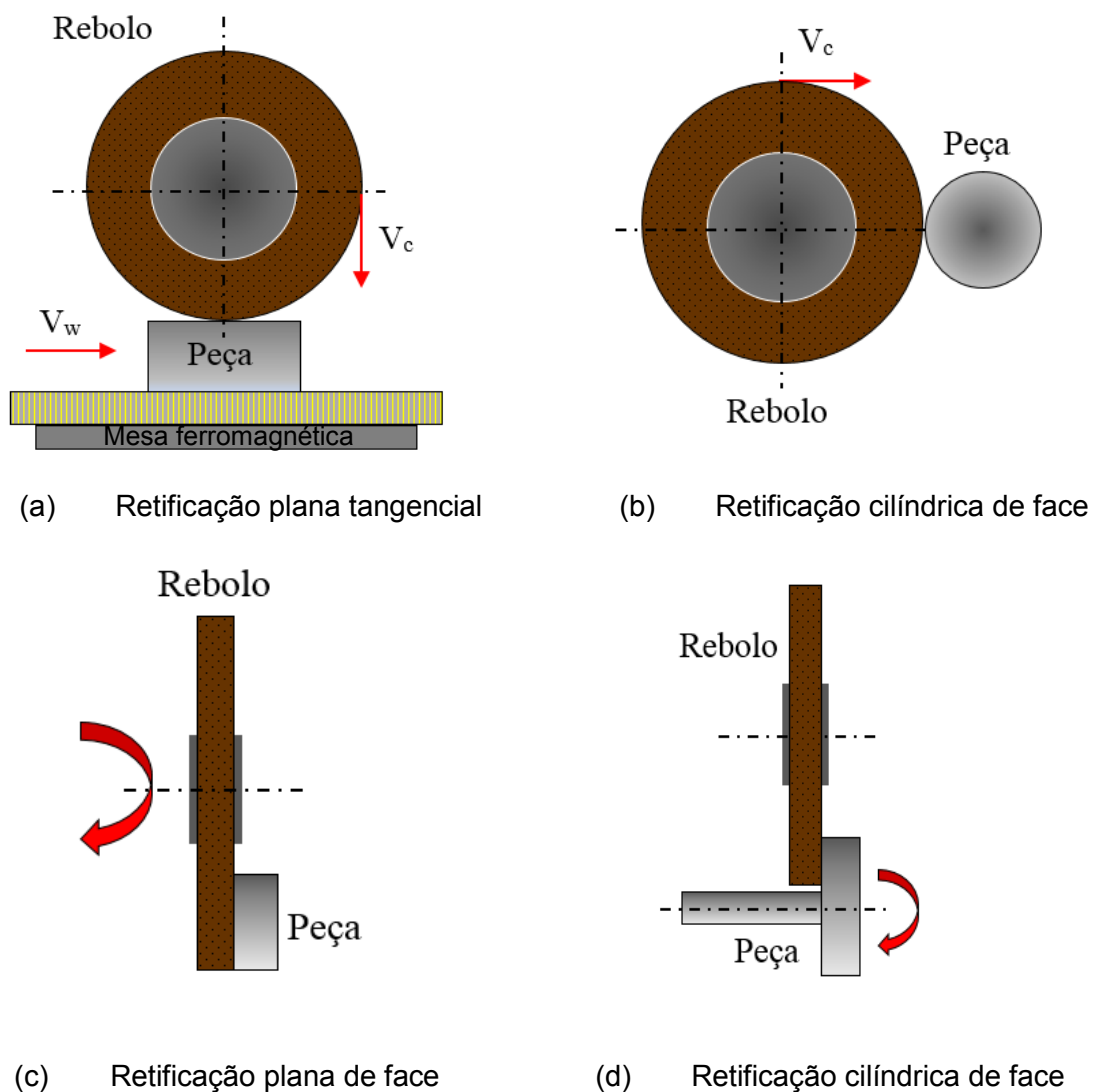


Figura 2. 11 - Classificação referente aos tipos básicos de retificação (Adaptado de MARINESCU et al., 2016).

2.2.3 Mecanismos de formação de cavaco

Conforme já mencionado, no processo de retificação é a partícula abrasiva do rebolo que atua como ferramenta de corte que possui arestas cortantes afiadas, elevada dureza e com distribuição das partículas abrasivas de forma irregular (MALKIN; GUO, 2008). Nesse sentido, em comparação com ferramentas de geometria definida (brocas, bits, fresas, etc) o ângulo de saída da partícula abrasiva alterna entre positivo e negativo, mas em geral com predominância deste último, durante as sucessivas passagens do rebolo sobre a peça (KLOCKE, 2009). E quanto à formação de cavaco na retificação, embora de difícil avaliação em virtude da geometria irregular das partículas abrasivas, na literatura específica são apresentadas três etapas de formação de cavaco por uma partícula abrasiva: atrito, cisalhamento e remoção do cavaco, Fig. 2. 12. Aliado a isso, os cavacos gerados são de dimensões muito pequenas, sendo que sua forma é somente possível de ser analisada através de um microscópio adequado (KLOCKE, 2009; MACHADO et al., 2015). Todavia, a compreensão acerca dos mecanismos que envolvem a remoção de material da peça sob a forma de cavaco ao longo da retificação é de fundamental importância, em virtude da sua influência na seleção dos parâmetros de corte, bem como na análise das variáveis de saída do processo (JACKSON; DAVIM, 2011; ROWE, 2014).

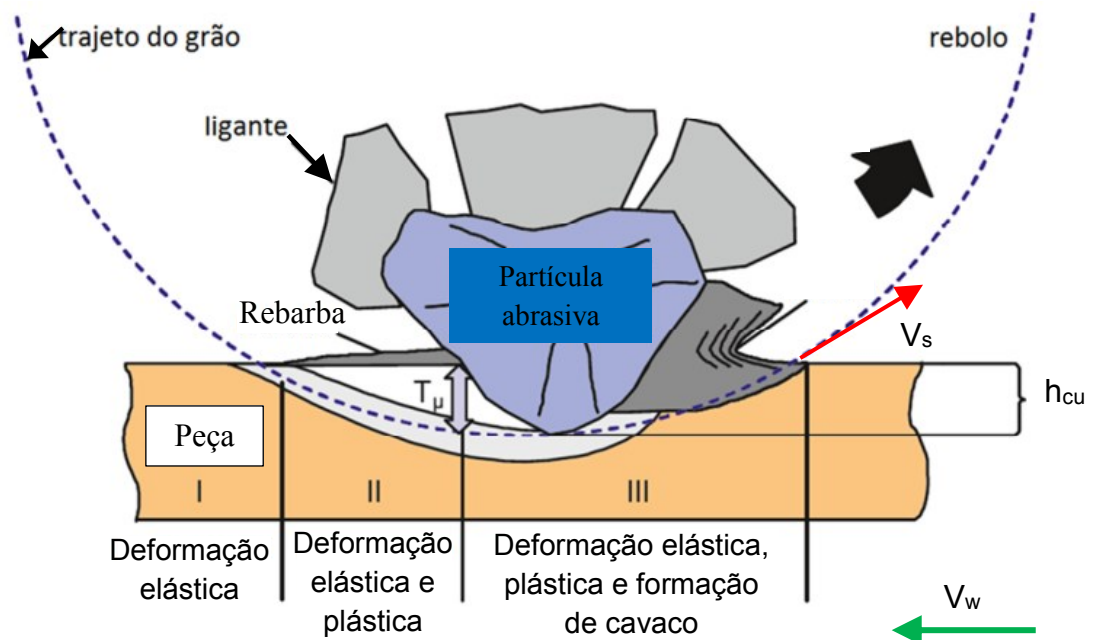


Figura 2. 12 - Esquema com as etapas de formação do cavaco em retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).

- Etapa I – Atrito: caracterizada pelo início do contato entre a partícula abrasiva e a peça. Por meio do atrito desenvolvido através dessa interação, inicia-se a deformação elástica, conforme a partícula penetra na peça, Fig. 2. 12.
- Etapa II – Cisalhamento: conforme a partícula abrasiva penetra na peça, a espessura de cavaco não deformado (h_{cu}) aumenta, ampliando assim as tensões compressivas na superfície que está sendo retificada, Fig. 2. 12. Dessa forma, o material da peça é deformado plasticamente e assim, deslocado para frente e para as laterais da partícula abrasiva, de acordo com o sentido de retificação. Assim, à medida que as partículas abrasivas adentram na peça, a área de contato rebolo-peça aumenta, consequentemente, o atrito e as deformações plásticas no material aumentam na mesma proporção. Na região de cisalhamento, a energia é dissipada, principalmente, sob a forma de atrito, calor e deformação.
- Etapa III – Remoção do cavaco: nesta região, a aresta cortante da partícula abrasiva atinge um valor de penetração crítica que, por consequência, gera uma tensão igualmente crítica. Esta tensão é definida como a tensão mínima para que ocorra a ruptura de material. São nessas condições que se inicia formação do cavaco de fato, sendo que grande parte da energia gerada é consumida tão somente na remoção do material. Entretanto, essa situação apenas ocorre se a aresta cortante da partícula penetra na peça a uma profundidade onde a espessura de cavaco não deformado h_{cu} seja igual à profundidade de corte crítica T_{μ} , conforme ilustrado na Fig. 2. 12.

Na Tabela 2. 2 são apresentadas, de forma resumida, as diferenças existentes entre a formação do cavaco em processos de usinagem que empregam ferramentas de geometria definida e o processo de retificação, onde a ferramenta de corte não possui geometria definida.

Tabela 2. 2 - Comparação entre as principais características entre processos de usinagem com geometria definida e não definida (MACHADO et al., 2015).

Geometria definida (ex.: fresa)	Geometria não definida (ex.: abrasivos do rebolo)
1) Recalque inicial	1) Recalque e sulcamento
2) Deformação e ruptura	2) Cisalhamento e formação de microtrincas
3) Deslizamento das lamelas	3) Escoamento do cavaco
4) Saída do cavaco	4) Fusão
5) Zona de aderência	5) Formação do cavaco esferoidal
	6) Expulsão do cavaco alongado
	7) Ausência de zona de aderência

E neste contexto, trabalhos acerca de retificação em aços inoxidáveis tiveram como finalidade avaliar a formação de cavaco de acordo com as condições de corte empregadas e alguns deles são comentados a seguir.

Manimaran e Kumar (2013) analisaram a influência das condições de lubrificação (a seco, com fluido de corte e criogênica) nos cavacos formados durante a retificação do aço inoxidável austenítico AISI 316 com rebolo de alumina *Sol-gel* e relataram que na condição a seco, os cavacos formados foram mais alongados e com lamelas retorcidas, Fig. 2. 13 (a), em virtude das altas temperaturas desenvolvidas na zona de corte e da ausência de lubrificação. Já ao usinarem na presença do fluido de corte semissintético, os cavacos foram mais quebradiços e retorcidos, conforme representado na Fig. 2. 13 (b). Sob a condição criogênica foram obtidos cavacos ainda menores e muito mais quebradiços, Fig. 2. 13 (c), comprovando assim que a refrigeração criogênica assegura uma redução mais eficiente na temperatura da zona de corte, o que influenciou diretamente na formação de cavaco e forma dos cavacos gerados. De acordo com os autores, a lubrificação criogênica gera menores defeitos superficiais o que facilita as arestas de corte das partículas executarem o corte.



Figura 2. 13 - Cavacos formados nas condições a seco (a), com fluido de corte (b) e criogênica (MANIMARAN; KUMAR, 2013).

Em outra pesquisa realizada por Manimaran et al. (2015) acerca da retificação do aço endurecido AISI D3, comumente empregado na confecção de moldes e matrizes, com rebolos de alumina convencional (A60K5V) e *Sol-gel* (SG46HV), foi avaliada a influência do tipo de lubrificação na forma dos cavacos. De acordo com os autores, na condição a seco, Fig. 2. 14 (a), os cavacos obtidos foram mais alongados e com arestas semelhantes a serras nas laterais. Contudo, na presença de um fluido de corte sintético, Fig. 2. 14 (b), alguns cavacos apresentaram-se muito retorcidos e alguns na forma esferoidal. Ao utilizarem a técnica criogênica, os cavacos apresentaram-se ainda mais retorcidos, conforme

representado na Fig. 2. 14 (c). Nesse sentido, foi possível observar que o regime de lubrificação influenciou diretamente na formação dos cavacos.



Figura 2. 14 - Cavacos obtidos nas condições a seco (a), com fluido de corte (b) e criogênica (c) após a retificação do aço endurecido AISI D3 (MANIMARAN et al., 2015).

2.2.4 Grandezas físicas no processo de retificação

Nesta seção serão apresentadas as principais grandezas físicas envolvidas no processo de retificação, mais especialmente, no que se refere à retificação plana tangencial, foco do presente estudo.

- Velocidade de corte (V_s): também conhecida como velocidade periférica do rebolo é definida como sendo o deslocamento de uma partícula abrasiva na superfície de corte do rebolo em um determinado intervalo de tempo, Fig. 2.15. Ela influencia na vida do rebolo, na taxa de remoção de material e no acabamento superficial das peças retificadas (MARINESCU et al., 2016; MALKIN; GUO, 2008). A velocidade de corte é calculada pela Eq. (1):

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad \text{m/s} \quad \text{Eq. (1)}$$

- Em que: d_s representa o diâmetro externo do rebolo (mm) e n_s a rotação dele (rpm). A velocidade corte para rebolos abrasivos convencionais em geral varia entre 30 m/s e 45 m/s, mas pode chegar a 300 m/s para o caso de rebolos superabrasivos. Manimaran e Kumar (2013) utilizaram, por exemplo, na retificação do aço inoxidável austenítico AISI 316, rebolos de alumina convencional e *Sol - Gel* a uma velocidade de corte V_s de 31,4 m/s, mas na literatura também sido observado que os valores de V_s podem ser inferiores ao que costuma estabelecer como padrão, por exemplo, Zhou et al. (2016) na

retificação do aço inoxidável duplex UNS S2304, empregaram uma velocidade de corte $V_s = 23,4$ m/s.

- Velocidade periférica da peça (V_w): ou simplesmente velocidade da peça é definida como sendo a velocidade tangencial, tendo-se como referência um ponto de contato da peça com o rebolo. Para o caso específico da retificação plana tangencial, a velocidade da peça equivale à velocidade da mesa da máquina, Fig. 2.15 (MARINESCU et al., 2016). A velocidade da peça é determinada em função do material da peça, do tipo de abrasivo e estrutura do rebolo, bem como das condições operacionais da máquina ferramenta, a fim de que as tolerâncias dimensionais sejam alcançadas. Em comparação com a velocidade de corte (V_s), a velocidade da peça (V_w) assume valores menores, que variam de 10 m/min a 25 m/min (NUSSBAUM, 1988). Todavia, em alguns trabalhos desenvolvidos a respeito da retificação de aços inoxidáveis, os valores de V_w empregadas foram diferentes. De acordo com um estudo desenvolvido por Fredj et al. (2006), na retificação do aço inoxidável austenítico AISI 304, com rebolo de alumina convencional (99A46M7V10N), foram empregados valores de velocidade da peça entre 1 m/min e 9 m/min, nos ensaios experimentais sob condição de lubrificação criogênica. Em outra pesquisa desenvolvida por Manimaran et al. (2014), foram empregados valores de V_w equivalentes a 6 m/s, 7,5 m/s e 9 m/s ao longo dos ensaios de retificação no aço inoxidável austenítico AISI 316 com rebolo de alumina convencional (A60K5V). Nesse sentido, a velocidade da peça é selecionada em função do tipo de material da peça, do tipo de abrasivo e estrutura do rebolo, bem como em função das condições da máquina ferramenta, onde serão realizados os procedimentos experimentais, visando sempre atingir as tolerâncias desejadas no processo (MALKIN; GUO, 2008).

- Da mesma forma que a velocidade de corte, a velocidade da peça é determinante na espessura do cavaco, posto estar diretamente relacionada com a espessura de corte equivalente, h_{eq} (MARINESCU et al., 2016). Contudo, os efeitos da velocidade da peça na espessura de corte equivalente são contrários aos relativos à velocidade de corte. O aumento nos valores da velocidade da peça implica em um aumento na espessura de corte equivalente; consequentemente, um maior número de partículas abrasivas entra em contato com a superfície a ser retificada, ampliando assim as forças de corte envolvidas no processo. Quando há um aumento nas forças de corte, o rebolo torna-se mais propenso a perder suas partículas abrasivas o que compromete, sensivelmente sua vida. Em contrapartida, quando é reduzido o valor da velocidade da peça, a espessura de corte equivalente h_{eq} diminui proporcionalmente, reduzindo as forças de

corte e, dessa forma, aumentando o tempo de vida do rebolo (MALKIN; GUO, 2008; KLOCKE, 2009).

- Penetração de trabalho (a_e): este parâmetro descreve o quanto que o rebolo penetra na peça, em relação ao plano de trabalho, sendo que esta grandeza é medida perpendicularmente a direção do avanço da peça ou do rebolo; em outras palavras, é a medida da espessura de material removido, em milímetros, por revolução ou passagem da peça, Fig. 2. 15 (MARINESCU et al., 2016). Baixos valores de penetração de trabalho a_e resultam em um menor número de partículas abrasivas do rebolo em contato com a peça e a um menor tempo de contato. Entretanto, com o aumento da penetração de trabalho, há um acréscimo de partículas abrasivas em contato com a peça, por um tempo comparativamente maior. Assim, a área de contato rebolo-peça é ampliada, culminando uma maior temperatura desenvolvida na região e em uma maior quantidade de material removida (espessura de corte equivalente h_{eq}) o que pode vir a comprometer negativamente a qualidade superficial das peças retificadas (KLOCKE, 2009; KLOCKE et al., 2015). Segundo um estudo desenvolvido por Zhou et al. (2016), ao retificar o aço inoxidável austenítico AISI 316, os valores de rugosidade média R_a aumentaram de $0,55 \mu\text{m}$ à penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$, para $0,65 \mu\text{m}$, a um $a_e = 40 \mu\text{m}$. O mesmo comportamento foi observado por Manimaran et al. (2015), onde foi observado um aumento nos valores de rugosidade média R_a de $0,66 \mu\text{m}$, a um $a_e = 10 \mu\text{m}$, para valores de R_a próximos a $0,75 \mu\text{m}$ à uma penetração de trabalho $a_e = 40 \mu\text{m}$, ao longo da retificação do aço endurecido AISI D3, empregado na fabricação de moldes e de matrizes.

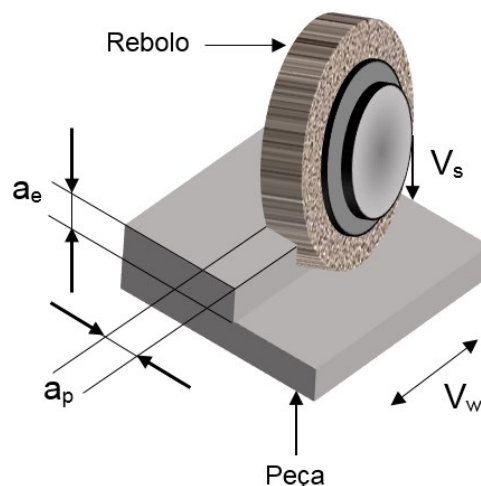


Figura 2. 15 - Ilustração das grandezas físicas do processo de retificação plana tangencial (Adaptado de MALKIN; GUO, 2008).

- Profundidade de corte (a_p) ou largura de usinagem (b): é a profundidade axial do rebolo na peça ou a largura de penetração do rebolo na peça, sendo medida na direção perpendicular ao plano de trabalho, Fig. 2. 15 (MARINESCU et al., 2016). Se a superfície a ser usinada é maior que a largura do rebolo, na retificação em cheio a profundidade de corte será igual à largura do rebolo. Para as situações em que a largura da peça é inferior à do rebolo, a profundidade de corte será igual à largura da peça a ser usinada. Mas ainda há casos em que não se utiliza a largura total do rebolo, ou seja, a profundidade de corte é feita por incrementos transversais. De acordo com Machado et al. (2015), esse parâmetro é normalmente selecionado com a largura do rebolo sendo que o ideal é que a profundidade varie de 1/4 a 4/5 do valor de largura do rebolo.
- Espessura de corte equivalente (h_{eq}): este parâmetro representa a espessura de material que as partículas abrasivas removem da peça, podendo ser calculado pela Eq. (2). O aumento no valor da espessura de corte equivalente, através do aumento da penetração de trabalho a_e ou da velocidade da peça (V_w), ou mesmo pela diminuição da velocidade de corte (V_s), resulta em um aumento na quantidade de material removido da superfície da peça, o que eleva os esforços de corte envolvidos no processo, comprometendo consequentemente a qualidade superficial das peças retificadas (MALKIN; GUO, 2008). Por isso, é sempre recomendado empregar rebolos cujos ligantes suportem altas velocidade, pois teoricamente quanto maior a velocidade de corte, menor será o desgaste no rebolo, menores serão os esforços de corte ao longo da retificação e dessa forma, melhor será o acabamento superficial das peças retificadas (MALKIN; GUO, 2008; KLOCKE, 2009).

$$h_{eq} = a_e \cdot \frac{V_w}{V_s} \quad \text{m/s} \quad \text{Eq. (2)}$$

- Comprimento de contato (l_c): é a extensão média de partículas abrasivas ativas que entram em contato com a peça durante a operação de retificação, sendo que tal parâmetro pode vir a ser determinado com base na penetração de trabalho e no diâmetro do rebolo, e expressa pela Eq.(3) (GRAF, 2004 apud DAMASCENO, 2010).

$$l_c = \sqrt{a_e \cdot d_s} \quad [\text{mm}] \quad \text{Eq. (3)}$$

O conhecimento do comprimento de contato rebolo-peça é de fundamental importância, pois é um indicativo da integridade superficial da peça (ROWE, 2010). Segundo Klocke (2009), quanto maior a área de contato rebolo-peça, maior será a dificuldade em remover a partícula abrasiva do rebolo, uma vez que nessas condições,

as partículas estarão em contato com a peça reduzindo assim o esforço e a pressão suportados por cada uma delas ao longo do processo. De acordo com a Eq. (3), a área de contato aumenta com a penetração de trabalho; dessa forma, estes valores não podem ser muito elevados como observado nas operações de usinagem convencional com ferramenta de geometria definida, uma vez que o aumento da penetração de trabalho resulta em um maior número de partículas em contato com a superfície da peça. Assim, o atrito entre as partículas abrasivas e a peça será maior o que, conseqüentemente, propiciará um aumento na geração de calor na zona de corte, comprometendo a qualidade superficial da peça retificada (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016).

2.2.5 Forças de corte e potência de retificação

Durante o processo de retificação são geradas forças na região de contato entre o rebolo e a peça, em virtude do atrito, cisalhamento e corte estabelecido entre ambos. Mais especificamente na retificação plana tangencial, a força de corte total estabelecida pode ser decomposta em dois vetores perpendiculares entre si, força tangencial (F_t) e força normal (F_n), Fig. 2. 16 (MALKIN; GUO, 2008).

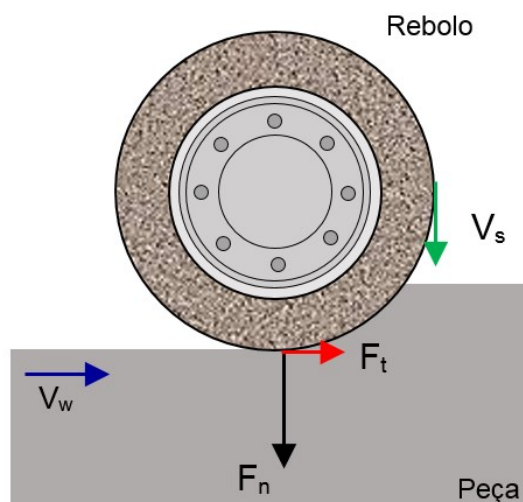


Figura 2. 16 - Componentes das forças de corte no processo de retificação (Adaptado de MALKIN; GUO, 2008).

Elevados valores nas forças normais (F_n) podem afetar negativamente nas tolerâncias dimensionais da superfície retificada, além de provocar vibrações e trepidações, conhecidas como *chattering*, cuja evidência de ocorrência pode ser notada nas superfícies das peças (AZIZI; MOHAMADYARI, 2015). Todavia, altos valores de forças tangenciais (F_t) permitem a geração de elevados gradientes de temperatura, responsáveis pela geração dos danos de origem térmica nas peças retificadas (TANG et al., 2009). De uma forma geral, quando a força de corte resultante no processo é elevada, o desgaste do rebolo é acelerado; nesse sentido, o conhecimento das forças de corte envolvidas na retificação é de fundamental importância no que tange ao monitoramento do processo e o conhecimento das consequências da retificação em termos de qualidade superficial à peça (BADGER; TORRANCE, 2000).

Dessa forma, identificação das forças de corte em retificação é fundamental para caracterizar o modo de remoção de material da peça, uma vez que a energia específica de retificação e os danos superficiais são fortemente dependentes das forças de retificação. Ao primeiro contato do rebolo com a peça, todo o conjunto máquina-rebolo-peça deforma elasticamente devido a ação da componente normal da força de retificação (F_n). E assim, a primeira passagem do rebolo sobre a peça não é suficiente para remover o valor correspondente à penetração de trabalho previamente ajustada na máquina de forma que haverá deformação elástica envolvida, sendo necessário mais de um passe para atingir a dimensão desejada. A cada nova passagem do rebolo é que ocorrerá o alívio progressivo das deformações elásticas até que seja atingida a penetração de trabalho pré-estabelecida (KLOCKE, 2009 apud MAGNANI, 2013). Esse alívio progressivo ocasionado pelas sucessivas passagens do rebolo sobre a peça é o chamado faiscamento ou centelhamento no final da operação (*spark out*). Tal fenômeno assegura ao processo de retificação a capacidade de remover quantidades infinitesimais de material, garantindo tolerâncias dimensionais e geométricas que não são alcançadas por processos convencionais de usinagem com ferramentas de geometria definida (SILVA et al., 2005).

Nesse sentido, alguns pesquisadores têm dedicado esforços em procurar monitorar as forças de corte e a potência ao longo do processo de retificação, como forma de avaliar a influência sobre a integridade superficial das peças, como por exemplo, em aços inoxidáveis. Um estudo desenvolvido por Manimaran e Kumar (2013) teve por finalidade avaliar a influência da aplicação de lubrificação criogênica nas forças de corte durante a retificação de amostras de aço inoxidável austenítico AISI 316, com rebolo de alumina *Sol-gel*. De acordo com os autores, em comparação com os ensaios a seco e na presença de fluido de corte semissintético, a refrigeração criogênica reduziu as forças de corte em 37 % e 13 %, respectivamente.

Eles atribuíram esta redução à melhor eficiência na lubrificação da zona de contato rebolo, que aumenta a refrigeração da peça e minimiza o risco de ocorrência de danos térmicos, como também melhoras as condições tribológicas. Nas Figuras 2. 17 (a) e (b) são apresentados os resultados obtidos por estes autores para as forças normal (F_n) e tangencial (F_t) em função da penetração de trabalho a_e .

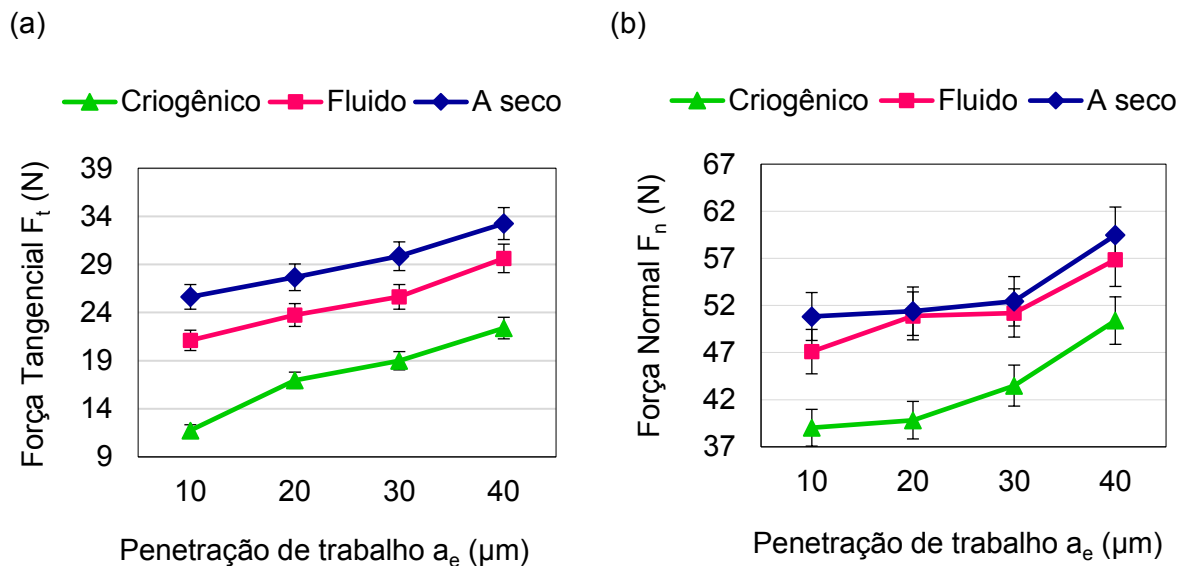


Figura 2. 17 - Forças tangencial F_t (a) e normal F_n (b) em função da penetração de trabalho a_e , após a retificação de amostras do aço inoxidável austenítico AISI 316 (Adaptado de MANIMARAN; KUMAR, 2013).

Outro parâmetro comumente utilizado para avaliar a eficiência de processo de retificação é a potência elétrica. O monitoramento da potência de retificação permite a obtenção de importantes informações sobre o processo, no que diz respeito, por exemplo, à influência dos parâmetros de corte e dos parâmetros de dressagem, além nortear na escolha dos mesmos, permite realizar uma comparação em termos de desempenho entre diferentes tipos de rebolos abrasivos empregados, além de auxiliar na detecção de problemas nas peças retificadas em termos de integridade superficial e subsuperficial (BADGER; TORRANCE, 2000).

