

OTÁVIO DE SOUZA RUZZI

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE DO AÇO
RÁPIDO APÓS A RETIFICAÇÃO PLANA**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2022

OTÁVIO DE SOUZA RUZZI

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE DO AÇO RÁPIDO APÓS A
RETIFICAÇÃO PLANA**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Processos de Fabricação e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

Uberlândia – MG

2022

OTÁVIO DE SOUZA RUZZI

**ANÁLISE DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE DO AÇO RÁPIDO
APÓS A RETIFICAÇÃO PLANA**

Trabalho de conclusão de curso **APROVADO** pela
Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade
Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Processos de Fabricação e
Materiais.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva - FEMEC - UFU – Orientador

Dr. Alcione dos Reis – FEMEC – UFU

Dr. Bruno de Souza Abrão – ESAMC - Uberlândia

UBERLÂNDIA, 2022.

DEDICATÓRIA

À minha família, especialmente minha esposa
Vivian, meus pais José Renato e Rosemary
e meus irmãos Rodrigo e Gabriel.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por guiar meus passos nesta jornada e proporcionar tantas bênçãos em minha vida.

Aos meus pais José Renato e Rosemary por todo apoio, dedicação e esforço. Por todos os ensinamentos e pelo exemplo de vida.

Aos meus irmãos Rodrigo de S. Ruzzi e Gabriel de S. Ruzzi, por todo apoio e ajuda ao longo desta jornada. Em especial ao Rodrigo por todo auxílio e ensinamentos compartilhados. Vocês são especiais.

A minha esposa Vivian de M. C. Ruzzi, por toda compreensão, parceria, auxílio, incentivo e estar sempre ao meu lado.

Ao meu Orientador Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva, por todo ensinamento passado, auxílio, pela oportunidade e amizade construída.

Aos membros do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e do Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Faculdade de Engenharia Mecânica pela amizade, apoio e contribuição ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Aos meus colegas de turma, por todo apoio e amizade ao longo desta etapa.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este trabalho.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq pela concessão de bolsa de estudos em Iniciação Científica que permitiu o desdobramento deste trabalho.

RUZZI, O. S. **Análise da integridade da superfície do aço rápido após a retificação plana.** 2022, 56 f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia - MG.

Resumo

Os aços rápidos (do inglês – HSS – *High Speed Steel*) ainda são bastante utilizados para a aplicação em ferramentas de corte, como diversas fresas, machos e bits, dentre outras. Desta forma, todas essas ferramentas são submetidas ao processo de retificação em uma de suas últimas etapas de fabricação. É conhecido da literatura de usinagem por abrasão que durante o processo são desenvolvidas altas temperaturas, principalmente quando se utilizam rebolos abrasivos convencionais o que, combinada com as peculiaridades, tais como baixa condutividade térmica dos rebolos, pequenos valores de penetração de trabalho e pequenas dimensões dos cavacos, faz com que grande parte deste calor seja transferido para a peça. No caso dos aços rápidos, eles ainda são muito mais susceptíveis aos danos de origem térmica, como queima de retifica (oxidação da superfície), queda de dureza e trincas, entre outros, que podem vir a comprometer a funcionalidade da peça (neste caso a futura ferramenta de corte). Para evitar a ocorrência destes danos é importante encontrar a combinação correta entre parâmetros de corte e do processo, com destaque para o rebolo e o sistema de refrigeração. Neste sentido, este trabalho visou, encontrar os melhores parâmetros para a retificação do aço rápido, variando 3 valores de penetração de trabalho (a_e) (10, 25 e 50 μm) e duas velocidades da peça (v_w) (2,5 m/min e 7,5 m/min). A fim de avaliar a integridade da superfície das peças, foram analisadas a rugosidade (Ra e Rz), imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), a microdureza e a microestrutura abaixo da superfície retificada. Os resultados mostraram que o melhor acabamento superficial foi obtido após a retificação com a combinação entre o maior valor de a_e e o menor valor de v_w . As maiores variações de microdureza e microestrutura ocorreram quando se empregou o maior valor de penetração de trabalho; para estas variáveis de saída, a velocidade da peça não se mostrou muito influente.