Além de ser monitorada diretamente na máquina ferramenta, a potência de retificação (P) requerida pelo motor de acionamento do eixo principal pode ser calculada com base na força tangencial (F_t) e das velocidades de corte do rebolo (V_s) e periférica da peça (V_w), e expressa pela Eq.(5), na qual emprega-se sinal positivo para a retificação discordante e negativo para a concordante (MALKIN; GUO, 2008).

$$P = F_t \cdot (V_s \pm V_w) \quad W \quad \text{Eq. 4}$$

Todavia, como a velocidade de corte ou periférica do rebolo (V_s) é muito maior que a velocidade periférica da peça (V_w), esta última é desprezada sem que haja prejuízo na determinação da potência de retificação (MALKIN; GUO, 2008). Assim, a relação matemática pode ser simplificada e apresentada pela Eq. (5).

$$P = F_t \cdot V_s \quad W \quad \text{Eq. 5}$$

Durante o processo de retificação, teoricamente, toda a potência necessária para o acionamento do eixo do motor da retificadora é convertido em calor, sendo que essa geração de calor está diretamente relacionada ao aumento na temperatura da peça e com a potência de retificação, de acordo com a Eq. (6) (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2016).

$$T \propto \frac{TP}{Pr} \times \frac{P}{A} \times \sqrt{\frac{l_c}{V_w}} \quad \text{Eq. 6}$$

Em que T: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), TP: taxa de distribuição da potência, Pr: propriedades térmicas da peça, P: potência de retificação (W), A: área de contato (mm^2), l_c : comprimento de contato rebolo – peça (m) e V_w : velocidade da peça (m/min).

A partir dessa relação expressa na Eq. (6) é possível inferir que um aumento nos valores da potência de retificação contribui para uma elevação no gradiente de temperatura na superfície das peças, ampliando o risco de queima e de geração de trincas de origem térmica nas superfícies retificadas (MALKIN; GUO, 2008).

Em que T: Temperatura ($^{\circ}\text{C}$), TP: taxa de distribuição da potência, Pr: propriedades térmicas da peça, P: potência de retificação (W), A: área de contato (mm^2), l_c : comprimento de contato rebolo – peça (m) e V_w : velocidade da peça (m/min).

A partir dessa relação expressa na Eq. (6) é possível inferir que um aumento nos valores da potência de retificação contribui para uma elevação no gradiente de temperatura na superfície das peças, ampliando o risco de queima e de geração de trincas de origem térmica nas superfícies retificadas (MALKIN; GUO, 2008).

2.3 Fluidos de corte em retificação

Nesta seção serão apresentadas as principais características dos fluidos de corte no processo de retificação, classificação e função dos fluidos, bem como sua aplicação na retificação dos aços inoxidáveis.

2.3.1 Funções dos fluidos de corte

Em processos de retificação, uma situação muito comum é o aparecimento de danos térmicos na superfície da peça, em virtude da seleção inadequada de parâmetros de corte, e principalmente, do calor gerado durante o processo e que é transferido majoritariamente para a peça. Nesse sentido, a aplicação de fluido de corte é fundamental para garantir uma melhor qualidade ao processo de retificação (IRANI et al., 2005). Além de proporcionar a retirada de calor da superfície da peça, o fluido de corte é responsável por remover cavaco da zona de corte, limpar o rebolo, melhorar a lubrificação na zona de corte bem como minimizar a corrosão na máquina-ferramenta. Essas características dos fluidos de corte influenciam sensivelmente no desgaste do rebolo, na qualidade superficial da peça usinada e nas temperaturas desenvolvidas no processo (TAWAKOLI et al., 2009).

A ausência de fluido de corte em processos de retificação pode ocasionar um aumento nas temperaturas desenvolvidas no processo, proporcionando o surgimento de mecanismos de desgaste por difusão o que compromete a vida do rebolo; além disso, pode gerar perda na estrutura dimensional e na qualidade superficial das peças, em virtude da incrustação de cavaco nos poros da ferramenta abrasiva (CASTRO et al., 2016). Dessa forma, torna-se necessária a adequada escolha do fluido de corte a ser empregado no processo de retificação, tendo em vista a redução e/ou prevenção da ocorrência de queima superficial da peça, redução da energia específica de corte e das temperaturas na zona de contato rebolo-peça (WEBSTER et al., 1995).

Apesar das vantagens dos fluidos de corte, estes apresentam ainda alguns aspectos negativos no que tange mais especialmente à sua composição química sendo que, o descarte de fluido de maneira inadequada que pode vir a proporcionar riscos à saúde dos operadores das máquinas bem como prejuízos ao meio ambiente assim (ALVES; OLIVEIRA, 2007).

2.3.2 Classificação dos fluidos de corte

Não existe uma classificação única e padronizada para fluidos de corte. Segundo Diniz et al. (2010) os fluidos de corte, de uma forma geral, podem ser classificados como miscíveis em água e não miscíveis em água, Fig. 2.18. Entretanto, pesquisadores vêm estudando o comportamento dos fluidos de corte contendo partículas sólidas que são dispersas nos mesmos, como por exemplo o grafite, multicamadas de grafeno, nanotubos de carbono.

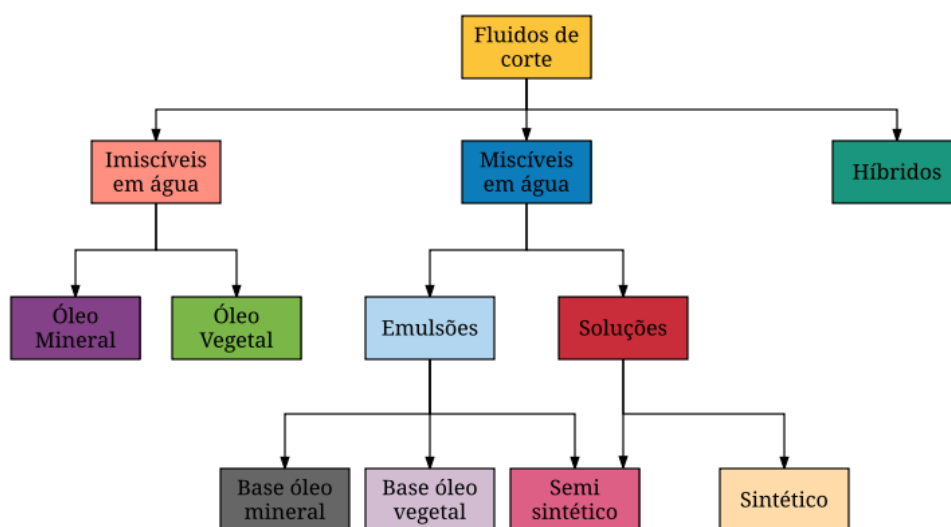


Figura 2. 18 - Classificação dos fluidos de corte aplicados em retificação (Adaptado de DINIZ et al., 2010).

Dentre os fluidos imiscíveis em água têm-se, de acordo com Diniz et al. (2010), os óleos minerais e os óleos vegetais. Inicialmente, nos processos de usinagem de metais, os primeiros lubrificantes utilizados foram os óleos de origem vegetal, o que com o passar do tempo, tornaram-se inviável em virtude da rápida deterioração e do alto custo desses fluidos, muito embora hoje sejam empregados como aditivos em óleos minerais, a fim de melhorar as propriedades de lubrificação (MACHADO et al., 2015).

Segundo Bianchi et al. (2004) os óleos minerais podem ser empregados em seu estado puro ou com aditivos de compostos polares ou químicos. Eles são constituídos de uma base parafínica contendo compostos policíclicos que são altamente cancerígenos e que podem provocar dermatite. Os óleos minerais possuem boas propriedades lubrificantes, anticorrosivas e longa vida útil; entretanto, não apresentam uma boa capacidade de refrigeração quando comparados com os fluidos de corte miscíveis em água.

No que se refere aos fluidos miscíveis em água, eles podem ser subdivididos em emulsões e soluções (DINIZ et al., 2010). De uma forma geral, os desta classe são recomendados em processos que envolvem elevada geração de calor, como por exemplo, a retificação. Nesse sentido, é fundamental que os fluidos de corte apresentem uma elevada ação refrigerante aliada à uma boa capacidade de lubrificação. Na retificação, a proporção de diluição pode variar bastante, mas as faixas mais usuais são 1:10 (uma parte de fluido para 10 partes de água), 1:20 ou até mesmo 1:40 (BIANCHI, 2004).

De acordo com Bianchi et al. (2004), as emulsões são compostas por água com partículas de óleo em seu interior. Essa configuração somente é possível de ser obtida com a adição de emulsificadores, substâncias compostas por materiais tensoativos que conferem à cada gotícula de óleo uma carga negativa, sendo que a estabilidade da emulsão é garantida pela repulsão entre as gotículas de óleo. Em processos de retificação essa proporção de diluição varia de 1 % a 20 %, sendo que a mais normalmente empregada é a de 5 %.

As emulsões combinam boas propriedades de lubrificação e anticorrosivas dos óleos com a excelente capacidade refrigerante da água. Em comparação com os fluidos imiscíveis em água, as emulsões permitem uma melhor refrigeração na interface rebolo-peça, melhor limpeza na zona de trabalho, uma maior economia resultante da diluição do óleo em água, assim como condições de trabalho mais seguras. No entanto, as emulsões não conferem uma boa lubricidade na zona de corte (EL BARADIE, 1996). Além disso, elas não possuem boa estabilidade biológica, já que os agentes emulgadores são fonte de alimento para bactérias aeróbias e anaeróbias que degradam o fluido, comprometendo suas propriedades. Como solução, empregam-se biocidas ao fluido (NOVASKI; RIOS, 2004).

As soluções são compostos monofásicos de substâncias químicas dissolvidas em água, sem a necessidade de adição de agentes emulsificantes, uma vez que os compostos reagem quimicamente formando uma fase única. Elas são classificadas em fluidos sintéticos e semissintéticos (DINIZ et al., 2010).

Os fluidos sintéticos são soluções químicas compostas por sais orgânicos ou inorgânicos alcalinos dissolvidos em água, porém sem óleo mineral ou derivados do petróleo. Pelo fato de formarem uma única fase, eles não requerem agentes emulsificadores na sua composição. E como vantagem, eles asseguram uma rápida retirada de calor na zona de corte, bom acabamento dimensional à peça, elevada resistência à corrosão e à oxidação. Além disso, apresentam uma boa estabilidade microbiológica, o que dificulta o ataque de bactérias, evitando que o fluido seja descartado periodicamente (NOVASKI; RIOS, 2004). No entanto, os fluidos sintéticos em geral não proporcionam uma eficiente lubrificação na zona de corte e permitem a formação de compostos insolúveis e espumas em determinadas

operações de usinagem, requerendo assim a adição de agentes antiespumantes e aditivos lubrificantes (BIANCHI et al., 2004).

Os fluidos semissintéticos são uma combinação de fluidos sintéticos com emulsões de óleo de base mineral e podem ser classificados tanto como soluções ou como emulsões, e isso lhes conferem a vantagem de garantir melhor lubrificação. Eles são formados por compostos sintéticos e óleos emulsionáveis a uma proporção que varia de 5% a 30% do fluido. Todavia, em comparação com os fluidos sintéticos, eles conferem menor poder de refrigeração (BIANCHI et al., 2004). Estes fluidos têm sido aqueles mais utilizados em operações de retificação por reunirem tanto propriedades lubrificantes (presentes no óleo mineral) quanto refrigerantes (presentes no fluido sintético) e ainda por apresentarem um custo inferior aos fluidos sintéticos.

Pode-se adicionar ainda uma nova categoria na classificação dos fluidos de corte, a dos fluidos híbridos. Eles são fluidos que apresentam em sua constituição partículas sólidas que têm por finalidade melhorar as propriedades dos mesmos, principalmente da lubrificação. Pesquisas recentes sobre esse assunto vêm sendo desenvolvidas buscando analisar o efeito da adição de partículas sólidas nos fluidos de corte, inclusive nos fluidos empregados em processos de retificação. Manojkumar e Ghosh (2016) buscaram averiguar a influência da adição de partículas de nano tubo de carbono suspensas em óleo de girassol. Como resultado, os pesquisadores obtiveram uma melhoria na condutividade térmica do fluido, bem como uma elevação na sua capacidade de refrigeração, molhabilidade e lubrificação. Além disso, observou-se uma redução na energia específica de retificação e uma redução na taxa de desgaste do rebolo de alumina com ligante vitrificado.

Em outro estudo, nanopartículas de bissulfeto de molibdênio (MoS_2) foram adicionadas em diferentes fluidos de corte de base vegetal, empregando-se a técnica de MQL. Como resultado, observou-se uma melhoria na capacidade de lubrificação e de refrigeração em comparação com outros tipos de óleos minerais utilizados nas mesmas condições de ensaios, porém sem a presença de nanopartículas (ZHANG et al., 2017).

De Mello (2015) realizou um trabalho acerca dos efeitos do processo de retificação de uma liga de titânio (Ti-6Al-4V) utilizando-se como condição de lubrificação nanopartículas de grafeno adicionadas em um fluido sintético de base vegetal, na condição MQL, em comparação com o fluido aplicado de forma convencional. De acordo com os resultados obtidos, verificou-se que a adição de nanopartículas no fluido de corte proporcionou uma redução na rugosidade das superfícies, uma menor variação da microdureza a partir das superfícies retificadas bem como uma redução na potência consumida para a realização dos ensaios.

Um estudo desenvolvido por De Oliveira et al. (2019) teve finalidade avaliar os efeitos que diferentes concentrações de grafeno (0,05 wt % e 0,10 wt %) imersos em um fluido semissintético aplicado via técnica MQL geraram sobre amostras de Inconel 718 submetidas ao processo de retificação plana tangencial. De acordo com os resultados, a menor concentração de grafeno combinada com as condições mais brandas de usinagem assegurou uma redução na rugosidade das superfícies e na variação de microdureza, bem como uma redução de até 50 % na potência exigida para a retificação. Além disso, as superfícies retificadas apresentaram um melhor acabamento e as tensões residuais geradas foram predominantemente compressivas.

Durante o processo de retificação do aço para moldes VP100, a adição de grafeno em uma emulsão de base vegetal, a uma proporção de no máximo 2 % em massa, assegura uma significativa redução nas forças de corte bem como um melhor acabamento superficial, em virtude da excelente capacidade de lubrificação do grafite e devido a sua estrutura estar disposta em camadas. A adição de grafeno em fluidos de corte em processos de retificação vem sendo estudada, posto que o grafeno apresenta uma melhor penetração na zona de contato rebolo-peça (DA SILVA et al., 2015). Na Tabela 2. 3 são apresentadas algumas das principais propriedades dos fluidos de corte comumente empregados em retificação.

De acordo com Wang et al. (2016) nanofluidos são definidos como misturas coloidais de partículas nanométricas imersas em um fluido base. Tais partículas podem ser de origem: metálica (Cu, Fe e Ag), não metálicas (diamante), óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 , ZrO_2), carboneto (nanotubos de carbono), sulfetos (MoS_2) cerâmicas e híbridos, que são compostas por mais de um material.

Tabela 2. 3 - Propriedades dos fluidos (1 - ruim; 2 - bom; 3 - ótimo; 4 - excelente) (Webster et al., 1995 apud Irani et al., 2005).

	Sintético	Semissintético	Emulsão base vegetal	Emulsão base mineral
Refrigeração	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Filtrabilidade	4	3	2	1
Meio ambiente	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1
Vida do rebolo	1	2	3	4

2.3.3 Fluidos de corte para retificação de aços inoxidáveis

Na retificação de aços inoxidáveis há uma tendência geral em utilizar fluidos de corte miscíveis em água, mais especificamente aqueles sintéticos, mas não há uma regra geral para diferenciar um fluido para as diferentes indústrias de manufatura. Como os componentes da indústria aeroespacial são aqueles que necessitam em geral de atender tolerâncias dimensionais mais estreitas e melhor acabamento, este setor pode ser tomado como referência para a seleção de fluidos para aços inoxidáveis que serão submetidos ao processo de retificação (KLOCKE et al., 2015).

Em um estudo desenvolvido por Zhou et al. (2016), os autores realizaram a retificação do aço inoxidável duplex (UNS S) 2304 e, dentre outros parâmetros, eles investigaram o efeito da lubrificação na superfície das peças de aço inoxidável testando o fluido de corte sintético (em concentração 3 %), do fabricante *Mobilcut*, em comparação com a condição a seco. Como resultados eles observaram que parâmetros de rugosidade R_a e R_z diminuíram quando se empregou fluido de corte, em comparação com os resultados alcançados nos ensaios realizados a seco. Na literatura também tem sido encontrado relatos do uso de fluidos semissintéticos em retificação de aços inoxidáveis, como o trabalho de Manimaran e Kumar (2013) quem compararam o fluido semissintético com a condição a seco e técnica criogênica (nitrogênio líquido) na retificação do aço inoxidável AISI 316 com rebolo *Sol - gel*. Entretanto em outro trabalho realizado por Paiva et al. (2017) para a retificação plana tangencial do aço inoxidável VP80 os autores empregaram um fluido de corte sintético IORGA RM/7 para três condições de penetração de trabalho $a_e = 5 \mu\text{m}$, $15 \mu\text{m}$ e $25 \mu\text{m}$, através do uso de um rebolo de alumina convencional de especificação AA46K6V.

2.4 Rebolos abrasivos

Em processos de retificação, a ferramenta de corte é denominada rebolo, o qual é constituído por inúmeras partículas abrasivas multicortantes unidas entre si por um material ligante (aglomerante) e também de poros (vazios formados entre o ligante e partículas abrasivas) Fig. 2. 19. As partículas abrasivas são materiais não metálicos, de elevada dureza e geometria irregular e que são aleatoriamente distribuídas no rebolo, sendo que cada aresta cortante realiza a efetiva penetração e cisalhamento do material da peça a ser removido na forma de cavaco (MALKIN; GUO, 2008). E os poros atuam como locais para que os cavacos se alojem durante a usinagem.

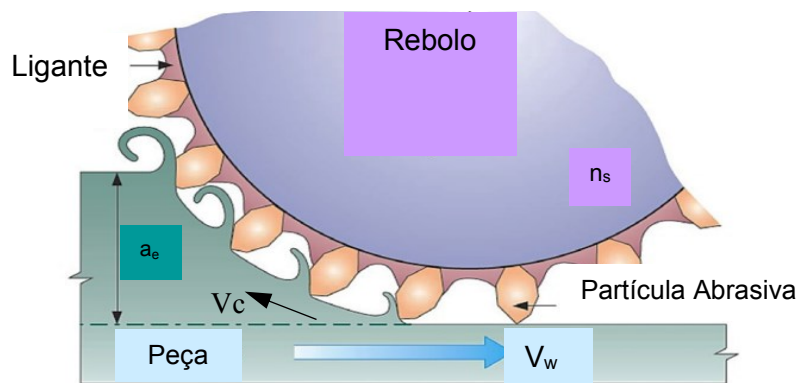


Figura 2. 19 - Esquema para ilustração dos principais componentes do rebolo durante a retificação (Adaptado de DING et al., 2017).

2.4.1 Composição dos rebolos

Segundo Rowe (2010), o rebolo compreende cinco elementos fundamentais:

- Abrasivo: material constituinte das partículas abrasivas, sendo que os mais usuais são a alumina (Al_2O_3), carboneto de silício (SiC), nitreto de boro cúbico (CBN) e o diamante.
- Ligante: também denominado aglomerante, é um material de origem orgânica ou inorgânica que tem a função de manter as partículas abrasivas unidas entre si. Os tipos mais comuns são os resinoides, os vitrificados e os metálicos.

- Granulometria: refere-se ao tamanho das partículas abrasivas. O tamanho do abrasivo é selecionado de acordo com o material a ser usinado; partículas mais finas são empregadas na retificação de materiais de elevada dureza, enquanto que partículas mais grossas são utilizadas em materiais mais dúcteis. No rebolo convencional o tamanho da partícula abrasiva é expresso por meio da grana mesh, que é a relação entre um espaço pré-definido e número de abrasivos ocupam este espaço. Quanto maior a grana, menor é o tamanho do abrasivo.
- Grau de dureza: definido como a capacidade de retenção de partículas abrasivas pelo material ligante. Rebolos de alta dureza retêm suas partículas mesmo depois de terem perdido sua capacidade de corte. Rebolos de baixa dureza tendem a perder suas partículas durante a remoção de material.
- Estrutura: é definida como o grau de compactação das partículas abrasivas no rebolo, sendo determinada pela razão entre o volume de partículas e o volume total do rebolo.

As informações acerca da composição e características do rebolo são descritas de forma padronizada, onde são indicadas suas características principais, conforme é ilustrado na Fig. 2. 20.

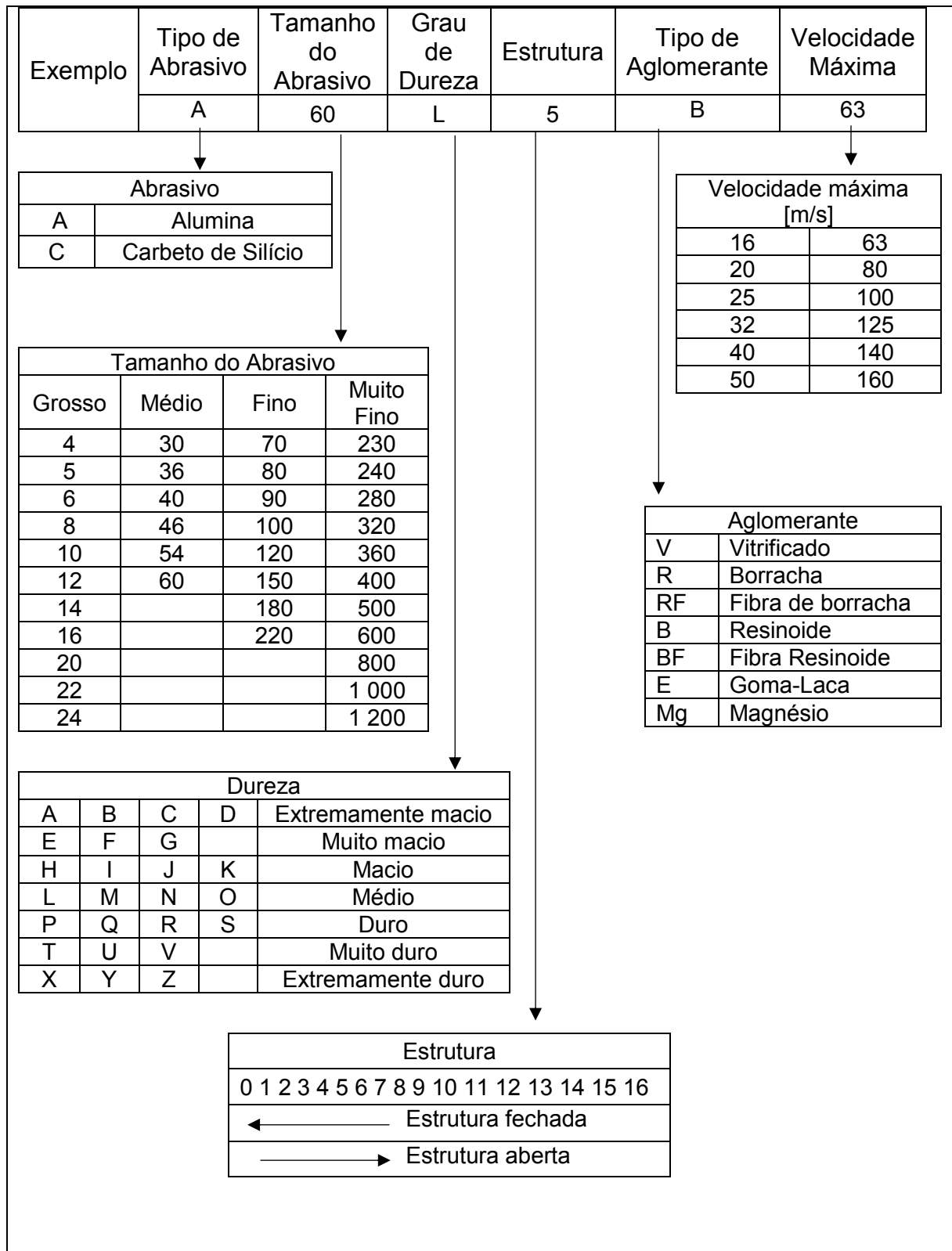


Figura 2. 20 - Nomenclatura para rebolos abrasivos (Adaptado de KLOCKE, 2009).

2.4.2 *Propriedades dos rebolos*

Nesta seção as principais propriedades dos rebolos abrasivos serão descritas de forma mais detalhada. As partículas abrasivas são constituídas de materiais não metálicos de elevada dureza, normalmente acima de 1500 HV, que apresentam uma geometria irregular e encontram-se unidos entre si por meio do material ligante; todavia, deve-se considerar a presença de poros, que são locais nos quais tanto os cavacos como o fluido de corte tem tendência de se alojarem (MALKIN; GUO, 2008). Essas partículas abrasivas devem possuir determinadas propriedades a fim de que possam executar a remoção de material da superfície da peça, sob a forma de cavaco. De acordo com KLOCKE (2009), as partículas abrasivas devem possuir as seguintes características:

- Elevada dureza a fim de conseguir penetrar na peça e resistir ao riscamento da peça, com o menor desgaste possível, a fim de remover material sob a forma de cavaco. A dureza do abrasivo é determinada através de um processo de medição de dureza Knoop, a qual consiste em realizar uma micro indentação na amostra do rebolo com uma ponta de diamante lapidada de forma piramidal, sob cargas que variam de 0,025 kg a 0,300 kg. O valor da dureza é então obtido pela medição da diagonal da marca produzida pelo diamante e relacionando-a com a carga aplicada.
- Elevada tenacidade para suportar as variações cíclicas de tensão, absorvendo energia e resistindo aos impactos, sem perder a capacidade de corte.
- Boa estabilidade térmica já que durante o processo de retificação elevadas temperaturas são desenvolvidas na zona de contato rebolo/peça; dessa forma, é fundamental que os abrasivos sejam capazes de resistir às variações de temperatura decorrentes do movimento rotativo do rebolo e seu contato com a peça.
- Elevada estabilidade química a fim evitar a deterioração do abrasivo e assim reduzir a vida útil do rebolo. Durante a retificação, em virtude das elevadas temperaturas desenvolvidas na zona de corte, é comum a ocorrência do mecanismo de desgaste por difusão, no qual moléculas dos abrasivos são transferidas para a peça e vice-versa, gerando assim um desgaste precoce do rebolo, comprometendo sua capacidade de corte, como também influenciando negativamente a textura da peça usinada.
- Boa friabilidade pois durante a retificação em geral deseja-se que as partículas abrasivas se fraturem e gerem novas arestas de cortes afiadas, garantindo assim que o material da peça possa ser cisalhado e removido eficientemente.

De acordo com Marinescu et al. (2004), a retificação pode ser analisada sob o ponto de vista de um processo tribológico, no qual a interação entre as partículas abrasivas e a superfície da peça é qualificada como um processo de abrasão dois corpos, riscando a peça e promovendo assim a remoção de material. Todavia, se essas partículas ao sofrerem fratura, não forem capazes de gerar arestas afiadas, o rebolo pode vir a sofrer desgaste prematuro, assumindo uma forma arredondada ou mesmo plana. Assim, a área real de contato entre o rebolo e a peça será maior, implicando em uma maior força de corte a ser desenvolvida no processo, ou ainda promovendo a quebra ou remoção de partículas desgastadas. Em alguns casos, o aumento da força de corte faz com que mais material da peça adentre no rebolo, ocasionando o seu empastamento. Neste caso, faz-se necessária a dressagem do rebolo para limpar os poros e gerar arestas mais afiadas às partículas.

2.4.3 Tipos de abrasivos

Nesta seção serão abordadas as principais características das partículas abrasivas empregados na retificação. Na Figura 2. 21 é apresentada uma classificação para os tipos de abrasivos usualmente empregados em processos de retificação, sendo que de uma forma geral, são classificados em dois grupos principais, de acordo com a sua natureza em: naturais e sintéticos.

Dentro da classe dos abrasivos naturais, destacam-se (KLOCKE, 2009; NUSSBAUM, 1988):

- Coríndon: material mineral à base de alumina, em geral translúcido, que possui uma dureza equivalente a 9 na escala Mohs. Pode ser encontrado na cor vermelha, e assim recebe o nome de rubi, ou ainda na coloração azul e é denominado safira. É normalmente empregado no polimento de lentes e pisos antiderrapantes, na fabricação de lixas ou mesmo como abrasivo livre em processos de tamboreamento.
- Esmeril: é constituído em 40 % de óxido de ferro e 60 % de alumina. Normalmente é encontrado na coloração preta e em geral possui uma dureza inferior a 9 na escala Mohs. É usualmente empregado na fabricação de lixas e telas de polimento, mas pode ser empregado como abrasivo livre em tamboreamento ou em polimento.
- Diamante: é o material abrasivo natural de maior dureza encontrado (equivalente a 10 na escala Mohs) além de ser uma das três formas alotrópicas do carbono (diamante, grafite e carvão), sendo comumente empregado para a dressagem de rebolos abrasivos.

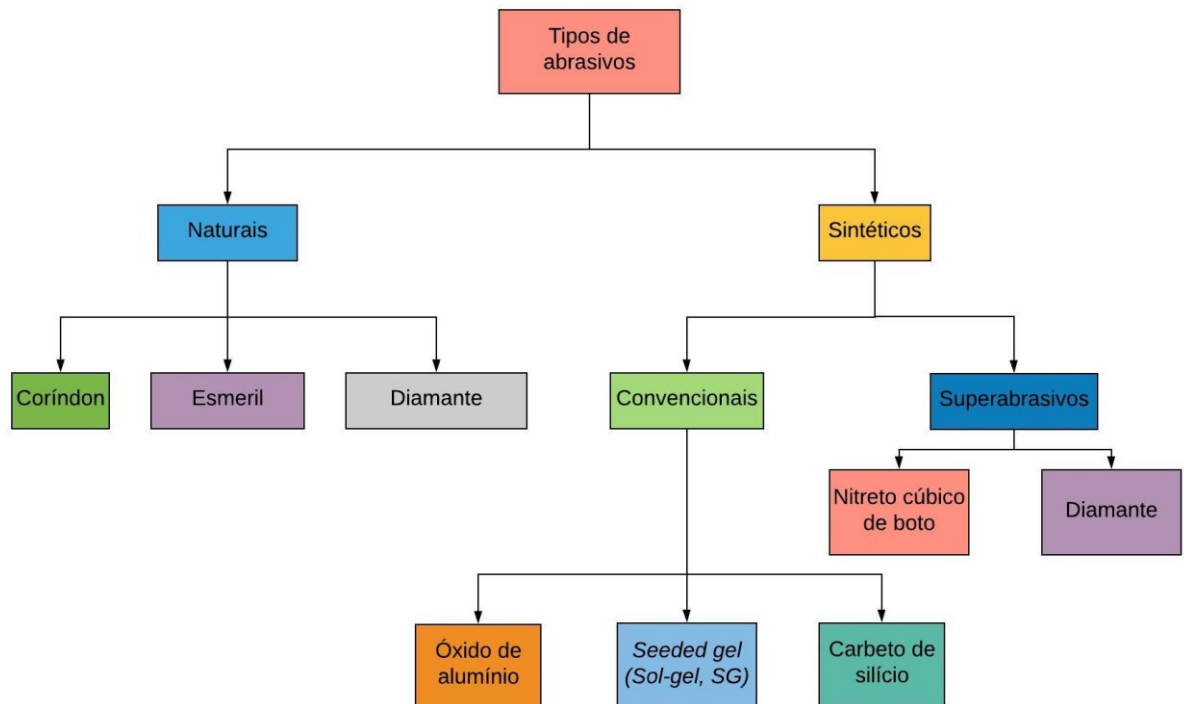


Figura 2. 21 - Principais tipos de materiais abrasivos (convencionais e superabrasivos) para operações de retificação (Adaptado de JACKSON; DAVIM, 2011).

Segundo KLOCKE (2009), algumas propriedades dos principais abrasivos sintéticos podem ser destacadas:

- Alumina ou óxido de alumínio (Al_2O_3): é o tipo de abrasivo mais empregado nas operações de retificação de aços, pois permite conciliar à partícula uma elevada tenacidade com uma boa friabilidade. Mas com estas características ele é indicado para a retificação de materiais com elevada resistência à tração, tais como os ferros fundidos nodular e maleável. Os principais tipos são os óxidos de alumínio branco, rosa, marrom, monocristalina;
- *Seeded gel* (SG): também denominado de *Sol-gel*, é uma variação do óxido de alumínio, porém não é fabricado a partir da bauxita, mas a partir de alumina levigada (partícula abrasiva na forma de gel) que é tratada quimicamente para formar uma pasta composta de minúsculas partículas de cristais de alumina. Em seguida a pasta é submetida aos processos de extrusão e de sinterização para finalmente gerar a partícula abrasiva. Ela é obtida pelo processo de simples fusão e que se compõe de um único cristal de alumina (um aglomerado de milhares de microcristais). Estes microcristais e a geometria do abrasivo conferem maior friabilidade e elevada

eficiência do corte por meio de baixa taxa de desgaste das partículas abrasivas (as partículas se desgastam em escala micrométrica) quando comparado aos abrasivos de alumina convencionais, por exemplo, o marrom e o branco (cujo desgaste ocorre de forma macrométrica) (NORTON ABRASIVES, 2019).

- Carboneto de silício: abrasivo sintético fabricado em fornos elétricos pela fusão da areia de sílica (SiO_2) com coque (carbono). Pode ser encontrado nas cores verde e preta. Em comparação com os abrasivos de alumina, o SiC possui uma dureza mais elevada e bordas mais cortantes, sendo recomendado para retificação de materiais de baixa resistência à tração como ferro fundido cinzento, metais não ferrosos (latão, cobre, bronze e alumínio), materiais não metálicos (cerâmica e mármore), como também superligas à base de níquel e de titânio, por exemplo (MARINESCU et al., 2004);
- Nitreto Cúbico de Boro (CBN): considerada como uma partícula superabrasiva, apresenta uma dureza mais ou menos próxima da dureza do diamante, com a vantagem de possuir uma melhor estabilidade térmica e, em relação às partículas convencionais, possui maior condutividade térmica que os abrasivos convencionais e maior resistência ao desgaste, sendo assim empregados na retificação de materiais mais duros como aços rápidos, metal duro e aços liga temperados;
- Diamante (D): é o material que possui a maior dureza entre os abrasivos, sendo que o mais comumente empregado é o diamante sintético policristalino (PCD). Possui elevada condutividade térmica e coeficiente de atrito muito baixo. É usualmente empregado na retificação de materiais não ferrosos e não metálicos. Assim como as partículas de CBN, o diamante é recomendado para operações de acabamento que requerem tolerâncias dimensionais muito estreitas.

Na Tabela 2. 4 são apresentadas as principais propriedades dos tipos de abrasivos mais comumente empregados em operações de retificação. Dentro da classe de materiais de óxidos de alumínio para emprego em rebolos abrasivos, existem duas que merecem destaque: óxido de alumínio (alumina) branca e óxido de alumínio (alumina) monocristalino. A primeira classe refere-se a alumina branca (designado pela sigla AA), um material sintético refinado diretamente da bauxita; esta é colocada no interior de um forno elétrico e aquecida a fim de eliminar toda a umidade. Em seguida, são adicionados coque e ferro à bauxita e essa mistura é então fundida e arrefecida (ZAWRAH et al., 2002).

Tabela 2. 4 - Principais propriedades dos abrasivos sintéticos (Adaptado de MALKIN; GUO, 2008).

Tipo de abrasivo				
	Alumina branca (Al ₂ O ₃)	Carbeto de silício (SiC)	Nitreto Cúbico de Boro (CBN)	Diamante (D)
Estrutura cristalina	Hexagonal	Hexagonal	Cúbica	Cúbica
Densidade (g/cm³)	3,85	3,22	3,48	3,52
Ponto de fusão (°C)	2 040	~2 830	~3 200 a 10,5 MPa (ponto triplo)	~3 700 a 13 MPa (ponto triplo)
Dureza Knoop (GPa)	1 970	2 400	4 700	8 000

As partículas de alumina branca são robustas e apresentam geometria na forma de cunha, conferindo aos mesmos uma capacidade de penetração rápida sem fraturar-se ou desgastar-se com facilidade Fig. 2. 22 (a). Essas são destinadas à retificação de materiais com elevada resistência à tração como aços e suas ligas (SAINT GOBAIN, 2017), como também os mais recomendados para a afiação de ferramentas de corte feitas de aço rápido, como brocas, fresas e bits.

Quanto à segunda classe de abrasivos de alumina comercial, alumina monocristalina ou ainda chamado de alumina calcinada, é um material obtido por eletrofusão da alumina calcinada, e não diretamente da bauxita, como o alumina branca e o alumina marrom. É um material de fabricação mais recente e é considerado um material mais puro, Fig. 2. 22 (b) (SAINT GOBAIN, 2017).

(a)



(b)



Figura 2. 22 - Partículas abrasivas de alumina branca (a) e de alumina monocristalina (b) (SAINT GOBAIN, 2017).

Em comparação com o alumina branca convencional (alumina branca ou Al_2O_3 branco), o alumina monocristalina (alumina monocristalina ou Al_2O_3 monocristalina) apresenta algumas vantagens, conforme a Fig. 2. 23. Pode-se observar que as partículas de alumina monocristalina apresentam uma maior dureza e maior friabilidade em relação à alumina branca, sendo portanto, uma boa opção para a retificação de materiais com alta taxa de endurecimento, como os aços inoxidáveis, pois conseguirão penetrar melhor na superfície da peça e, ao sofrerem fratura, permitirão gerar arestas mais afiadas, assegurando assim um melhor acabamento superficial (SAINT GOBAIN, 2017).

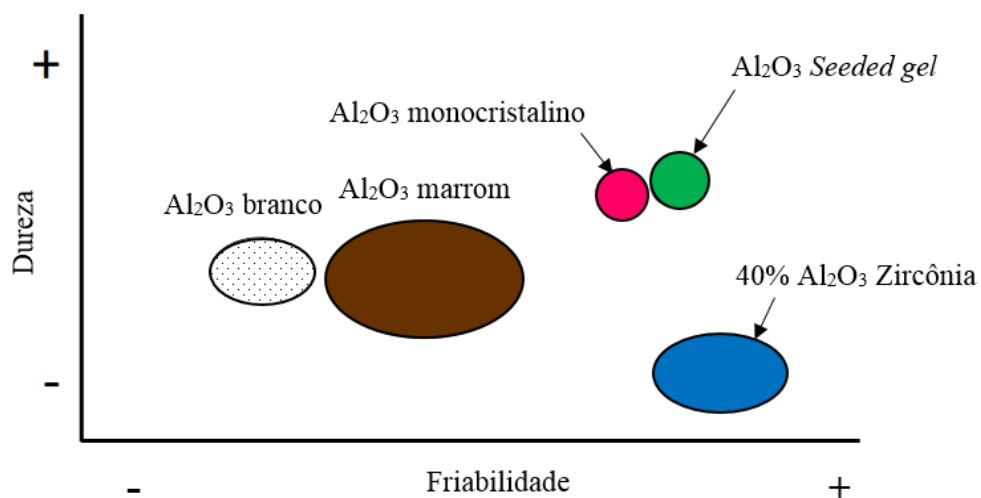


Figura 2. 23 - Dureza X Friabilidade referente a algumas partículas abrasivas (Adaptado de SAINT GOBAIN, 2017).

2.4.4 Ligantes

Ligantes ou aglomerantes são materiais de base orgânica ou inorgânica, cuja função principal é manter as partículas abrasivas interligadas. Como propriedades principais, precisam suportar as forças desenvolvidas no processo de retificação, assim como as variações de temperatura sem se desintegrarem. Aliado a isso, devem possuir boa estabilidade química a fim de não reagirem quimicamente com o material da peça e com o fluido de corte (MALKIN; GUO, 2008). Por atribuir resistência às partículas abrasivas de forma a evitar que as mesmas se desprendam durante o corte, exercem uma importante influência tanto no comportamento elástico das partículas, como na durabilidade dos rebolos. Assim sendo, sua correta seleção irá garantir o adequado desempenho do processo de retificação,

seja em termos da ação do rebolo sobre a peça, da qualidade superficial como também nas forças de corte (WANG, 2008).

De acordo com Klocke (2009) e Marinescu et al. (2016), os principais tipos de ligantes são: vitrificados, resinoides e metálicos.

- Ligante vitrificado: esse tipo de ligante é constituído por uma mistura de argila, caolim e feldspato. Esses elementos são unidos às partículas abrasivas em proporções que variam com as propriedades desejadas a cada tipo de rebolo. Esse tipo de ligante é usado em rebolos empregados em operações de retificação que requerem elevada exatidão, em virtude de sua elevada rigidez. São empregados em rebolos cujas velocidades variam de 30 m/s a 120 m/s. Por possuir elevada estabilidade química, é o ligante recomendado para fabricação de rebolos que irão trabalhar em meios corrosivos.
- Ligante resinoide: são constituídos de resinas sintéticas, usados em operações de cortes frios e velocidades de até 80 m/s. Além disso, são utilizados em rebolos para operações de desbaste, em virtude de sua resistência e capacidade de suportar choques, além de poderem ser empregados em operações de acabamento. No entanto, ao contrário dos ligantes vitrificados, os resinoides não apresentam boa estabilidade química de forma que reagem com fluidos de corte alcalinos, quebrando as ligações químicas entre o material ligante e o abrasivo. Como consequência, eles provocam a deterioração prematura do rebolo, reduzindo a sua vida útil.
- Ligante metálico: é constituído de materiais à base de níquel, ferro ou bronze, sendo este último o mais comum, produzidos pelo processo de metalurgia do pó, e depositados por galvanização ou inseridos em uma matriz porosa de abrasivo. Todavia, para rebolos de CBN e diamante, são empregados usualmente os ligantes à base de níquel.

2.4.5 Grau de dureza do rebolo

O grau de dureza de um rebolo está relacionado à capacidade do material ligante em reter as partículas abrasivas, sendo essa característica diretamente relacionada às propriedades mecânicas do ligante. Se este material apresentar uma elevada resistência mecânica, maior será a dificuldade em se destacar os abrasivos, pois o rebolo suportará melhor os impactos mecânicos desenvolvidos ao longo da retificação. Além disso, se o ligante apresentar uma boa resistência ao desgaste, maior será a capacidade de retenção das partículas afiadas, aumentando assim a vida do rebolo (MALKIN; GUO, 2008).

De acordo com Klocke (2009), além das propriedades do ligante, a dureza do rebolo depende do volume de ligante, do tamanho do abrasivo e da estrutura do rebolo. A classificação da dureza é feita por letras que varia de A à Z, sendo que as letras mais próximas de A se referem à materiais mais dúcteis, e as letras mais próximas de Z referem-se a materiais de dureza mais elevada. Dessa forma, quanto maior a dureza de um rebolo, maior será sua resistência ao desgaste e ao arrancamento das partículas abrasivas (MALKIN; GUO, 2008).

Os rebolos de menor dureza, convencionalmente chamados de rebolos “macios”, são indicados para a retificação de materiais com grande resistência à deformação plástica, como aços endurecidos termicamente. Neste caso, exige-se mais da capacidade de corte dos abrasivos que se desgastam com maior facilidade, expondo assim novas partículas. Em contrapartida, rebolos de maior dureza são empregados na retificação de materiais dúcteis, como aços com baixo teor de carbono (MACHADO et al., 2015).

2.4.6 Estrutura do rebolo

A estrutura de um rebolo pode ser definida como a distância da ponte de ligação entre as partículas abrasivas, ou seja, uma razão entre o volume de abrasivos e o volume total do rebolo, indicando assim o grau de compactação das partículas no rebolo. Sua classificação é dada numericamente por algarismos que variam de 1 a 12, sendo que rebolos que apresentam uma estrutura mais compacta, são indicados por números mais próximos de 1, enquanto que rebolos que apresentam uma porosidade maior, são designados por números que se aproximam de 12 (DINIZ et al., 2010).

Rebolos de estrutura mais fechada, Fig. 2. 24 (a), por apresentarem uma densidade de arestas cortantes maior, são indicados na retificação de materiais com elevada dureza, enquanto que os rebolos de estrutura mais aberta, Fig. 2. 24(b), por apresentarem uma maior porosidade, assegurando melhor alojamento dos cavacos e do fluido de corte, são empregados preferencialmente em materiais mais dúcteis (MALKIN; GUO, 2008).

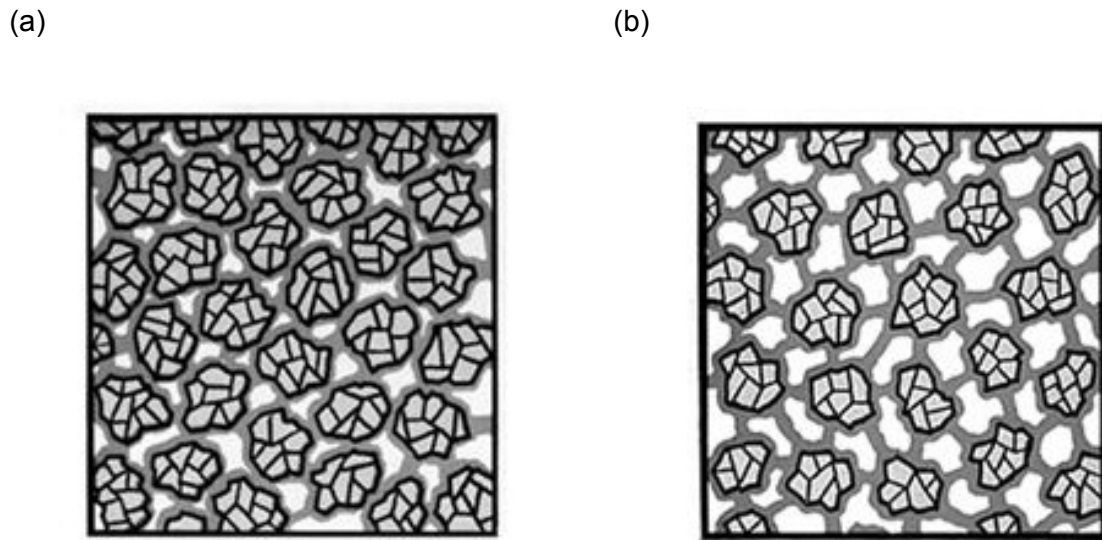


Figura 2. 24 - Ilustração de estruturas de rebolo: fechada (a) e aberta (b) abrasivo (Adaptado de GREENE, 2016).

2.4.7 Operação de dressagem

Ao longo do processo de retificação, as partículas abrasivas do rebolo sofrem desgaste, podendo assumir forma arredondada ou plana levando a uma perda na sua capacidade de corte (JACKSON; DAVIM, 2011). Diversos fatores podem influenciar no desgaste dos rebolos, tais como: a seleção dos parâmetros de corte, material da peça, fluido de corte, danos térmicos bem como o atrito gerado entre os abrasivos e a peça (KLOCKE, 2009; KÖNIG, 1980).

Como consequência, os pontos cegos das partículas abrasivas podem aumentar consideravelmente a temperatura na região de corte, ocasionando eventualmente, mudanças microestruturais, reações químicas e adesão de material da peça no rebolo. Nesse sentido, é fundamental restabelecer o condicionamento do rebolo (KLOCKE, 2009; OLIVEIRA, 1988).

O condicionamento do rebolo envolve as operações de dressagem e limpeza do rebolo. A eficiência do processo de retificação, assim como a integridade superficial e subsuperficial das peças retificadas, estão diretamente relacionadas à operação de dressagem, que consiste basicamente na reafiação do rebolo (ROWE, 2014).

Ao realizar a operação de dressagem, a superfície desgastada do rebolo é removida restabelecendo assim, a capacidade de corte e expondo uma nova camada de partículas abrasivas (KLOCKE, 2009; OLIVEIRA, 1988). A dressagem é realizada através de ferramentas, denominadas por dressadores que são divididos, fundamentalmente, em duas

categorias: estáticos e rotativos. Os estáticos abrangem os dressadores de ponta única, *fliesen* e conglomerados. Os rotativos compreendem os dressadores do tipo copo, rolo de diamante, disco rotativo de PCD e disco rotativo de diamante. Existem ainda, dressadores especiais a laser e ultrassônico (JACKSON; DAVIM, 2011).

A operação de dressagem é ainda definida como uma operação mais completa, envolvendo o perfilamento (*Truing* ou *Profiling*) e o avivamento (Afiação ou *Sharpening*) (PRICKEN, 1999 apud FIOCCHI, 2014). O perfilamento destina-se a gerar um perfil específico no rebolo, mediante a geração de uma concentricidade entre a face de trabalho e o eixo de rotação do rebolo, enquanto que o avivamento, por sua vez, é um processo particular indicado para a remoção de material aglomerante nas vizinhanças das partículas abrasivas assegurando assim, uma maior exposição de abrasivos. Já a limpeza do rebolo é uma consequência da dressagem, na qual os resíduos que por ventura estejam presentes nos poros sejam removidos (KLOCKE, 2009).

Como consequência da operação de dressagem, são gerados dois efeitos simultâneos na superfície do rebolo: macroefeito e microefeito. O macroefeito está diretamente associado à forma do perfil gerado na superfície do rebolo a partir da geometria da ponta do dressador. É, portanto, originado em função do tipo de dressador, da profundidade de penetração do dressador e do passo de dressagem. A ação do dressador leva à fratura e ao arrancamento de partículas gerando na superfície do rebolo uma topografia em forma espiral (rosca), o que influencia, sobremaneira, no desempenho do processo de retificação e nos efeitos gerados em termos de integridade superficial e subsuperficial nas peças (KÖNIG, 1980 apud FIOCCHI, 2014).

No que diz respeito ao microefeito, o mesmo está relacionado ao efeito que o dressador proporciona nas partículas abrasivas gerando novas arestas. Está diretamente relacionado com os parâmetros de dressagem, bem como com a friabilidade dos abrasivos (KÖNIG, 1980 apud FIOCCHI, 2014).

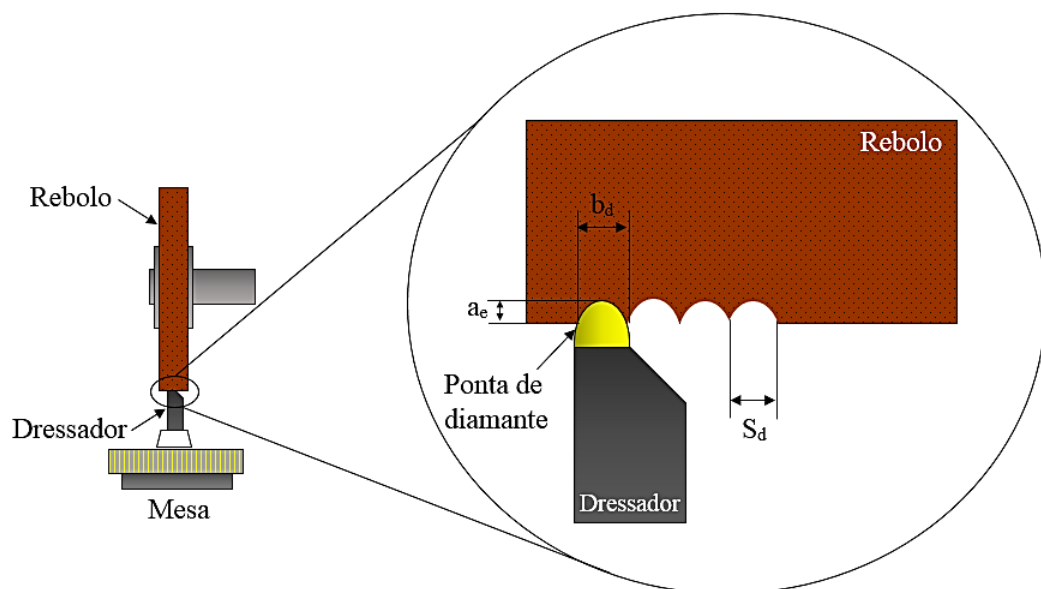
A operação de dressagem, quanto a cinemática, é bem semelhante a operação torneamento, no qual a rebolo faz o papel da peça e o dressador o papel da ferramenta de corte, promovendo a remoção de uma fina camada rebolo, possíveis cavacos que estejam alojados nos poros do rebolo e expondo novas partículas abrasivas com aresta de corte mais afiada (KLOCKE, 2009), Fig. 2. 25. Segundo Marinescu et al. (2016) essa operação pode ser quantificada através do parâmetro U_d , que representa o grau de recobrimento do rebolo, estabelecendo assim uma relação entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o avanço por volta do dressador (S_d), de acordo com a Eq. (7).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad \text{Eq. 7}$$

A largura de atuação do dressador (b_d) pode ser calculada em função do raio de ponta do dressador (r_p) e da profundidade de dressagem (a_d), conforme a Eq. (8).

$$b_d = \sqrt{8 \cdot r_p \cdot a_d} \quad \text{Eq. 8}$$

A dressagem também exerce uma forte influência sobre a taxa de remoção de material e na integridade superficial da peça retificada. Em condições mais severas, nas quais o grau de recobrimento (U_d) é pequeno, próximo de 1, maior será a agressividade do rebolo. E nestes casos, maior será a quantidade de material a ser removida da peça e, maior deformação plástica, e o que influencia negativamente no acabamento, podendo vir a comprometer a integridade superficial da peça (KLOCKE, 2009); esta condição de dressagem é denominada de grosseira. Ao aumentar o grão de recobrimento, o rebolo contará com um número maior de partículas ativas, mas de menor tamanho, o que implica e menor agressividade do mesmo e que melhora o acabamento da peça.



a_d : profundidade de dressagem

b_d : largura de atuação do dressador

S_d : avanço por volta do dressador

Figura 2. 25 - Esquema de atuação de uma das pontas de diamante do dressador tipo *fliesen* no rebolo ao longo da operação de dressagem (BIANCHI et al., 199).

2.5 Qualidade superficial das peças retificadas

A qualidade de uma peça submetida a um processo de retificação pode ser classificada de duas maneiras: pela sua topografia e observando os aspectos das integridades superficial e subsuperficial. A topografia compreende a geometria da peça usinada, usualmente definida em termos dos parâmetros de rugosidade. A integridade superficial está relacionada principalmente com a formação de camada de óxido por causa das elevadas temperaturas na peça, queima de retífica, alteração de dureza e da textura da peça, como também na formação de trincas ou microtrincas. Quanto à integridade subsuperficial, o termo refere-se a alterações logo abaixo da superfície, como alterações mecânicas e metalúrgicas manifestadas sob a forma de danos térmicos, variações na dureza, bem como alterações microestruturais, transformações de fase, dentre outras (MALKIN; GUO, 2008).

2.5.1 Rugosidade

No que se refere à topografia da peça usinada, a rugosidade ou textura primária é definida como um conjunto de irregularidades microgeométricas caracterizadas pelas reentrâncias e saliências presentes na superfície de uma peça. A rugosidade é o parâmetro mais comumente analisado em operações de retificação pela facilidade e rapidez de obtenção dos valores que pode ser feito com auxílio de dispositivos como o rugosímetro ou ainda perfilômetros, sendo diretamente influenciada pelo tipo de acabamento, máquina-ferramenta e processo de fabricação. Além disso, a rugosidade influencia fortemente os custos de fabricação das peças, Fig. 2. 26. Existem diversos parâmetros de rugosidade, sendo que os principais são listados e descritos na Tab. 2. 5 de acordo com a norma ABNT NBR ISO 4287 (2002).

Ao contrário dos processos que empregam ferramentas com geometria definida, na retificação a previsão e determinação da rugosidade não é uma tarefa fácil, muito em virtude da forma aleatória com a qual as partículas abrasivas são distribuídas no rebolo, assim como dos aspectos tribológicos resultantes da combinação entre vários parâmetros de corte importantes na retificação, tais como: a cinemática do processo, propriedades do material da peça, características do rebolo, condições de dressagem, movimentos de entrada e de saída do rebolo sobre a peça e cortina de ar presente entre o fluido de corte e o rebolo (MARINESCU et al., 2016). Além desses fatores, a temperatura na zona de corte exerce forte influência na rugosidade, uma vez que o aumento da penetração de trabalho e/ou profundidade de corte implica em aumento da área de contato entre as partículas abrasivas e

a peça, o que por sua vez promove uma elevação na temperatura da zona de corte. Como consequência, pode ocorrer uma diminuição da resistência mecânica da peça, assim como o destacamento de partículas deformadas que podem adentrar nos poros e comprometer o acabamento superficial da peça (MALKIN; GUO, 2008).

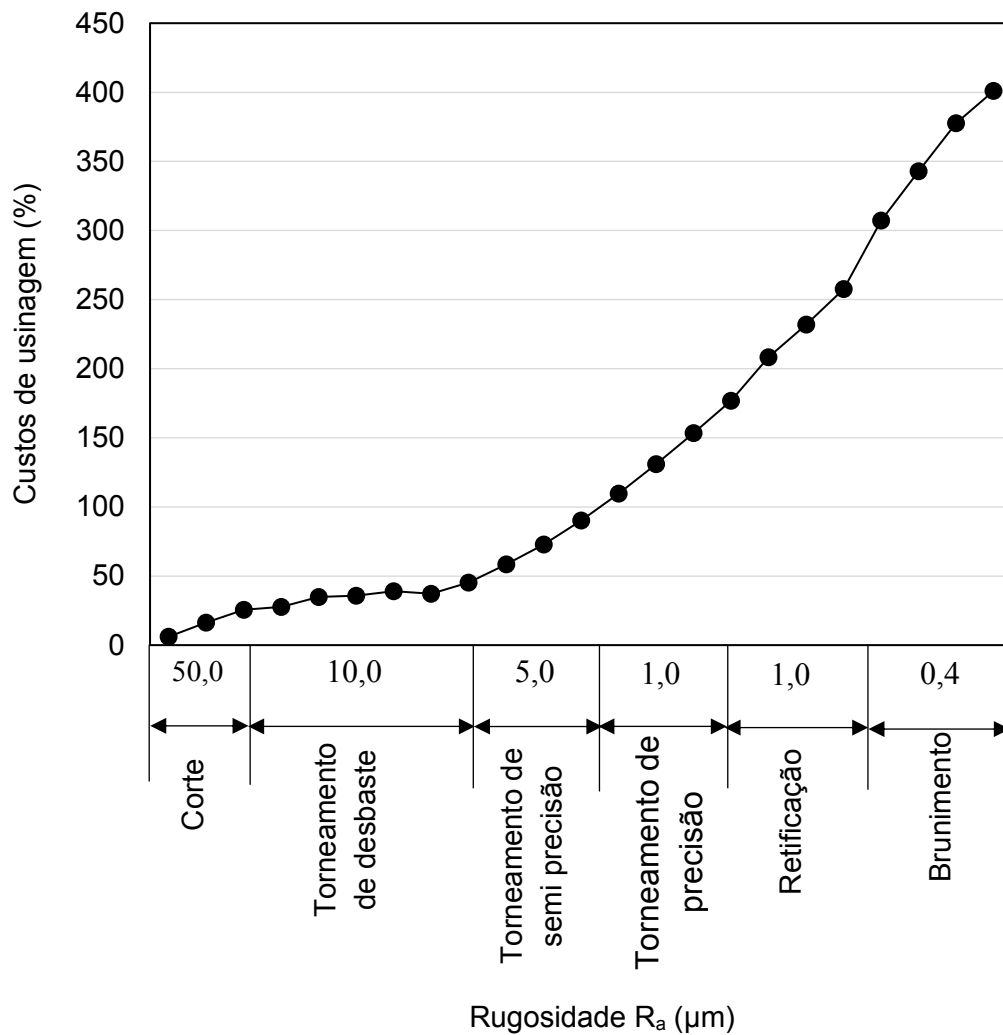


Figura 2. 26 - Custos percentuais para os vários processos de usinagem convencionais em função da rugosidade superficial R_a requerida (Adaptado de KALPAKJIAN; SCHMID, 2009).