Palavras-Chave: Retificação, Aço Rápido, Rebolo de Óxido de Alumínio Branco, Rugosidade, MEV, Microdureza, Microestrutura.

RUZZI, O. S. *High-speed steel surface integrity analysis after grinding process*. 2022. 56p. Monograph. Federal University of Uberlandia –MG.

Abstract

High Speed Steel (HSS) is commonly used in cutting tools application, such as milling cutters, taps and bits. Therefore, all these tools are subjected to the grinding process in one of the final stages of cutting tool manufacture. During the abrasive machining process, high temperatures are reached, especially when using conventional abrasive grinding wheels, which combined with some peculiarities, such as low thermal conductivity of grinding wheels, low depth of cut values and small chip dimensions, transfers most of the heat to the workpiece. HSS is still very susceptible to thermic damage, such as burns (surface oxidation), hardness decreasing and cracks, among others, that can compromise the workpiece function (in this case the future cutting tool). In order to avoid these damages, it is important to find the correct combination between cutting and process parameters, especially for the grinding wheel and the cooling system. In this work is aimed to determine appropriated parameters for grinding HSS by analyzing 3 depth of cut depths (a_e) (10 μm , 25 μm and 50 μm) and 2 workspeed (v_w) (2.5 m/min and 7.5 m/min). Roughness (Ra and Rz), Scanning Electron Microscopy (SEM) images, microhardness and microstructure underneath the ground surface were used to access the surface integrity of workpieces. Results show that the best surface finishing was obtained after grinding with the highest value of a_e (50 μm) and lowest value of v_w (2.5 m/min). The greatest microhardness and microstructure variations occurred when the highest depth of cut value was used; workspeed was not very influential for these output variables.

Keywords: Grinding, High Speed Steel, Alumina Grinding Wheel, Roughness, SEM, Microhardness, Microstructure.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Ilustração de alguns processos de retificação: Retificação plana tangencial: (a) avanço transversal, (b) de mergulho; (c) retificação plana de topo – mesa rotativa. Retificação cilíndrica externa – (d) avanço transversal, (e) de mergulho. Retificação interna – (f) avanço transversal, (g) de mergulho. Retificação centerless – (h) avanço transversal, (i) de mergulho (MALKIN & GUO, 2008, adaptado).	17
Figura 2.2 - Representação do processo de retificação plana tangencial com as principais grandezas (adaptado de MARINESCU et al., 2016).	18
Figura 2.3 – Representação esquemática dos processos de retificação plana: (a) periférica longitudinal, (b) periférica de passagem ou mergulho e (c) frontal (adaptado de KLOCKE, 2009).	19
Figura 2.4 – Etapas de formação do cavaco na retificação (TEIXEIRA et al., 2021, adaptado).	20
Figura 2.5 – Classificação dos fluidos de corte aplicados em retificação (adaptado de RUZZI, 2019; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).	23
Figura 2.6 – Propriedades e características dos fluidos de corte na retificação (adaptado de IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).	24
Figura 2.7 – Representação ilustrativa dos aspectos presentes em uma dada superfície (ETTL et al., 1998).	28
Figura 2.8 – Ferramentas fabricadas em Aço-Rápido: ¹ (a) brocas, ¹ (b) cossinetes, ¹ (c) machos, ² (d) fresas, ² (e) alargadores, ² (f) bits. 1 - (OSG, n.d.) 2 - (INDAÇO, 2015).	32
Figura 2.9 – Dureza dos constituintes do aço rápido e dos principais tipos de abrasivos utilizados em retificação de metais (BADGER, 2003).	33
Figura 3.1 – Fluxograma do procedimento experimental desenvolvido.	35
Figura 3.2 – Imagens da ponta de diamante do dressador ao longo das operações de dressagem.	37
Figura 3.3 – Operação de dressagem.	38
Figura 3.4 – Medição de rugosidade da superfície retificada.	39
Figura 4.1 – Rugosidade média (R_a) do aço rápido em função da penetração de trabalho e do número de passes.	42
Figura 4.2 – Rugosidade média (R_z) do aço rápido em função da penetração de trabalho e do número de passes.	42
Figura 4.3 – Imagens de MEV das superfícies de aço rápido retificadas em diferentes	

condições de corte..... 44

 Figura 4.4 – Microdureza abaixo da superfície retificada sob diferentes condições de corte. 46