Tabela 2. 5 - Principais parâmetros de rugosidade das superfícies (MACHADO et al., 2015).

Simbologia	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 (Kurtosis)	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.

Ainda de acordo com Machado et al. (2015), o parâmetro de rugosidade mais mensurado em peças usinadas é o R_a ; entretanto, por tratar-se de uma média dos valores absolutos no comprimento de amostragem, ele não é suficiente para identificar algumas características importantes da superfície, sendo assim necessária a medição de outros parâmetros de rugosidade.

E a fim de destacar a predominância deste parâmetro em avaliação de acabamento de peças submetidas ao processo de retificação, a seguir são apresentados alguns dos poucos trabalhos que estão disponíveis na literatura sobre retificação de aços inoxidáveis. Da

Silva et al. (2012) retificaram o aço inoxidável endurecido por precipitação VP80 com rebolo de alumina em diferentes condições de corte e utilizaram a rugosidade superficial R_a como um dos principais parâmetros de saída para avaliar a influência do tipo de bocal. Eles observaram, dentre outros resultados, que a rugosidade R_a aumentou proporcionalmente com a penetração de trabalho, independente do bocal empregado. Já no estudo realizado por Zhou et al. (2016), além do parâmetro R_a , o parâmetro R_z foi medido na superfície das peças retificadas de aço inoxidável duplex 2304. Como resultado, os autores observaram que rugosidade superficial diminuiu com a diminuição no tamanho das partículas abrasivas do rebolo. E neste caso, o parâmetro R_z veio corroborar os resultados obtidos para o parâmetro R_a .

Em um trabalho desenvolvido por Paiva et al. (2017) foram realizados ensaios de retificação em amostras de VP80 utilizando rebolo de alumina branca convencional (AA46K6V) e fluido sintético miscível em água, a duas concentrações diferente (3 % e 8 %). Em termos de rugosidades das superfícies retificadas, verificou-se que para baixos valores de penetração de trabalho (a_e) o fluido à concentração de 3 % proporcionou valores de rugosidade R_a superiores e em média iguais a: 0,19 μm a um $a_e = 5 \mu\text{m}$ e 0,24 μm a um $a_e = 15 \mu\text{m}$, enquanto que à maior penetração de trabalho $a_e = 25 \mu\text{m}$, o fluido a concentração de 8 % proporcionou os maiores valores de rugosidade de todos os ensaios, em torno de 0,30 μm .

2.5.2 Danos térmicos

Durante o processo de retificação elevadas temperaturas são desenvolvidas na região de corte, o que pode ocasionar danos térmicos às peças. Essas temperaturas são resultado da transformação da energia mecânica, necessária a remoção de cavaco, em energia térmica (SILVA et al., 2000).

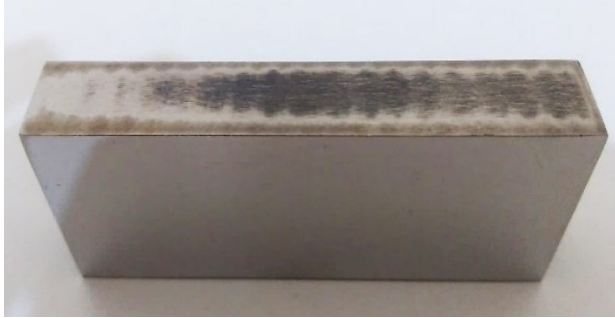
Os principais danos de origem térmica são descritos da seguinte forma:

- Queima superficial da peça: a queima visível na peça é identificada pela presença de tons azulados decorrentes da formação de camada de óxido. Como consequência, a queima superficial pode ocasionar perda diametral do rebolo em virtude da adesão de partículas metálicas aos abrasivos, aumentando os esforços de corte. Durante a retificação de aços temperados e revenidos, o surgimento da queima superficial provoca um aumento na têmpera superficial devido à retêmpera do material resultante da austenitização seguida da formação da martensita não-revenida. Esse fenômeno pode reduzir o limite da resistência à fadiga do material em função da formação de

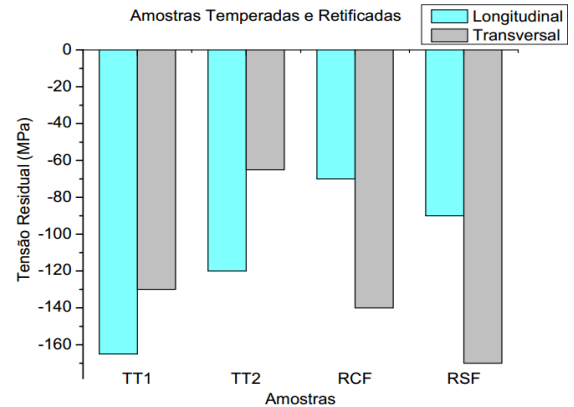
uma microestrutura não favorável. Ainda para a retificação de aços inoxidáveis, quando não ocorre a queima superficial, geralmente ocorre um amolecimento do material, posto que as temperaturas desenvolvidas na zona de corte são inferiores à de austenitização do material, Fig. 2. 27 (a) (MALKIN; GUO, 2008).

- Tensões residuais: essas tensões surgem nas adjacências das superfícies retificadas afetando o comportamento mecânico do material. Tais tensões surgem em decorrência de deformações plásticas não-uniformes nas proximidades da superfície da peça. As interações mecânicas das partículas abrasivas com a peça resultam em tensões residuais de compressão, em virtude dos deslocamentos plásticos localizados, e estas são consideradas benéficas em relação às propriedades dos materiais, Fig. 2. 27 (b) (MALKIN; GUO, 2008). Junto dos esforços mecânicos há o desenvolvimento de elevadas temperaturas na zona de corte, e com isso são formadas as tensões residuais trativas.
- Têmpera superficial: normalmente os aços são retificados em seu estado temperado-revenido; entretanto, dependendo das temperaturas desenvolvidas na zona de corte e da taxa de resfriamento em função do fluido de corte, pode ocorrer uma diminuição na dureza superficial da peça, bem como levar à formação de estruturas martensíticas não-revenidas, quando a temperatura de austenitização do material é atingida, seguida de um processo de resfriamento rápido. O surgimento ou não dessa estrutura martensítica é regida pelo mecanismo de difusão do carbono, dependente da velocidade de resfriamento, tempo de aquecimento e temperatura, Fig. 2. 27 (c) (MALKIN; GUO, 2008).
- Trincas: as trincas superficiais são resultantes do aquecimento excessivo na zona de corte durante o processo de retificação. A intensidade das trincas varia sendo que podem ser visíveis imediatamente após a retificação ou após um certo tempo. Todavia, as trincas podem não ser aparentes, em especial quando na superfície predominam tensões trativas. Neste caso, as trincas se tornarão visíveis após um ataque na peça. As trincas provocam uma redução no limite de resistência a fadiga do material, aumentando também a susceptibilidade o mesmo à processos corrosivos, Fig. 2. 27 (d) (ROWE, 2014).

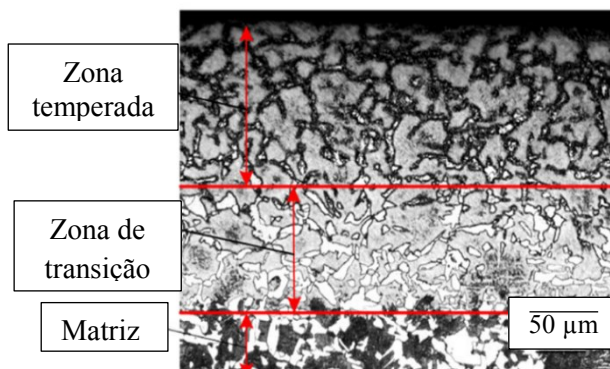
(a) Queima de retífica



(b) Tensões residuais



(c) Têmpera



(d) Trincas

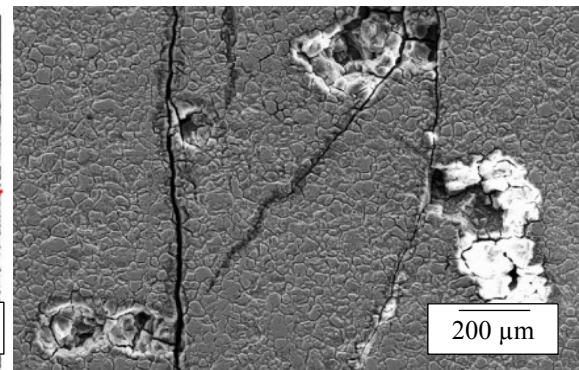


Figura 2. 27 - Queima de retífica após retificação no aço inoxidável martensítico VP420 (a) (Fonte: própria autora). Gráfico de tensões residuais de compressão após retificação no aço inoxidável austenítico AISI 304 (b) (DOS REIS et al., 2010). Microestrutura de aço AISI 1045 com evidência de tempera causada por retificação (c) (LIU et al., 2016). Trincas superficiais no aço inoxidável austenítico AISI 304L após o processo de retificação (d) (ZHOU et al., 2016).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo será abordada uma explicação acerca da metodologia e dos procedimentos experimentais empregados desde a preparação das amostras, incluindo os ensaios de retificação até a forma como foi desenvolvida a análise dos resultados.

Para a determinação dos parâmetros de entrada mais adequados à retificação plana tangencial do aço inoxidável martensítico VP420 foram realizados ensaios preliminares. A partir da definição das condições de corte mais adequadas, foi possível realizar, posteriormente, os ensaios definitivos de retificação. Ressalta-se que tanto os ensaios preliminares como os definitivos foram realizados na mesma máquina-ferramenta, a qual será descrita na seção 3. 1.

Com base nos ensaios preliminares de retificação foram selecionados os seguintes parâmetros de corte:

- Penetrações de trabalho (a_e): 10 μm (0,010 mm) e 25 μm (0,025 mm), que correspondem, respectivamente, aos seguintes valores de espessura de corte equivalente (h_{eq}) de acordo com a Eq. (3): 0,04 μm e 0,11 μm .
- Velocidade da peça (V_w): 10 m/min.
- A velocidade de corte (V_s) de 37 m/s e profundidade de corte (a_p) de 10 mm foram mantidas constantes em todos os ensaios.
- Tipo de dressador: *fliesen*.

É importante enfatizar que a escolha dos parâmetros de corte mais adequados foi pautada nos valores de rugosidade R_a obtidos, inferiores a 1,60 μm (em concordância com o descrito na literatura específica (MALKIN; GUO (2008)) e mediante uma análise visual para detecção de queima superficial. Dessa forma, concluída essa etapa, prosseguiu-se para a seguinte, que se refere aos ensaios definitivos de retificação. Na Figura 3. 1 é apresentado o um fluxograma com os principais parâmetros de entrada e de saída empregados nesta pesquisa de Mestrado, incluindo a máquina-ferramenta, o material da peça, os tipos de rebolos e os fluidos de corte).

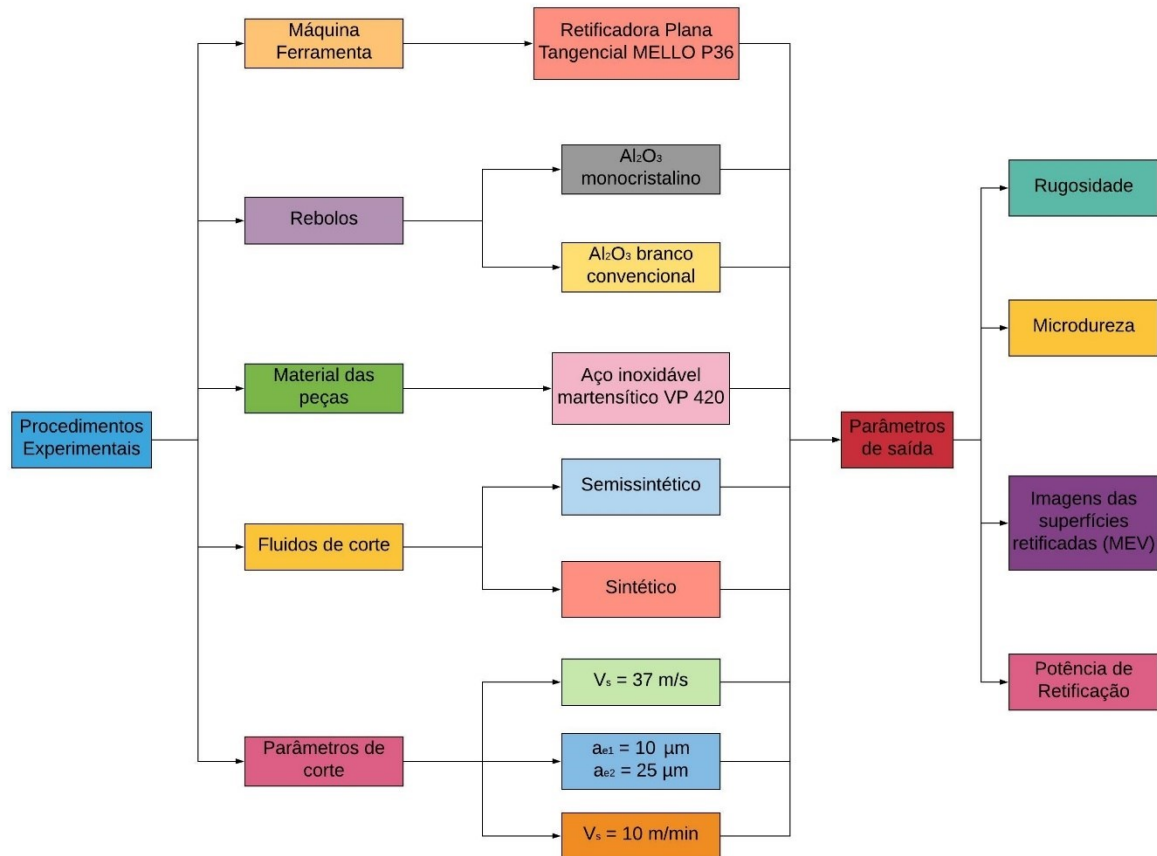


Figura 3. 1 - Fluxograma para o planejamento experimental realizado ao longo dos ensaios de retificação (Fonte: própria autora).

Todo o procedimento experimental deste trabalho foi desenvolvido nos laboratórios da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Os ensaios de retificação e o monitoramento da potência de retificação foram realizados no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC). Já a medição de rugosidade foi realizada no Laboratório de Metrologia (LEMETRO - UFU), enquanto que a análise das superfícies retificadas foi realizada no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU). Por fim as medições de microdureza foram realizadas no Laboratório de Soldagem (LAPROSOLDA).

3.1 Máquina-ferramenta

Os ensaios preliminares assim como os ensaios definitivos de retificação foram executados em uma máquina retificadora plana tangencial semiautomática do fabricante MELLO S.A, modelo P36, com resolução de 5 μm no nônio de deslocamento radial do rebolo (eixo Z), , rotação constante disponível de 2 400 rpm (251,33 rad/s) e potência equivalente a 3 HP (2,24 kW). Esta máquina-ferramenta encontra-se disponível no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU).

Quanto ao material da peça, foi selecionado o aço inoxidável martensítico VP420. Foram preparadas amostras e cada uma foi fixada em uma morsa de precisão. Esta morsa foi apoiada sobre a mesa da máquina retificadora a fim que fosse garantido o paralelismo entre a mesa e a superfície da peça a ser retificada. Na Fig. 3.2 é apresentado o posicionamento da peça (fixa em uma morsa de precisão) na máquina retificadora para a execução de cada ensaio experimental.

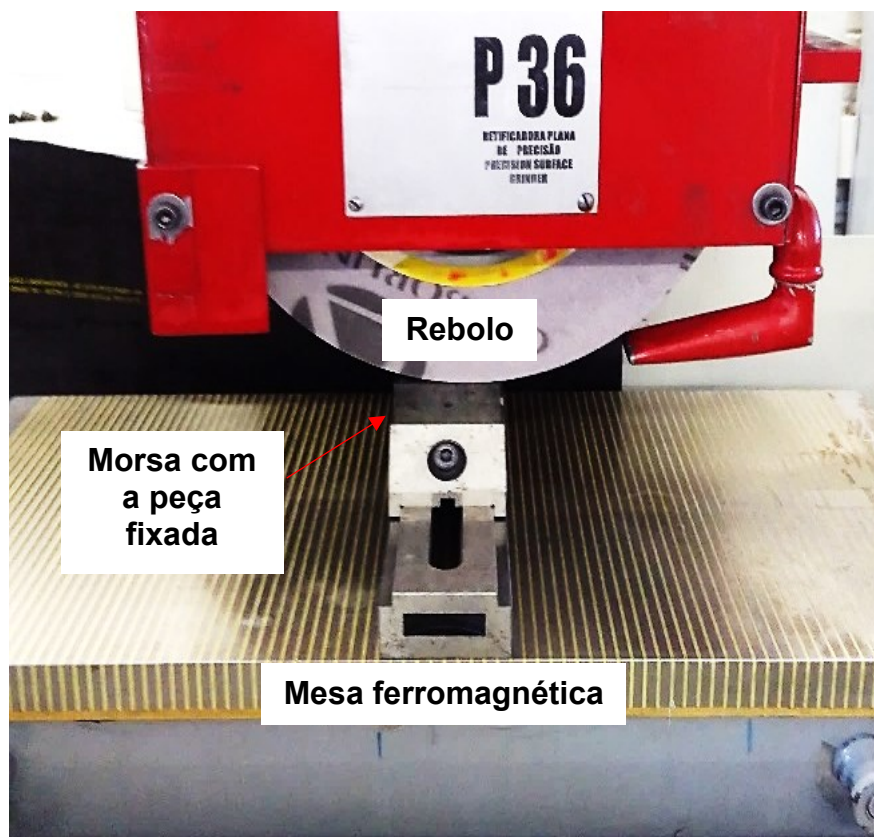


Figura 3. 2 - Posicionamento da amostra de aço inoxidável martensítico VP420 na máquina retificadora (Fonte: própria autora).

3.2 Rebolos abrasivos

Ao longo dos ensaios de retificação foram utilizados dois tipos de rebolo abrasivo: alumina monocristalina (65A120K8V40W) e alumina branca convencional (AA120K8V40W). Cabe ressaltar que ambos possuem ligante vitrificado e uma grana equivalente a *mesh* 120 sendo, pois, indicados para operações de acabamento. Os rebolos foram fornecidos pela empresa Saint-Gobain Abrasivos da América do Sul (Vinhedo – SP) nas seguintes dimensões: 300 mm de diâmetro externo X 25 mm de largura X 127 mm de diâmetro interno. Antes dos ensaios experimentais, os dois rebolos foram balanceados a fim de minimizar a influência de vibrações indesejáveis sobre o processo de retificação. O posicionamento dos rebolos balanceados na máquina retificadora antes dos ensaios é apresentado na Fig. 3. 3 (a) e (b). As propriedades químicas e físicas das partículas abrasivas destes dois rebolos encontram-se designadas na Tab. 3. 1. É importante ressaltar que os dois tipos de rebolos, monocristalina e convencional, diferem-se apenas com relação ao tipo de partícula abrasiva do qual são constituídos.

(a)



(b)



Figura 3. 3 - Posicionamento dos rebolos de alumina na máquina retificadora plana tangencial
a) monocristalina (65A120K8V40W) e (b) branca convencional (AA120K8V40W).

Tabela 3. 1 - Propriedades das partículas de alumina monocristalina e branca convencional (SAINT GOBAIN, 2017).

	Alumina monocristalina	Alumina branca convencional
	Composição química* (%)	
Al₂O₃	99,480	99,240
TiO₂	0,410	0,020
SiO₂	0,010	0,020
Fe₂O₃	0,020	0,090
Na₂O	0,080	0,600
S	0,003	0,300
	Propriedades físicas	
Densidade (g.cm⁻³)	3,98	3,95
Composição mineral	$\alpha - \text{Al}_2\text{O}_3$	
Ponto de fusão (°C)	~ 2 050	~ 2 000
Dureza (HV)	2 254	2 035
Coloração	Lavanda	Branca

*Percentual em peso dos elementos químicos.

As demais características como tamanho da partícula, dureza, tipo de estrutura e tipo de aglomerante, são comuns aos dois rebolos. Dessa forma, o objetivo dos ensaios experimentais de retificação restringe-se à análise da influência do tipo de abrasivo do reboło nas peças de aço inoxidável martensítico VP420.

3.3 Material das amostras

Em conformidade com o objetivo dessa pesquisa, foi selecionado o aço inoxidável martensítico VP420 como material a ser retificado. O material foi adquirido em forma de barra de seção circular da empresa Aço Mix Comércio de Metais (São Carlos – SP). Na Tabela 3. 2 são apresentadas algumas das propriedades deste material que é fabricado pela empresa Villares Metals. Desta barra foram cortadas e devidamente preparadas as amostras para este trabalho que possuem as seguintes dimensões: 60 mm de comprimento X 23 mm de largura X 10 mm de altura. Antes dos ensaios definitivos, todas as amostras foram submetidas aos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento pela empresa Termbrás – Tratamento Térmico (Jardinópolis – SP) e apresentaram a dureza final de 537 HV (51 HRc $\pm$ 2 HRc).

Tabela 3. 2 - Propriedades mecânicas e físicas típicas do aço inoxidável martensítico VP420 temperado e revenido (Adaptado de VILLARES METALS, 2014).

Propriedades mecânicas	
Limite de escoamento a 20 °C (N.mm ⁻²)	1 344
Limite de resistência à tração a 20 °C (N.mm ⁻²)	1 586
Alongamento a 20 °C (%)	8
Dureza a 20 °C (HV)	537
Propriedades físicas	
Densidade a 20 °C (g.cm ⁻³)	7,78
Condutividade térmica a 100 °C (W. (m. °C) ⁻¹)	24,9
Faixa ponto de fusão (°C)	1 454 – 1 510
Ferromagnético	Sim

Primeiramente, antes da realização dos ensaios preliminares e definitivos de retificação, selecionou-se uma das faces perpendiculares à superfície a ser retificada de todas as 10 amostras para preparação e análise metalográfica. Elas foram preparadas mediante os processos de lixamento e de polimento, ambos executados no Laboratório de Apoio à Fabricação (LAF) da FEMEC – UFU.

O processo de lixamento foi efetuado em uma lixadeira rotativa manual, sendo que a sequência de lixas d'água de carbetto de silício adotadas foi: 36, 80, 100, 120, 220, 240, 320, 400, 600, 800, 1 000 e 1 200 *mesh*, todas do fabricante 3M. Em seguida, a face selecionada de cada amostra foi polida na máquina Politriz rotativa automática, com rotação de 600 rpm, com pasta de óxido de cromo seguida da pasta de alumina com tamanho de partícula de 1,0µm, e por fim, com pasta de alumina com tamanho de partícula 0,3 µm. Em seguida, foi selecionada uma das amostras para análise metalográfica. Esta amostra foi submetida ao ataque químico por imersão com o reagente *Villela* (1 g de ácido pícrico, 100 ml de álcool etílico e 5 ml de ácido clorídrico) por cerca de 30 segundos e, posteriormente, lavada e secada via ar comprimido, antes de ser analisada no Microscópio Ótico *Olympus*, modelo BX51, do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM – UFU). As imagens referentes à microestrutura de uma das amostras do aço inoxidável martensítico VP420 encontram-se nas Fig. 3. 4 (a) e (b), tendo em vista que nas demais, as mesmas características foram igualmente observadas.

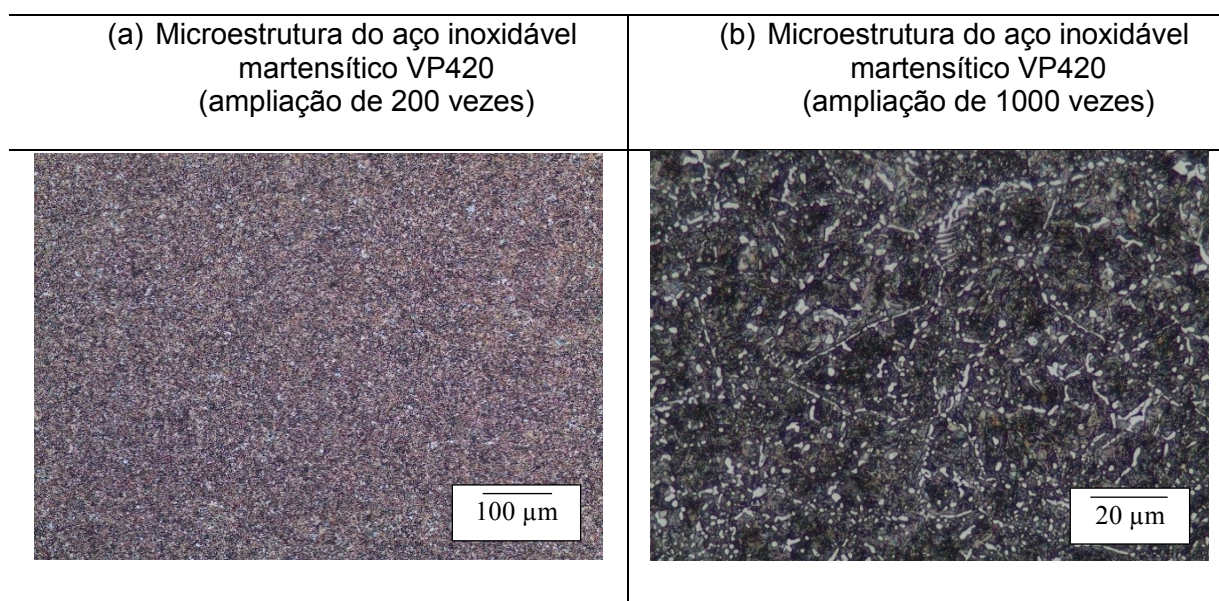


Figura 3. 4 - Microestruturas do aço inoxidável martensítico VP420 após ataque com o reagente Villela.

A partir do ataque químico com reagente *Villela* foi possível observar a matriz martensítica, Fig. 3. 4 (a) e a presença de carbonetos esferoidizados do tipo $M_{23}C_6$ (cor branca) dispostos de forma intergranular e intragranular na matriz de martensita revenida (cor preta), Fig. 3. 4 (b), no aço inoxidável martensítico VP420, temperado e revenido.

3.4 Fluidos de corte

Todos os ensaios de retificação foram realizados na presença de fluido de corte, aplicado tangencialmente ao rebolo pela técnica convencional (abundância ou jorro) à uma vazão de 11 L/min através de um bocal do tipo sapata que acompanha à retificadora, conforme apresentado na Fig. 3. 5. O bocal foi posicionado a partir do eixo central do rebolo, a uma distância horizontal de 82,0 mm e uma altura de 103,0 mm, a fim de garantir que o fluido de corte tangenciasse a superfície do rebolo. Todos os ensaios foram feitos com o bocal mantido nesta posição.

- Foram empregados nos ensaios experimentais de retificação, dois tipos de fluido de corte cujas propriedades são apresentadas na Tab. 3. 3.
- Fluido de corte sintético Grindex 10 do fabricante *Blaser Swisslube*.
- Fluido de corte semissintético de base vegetal VASCO 7000 do fabricante *Blaser Swisslube*.

Para ambos fluidos, foi utilizada a diluição em água na proporção na proporção 1: 19, equivalente ao BRIX = 3,2 % que foi verificado com o auxílio de um refratômetro N1, ATAGO sempre antes de cada ensaio.

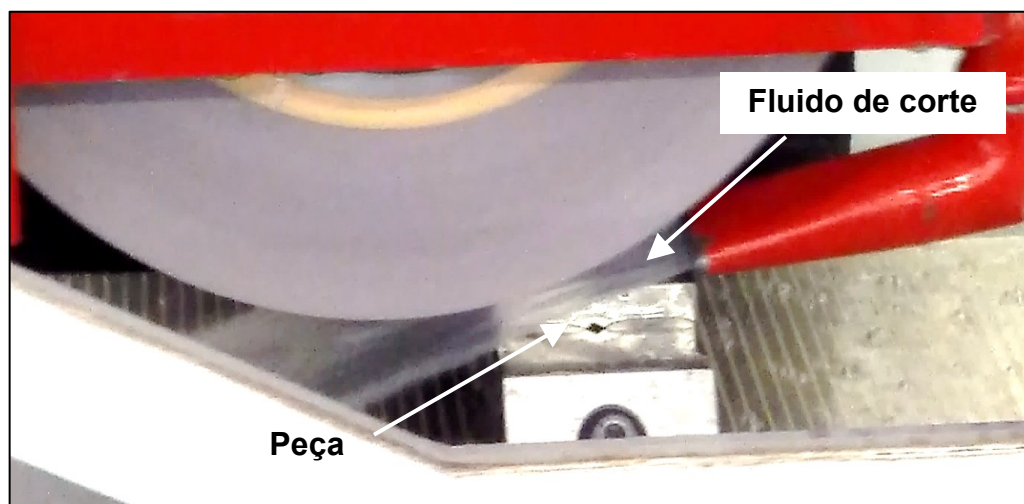


Figura 3. 5 - Posicionamento do bocal de fluido de corte em relação ao rebolo.

Tabela 3. 3 - Características dos fluidos de corte sintético (Grindex 10) e semissintético (VASCO 7000) (Adaptado de BLASER SWISSLUBE, 2011 (a) e (b)).

Característica \ Fluido	Sintético	Semissintético
Coloração	Amarelo claro semitransparente	Marrom claro semitransparente
Óleo mineral	-*	0%
Éster	-*	25%
Água	40%	-*
Densidade a 20 °C (g.cm⁻³)	1,12	0,98
Viscosidade a 40 °C (mm².s⁻¹)	-*	74
Ponto de inflamação (°C/°F)	-*	134/273
pH	8,7 – 9,2	8,8 – 9,5

*Informações não disponibilizadas pelo fabricante.

3.5 Parâmetros de corte

Os ensaios de retificação foram realizados de tal forma que o rebolo entrasse em contato com a superfície da peça em cheio e percorresse um único passe ao longo do

comprimento da amostra. O ciclo de retificação consistiu de um movimento de ida e um de retorno do rebolo também passando pela superfície da peça (mas sem avanço radial ou incremento na penetração de trabalho), o que configurou um tempo de faiscamento na saída (sparkout) em torno de 2 segundos. Desta forma, o critério de parada de cada foi baseado no volume de material removido, 6 mm^3 e 15 mm^3 , de acordo com as penetrações $a_e = 10 \text{ }\mu\text{m}$ e $a_e = 25 \text{ }\mu\text{m}$, empregadas respectivamente, nos ensaios de retificação.

No que tange à operação de dressagem, optou-se pelo emprego de um dressador estático do tipo *fliesen*, conforme ilustrado na Fig. 3. 6. No início de cada ensaio experimental realizou-se uma operação de dressagem, na qual o dressador solidário a um suporte foi fixo à mesa da retificadora deslocava-se transversalmente ao rebolo percorrendo toda a espessura do mesmo, em dois passes consecutivos, a uma profundidade de dressagem constante $a_d = 20 \text{ }\mu\text{m}$ e uma largura de atuação do dressador $b_d = 0,8 \text{ mm}$, (medido no dressador), na presença o fluido de corte disponível na máquina (sintético ou semissintético, de acordo com o ensaio em questão). Na Tab. 3. 4 é apresentado o resumo dos parâmetros empregados nos ensaios de retificação.

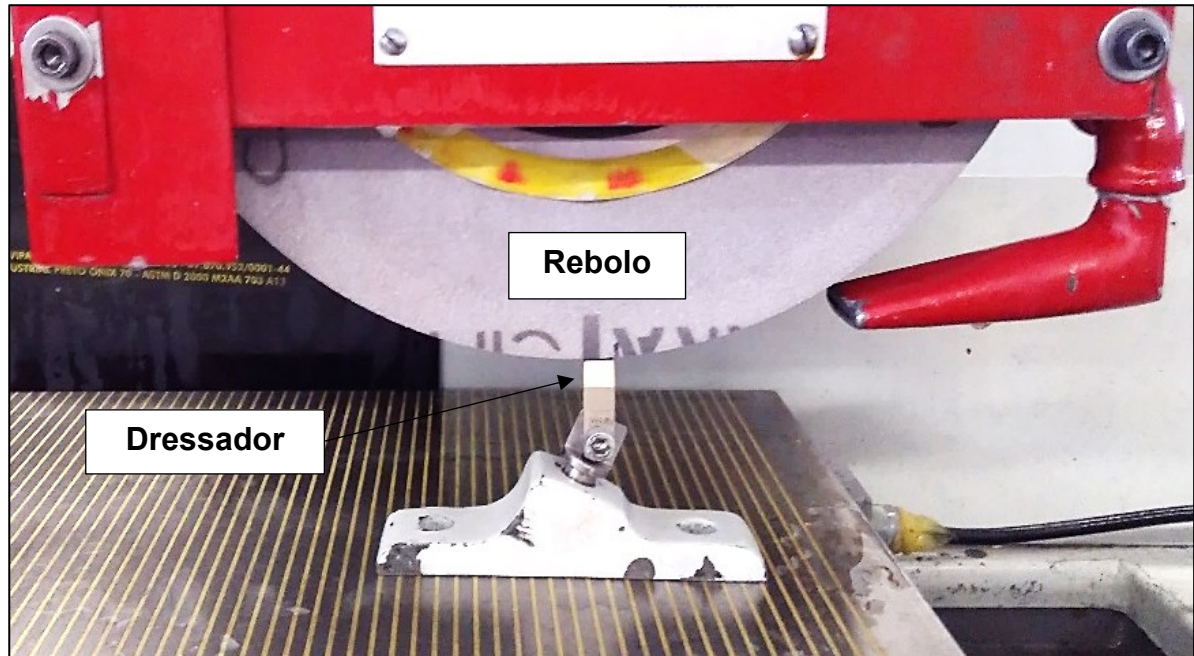


Figura 3. 6 - Posicionamento do dressador do tipo *fliesen* na máquina retificadora (Fonte: própria autora).

Tabela 3. 4 - Parâmetros de corte nos ensaios de retificação.

Parâmetros de corte	
Velocidade de corte (V_s)	37 m/s
Rotação da máquina	2 400 rpm
Velocidade da peça (V_w)	10 m/min
Penetração de trabalho (a_e)	10 μm e 25 μm
Profundidade de corte (a_p)	10 mm
Volume de material removido (VMR)	6 mm ³ ($a_e = 10 \mu\text{m}$) 15 mm ³ ($a_e = 25 \mu\text{m}$)
Vazão dos fluidos de corte (V_j)	11 L/min
Profundidade de dressagem (a_d)	20 μm
Grau de recobrimento (U_d)	6

Cabe ressaltar que ao longo dos ensaios, à exceção da penetração de trabalho (a_e), todos os parâmetros de entrada foram mantidos constantes. Como já mencionado anteriormente, foram empregados dois tipos de fluido de corte e dois tipos de rebolos. Na Tab. 3. 5 é apresentado o planejamento experimental fatorial 2^3 que serviu de base para a execução dos experimentos, que consistiram nos ensaios de retificação propriamente ditos e suas respectivas réplicas.

Tabela 3. 5 - Planejamento experimental fatorial 2^3 dos ensaios de retificação.

Ensaio	Tipo de reboło	a_e (μm)	Fluido de corte
1	Alumina monocristalina	10	Semissintético
2		10	
3		25	
4		25	
5		10	Sintético
6		10	
7		25	
8		25	
9	Alumina branca convencional	10	Sintético
10		10	
11		25	
12		25	
13		10	Semissintético
14		10	
15		25	
16		25	

3.6 Parâmetros de saída

Nesta seção serão apresentadas as informações e procedimentos adotados para a medição e aquisição dos parâmetros de saída referentes à esta dissertação de Mestrado. Tais parâmetros abrangem rugosidade e microdureza das peças usinadas, imagens das superfícies retificadas e potência de retificação.

3.6.1 Rugosidade

Após os ensaios definitivos de retificação, cada uma das faces principais retificadas foi submetida a uma análise de rugosidade da superfície por meio da medição dos parâmetros R_a , R_z e R_t em cinco regiões distintas e distribuídas uniformemente ao longo do comprimento das amostras e perpendiculares ao sentido de retificação, Fig. 3. 7.

Para efetuar a medição dos parâmetros de rugosidade, empregou-se um rugosímetro portátil Surtronic, modelo S-100 Series (nº 010720) do fabricante *Taylor Robson*, de resolução $0,01 \mu\text{m}$, que possui um raio de ponta do apalpador igual a $2 \mu\text{m}$, com um comprimento de onda do filtro (*cut-off*) de $0,8 \text{ mm}$ e um comprimento de avaliação de $4,0 \text{ mm}$.

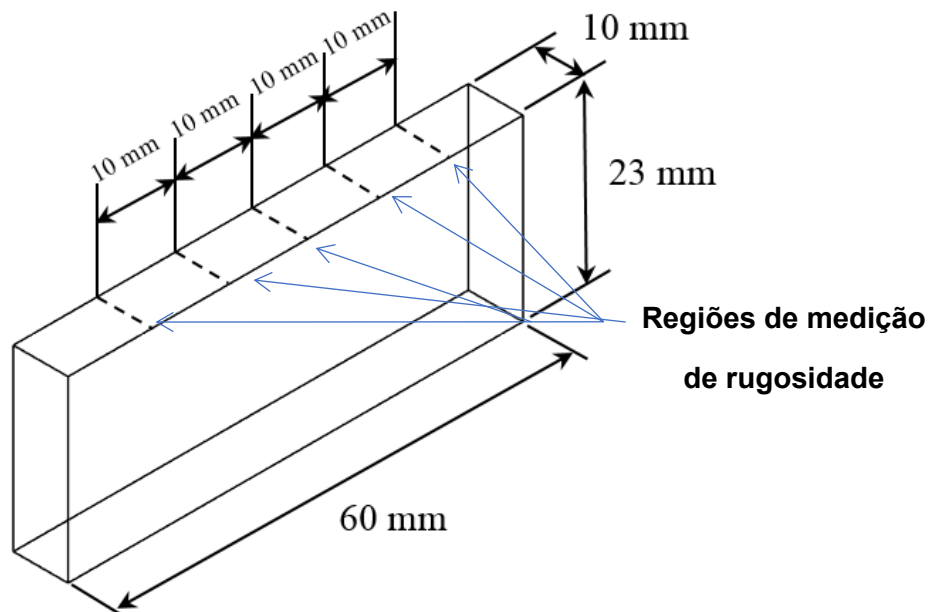


Figura 3. 7 - Dimensões da amostra e regiões de medição de rugosidade superficial (Fonte: própria autora).

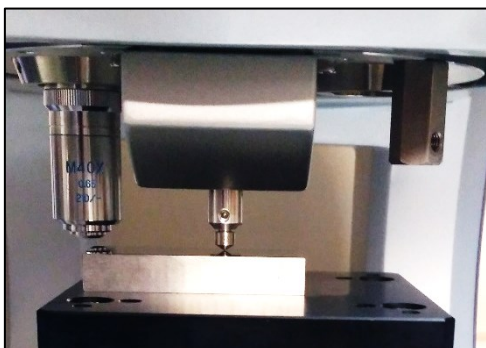
Todas as medições de rugosidade foram efetuadas no Laboratório de Metrologia (LEMETRO – UFU), a uma temperatura controlada de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$, em que tanto o rugosímetro quanto as amostras foram posicionados sobre um desempenho a fim de garantir o paralelismo entre o apalpador e a superfície de medição, bem como evitar vibrações. Após a aquisição dos valores de rugosidade, foi calculada a média aritmética e desvio padrão das 5 medições, e estes foram utilizados para a plotagem dos gráficos dos parâmetros de rugosidade.

3.6.2 Microdureza

A medição de microdureza nas amostras retificadas de aço inoxidável martensítico VP420 foi realizada através do Microdurômetro SHIMADZU HMV – G, pertencente ao Laboratório de Soldagem (LAPROSOLDA). Para as medições foi adotada a carga de 255,2 mN (0,025 HV) que foi aplicada por 15 s, critério que foi estabelecido com base em pré-testes realizados para ajuste de carga. Ao longo dos testes foram realizadas 10 medições em 3 regiões distintas de cada amostra, ao longo da superfície secundária, devidamente lixada e polida.

As medições de microdureza consistiram em fazer indentações por meio de um indentador de ponta única de diamante, Fig. 3. 8 (a), inicialmente, a partir de 30 μm perpendicularmente à superfície retificada (na superfície secundária) com uma distância horizontal entre as indentações de 40 μm e uma distância vertical de 20 μm entre as mesmas, de tal forma a respeitar a distância mínima de duas vezes o comprimento das indentações, para que valores de microdureza a diferentes profundidades sejam obtidos, Fig. 3. 8 (b).

(a)



(b)

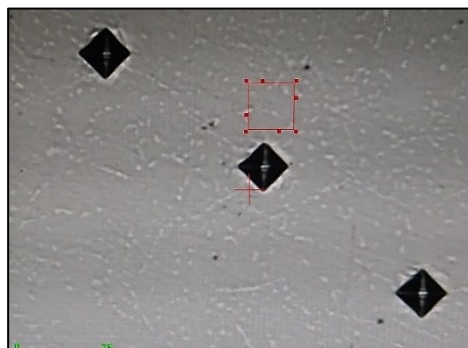


Figura 3. 8 - Posicionamento das amostras de VP420 no microdurômetro (a), medições de microdureza obtidas nas amostras, a partir da superfície (b) (Fonte: própria autora).

3.6.3 *Imagens das superfícies retificadas (MEV)*

A avaliação das superfícies retificadas foi efetuada com o auxílio de um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), do fabricante Hitachi, modelo TM 3000 e uma análise da composição química por meio da Espectroscopia de Dispersão em Energia (EDS), disponíveis no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU – UFU). A observação das amostras no MEV permite identificar possíveis danos superficiais tais como microtrincas e queima nas superfícies usinadas, como também permitem compreender os eventos tribológicos e melhor discussão e análise dos resultados da qualidade superficial das peças

Em uma das amostras do aço inoxidável martensítico VP420 foi realizada uma análise dos seus componentes químicos através da espectroscopia de raios X por dispersão de energia, ou espectroscopia de dispersão em energia (EDS – *Energy Dispersion Spectroscopy*), a partir da qual foi possível obter graficamente os componentes químicos presentes na amostra em questão, Fig. 3. 9, bem como o percentual em massa e o percentual atômico de cada elemento, conforme descrito na Tab. 3. 6.

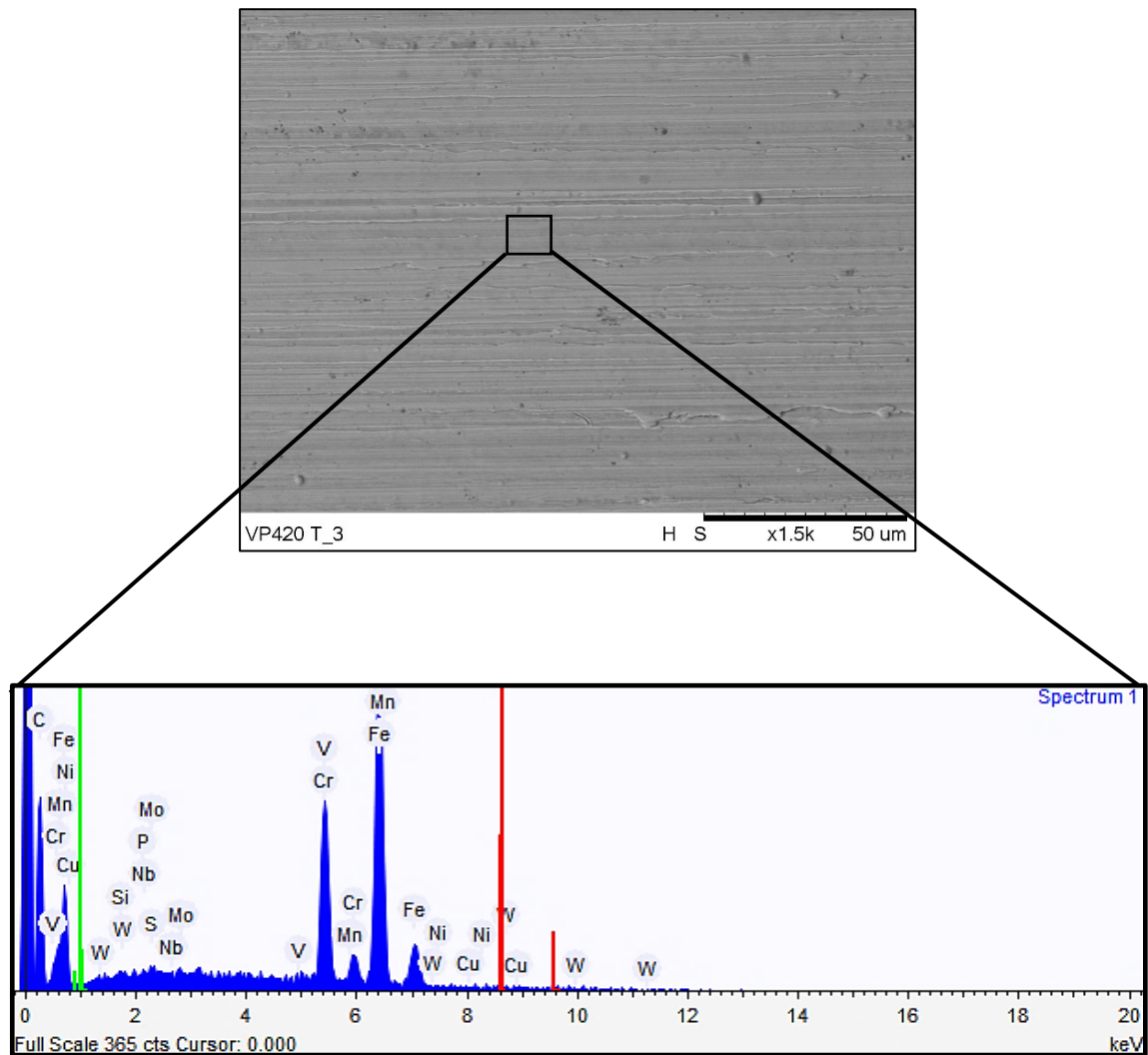


Figura 3. 9 - Gráfico com a composição química do aço inoxidável martensítico VP420 obtido através do EDS (Fonte: própria autora).

Tabela 3. 6 - Percentual em massa e percentual atômico dos elementos químicos presentes no aço inoxidável martensítico VP420 obtidos através de EDS (Fonte: própria autora).

<i>Elemento químico</i>	<i>% em massa</i>
Carbono (C)	0,388
Silício (Si)	0,138
Vanádio (V)	0,200
Cromo (Cr)	13,974
Manganês (Mn)	0,451
Cobre (Cu)	0,275
Nióbio (Nb)	0,245
Molibdênio (Mo)	0,683
Tungstênio (W)	0,103
Ferro (Fe)	51,182

3.6.4 Potência de retificação

A cada ensaio experimental realizou-se medições de potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore através da aquisição dos valores de tensão e corrente elétricas, que alimentam o motor de indução trifásico (2,25 kW de potência nominal). Os sinais de tensão e de corrente elétrica foram monitorados através de um sensor para aquisição dos sinais de tensão e outro sensor de efeito *Hall* para aquisição dos sinais de corrente elétrica).

Para a medição da tensão elétrica, optou-se por utilizar um sensor LV – 20p, disposto paralelamente à diferença de potencial (ddp), a qual se desejava aferir. Já para a medição de corrente elétrica foi empregado um sensor HAS 50 – 600S o qual foi colocado de forma a circundar o fio condutor e assim captar a variação do fluxo magnético oriundo da passagem da corrente elétrica estabelecida pelo condutor.

Dessa forma, os sinais elétricos captados pelos dois sensores foram convertidos através de um conversor analógico-digital (A/D), responsável pelas entradas e saídas dos sinais em sequência. Assim sendo, utilizou-se uma placa NI6001, da *National Instruments*, que converte o sinal analógico em digital a uma taxa de aquisição de 20 kS/s, divididos em 6 canais e 12 bits.

O tratamento de sinais foi efetuado através do software LabView, da *National Instruments*, que permite realizar as operações matemáticas necessárias de acordo com a calibração do conversor e efetuar o armazenamento dos dados adquiridos, como também a geração dos gráficos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Ao longo deste capítulo serão apresentados os resultados obtidos após os ensaios experimentais de retificação nas amostras de aço inoxidável martensítico VP420 com diferentes condições operacionais. Esses resultados serão expostos sob a forma de gráficos e de tabelas, para que assim sejam explicados e discutidos com base na literatura específica. Primeiramente, serão apresentados os resultados de rugosidade da superfície, seguidos pelos perfis de microdureza, imagens das superfícies retificadas (MEV) e, por fim, os valores de potência de retificação.

4.1 Rugosidade da superfície

Os resultados de rugosidade mensurados nas superfícies das amostras retificadas serão apresentados e discutidos de acordo com os parâmetros selecionados (R_a , R_t e R_z), em relação ao tipo de rebolo e ao fluido de corte empregados nos ensaios.

Nas Figuras 4. 1, 4. 2 e 4. 3 são apresentados os resultados médios de rugosidade em termos dos parâmetros R_a (desvio aritmético médio), R_t (altura total do perfil) e R_z (altura máxima do perfil), respectivamente. Destas figuras pode-se afirmar que, de uma forma genérica, os valores médios de rugosidade concernentes aos parâmetros R_a , R_t e R_z aumentaram com a penetração de trabalho (a_e), em todos os ensaios realizados na presença de fluidos de corte sintético (Grindex 10) e semissintético (VASCO 7000), independentemente do tipo de abrasivo do rebolo testado (alumina monocristalina e alumina branca convencional).

Na Tabela 4. 1 são apresentadas as variações percentuais médias dos três parâmetros de rugosidade avaliados, em função das condições de retificação empregadas nos ensaios. A partir desses valores, é possível observar essa tendência de aumento da rugosidade em função da penetração de trabalho a_e . Essa é uma tendência já esperada de acordo com a literatura específica, pois, segundo Klocke (2009), inicialmente, a ao usinar com uma baixa penetração de trabalho, há um reduzido número de partículas abrasivas do rebolo que atua na remoção de material em um tempo de contato relativamente baixo. À medida que se eleva a penetração de trabalho, o comprimento de contato do rebolo com a peça torna-se maior e,

assim, o número de partículas abrasivas que atuam efetivamente na zona de contato com a peça aumenta proporcionalmente com a taxa de remoção de material e com a área de contato. Dessa forma, os esforços de corte do rebolo sobre a peça aumentam, elevando também a temperatura na zona de corte, o que afeta de forma negativa a qualidade da superfície retificada, efeito que é refletido no aumento na rugosidade.

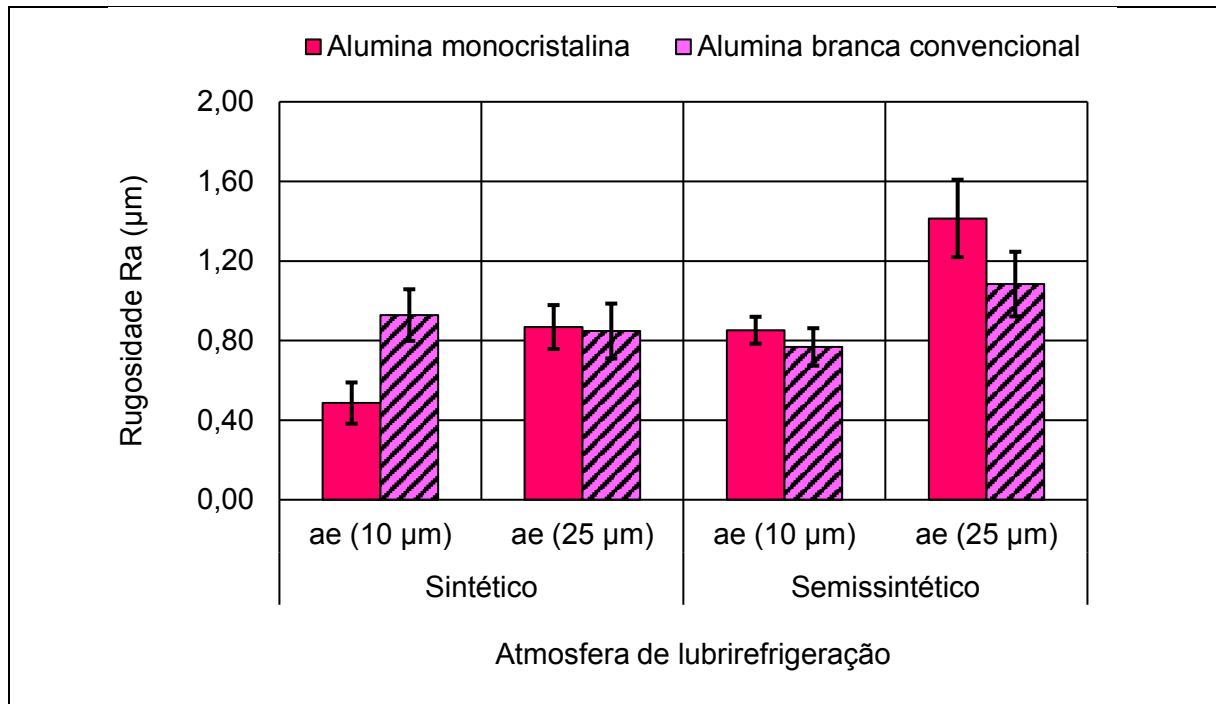


Figura 4. 1 - Rugosidade R_a para o aço inoxidável martensítico VP420 em função da penetração de trabalho (a_e), atmosfera de lubrificação e tipo de abrasivo do rebolo.

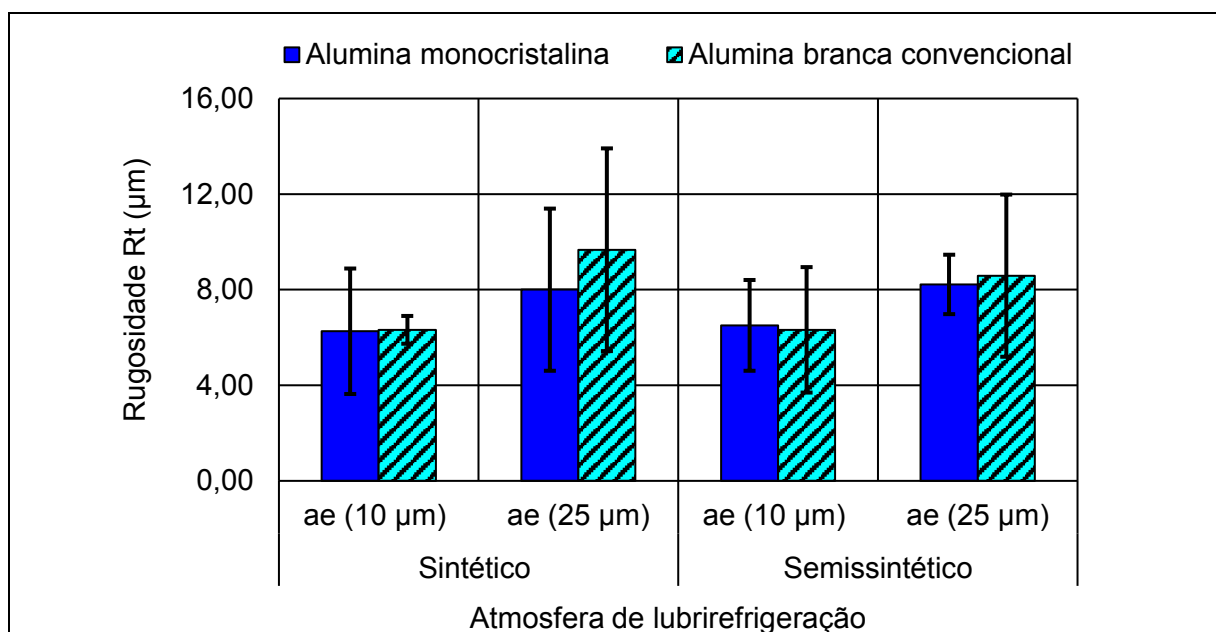


Figura 4. 2 - Rugosidade R_t para o aço inoxidável martensítico VP420 em função da penetração de trabalho (a_e), atmosfera de lubrificação e tipo de abrasivo do rebolo.

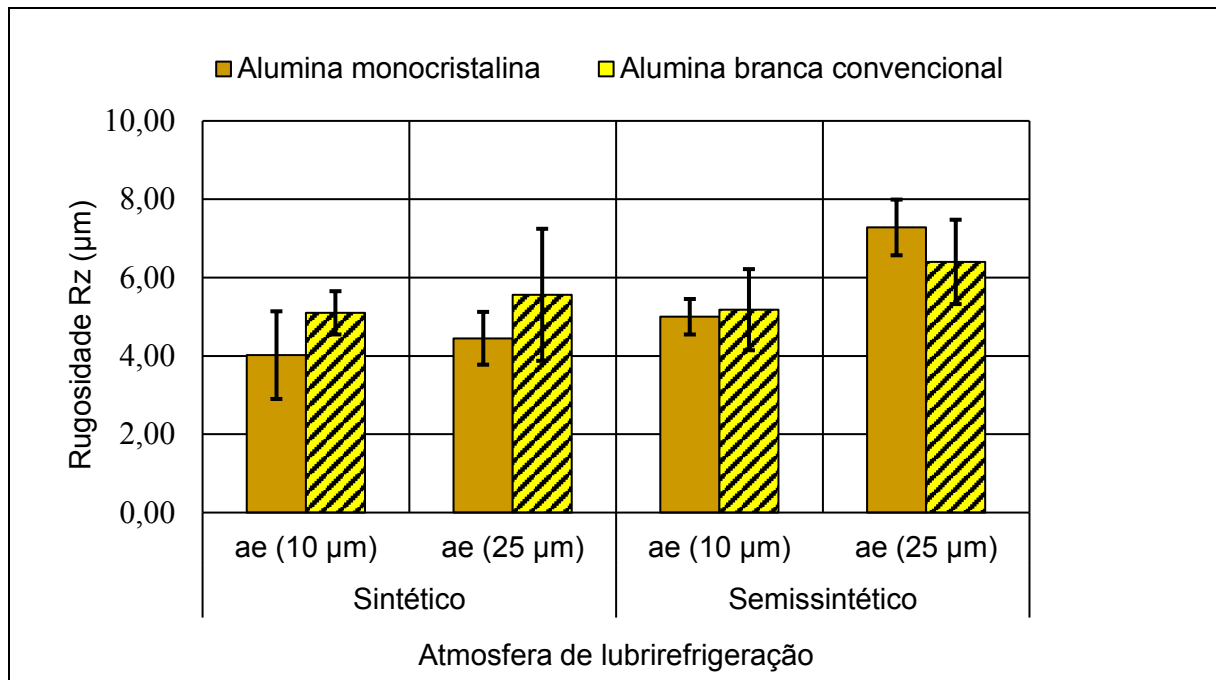


Figura 4. 3 - Rugosidade R_z para o aço inoxidável martensítico VP420 em função da penetração de trabalho (a_e), atmosfera de lubrificação e tipo de abrasivo do rebolo.

Tabela 4. 1 - Variações percentuais (%) médias de rugosidade R_a , R_t e R_z em função do aumento na penetração de trabalho (a_e), do tipo de abrasivo do rebolo e atmosfera de lubrificação.