 Figura 4.5 – Microestrutura abaixo da superfície retificada do aço rápido sob diferentes condições de corte - região de entrada do rebolo na peça..... 48

 Figura 4.6 – Microestrutura abaixo da superfície retificada do aço rápido sob diferentes condições de corte - região de saída do rebolo na peça. 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades e aplicações dos abrasivos (adaptado de RUZZI, 2019; MACHADO et al., 2015).....	21
Tabela 2.2 – Variações do óxido de alumínio e suas características (ELFUSA, 2019; SAINT-GOBAIN, 2019).....	22
Tabela 3.1 – Parâmetros e variáveis de corte utilizados.	36
Tabela 3.2 – Condições de dressagem.....	37
Tabela 3.3 – Condições de corte utilizadas nos ensaios experimentais de retificação.....	38

LISTA DE ABREVIações E SÍMBOLOS

a_e	Penetração de trabalho
Al_2O_3	Óxido de Alumínio
a_p	Profundidade de corte
cBN	Nitreto de boro cúbico
h_{cu}	Espessura de cavaco não deformado
h_{eq}	Espessura de corte equivalente
HRc	Dureza Rockwell C
HSS	Aço rápido
HV	Dureza Vickers
ISO	International Organization for Standardization (Organização Internacional para Padronização)
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira
Ra	Desvio aritmético médio de rugosidade
Rz	Altura máxima do perfil de rugosidade
SiC	Carbeto de Silício
Ud	Grau de recobrimento do rebolo
v_s	Velocidade de corte
v_w	Velocidade da peça
n_s	Rotação do rebolo
V_{fa}	Velocidade de avanço
d_s	Diâmetro do rebolo
Qw	Taxa de remoção de material
a_d	Profundidade de dressagem
b_d	Largura do dressador
S_d	Passo de dressagem
t_d	Tempo de dressagem
$Q'w$	Taxa de remoção de material específica

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	13
1. INTRODUÇÃO.....	13
CAPÍTULO II.....	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	16
2.1. Processo de retificação	16
2.1.1. Retificação Plana Tangencial	18
2.1.2. Mecanismo de Formação do cavaco.....	19
2.1.3. Principais Parâmetros operacionais	20
2.2. Integridade de Superfícies Retificadas.....	27
2.2.1. Acabamento superficial	27
2.2.2. Alterações subsuperficiais.....	28
2.3. Aços Rápidos.....	30
CAPÍTULO III	34
3. MATERIAIS E MÉTODOS	34
3.1. Equipamentos e materiais utilizados	35
3.2. Parâmetros de Corte.....	36
3.3. Planejamento experimental dos ensaios de retificação	38
3.4. Variáveis de saída e metodologia para suas medições.....	39
3.4.1. Rugosidade das superfícies retificadas.....	39
3.4.2. Imagens das superfícies retificadas	39
3.4.3. Medição de microdureza abaixo da superfície retificada.....	40
3.4.4. Microestrutura abaixo da superfície retificada	40
CAPÍTULO IV.....	41
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	41
4.1. Rugosidade da superfície.....	41
4.2. Imagens das superfícies retificadas	44
4.3. Microdureza abaixo da superfície retificada	45
4.4. Microestrutura abaixo da superfície retificada	47
CAPÍTULO V.....	51
5. CONCLUSÕES.....	51
5.1. Sugestões para trabalhos futuros	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão e possui aplicação principalmente quando se deseja a combinação entre bom acabamento da superfície da peça e elevada exatidão dimensional (representada por tolerâncias estreitas da qualidade de trabalho (IT03 – IT06)) (MARINESCU et al., 2007). Ela é considerada um processo de acabamento, possuindo valores de rugosidade, parâmetro Ra, entre 0,2 μm e 1,6 μm (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014). Outras aplicações são ainda na geração de forma e redução dos valores de desvios dimensionais e geométricos em materiais endurecidos que se encontram com limitações nos processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida, como o fresamento e torneamento, por exemplo.

Na retificação emprega-se o rebolo como a ferramenta de corte, o qual é constituído de abrasivos de elevada dureza (em relação aos aços), unidos por ligantes e que são aleatoriamente distribuídos (MACHADO et al., 2015).

A formação de cavaco na retificação é realizada por meio de cada partícula abrasiva do rebolo de forma que, por serem de pequenas dimensões, a taxa de remoção de material é baixa, principalmente por causa dos pequenos valores de penetração de trabalho. Com isso, as peças produzidas apresentam tolerâncias dimensionais estreitas.

Na operação de retificação plana tangencial, especificamente, o rebolo trabalha com o eixo paralelo à mesa ferromagnética porta-peça, de maneira que seu contato com a peça ocorra na sua parte periférica (NUSSBAUM, 1988). Dentre os principais parâmetros de corte principais do processo de retificação plana tangencial, destacam-se: velocidade do corte (v_s), calculada na parte periférica do rebolo que assume valores em torno de 30 m/s (1800 m/min),

mas que podem alcançar cerca de 50 m/min com rebolos convencionais, valores que são bem superiores aqueles empregados para processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida, como é o caso do fresamento por exemplo; velocidade da peça (v_w) que pode ser calculada em m/min, é o quanto a mesa se movimenta longitudinalmente em relação ao rebolo; penetração de trabalho (a_e), que representa o quanto o rebolo vai penetrar radialmente na peça a cada passagem pela peça; a profundidade de corte (a_p), que representa a largura do rebolo em contato com a superfície da peça sendo usinada, quando a largura da peça for menor que a espessura do rebolo o valor deste parâmetro será igual à largura da peça (MARINESCU et al., 2007).

O aço rápido é um dos principais aços para fabricação de ferramentas de corte, as quais requerem um elevado grau de exatidão e ótimo acabamento, principalmente das arestas de corte, requisitos que em geral só podem ser alcançados com o processo de retificação/afiação. Contudo, os aços rápidos são materiais muito susceptíveis a danos de origem térmica durante a retificação e, com isso, exigem ainda atenção na seleção dos parâmetros de corte em relação a outras classes de aços. Embora os aços rápidos apresentem elevada tenacidade em relação às outras classes de ferramentas de corte, como metal duro e cerâmicas, a presença dos carbonetos na composição (que em alguns casos possuem dureza próxima àquela do rebolo) lhes confere elevada dureza e resistência ao desgaste, o que pode acelerar o desgaste dos rebolos e reduzir a eficiência da retificação, principalmente ao se empregar o uso de rebolos de óxido de alumínio convencional (BADGER, 2007). Devido ao excesso de elementos de liga que resulta em excesso de carbonetos complexos na estrutura tratada, os aços rápidos podem alcançar a dureza próxima de 63 HRC (CHIAVERINI, 2005), um valor quase no limite de dureza para aços, que é de 70 HRC. Com isso, durante a retificação, por causa da elevação da temperatura e geração de calor, o aço rápido estará sujeito a ocorrência de danos térmicos tais como oxidação da superfície, queda ou aumento de dureza na superfície da peça ou abaixo desta, tensões residuais de tração e trincas (KRAJNIK et al., 2011).

Neste sentido, visando contribuir para a retificação de aço rápido e propor melhoria da sua retificabilidade, este trabalho foi proposto. Como variáveis de entrada, foram testados diferentes valores de penetração de trabalho (a_e) e velocidade da peça (v_w). Os resultados foram avaliados em função da rugosidade, imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), microdureza e microestrutura abaixo da superfície retificada.

Este trabalho foi estruturado em 5 capítulos, a saber:

CAPÍTULO I – Contém a introdução do trabalho, a fim de contextualizar o tema de estudo, além da motivação e os objetivos do mesmo.

CAPÍTULO II – Seção que apresenta a revisão bibliográfica que abrange os principais tópicos relacionados ao trabalho, como princípio, grandeza e particularidades do processo de

retificação, integridade de superfícies retificadas e aços rápidos.

CAPÍTULO III – Contém todo o procedimento experimental e equipamentos utilizados nos experimentos deste trabalho, bem como a metodologia para medição e análise das variáveis de saída.

CAPÍTULO IV – Apresenta todos os resultados obtidos e as respectivas análises e discussões realizadas.

CAPÍTULO V – Contempla todas as conclusões acerca dos resultados obtidos, como também sugestões para trabalhos futuros.