Tipo de abrasivo do rebolo	Atmosfera de lubrificação					
	Sintético			Semissintético		
	R_a	R_t	R_z	R_a	R_t	R_z
Monocristalina	+ 70,00	+ 33,33	+ 12,50	+ 68,67	+ 30,16	+ 46,00
Convencional	- 12,63	+ 60,48	+ 10,00	+ 46,67	+ 32,26	+ 25,49

Manimaran e Kumar (2013) também observaram que, ao longo da retificação do aço inoxidável AISI 316 na presença de fluido de corte semissintético, o aumento nos valores de penetração de trabalho (a_e), resultou na elevação dos valores de rugosidade em termos do parâmetro R_a , na presença do rebolo de alumina *Seeded Gel* (SG). Além disso, de acordo com os autores, o emprego de penetrações de trabalho mais baixas ($a_e = 10 \mu m$) resultaram em valores de rugosidade R_a média entre $0,3 \mu m$ e $0,5 \mu m$, enquanto que a penetrações mais elevadas ($a_e = 40 \mu m$) os valores obtidos foram em torno de $0,7 \mu m$.

Em termos de fluido de corte, os valores médios de rugosidades R_a , R_t e R_z foram, em geral, maiores para os ensaios realizados com o fluido semissintético, nas mesmas condições de corte, penetração de trabalho e de rebolo, Fig. 4. 1, 4. 2 e 4. 3. Isso pode ser explicado

pelo fato de os fluidos sintéticos assegurarem uma maior taxa de remoção de calor da zona de corte. Neste caso, acredita-se que o rebolo esteve menos susceptível ao empastamento causado pela mistura de fluido e com o material da peça, o que promoveu redução nos esforços de corte e, conseqüentemente, menor temperatura na zona de contato rebolo-peça, o que leva a uma melhor qualidade da peça em termos de rugosidade, em comparação com o fluido semissintético. E estes resultados podem ser atribuídos aos agentes umectantes que melhoram as propriedades refrigerantes da solução formada quando os fluidos sintéticos são adicionados na água, conforme relatado por Machado et al. (2015).

Para corroborar com estes resultados, Yin e Marinescu (2013) avaliaram a capacidade de refrigeração entre diferentes categorias de fluidos de corte comumente empregados em processos de retificação, entre eles um fluido de corte sintético (C270) e outro semissintético (MicriSol 585XT). Estes autores observaram, a partir dos resultados obtidos, que a capacidade de refrigeração de um fluido de corte é inversamente proporcional à viscosidade do mesmo e que os fluidos sintéticos apresentaram uma menor viscosidade em relação aos semissintéticos, portanto, a capacidade de refrigeração dos fluidos sintéticos ao longo do processo de retificação é maior.

No que se refere ao tipo de abrasivo do rebolo, a partir dos gráficos das Fig. 4. 1, 4. 2 e 4. 3 que em termos de rugosidade superficial, pode-se observar que o rebolo de alumina monocristalina apresentou um melhor desempenho na condição de lubrificação em que foi empregado o fluido de corte sintético. Isso pode ser explicado pelo fato das partículas de alumina monocristalina apresentarem dureza superior e serem mais friáveis em relação às partículas de alumina branca convencional, o que contribuiu para processo de fratura mais eficiente das partículas abrasivas durante a quebra ao longo da retificação, logo expondo abrasivos mais pontiagudos, que reduzem os esforços de corte refletindo em baixos valores de rugosidade nas amostras de VP420 (MALKIN; GUO, 2008; SAINT GOBAIN, 2017). Essa característica combinada com a maior capacidade de refrigeração do fluido sintético resultou em um melhor desempenho desse tipo de rebolo nessas condições, gerando assim os menores valores de rugosidade, em especial quando a retificação foi realizada com baixos valores de penetração de trabalho ($a_e = 10 \mu\text{m}$).

Entretanto, na presença do fluido de corte semissintético o desempenho do rebolo de alumina monocristalina foi inferior ao do rebolo convencional, gerando valores de rugosidade, em termos dos parâmetros R_a , R_t e R_z , maiores nas mesmas condições de operação, Fig. 4. 1, 4. 2 e 4. 3, respectivamente, demonstrando que esta combinação para a retificação do aço inoxidável VP420 não é a ideal para a faixa de condições de corte e atmosferas testadas. Além disso, embora não tenham sido coletadas e registradas imagens das superfícies de corte dos rebolos após cada ensaios, observou-se que nesta condição houve empastamento do

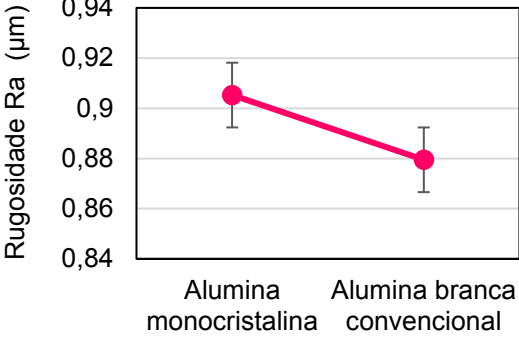
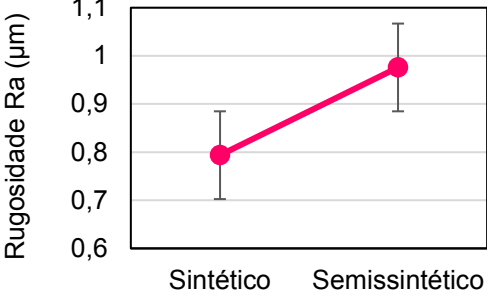
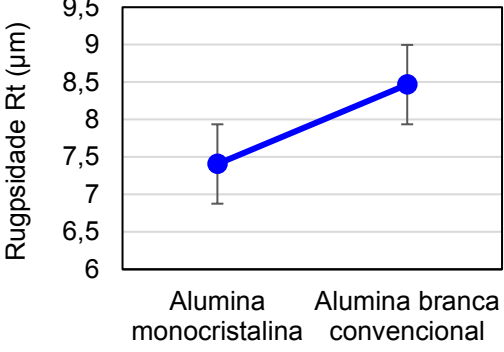
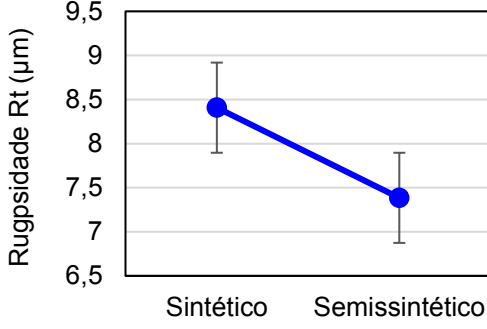
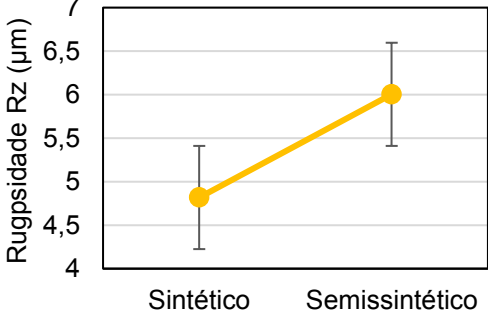
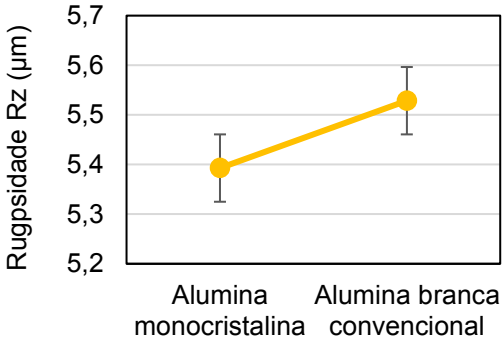
rebolo, o que contribuiu para a deterioração do acabamento. Outra explicação para estes resultados baseia-se no fato de o fluido semissintético possuir maior viscosidade que o sintético, que em tese possui melhor propriedade de lubrificação, mas menor capacidade refrigerante, o que favorece a elevação nas temperaturas desenvolvidas na região de corte. Isso faz com que as peças estejam mais propensas aos danos de origem térmica, como também afeta a textura da superfície usinada e reflete nos valores de rugosidade, em especial na condição mais severa ($a_e = 25 \mu\text{m}$), em comparação com os valores obtidos com o rebolo convencional, conforme pode ser observado nos gráficos das Fig. 4. 1, 4. 2 e 4. 3, respectivamente.

A fim de melhor avaliar o efeito do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte sobre os valores de rugosidade R_a , R_t e R_z mensurados, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) através do software *Excel 2016*. O objetivo é também obter o p-valor, Tab. 4. 2, e avaliar se há significância estatística entre os fatores tipo de abrasivo e fluido de corte e os valores de rugosidade. Desta tabela, e considerando uma confiabilidade de 95%, observa-se que todos os p-valores obtidos foram inferiores ao valor de $\alpha = 0,05$, o que permite inferir que tanto o tipo de abrasivo quanto o fluido de corte foram significantes nos resultados de rugosidade adquiridos. Entretanto, a influência do fluido de corte foi ainda maior nos parâmetros de rugosidade dos que o tipo de abrasivo do rebolo empregado nos ensaios de retificação, conforme pode ser observado na Tab. 4. 3, onde são apresentados os gráficos que relacionam a média aritmética dos valores de rugosidade em função do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte.

Tabela 4. 2 - Valores de p-valor obtidos após a análise de variância (ANOVA) para os valores de rugosidade R_a , R_t e R_z em função do tipo de abrasivo do rebolo e da atmosfera de lubrificação.

Parâmetro de rugosidade	p-valor	
	Tipo de abrasivo do rebolo	Atmosfera de lubrificação
R_a	0,03245	0,01281
R_t	0,02443	0,01192
R_z	0,03521	0,02435

Tabela 4. 3 - Influência do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte nos valores de rugosidade R_a , R_t e R_z nas amostras retificadas do aço inoxidável martensítico VP420.

	Tipo de abrasivo do rebolo	Atmosfera de lubrificação
Rugosidade R_a , R_t e R_z (μm)	 Rugosidade R_a (μm) Alumina monocristalina Alumina branca convencional	 Rugosidade R_a (μm) Sintético Semissintético
	 Rugosidade R_t (μm) Alumina monocristalina Alumina branca convencional	 Rugosidade R_t (μm) Sintético Semissintético
	 Rugosidade R_z (μm) Sintético Semissintético	 Rugosidade R_z (μm) Alumina monocristalina Alumina branca convencional

4.2 Microdureza

Nesta seção são apresentados os perfis de microdureza obtidos após a retificação do aço inoxidável martensítico VP420 em diferentes condições operacionais com as respectivas discussões.

Na Fig. 4. 4 (a) e (b) são apresentados os gráficos com os perfis de microdureza das amostras retificadas com o fluido de corte sintético e rebolos de óxidos de alumínio monocristalina e alumínio branca convencional, respectivamente. Vale ressaltar que cada ponto dos gráficos corresponde à média entre os três perfis obtidos em cada amostra, incluindo ensaio, réplica e tréplicas das medições de microdureza, enquanto que a linha tracejada corresponde à dureza média do material obtida antes dos ensaios de retificação (537 HV), condição que não há presença dano térmico, e por isso considerada como referência para as análises. No geral, observa-se que a usinagem na condição mais branda resultou na menor variação da microdureza em relação àquela considerada de referência, independente do rebolo empregado. Ao realizar a comparação entre os rebolos, observa-se que o de alumina monocristalina foi mais eficiente neste quesito, por exemplo, ao empregar a penetração $a_e = 10 \mu\text{m}$, a margem de variação dos valores de microdureza foi mais estreita (90 μm abaixo da superfície retificada, enquanto que para o rebolo convencional na mesma condição, a margem foi de 150 μm).

Na Fig. 4. 5 (a) e (b) são apresentados os gráficos com os perfis de microdureza das amostras retificadas com o fluido de corte semissintético e rebolos de óxidos de alumínio monocristalina e alumínio branca convencional, respectivamente.

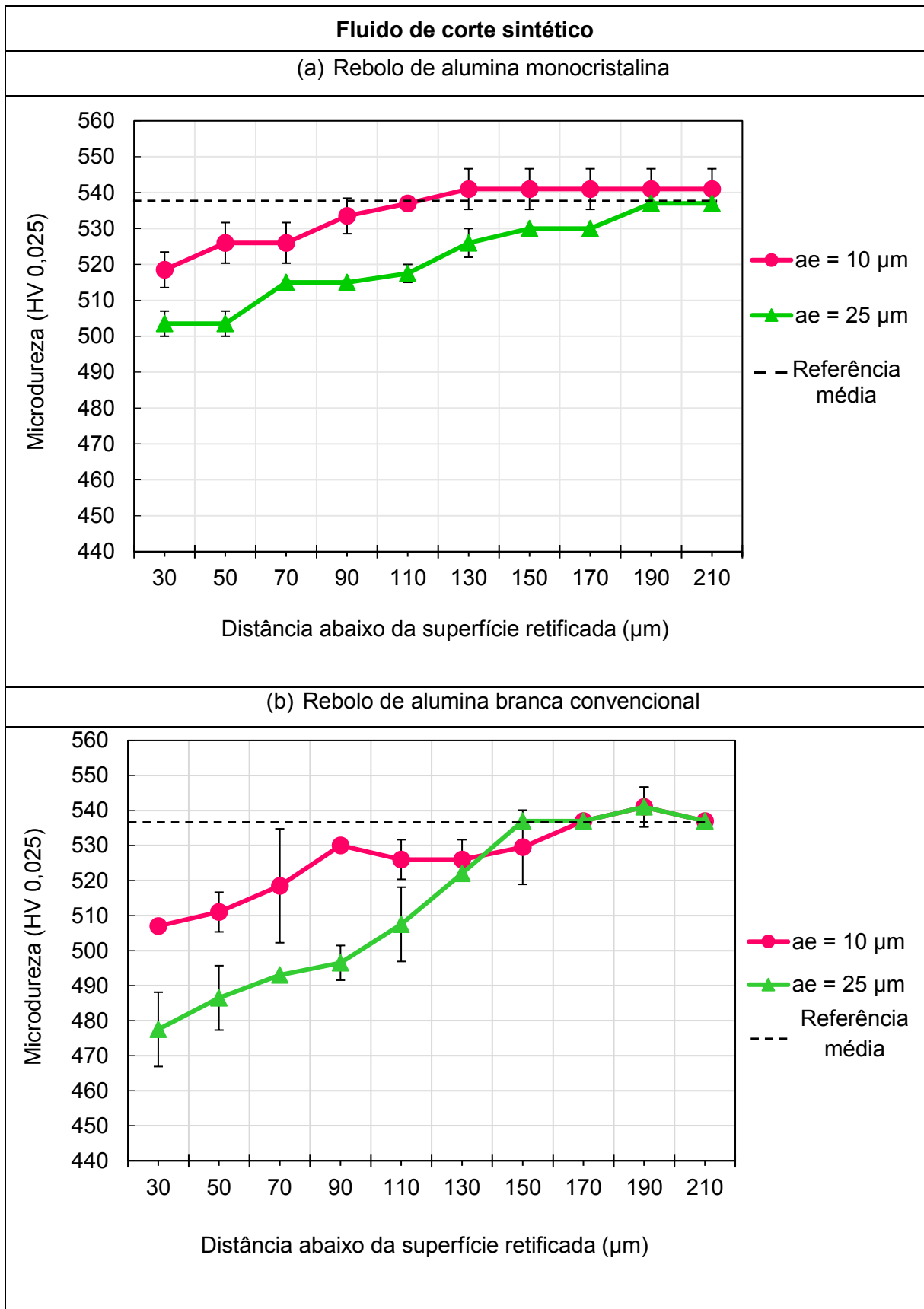


Figura 4. 4 - Valores de microdureza abaixo da superfície do aço inoxidável martensítico VP420 após a retificação com rebolos de (a) alumina monocristalina e (b) alumina branca convencional, com fluido de corte sintético.

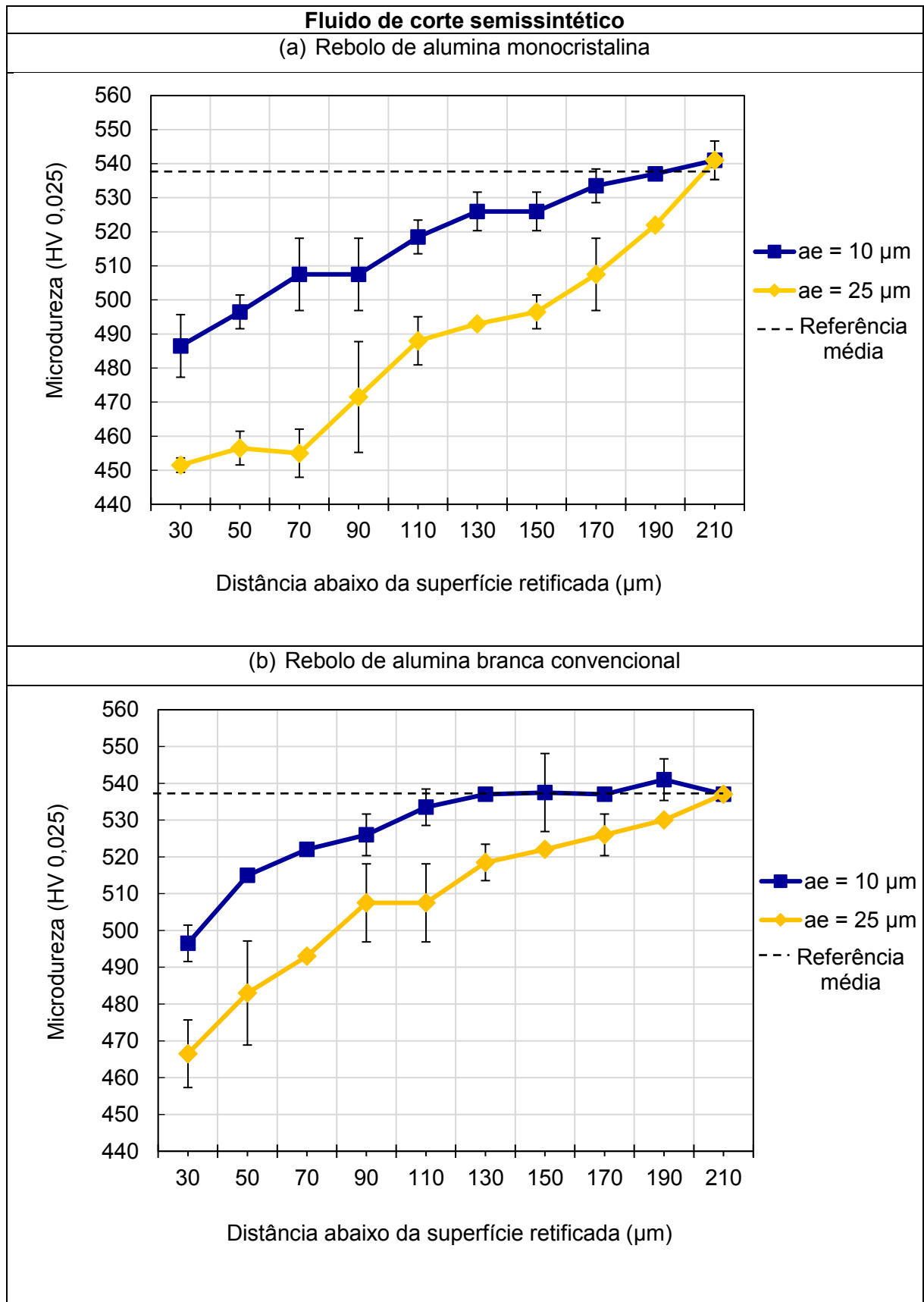


Figura 4. 5 - Valores de microdureza abaixo da superfície do aço inoxidável martensítico VP420 após a retificação com rebolos de a) alumina monocristalina e (b) alumina branca convencional, com fluido de corte semissintético.

Ao analisar a influência da penetração de trabalho nos resultados de microdureza pode-se observar que as amostras retificadas com a maior penetração de trabalho, $a_e = 25 \mu\text{m}$, Fig. 4. 4 (a) e (b) e 4. 5 (a) e (b), foram aquelas que apresentaram as maiores evidências de danos térmicos em virtude da maior queda nos valores de microdureza em relação à referência média (537 HV), independente do fluido de corte e do rebolo empregados. Esse fenômeno foi também observado por Fathallah et al. (2009) ao retificarem o aço endurecido AISI D2 e, de acordo com os autores, a queda dos valores de microdureza aumenta com o aumento da penetração de trabalho devido à ocorrência de um maior encruamento na zona de corte resultante das elevadas temperaturas desenvolvidas na região. É importante destacar que uma característica peculiar dos aços inoxidáveis é a maior tendência de revenimento que aços que não são inoxidáveis, o que colabora ainda mais para alteração na microdureza e estrutura durante a retificação.

Ainda em relação ao parâmetro penetração de trabalho, o incremento dele durante a retificação aumenta o comprimento de contato entre rebolo e abrasivo, consequentemente o número de partículas ativas em contato com a peça é maior, o que gera um aumento nos esforços de corte e que resultam em maiores temperaturas desenvolvidas na região. Dessa forma, o revenimento gerado a partir da superfície retificada é maior, e por estar sendo utilizado um rebolo cerâmico convencional, como é o caso destes empregados neste trabalho, logo maior quantidade de calor será direcionada para a peça. Com isso, haverá um amolecimento de material na superfície e próxima dela, assim reduzindo a microdureza, o que caracteriza um dano térmico (KLOCKE, 2009).

Um comportamento semelhante aos resultados deste trabalho foi constatado por Turnbull et al. (2011) ao realizarem as medições de microdureza em amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304 que foram retificadas com um rebolo de alumina branca convencional com dois valores de penetração de trabalho ($20 \mu\text{m}$ e $30 \mu\text{m}$). Os autores informaram que, em regiões próximas à superfície retificada, os valores de microdureza foram comparativamente mais baixos ($\pm 102 \text{ HV}$) que aqueles medidos a $500 \mu\text{m}$ a partir da superfície usinada ($\pm 305,9 \text{ HV}$), região esta que não é comum sofrer influência do processo do processo de retificação.

Em termos da influência do tipo de fluido de corte, pode-se afirmar que as amostras retificadas com o fluido de corte sintético, Fig. 4. 4 (a) e (b), foram aquelas que resultaram na menor variação de microdureza abaixo da superfície, independentemente da penetração de trabalho e do rebolo empregados, em comparação com os resultados obtidos para as amostras retificadas na presença do fluido de corte semissintético, Fig. 4. 5 (a) e (b), nas mesmas condições de corte empregadas. Esta diferença de desempenho entre os dois tipos de fluidos de corte pode ser atribuída às propriedades deles. Como o fluido sintético possui

uma menor viscosidade que o fluido semissintético, teoricamente ele apresenta uma melhor capacidade de refrigeração (YIN; MARINESCU, 2013). Uma condição de refrigeração da zona de corte eficiente reduz a temperatura de corte e riscos dos danos de origem térmica nas peças, por exemplo, fazendo que a variação nos valores de microdureza abaixo da superfície seja mínima ou nula, com relação à dureza média de referência do material. Ainda de acordo com YIN e MARINESCU (2013) o fluido sintético apresenta uma melhor capacidade de remoção de cavacos que se alojam nos poros dos rebolos, o que é refletido diretamente na redução dos esforços de corte e, conseqüentemente, nas temperaturas desenvolvidas na zona de corte, proporcionando menores danos térmicos no material.

Quanto a análise da influência do tipo de rebolo, o rebolo de alumina monocristalina, em comparação com o rebolo convencional, apresenta partículas mais friáveis, ou seja, partículas que, ao sofrerem fratura ao longo do processo de retificação, geram novas arestas afiadas e que, teoricamente, resultaram em processo de remoção de cavaco mais eficiente. Dessa forma, os esforços mecânicos gerados sobre a superfície do material são menores; conseqüentemente, as temperaturas desenvolvidas na zona de corte são mais brandas, o que reduz a geração de danos térmicos nas amostras.

Entretanto, ao alterar o tipo de fluido de corte empregado, notou-se um comportamento inverso quando utilizou o fluido semissintético em relação ao sintético. A retificação com combinação de fluido semissintético com rebolo monocristalina resultaram em amostras com maior variação na microdureza, ela se estendeu até 210 μm abaixo da superfície após a usinagem com a penetração a_e de 25 μm , Fig. 4. 5 (a). Já as amostras que foram retificadas com o rebolo convencional e com o mesmo fluido de corte semissintético, Fig. 4. 5 (b), apresentaram menores danos térmicos, sendo que na condição menos severa ($a_e = 10 \mu\text{m}$), a variação na microdureza foi estendeu-se até 110 μm , ou seja, menor volume afetado. E a combinação do rebolo com o fluido de corte também exerceu influência na extensão da variação da dureza durante a usinagem.

A fim de facilitar as comparações entre os resultados obtidos para a microdureza após a retificação nas diferentes condições de corte empregados neste trabalho, os resultados das Figuras 4. 4 (a) e (b) e 4. 5 (a) e (b) foram agrupados em um único gráfico, que é apresentado na Fig. 4. 6. E para auxiliar na avaliação do percentual de variação entre uma condição e outra, na Tabela 4. 4 são apresentados os valores percentuais de redução máxima na dureza das amostras, para as condições de corte empregadas neste trabalho.

Por meio desta figura pode-se constatar que, de forma geral, as menores variações de microdureza foram registrados ao empregar o fluido sintético com rebolo de alumina monocristalina na condição mais branda, $a_e = 10 \mu\text{m}$ (- 3,17 %), enquanto que as maiores foram obtidas ao utilizar o fluido de corte semissintético com o mesmo rebolo na condição

mais severa de retificação, $a_e = 25 \mu\text{m}$ (- 16,20 %). A segunda maior variação na microdureza foi observada ao utilizar o fluido semissintético na condição mais severa de usinagem e rebolo de alumina convencional (- 13, 41 %). Por estas comparações é possível então inferir que a eficiência da combinação do rebolo com o fluido irá depender da penetração de trabalho a ser empregada.

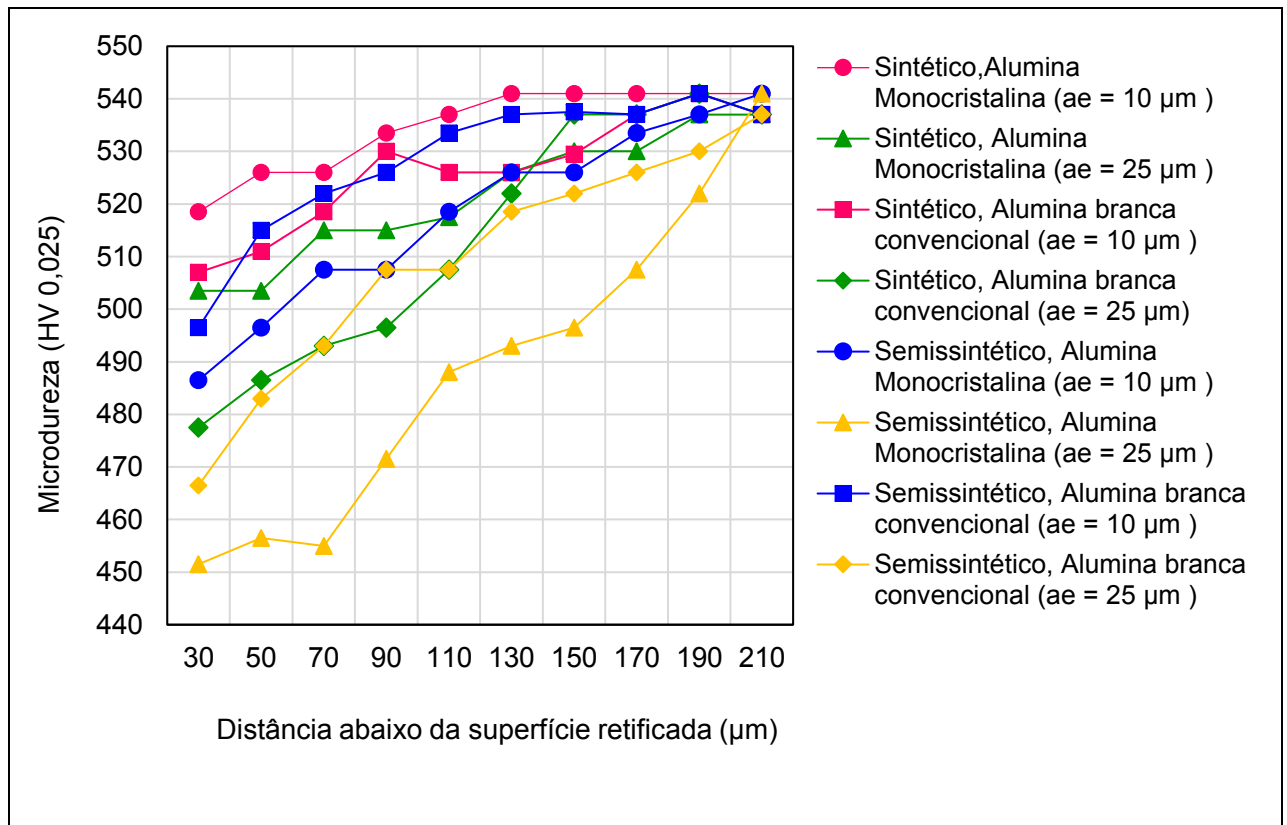


Figura 4. 6 - Perfis de microdureza do aço VP 420 após a retificação em diferentes condições de retificação.

Tabela 4. 4 - Reduções percentuais máximas nos valores de microdureza Vickers em relação à referência média.