Para finalizar, são apresentadas as referências bibliográficas consultadas e que serviram para embasar este trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é apresentada a revisão da literatura, a qual aborda sobre o processo de retificação, principais parâmetros operacionais, integridade das superfícies retificadas, principais danos térmicos e a retificabilidade do aço rápido.

2.1. Processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem por abrasão na qual a ferramenta é constituída de partículas abrasivas cerâmicas de alta dureza, normalmente entre 2100 HV (para rebolos convencionais) e 10000 HV (para superabrasivos). Este processo é usualmente aplicado quando se deseja a combinação entre baixos desvios geométricos (rugosidade Ra inferior a 1,6 μm) e dimensionais estreitos (IT06 – IT03); como também na usinagem de materiais de alta dureza e quando se encontra limitação nos processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, como por exemplo no fresamento. A ferramenta de corte utilizada neste processo, conhecida como rebolo, é composta por diversos grãos abrasivos, os quais são unidos através de um material ligante, e possui uma velocidade de corte elevada em comparação com outros processos de usinagem (como fresamento e torneamento), geralmente superiores a 30 m/s em processos convencionais (MARINESCU et al., 2016; MACHADO et al., 2015).

O processo de retificação envolve quatro grupos de variáveis que abrange a integridade superficial da peça a ser retificada. São eles: desempenho da retificadora, características do rebolo, propriedades do material da peça e os parâmetros de retificação. (JACKSON e DAVIM,

2011).

Existem vários tipos de processos de retificação, e estes variam de acordo com a forma do rebolo e os movimentos entre o rebolo e a peça. Na Figura 2.1 é possível observar alguns dos processos de retificação.