Tipo de abrasivo do rebolo	Atmosfera de lubrificação			
	Sintético		Semissintético	
	a_e (10 μm)	a_e (25 μm)	a_e (10 μm)	a_e (25 μm)
<i>Monocristalina</i>	- 3,17 %	- 6,89 %	- 9,68 %	- 16,20 %
<i>Convencional</i>	- 5,59 %	- 11,55 %	- 7,82 %	- 13,41 %

Para certificar-se estatisticamente da influência do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte nos valores de microdureza, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) através do software Excel 2016 a fim de se obter o p-valor e avaliar se há significância estatística de tais fatores nos valores de microdureza e que são apresentados na Tabela 4. 5. Desta tabela é possível observar que tanto o tipo de abrasivo do rebolo e o fluido de corte influenciam nos resultados, já que os p-valores obtidos são inferiores ao valor de $\alpha = 0,05$, para uma confiabilidade de 95 %. E para facilitar a visualização desta influência, os resultados foram plotados na Fig. 4. 7, em que é mostrada uma relação entre a média dos valores de microdureza e o tipo de abrasivo e fluido de corte. Desta figura foi possível observar que o fluido de corte foi ainda mais decisivo nos valores obtidos do que o tipo de abrasivo do rebolo em termos de variação na microdureza.

Tabela 4. 5 - Valores de p-valor obtidos após a análise de variância (ANOVA) para os valores de microdureza Vickers em função do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte.

	p-valor	
	Tipo de abrasivo do rebolo	Atmosfera de lubrificação
Microdureza (HV)	0,04982	0,02768

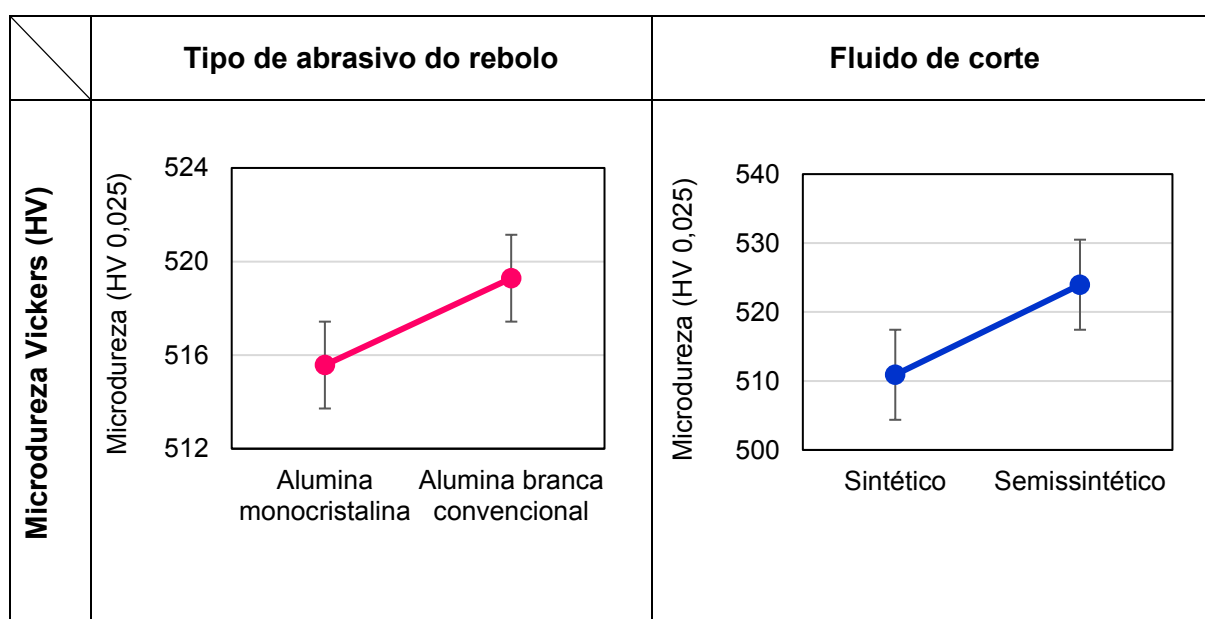


Figura 4. 7 - Influência estatística do tipo de abrasivo do rebolo e da atmosfera de lubrificação nos valores de microdureza do aço VP 420 após a retificação em diferentes condições de corte.

4.3 Imagens das superfícies retificadas

Para uma análise mais aprofundada acerca da qualidade superficial das amostras retificadas do aço inoxidável martensítico VP420, foram retiradas imagens delas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Nas Figuras 4. 8 (a) a (d) são apresentadas as imagens das amostras após a retificação com os rebolos de alumina monocristalina e alumina branca convencional com o fluido sintético em diferentes penetrações de trabalho. Destas figuras pode-se observar que as superfícies usinadas com este fluido em combinação com o rebolo monocristalina apresentam melhor qualidade superficial que aquelas usinadas com o rebolo de alumina convencional, independente da penetração de trabalho empregada. Nas amostras usinadas com o rebolo de alumina convencional podem ser percebidas descontinuidades nos sulcos formados pela passagem dos abrasivos do rebolo, como também trincas. De acordo com as Fig. 4. 8 (a) e (c), as superfícies retificadas apresentaram sulcos bem orientados, com pouco material aderido, comprovando assim o bom desempenho do rebolo de alumina monocristalina nas condições de corte testadas.

Além disso, para as amostras retificadas com ambos os rebolos empregados na condição mais severa ($a_e = 25 \mu\text{m}$), verificou-se que os sulcos foram mais evidentes assim como o deslocamento de material para a lateral dos riscos/sulcos provocados pela pressão do abrasivo sobre a superfície da peça durante a retificação, conforme já esperado segundo a literatura específica (MALKIN; GUO, 2008).

Fluido de corte sintético

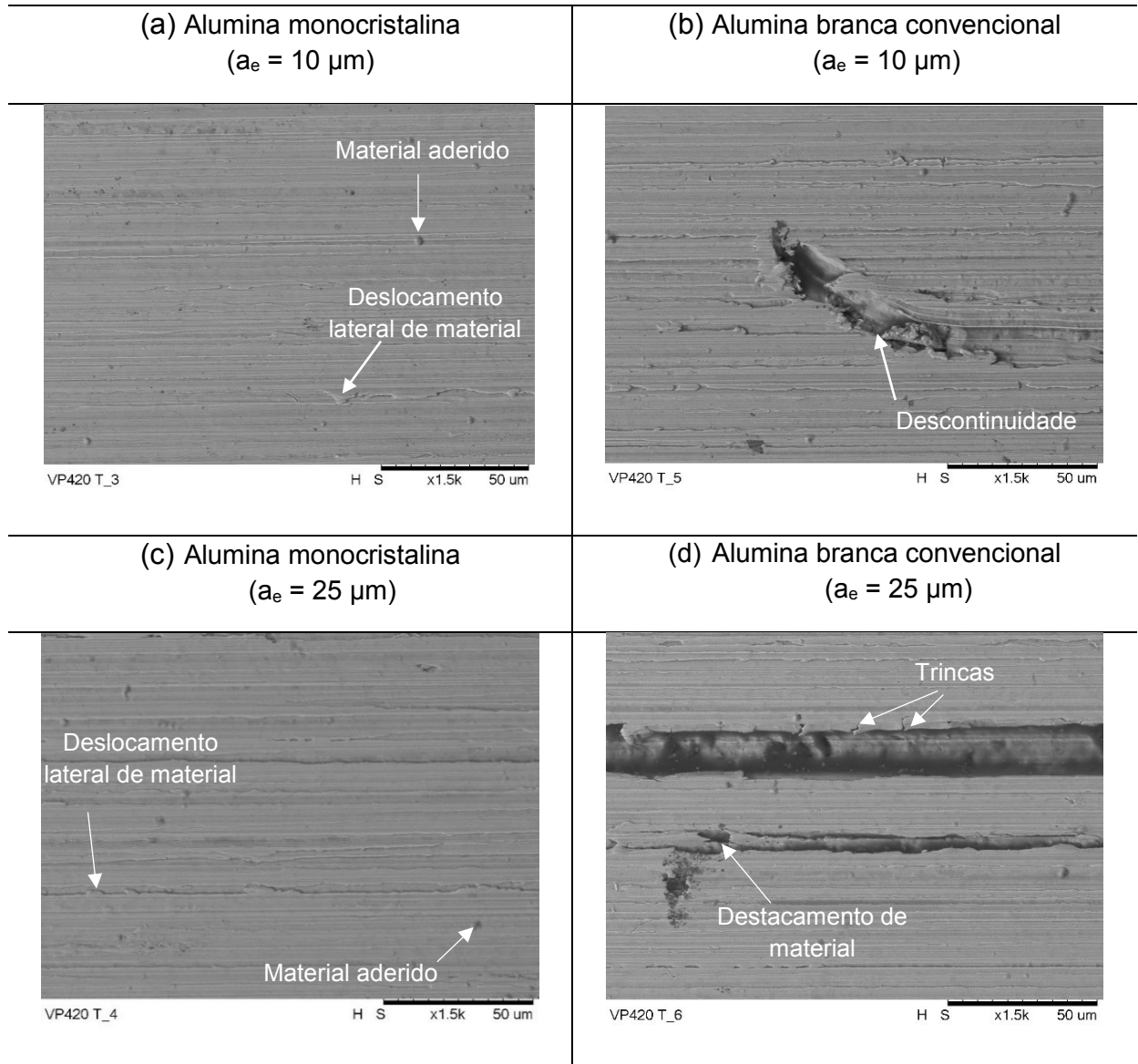


Figura 4. 8 - Imagens das superfícies via MEV do aço inoxidável martensítico VP420 após a retificação com diferentes rebolos e com o fluido sintético.

Fredj et al. (2006), ao realizarem ensaios de retificação do aço inoxidável austenítico AISI 304 com rebolo de alumina e fluido de corte sintético, também relataram a presença de deslocamento lateral de material, sulcos pronunciados e algumas trincas de origem térmica. Em outro trabalho conduzido por Manimaran et al. (2015) em retificação do aço AISI D3 (empregado na fabricação de moldes e matrizes), os autores relataram deslocamento de material de material entre as marcas de retificação na superfície da peça bem como queima

de retífica ao empregaram combinação entre fluido de corte sintético e rebolo de alumina convencional. Em outra pesquisa mais recente em retificação com rebolo de alumina convencional e fluido de corte sintético realizada por Zhou et al. (2016), os autores também notaram presença de sulcos profundos, queima e material destacado em amostras do aço inoxidável austenítico AISI 304L.

Nas Figuras 4. 9 (a) a (d) são apresentadas as imagens das amostras de aço VP420 retificadas com os rebolos de alumina monocristalina e branca convencional com penetrações de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ e $a_e = 25 \mu\text{m}$ e com o fluido de corte semissintético. Observa-se que para este fluido, ocorreu uma tendência diferente daquela quando se empregou o fluido sintético quanto ao desempenho dos rebolos. O rebolo de alumina monocristalina mostrou-se inferior ao rebolo de alumina branca convencional já que há mais marcas e eventos nas superfícies, como descontinuidade do risco deixado pelo abrasivo, maior densidade de material aderido, Fig. 4. 9 (a). Sob a condição mais severa de retificação ($a_e = 25 \mu\text{m}$), observou-se que houve destacamento de material da peça em mais de uma região, além do fato de os sulcos formados nessa condição serem ainda mais pronunciados, Fig. 4. 9 (c).

Fluido de corte semissintético

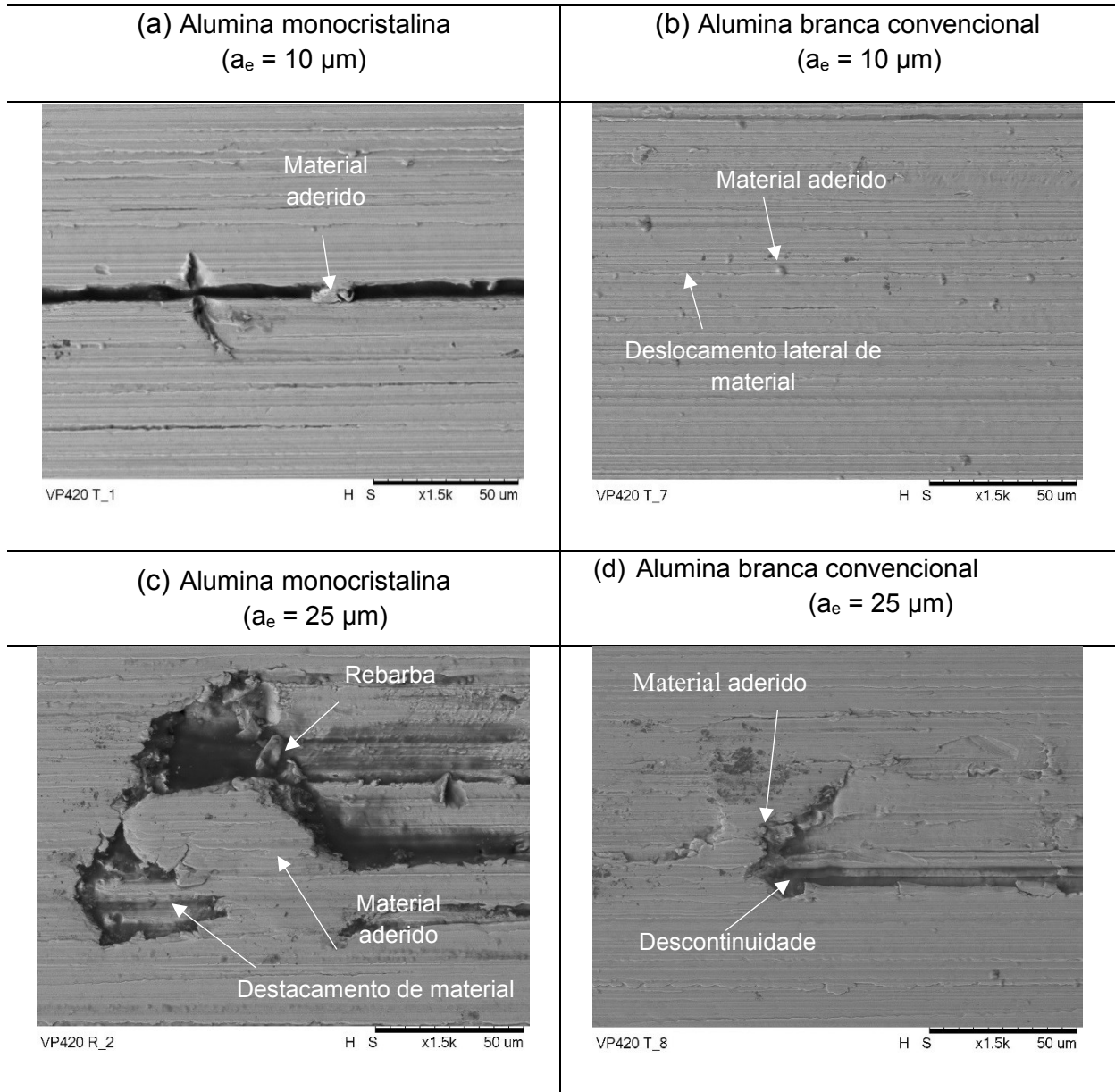


Figura 4. 9 - Imagens das superfícies (MEV) de aço inoxidável martensítico VP420 após a retificação com o fluido de corte semissintético VASCO 7000 em diferentes penetrações de trabalho.

A presença de material aderido e de destacamento de material são evidências de que o processo de formação de cavaco não foi eficiente e que pode ter ocorrido amolecimento de material da superfície da peça por causa das elevadas temperaturas desenvolvidas na zona de corte.

Da Fig. 4. 9 (b), em que foi realizada a usinagem na condição mais branda ($a_e = 10 \mu\text{m}$), observa-se que as partículas de alumina branca convencional proporcionaram sulcos orientados. Além disso, constatou-se a presença de material aderido nas superfícies usinadas. Já na Fig. 4. 9 (d) os sulcos gerados foram mais profundos e houve o destacamento de material, conforme já esperado, tendo em vista ser esta uma condição na qual a penetração de trabalho é a maior ($a_e = 25 \mu\text{m}$). Entretanto, nota-se que a densidade de material destacado proporcionado pelo rebolo de alumina branca convencional foi comparativamente menor em relação ao rebolo monocristalina, sob as mesmas condições de corte e na presença do fluido de corte semissintético. Portanto, a retificação com a combinação do rebolo de alumina branca convencional com o fluido de corte semissintético mostrou-se mais eficiente no sentido de proporcionar um melhor acabamento nas superfícies das peças.

Manimaran e Kumar (2013) também observaram trincas de origem térmica e destacamento de material nas superfícies das peças de aço inoxidável austenítico AISI 316 após a retificação com um rebolo *Seeded-Gel* com fluido de corte semissintético, semelhante aos eventos observados neste presente trabalho.

De uma forma genérica, a partir das Fig. 4. 8 e 4. 9, as superfícies que apresentaram uma qualidade superficial melhor foram aquelas obtidas após a retificação com o rebolo monocristalina na presença do fluido de corte sintético, independente da penetração de trabalho empregada e também naquelas obtidas com o rebolo convencional na presença do fluido de corte semissintético e com a menor penetração de trabalho, $a_e = 10 \mu\text{m}$.

A fim de facilitar a análise das superfícies e de detectar a ocorrência de queima de retifica, nas Figuras 4. 10 (a) a (g) são apresentadas fotos das superfícies das amostras do aço VP420 após o processo de retificação em diferentes condições de corte. Nota-se que aquelas amostras que foram retificadas com o fluido semissintético em geral apresentaram mais marcas que são conhecidas como queima de retifica, em especial ao empregar a maior penetração de trabalho, $a_e = 25 \mu\text{m}$, Fig. 4. 10 (g) e (h). Em relação ao rebolo, as amostras com menor incidência de queima de retifica foram aquelas retificadas com o rebolo monocristalina na presença do fluido sintético, Fig. 4. 10 (a) e (c). Todavia, ao retificar na presença desse mesmo rebolo com o fluido semissintético notou-se superfícies com maior incidência de marcas de queima de retifica, Fig. 4. 10 (e) e (g).

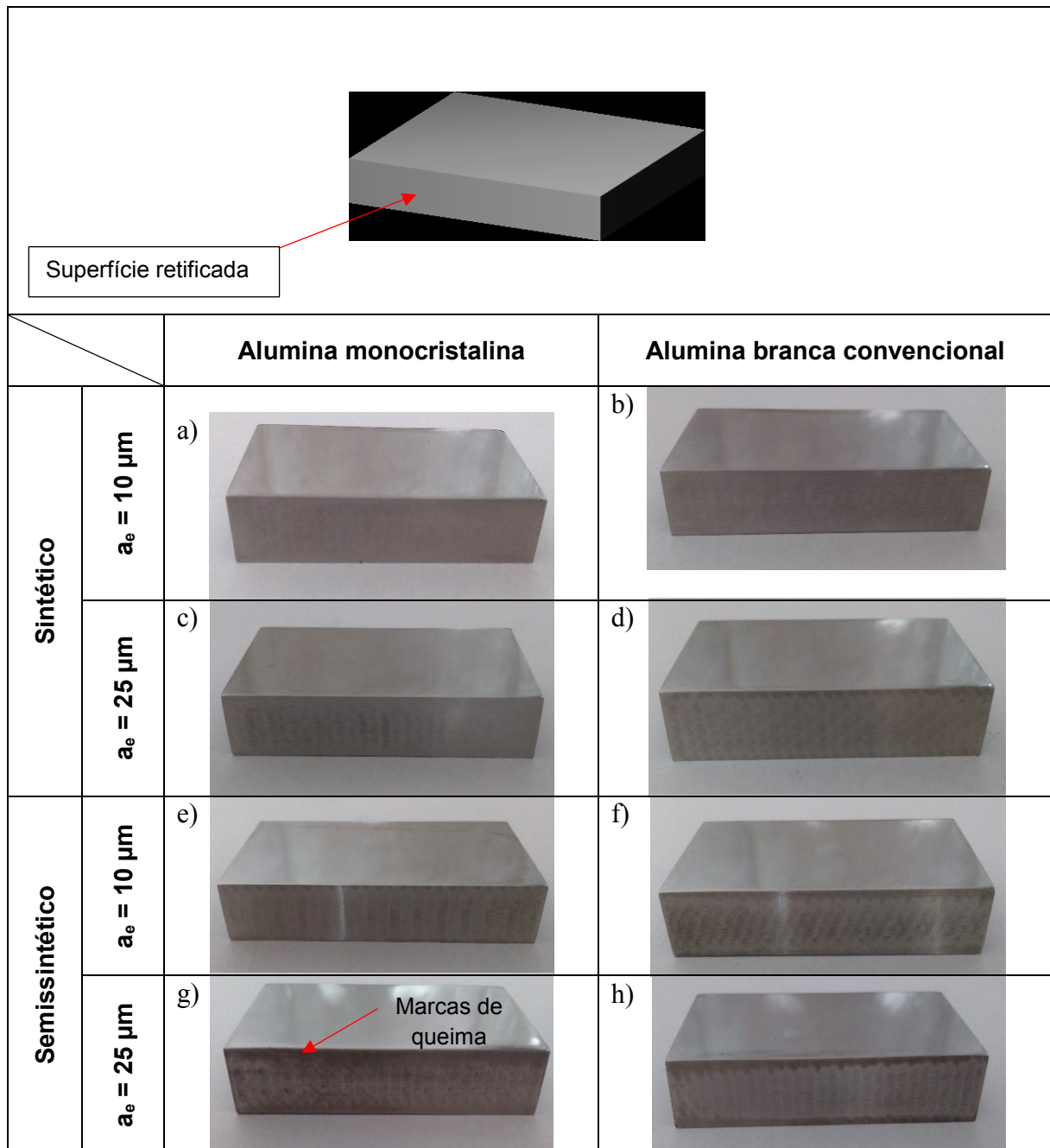


Figura 4. 10 - Imagens das superfícies retificadas do aço VP420 nas diversas condições de corte empregadas.

4.4 Potência de retificação

Nesta seção são apresentados os resultados da potência adquiridas ao longo dos ensaios de retificação do aço inoxidável martensítico VP420, na presença do fluido sintético com rebolo de alumina monocristalina, Fig. 4. 11 (a) e alumina branca convencional Fig. 4. 11 (b), bem como as curvas referentes aos ensaios realizados na presença do fluido

semissintético com rebolo de alumina monocristalina, Fig. 4. 12 (a) e alumina branca convencional 4. 12 (b).

A partir das curvas de potência apresentadas nas Fig. 4. 11 (a) e (b) e 4. 12 (a) e (b) pode-se observar que o aumento no valor da penetração de trabalho resultou em um aumento na energia consumida pela máquina retificadora, como esperado, independentemente do tipo de rebolo e fluido de corte testados. Os valores de potência máxima (representada através dos picos nas curvas) foram significativamente maiores nos ensaios realizados à penetração de trabalho $a_e = 25 \mu\text{m}$.

Segundo Klocke (2009) o aumento no valor da penetração de trabalho resulta em maiores esforços para remover material da peça já que a área de contato entre o rebolo e a peça é maior, logo o gradiente de temperatura desenvolvido na superfície da peça também aumenta e, consequentemente, a energia consumida pela máquina retificadora é maior.

Em um estudo desenvolvido por Kwak et al. (2005), os autores monitoraram a potência durante a retificação do aço endurecido SCM440 (SAE 4140) e constataram que o aumento na penetração de trabalho implicou no aumento da potência pela máquina retificadora e atribui isso aos maiores esforços de corte envolvidos na condição de corte mais severa.

Em termos da influência do fluido de corte, a partir das Fig. 4. 11 (a) e (b) e 4. 12 (a) e (b) pode-se afirmar que os ensaios realizados na presença do fluido de corte semissintético resultaram em valores de potência maiores em comparação com os resultados alcançados nos ensaios conduzidos na presença do fluido sintético. Este fenômeno está diretamente relacionado com propriedades de cada fluido, em especial com sua viscosidade. Como o fluido sintético possui menor viscosidade que o fluido semissintético, ele teoricamente tende a proporcionar uma melhor lubrificação da zona de corte ao espalhar melhor pela região de corte, gerando bolsões de fluido. Quando a função lubrificação se sobressai, o rebolo tende a ser mais estável térmica e quimicamente, o que favorece as condições tribológicas ideais para a formação de cavaco em relação a uma condição em que a lubrificação não é predominante. É importante ressaltar que o filme lubrificante formado na interface rebolo-peça contribui para a redução do atrito. Com isso, os esforços de corte são reduzidos e, consequentemente, a energia consumida pela máquina para realizar a remoção de material da peça é menor (YIN; MARINESCU, 2013). E esta é uma das explicações para o fato de os valores de potência obtidos nos ensaios realizados na presença do fluido sintético terem sido menores que os obtidos ao usar com o fluido semissintético, Fig. 4. 11 (a) e (b) e 4. 12 (a) e (b), nas mesmas condições de operação e na presença dos dois tipos de rebolos abrasivos empregados.

Quando a análise é refinada para a influência do tipo de abrasivo do rebolo empregado, observa-se que a usinagem com o rebolo monocristalina na presença do fluido de corte

sintético, Fig. 4. 11 (a), proporcionou menores valores de potência, em relação aos valores obtidos, nas mesmas condições, com o rebolo convencional, Fig. 4. 11 (b). Essa diferença de desempenho pode ser explicada com base no fato de que o rebolo monocristalina possui partículas abrasivas mais friáveis em relação aos do rebolo convencional; nesse sentido, ao se fraturarem ao longo da retificação, as partículas de alumina monocristalina geram arestas mais pontiagudas (SAINT GOBAIN, 2017). Com isso, a área real de contato entre essas partículas e a superfície das amostras é efetivamente menor, o que resulta em menores esforços de corte e, conseqüentemente, uma menor potência da máquina retificadora. Portanto, os valores de potência nos ensaios realizados com rebolo monocristalina, Fig. 4. 11 (a), são menores em comparação com os obtidos nas mesmas condições de operação para o rebolo convencional, Fig. 4. 11 (b). Todavia, quando se empregou um fluido de corte semissintético, o comportamento observado foi o oposto: a combinação entre fluido sintético e rebolo de alumina branca convencional, Fig. 4. 12 (b) proporcionou uma redução no consumo de energia exigido para a realização da remoção de material, em comparação com a condição na qual é empregado o rebolo de alumina monocristalina, Fig. 4. 12 (a). Novamente, a combinação entre as propriedades do fluido semissintético com o rebolo de alumina branca convencional proporcionou resultados superiores aos alcançados quando o mesmo fluido foi utilizado em combinação com o rebolo de alumina monocristalina.

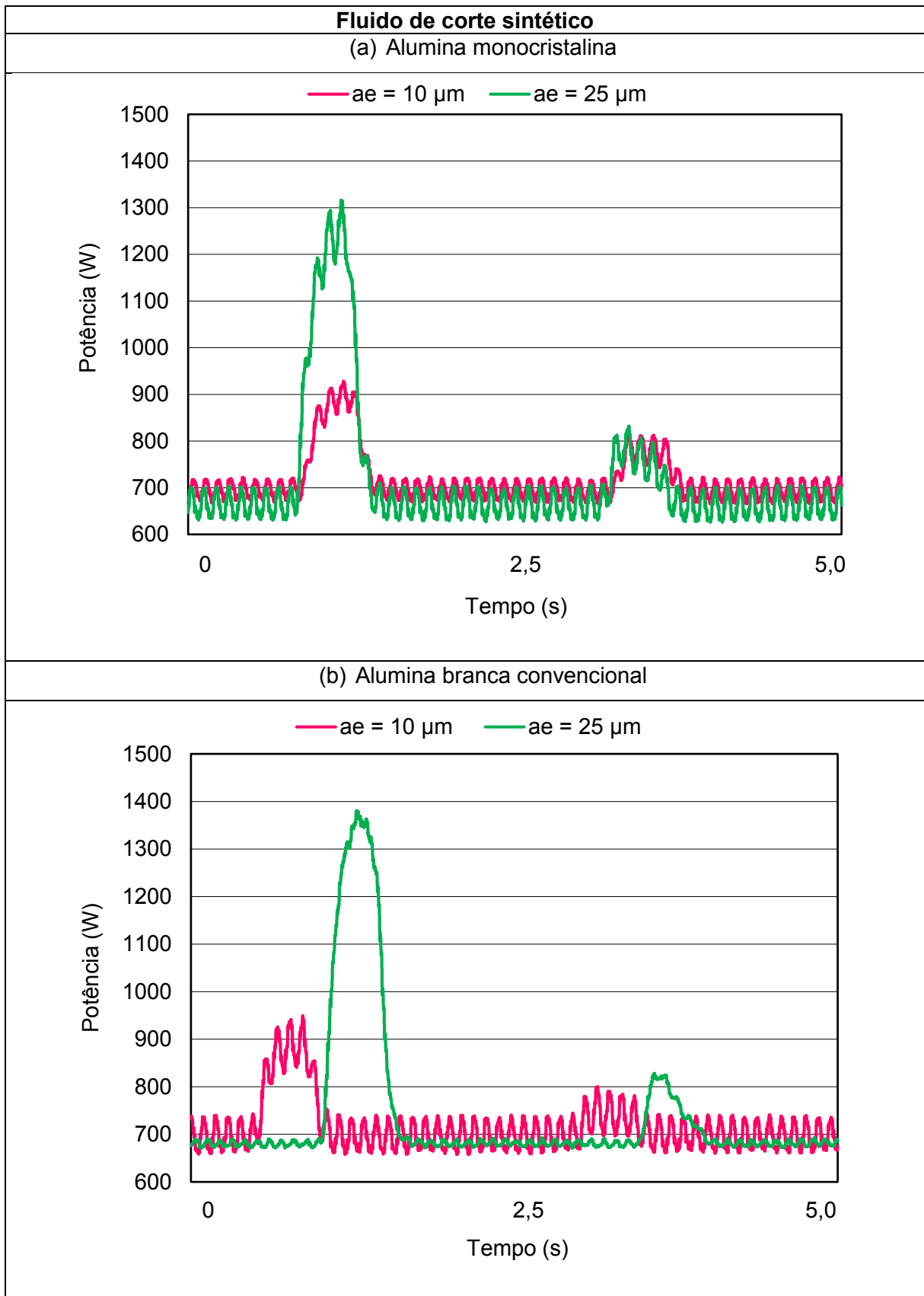


Figura 4. 11 - Curvas de potência durante a retificação do aço inoxidável martensítico sob com o fluido de corte sintético, diferentes penetrações de trabalho e com diferentes rebolos: (a) alumina monocristalina e (b) alumina branca convencional.

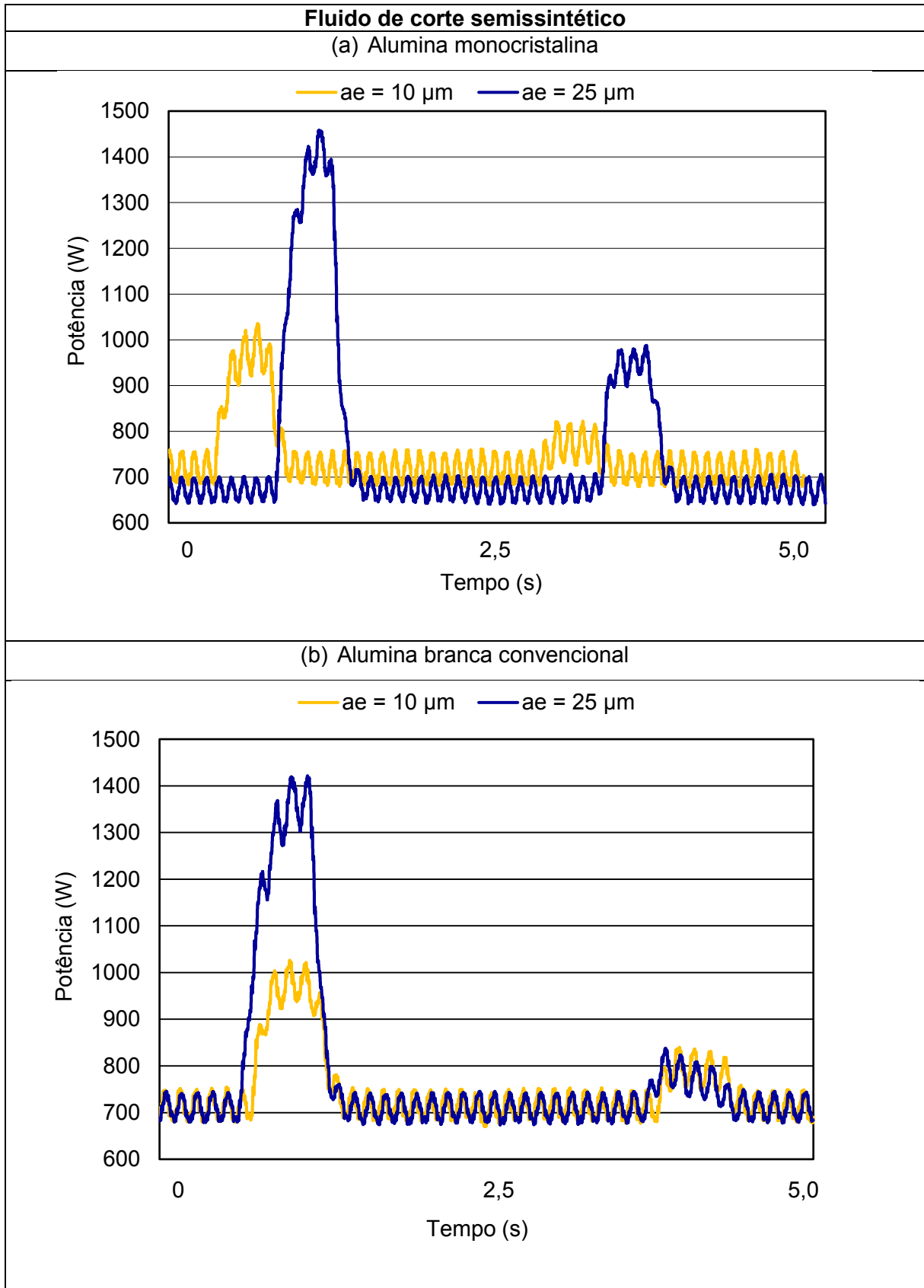


Figura 4. 12 - Curvas de potência durante a retificação do aço inoxidável martensítico sob com o fluido de corte sintético, diferentes penetrações de trabalho e com diferentes rebolos: (a) alumina monocristalina e (b) alumina branca convencional.

Na Fig. 4. 13 são apresentados os valores máximos de potência de retificação com diferentes fluidos de corte sintético e semissintético e rebolos de alumina monocristalina e alumina branca convencional em função da penetração de trabalho ($a_e = 10 \mu\text{m}$ e $a_e = 25 \mu\text{m}$). A partir dos dados apresentados é possível observar que a retificação com a combinação entre fluido de corte sintético e o rebolo monocristalina na condição de corte mais branda, penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ foi obtido o menor valor de potência máxima de retificação $[926,65 \pm 0,33] \text{ W}$ dentre todas as condições testadas. Em contrapartida, nos ensaios em que foi mantido este rebolo, mas alterando o tipo de fluido, no caso o semissintético fluido e empregada a maior penetração de trabalho, $a_e = 25 \mu\text{m}$, foi registrado o maior valor de potência máxima dos ensaios de retificação, $[1452,17 \pm 0,48] \text{ W}$.

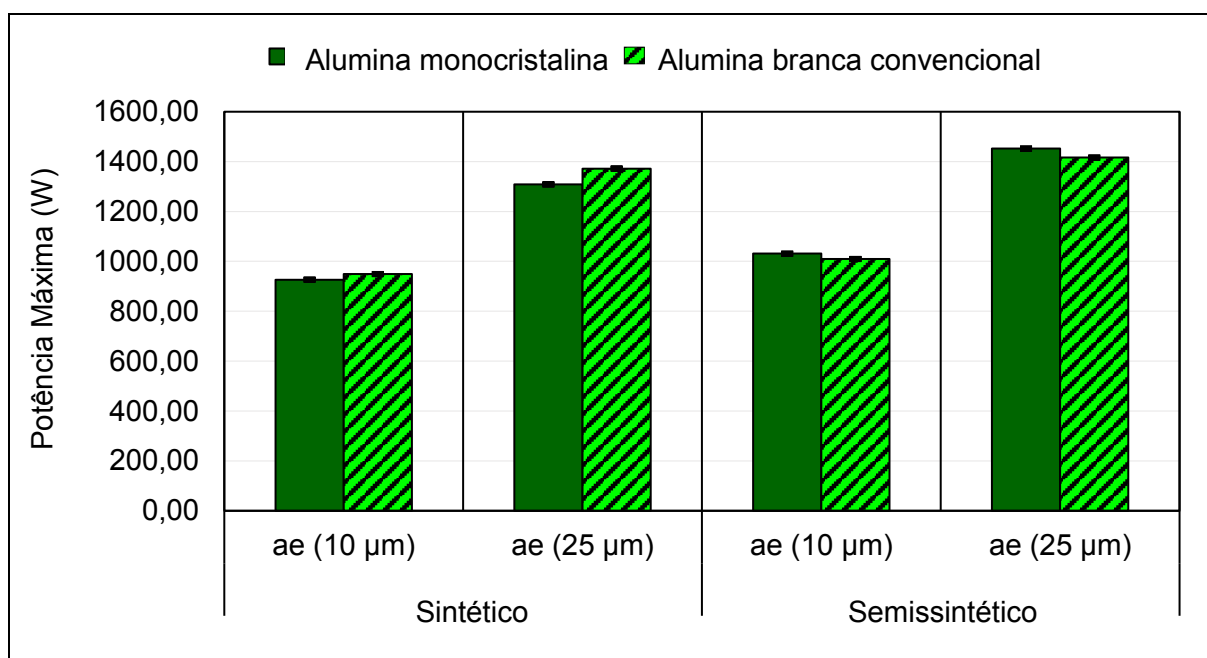


Figura 4. 13 - Potência máxima de retificação do aço inoxidável martensítico VP420 nas diversas condições de corte empregadas.

Para certificar-se estatisticamente do efeito do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte sobre os valores de potência máxima, foi efetuada uma análise de variância (ANOVA) através do software *Excel 2016* a fim de se obter o p-valor e determinar se há influência dos fatores (condições de corte) nos resultados de potência. Assim, observou-se que, para uma confiabilidade de 95 % os p-valores obtidos foram inferiores ao valor de $\alpha = 0,05$, Tab. 4. 6. Dessa forma, pode-se afirmar que tanto o tipo de abrasivo do rebolo quanto o fluido de corte exercem forte influência nos valores de potência monitorados, sendo que o efeito do fluido de corte foi o mais significativo, conforme pode ser observado na Fig. 4. 14.

Tabela 4. 6 - Análise de variância (ANOVA) para a potência máxima em função do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte, após a retificação das amostras de aço inoxidável martensítico VP420.

	p-valor	
	Tipo de abrasivo do rebolo	Atmosfera de lubrificação
Potência máxima (W)	0,03567	0,02679

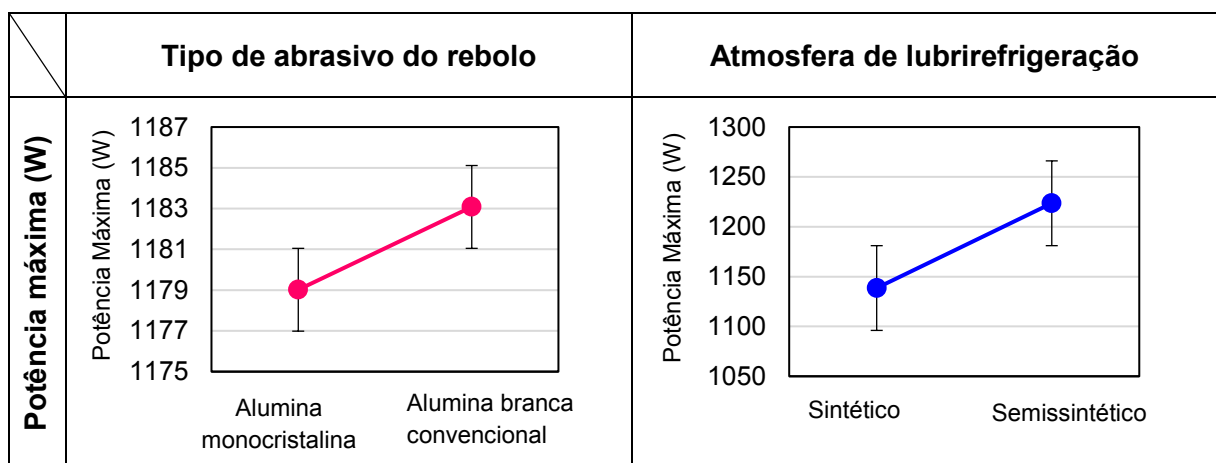


Figura 4. 14 - Influência do tipo de abrasivo do rebolo e do fluido de corte na potência máxima de retificação do aço VP420.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Em conformidade com os resultados experimentais de retificação plana tangencial do aço inoxidável martensítico VP420 em diferentes condições operacionais, as seguintes conclusões podem ser obtidas:

- Os parâmetros de rugosidade superficial R_a , R_t e R_z aumentaram com a penetração de trabalho, independentemente do tipo de rebolo e fluido de corte testados;
- A condição de retificação com o fluido de corte semissintético combinado com o rebolo de alumina monocristalina e maior penetração de trabalho de $a_e = 25 \mu\text{m}$ resultou nos maiores valores de rugosidade, independentemente do tipo de parâmetro de rugosidade avaliado;
- Em termos de microdureza, a menor variação deste parâmetro em foi observada nas amostras retificadas com a combinação entre o rebolo monocristalina, fluido de corte sintético e menor penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$. Todavia, as amostras retificadas com este rebolo e na presença do fluido semissintético apresentaram a maior variação de microdureza;
- De acordo com as imagens das superfícies analisadas via MEV, as melhores qualidade e textura foram observadas nas amostras que foram retificadas com o rebolo monocristalina e o fluido de corte sintético, independente da penetração de trabalho empregada, como também nas amostras retificadas com o rebolo de alumina convencional e fluido de corte semissintético ao empregar a menor penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$. Nessas condições, não foram observadas a presença de trincas e queima de retifica;
- As superfícies produzidas após a retificação com o rebolo de alumina monocristalina na presença do fluido de corte semissintético apresentaram qualidade inferior, nas quais foi possível observar a presença de rebarbas, destacamento de material da peça, trincas de origem térmica e queima de retifica;
- Em termos de potência, os menores valores foram registrados após a retificação com do rebolo monocristalina, fluido de corte sintético e menor penetração de trabalho

$a_e = 10 \mu\text{m}$. Contudo, os ensaios realizados com este mesmo rebolo, mas empregando o fluido de corte semissintético, resultaram nos maiores valores de potência;

- Em termos da influência do fluido de corte na potência, pode-se inferir que o fluido de corte semissintético exigiu uma maior potência da máquina em comparação com o fluido sintético, nas mesmas condições de operação, para as duas penetrações de trabalho e rebolos empregados.
- A potência de retificação aumentou com a penetração de trabalho;
- A combinação entre o rebolo de alumina monocristalina e o fluido de corte sintético em geral resultou em um desempenho superior na retificação plana tangencial do aço inoxidável martensítico VP420 por ter proporcionado boas integridades superficial e subsuperficial, em especial na usinagem com menor penetração de trabalho ($a_e = 10 \mu\text{m}$). Em contrapartida, este rebolo apresentou desempenho inferior ao rebolo de alumina convencional ao ser empregado na retificação com o fluido de corte semissintético na condição mais severa de retificação ($a_e = 25 \mu\text{m}$);
- A partir da análise de variância (ANOVA) foi possível verificar que tanto o tipo de abrasivo do rebolo quanto o tipo de fluido de corte influenciaram nos resultados de rugosidade, microdureza e potência, sendo que a influência exercida pelo fluido de corte sobressaiu-se.
- Com base nos ensaios experimentais e da análise dos resultados de rugosidade, microdureza, potência e imagens das superfícies retificadas, pode-se inferir que as condições de operacionais mais adequadas para a retificação plana do aço inoxidável martensítico VP420 são: rebolo alumina monocristalina, fluido de corte sintético e menor penetração de trabalho, $a_e = 10 \mu\text{m}$.

SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS

A fim de dar prosseguimento a esse estudo e aprofundar os conhecimentos acerca da retificação do aço inoxidável martensítico VP420, são propostos a seguir alguns temas para estudo:

- Estudar o efeito da geometria de diferentes bocais e a técnica de aplicação de fluido na eficiência do processo de lubrificação das amostras ao longo da retificação plana;
- Estudar o efeito do uso da técnica da mínima quantidade de lubrificação (MQL) com e sem grafeno, em comparação com a técnica convencional de aplicação de fluido de corte, sobre as integridades da superfície e subsuperfície das amostras retificadas, como também avaliar o desgaste do rebolo em diferentes condições de corte.
- Realizar ensaios de retificação em amostras do mesmo aço em diferentes velocidades de corte e velocidade da peça, utilizando como parâmetros de saída a rugosidade, microdureza, tensões residuais e relação G.
- Realizar processo de retificação cilíndrica das amostras do aço VP420 com os mesmos rebolos e fluidos de corte;
- Avaliar a influência de diferentes tipos de dressadores e condições de dressagem na integridade da superfície da peça e no desgaste do rebolo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALVES, S. M.; OLIVEIRA, J. F. G. Environmental adequacy of Machining processes using Cleaner Production as strategy of environmental management production. **Production**. v. 17, p. 129-138, abr. 2007. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-65132007000100009>
- AZARHOUSHANG, B.; ZAHEDI, A. Laser conditioning and structuring of grinding tools – a review. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 5. p. 35-49, mar. 2017. <https://doi.org/10.1007/s40436-016-0167-0>
- AZIZI, A.; MOHAMADYARI, M. Modeling and analysis of grinding forces based on the single grit scratch. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 78, p. 1223-1231, mai. 2015. <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6729-z>
- BADGER, J. A.; TORRANCE, A. A. A comparison of two models to predict grinding forces from wheel surface topography. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 40, p. 1099 - 1120, jun. 2000. [https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(99\)00116-9](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(99)00116-9)
- BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; PIUBELI, B.A. **Aplicação e utilização dos fluidos de corte nos processos de retificação**. 1. ed. SP: ARTLIBER, 2004. 112p.
- BIANCHI, E. C. **Ação das condições de dressagem na retificação de precisão**. 1990. 116f. Dissertação de Mestrado – Universidade de São Paulo, São Carlos.
- BLASER SWISSLUBE. **Catálogo: Grindex 10**. NY: BLASER SWISSLUBE, mar. 2011a, 1f.
- BLASER SWISSLUBE. **Catálogo: VASCO 7000**. NY: BLASER SWISSLUBE, dez, 2011b, 2f.
- BRÜHL, S. P.; CHARADIA, R.; SANCHEZ, C.; STAIA, M. H. Wear behavior of plasma nitride AISI 420 stainless steel. **International Journal of Materials Research**. v. 99, p. 779-786, jul. 2008. <https://doi.org/10.3139/146.101692>
- CASTRO, L. N.; ANDRADE, R. B.; BIANCHI, E. C.; NETO, L. M. G. Analysis of different lubricating methods during cylindrical grinding ABNT 52100 steel grade with silicon carbide grinding wheel with resin binder. **Revista Matéria**. v. 21, p. 691 – 705, set. 2016. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0066>
- CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos**. 7. ed. ABM Associação Brasileira de Metalurgia e Metais, 2012.

COTELL, C. M.; SPRAGUE, J. A.; SMIDT JR, F. A. **ASM HANDBOOK: Surface Engineering**. 9. ed. v. 5, OH: ASM INTERNATIONAL, 2004. 2535p.

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

DA SILVA, R. B.; EZUGWU, E. O.; GUIMARÃES, C.; MARQUES, A.; FERNANDES, L. A.; GELAMO, R. V. Grinding of mould steel with graphene platelets dispersed in a vegetable-based cutting fluid. In: **STLE Annual Meeting & Exhibition**, Dallas, EUA, May. 2015.

DA SILVA, R. B.; FERREIRA, T. A.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; CANARIN, R. C. Experimental study on peripheral surface Grinding of a plastic mould VP80 – steel with Al_2O_3 abrasive wheel. In: **NINETH INTERNATIONAL CONFERENCE ON HIGH SPEED MACHINING**, 9, 2012. San Sebastian. Anais. p. 1-6.

DE MELLO. **Retificação da liga deTi-6Al-4V com fluido de corte contendo partículas de grafeno**. 2015. 95 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DE OLIVEIRA, D.; DA SILVA, R. B.; GELAMO, R. V. Influence of multilayer graphene platelet concentration dispersed in semisynthetic oil on the grinding performance of Inconel 718 alloy under various machining conditions. **Wear**. v. 426 – 427 – Parte B, p. 1371 – 1383, abr. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.wear.2019.01.114>

DIN 8589. Manufacturing Process Chip Removal – Part 11: Grinding with rotating tool. **GERMAN NATIONAL STANDARD**, 2003. 18p.

DING, W.; LINKE, B.; YEJUN, Z.; YUCAN, F.; HONGHA, S.; JIUHUA, X. Review on monolayer CBN superabrasive wheel for grinding metallic materials. **Chinese Journal of Aeronautics**. v. 30, p. 109-134, fev. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2016.07.003>

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**. 7. ed. Campinas, SP: ARTILIBER, 2010. 286p.

DOS REIS, W. P.; FONSECA, M. P. C.; SERRÃO, L. F.; CHUVAS, T. C.; OLIVEIRA, L. C., Estudo das tensões residuais geradas na usinagem do aço AISI 4340. In: **Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciência dos Materiais**, 19, 2010, Campos do Jordão – SP. Anais. p. 4780 – 4787.

DUDA, B. C. C. Caracterização de um aço inoxidável VC – 150 utilizado em indústrias produtoras de acessórios para o polo de confecções de Caruaru e Toritama. In: Congresso Brasileiro de Engenharia de Ciência dos Materiais, 22, 2016, Natal – RN, **Anais**. p. 6237 – 6246.

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: Part 1. Characterization. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 56, p. 786-797, jan. 1996. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)01892-1](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)01892-1)

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 and Manufacture**. v. 49, p. 261-272, mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.10.005>

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. SP: BLÜCHER, São Paulo - SP, 2014. 751p.

FIOCCHI, A. A. **Ciência e tecnologia da manufatura de ultraprecisão de cerâmicas avançadas: Lapidorreificação U_d de superfícies planas de zircônia tetragonal policristalina estabilizada com ítria**. 2014. 327f. Tese de Doutorado- Universidade de São Paulo – São Carlos – SP.

FREDJ, N. B.; SIDHOM, H.; BRAHAM, C. Ground surface improvement of austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling. **Surface & Coatings Technology**. v. 200, p. 4846 – 4860, jun. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2005.04.050>

GRAF, W. **Cylindrical Grinding**. 1. ed. AG: COPYRIGHT WST, 2004. 87p.

GREENE, A. **Abrasive machining processes – presentation**, 2016, capítulo 26.

IRANI, R.A.; BAUER, R.J.; WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 45, p. 1696-1705, abr. 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.03.006>

JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. **Machining with abrasives**. 1. ed. NY: SPRINGER, 2011, 439p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4419-7302-3>

KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S. R. **Manufacturing Engineering and Technology**. 6. Ed. NY: PEARSON, 2009. 1197p.

KLOCKE, F. **Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping**. 1. ed. AC: SPRINGER, 2009. 433p. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9>

KLOCKE, F.; SOO, S. L.; KARPUSCHEWSKI, B.; WEBSTER, J. A.; NOVOVIC, D.; ELFIZY, A.; AXINTE, D. A.; TONISSEN, S. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. **CIRP Annals – Manufacturing Technology**. v. 64, p. 581-604, mai. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.004>

KÖNIG, W. **Tecnologia da Fabricação – Retificação, Brunimento e Lapidação**. Tradução: de Walter Lindolfo Weingaertner, 1980.

KUMAR, P. S.; ACHARYYA, S. G.; RAO, S. V. R.; KAPOOR, K. Distinguishing effect of buffing vs. grinding, milling and turning operations on the chloride induced SCC susceptibility of 304L austenitic stainless steel. **International Journal of Materials Science & Engineering A**. v. 687, p. 193 – 199, fev. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.004>

KWAK, J. S.; SIM, S. B.; JEONG, Y. D. An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using response surface method. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 46, p. 304-312, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2017.01.079>

LI, B.; LI, C.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; JIA, D.; YANG, M.; ZHANG, N.; WU, Q.; HAN, Z.; SUN, K. Heat transfer performance of MQL grinding with different nanofluids for Ni-based alloys using vegetable oil. **Journal of Cleaner Production**. v. 154, p. 1-11, jun. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.213>

LIU, M.; ZHANG, K.; XIU, S. Mechanism investigation of hardening layer hardness uniformity based on grind-hardening process. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**. v. 88, p. 3185 – 3194, jun. 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9029-y>

MACHADO, A. R.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B.; COELHO, R. T. **Teoria da usinagem dos materiais**. 3. ed. SP: BLUCHER, 2015. 408p.

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**. 2ª ed. NY: INDUSTRIAL PRESS, 2008. 372p.

MANIMARAN, G.; KUMAR, M. P.; VENKATASAMY, R. Surface modifications in grinding AISI D3 steel using cryogenic cooling. **The Brazilian Society of Mechanical Science and Engineering**. v. 37, p. 1357 – 1363, jul. 2015. <https://doi.org/10.1007/s40430-014-0241-0>

MANIMARAN, G.; KUMAR, M. P.; VENKATASAMY, R. Influence of cryogenic cooling on surface grinding of Stainless steel 316. **Cryogenics**. v. 59, p. 76 – 83, fev. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.cryogenics.2013.11.005>

MANIMARAN, G.; KUMAR, M. P. Effect of cryogenic cooling and sol-gel alumina wheel on grinding performance of AISI 316 stainless steel. **Archives of Civil and Mechanical Engineering**. v. 13, p. 304 – 312, set. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.acme.2013.03.002>

MANOJKUMAR, K.; GHOSH, A. Assessment of cooling-lubrication and wettability characteristics of nano-engineering sunflower oil as cutting fluid and its impact on SQCL grinding performance. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 237, p. 55-64, jun. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.05.030>

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. 2. ed. NY: CRC PRESS TAYLOR & FRANCIS GROUP, 2016. 724p.

MARINESCU, I. D.; ROWE, W.B.; DIMITROV, B.; INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes**. 1.ed. NY: WILLIAM ANDREW, 2004. 763p. <https://doi.org/10.1016/C2010-0-67070-2>

NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: Método do perfil – Termos, definições e parâmetros da rugosidade**. RJ: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 200, 5f.

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, mai. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.001>

NORTON ABRASIVES. Abrasivos e Inovação nos Processos. Disponível em: <https://www.nortonabrasives.com/pt-br/gr%C3%A3os-abrasivos-einova%C3%A7%C3%A3o-nos-processos>>. Acesso em 18 abr. 2019.

NOVASKI, O., RIOS, M. Introdução teórica e vantagens de uso na usinagem de aços-liga. **Revista Máquinas e Metais**. v. 40, p. 214-223, mai 2004.

NUSSBAUM, G. C. **Rebolos & abrasivos - Tecnologia básica**. 1. ed. SP: ÍCONE, 1988. 95p.

OUTOKUMPU. **Handbook of Stainless Steel**. 1. ed. v. 1. AV: OUTOKUMPU, 2013. 92p.

OLIVEIRA, J. F. G. **Tópicos avançados sobre o processo de retificação**. Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1989.

PAIVA, R. L., DA SILVA, R. B., JACKSON, M. J., ABRÃO, A. M. The influence of cutting fluid concentration on surface integrity of VP80 steel and the influence of cutting fluid flow rate on surface roughness of VPATLAS steel after grinding. **Journal of Manufacturing Science and Engineering**. v. 189, p.1-7, dez. 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4038149>

PRIETO, G.; IPIÑA, J. E.; TUCKART, W. R. Cryogenic treatments on AISI stainless steel: microstructure and mechanical properties. **Materials Science & Engineering A**. v. 605, p. 236-243, mar. 2014. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2014.03.059>

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding**. 2. ed. OX: ELSEVIER, 2014. 444p. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-06952-6>

ROWE, W. B. **Modern Grinding Techniques**. 1. ed. BE: WILEY-SCRIVENER, 2010. 51p. <https://doi.org/10.1002/9780470882313>

SAINT GOBAIN. **Manual: Propriedade de grãos**. SAINT GOBAIN, 2017. 8f.

SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; FUSSE, R. Y.; FRANÇA, T. V.; AGUIAR, P. R. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**. v. 27, p. 192-199, jun. 2005. <https://doi.org/10.1590/S1678-58782005000200012>

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**, 1, 2000, Natal. Anais. p. 1-8.

SURPI, D. **Stainless Steel**. 1. ed. v. 1. ES: LUCEFIN, 2011. 68p.

TANG, J.; DU, J.; CHEN, Y. Modeling and experimental study of grinding forces in surface grinding. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 209, p. 2847-2854, mar. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.06.036>

TAWAKOLI, T.; HADAD, M. J.; SADEGHI, M. H. An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v.49, p. 924-932, out. 2009. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.015>

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4. ed. OX: BUTTERWORTH-HEINEMANN, 2000. 464.p. <https://doi.org/10.1016/B978-075067069-2/50007-3>

TURNBULL, A.; MINGARD, K.; LORD, J. D.; ROEBUCK, B.; TICE, D. R.; MOTTERSHEAD, K. J.; FAIRWEATHER, N. D.; BRADBURY, A. K. Sensitivity of stress corrosion cracking of stainless steel to surface machining and grinding procedure. **Corrosion Science**. v. 53, p. 3398-3415, jun. 2011. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2011.06.020>

VILLARES METALS. **Catálogo: Aços inoxidáveis**. SP: VILLARES METALS, out. 2014, 11f.

WANG, Y., LI C., ZHANG, Y., LI, B., YANG, M. ZHANG, X., GUO, S., LIU, G. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with diferent nanofluids. **Tribology International**. v. 99, p. 198–210, abr 2016. <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2016.03.023>

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

WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK JR, R. B. Grinding fluid application system design. **CIRP Annals**. v. 44, p. 333 – 338, jan. 1995. [https://doi.org/10.1016/S0007-8506\(07\)62337-3](https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)62337-3)

YIN, G.; MARINESCU, I. Cooling Capability of cutting fluids in Grinding. **Applied Mechanics and Materials**. v. 371, p. 89 – 94, ago. 2013. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.371.89>

ZAWRAH, M. F.; SCHNEIDER, J.; ZUM GAHR, K. H. Microstructure and mechanical characteristics of laser-alloyed alumina ceramics. **Materials Science and Engineering: A**. v. 332, p. 167-173, jul. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(01\)01728-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(01)01728-2)

ZHANG, X.; LI, C.; ZHANG, Y.; WANG, Y.; LI, B.; YANG, M.; GUO, S.; LIU, G.; ZHANG, N. Lubrication property of MQL grinding of Al₂O₃/ SiC mixed nanofluid with different particle sizes and microtopography analysis by cross – correlation. **Precision Engineering**. v. 47, p. 532-545, jan. 2017. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2016.09.016>

ZHAO, X.; WEI, Q.; SONG, B.; LIU, Y.; LUO, X.; WEN, S.; SHI, Y. Fabrication and Characterization of AISI 420 stainless steel using selective laser melting. **Materials and Manufacturing Processes**. v. 0, p. 1 - 7, mar. 2015. <https://doi.org/10.1080/10426914.2015.1026351>

ZHOU, N.; PENG, R. L.; PETTERSSON, R. Surface characterization of austenitic stainless steel 304L after different grinding operations. **International Journal of Mechanical and**

Materials Engineering A. v. 658, p. 50 – 59, dez. 2017. <https://doi.org/10.1186/s40712-017-0074-6>

ZHOU, N.; PENG, R. L.; PETTERSSON, R. Surface integrity of 2304 duplex stainless steel after different grinding operations. **Journal of Materials Processing Technology.** v. 229, p. 294-304, jan. 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.031>