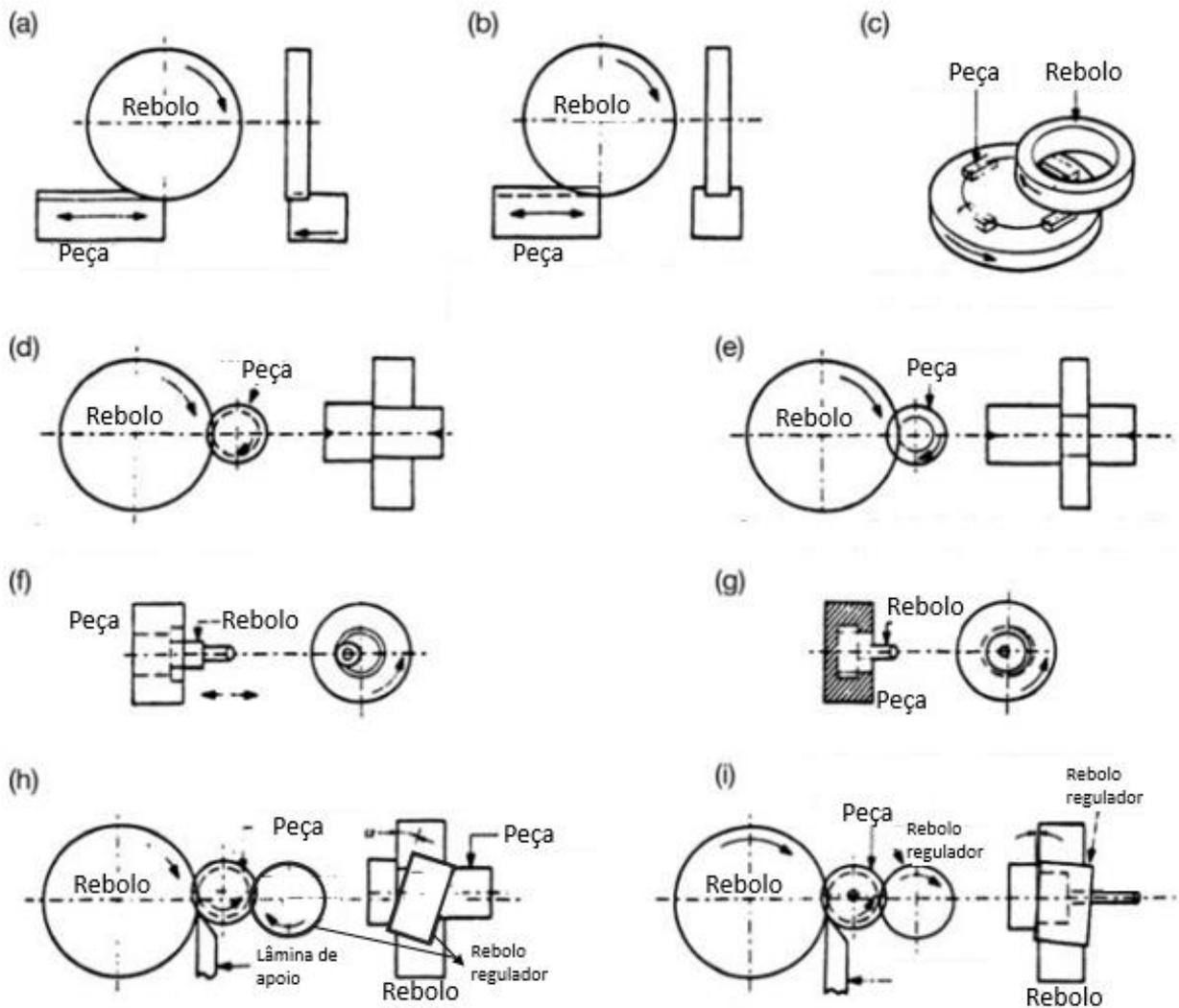


Figura 2.1 - Ilustração de alguns processos de retificação: Retificação plana tangencial: (a) avanço transversal, (b) de mergulho; (c) retificação plana de topo – mesa rotativa. Retificação cilíndrica externa – (d) avanço transversal, (e) de mergulho. Retificação interna – (f) avanço transversal, (g) de mergulho. Retificação centerless – (h) avanço transversal, (i) de mergulho (MALKIN & GUO, 2008, adaptado).

No presente trabalho será abordado o processo de retificação plana tangencial, e por esta razão a revisão bibliográfica e os parâmetros de corte serão concentrados neste processo.

2.1.1. Retificação Plana Tangencial

No processo de retificação plana tangencial, utiliza-se a superfície periférica do rebolo (rebolos do tipo reto), sendo seu eixo de rotação paralelo à mesa. Este procedimento garante retificar peças de alta precisão (MARINESCU et al., 2016). Na Figura 2.2 é possível observar uma representação esquemática deste processo com suas principais grandezas físicas.

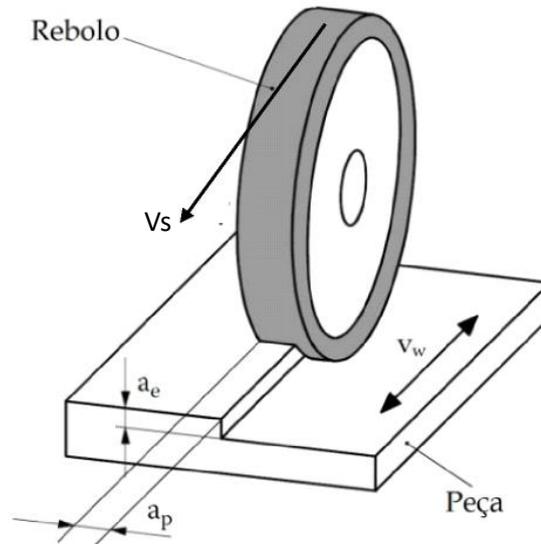


Figura 2.2 - Representação do processo de retificação plana tangencial com as principais grandezas (adaptado de MARINESCU et al., 2016).

Em que:

V_s é a velocidade do rebolo;

V_w é a velocidade da peça;

a_e é a penetração de trabalho;

a_p é a profundidade de corte.

Na Figura 2.2 está detalhado o processo de retificação plana longitudinal, porém a retificação plana compreende os métodos de periférica de passagem (mergulho) e a retificação frontal, além da periférica longitudinal. No cotidiano industrial, utiliza-se a retificação plana para retificar ranhuras, perfis, superfícies e nivelamento de grandes superfícies (KLOCKE, 2009). Na Figura 2.3 são apresentados os processos que compõem a retificação plana: (a) periférica longitudinal, (b) periférica de passagem ou mergulho e (c) retificação frontal.

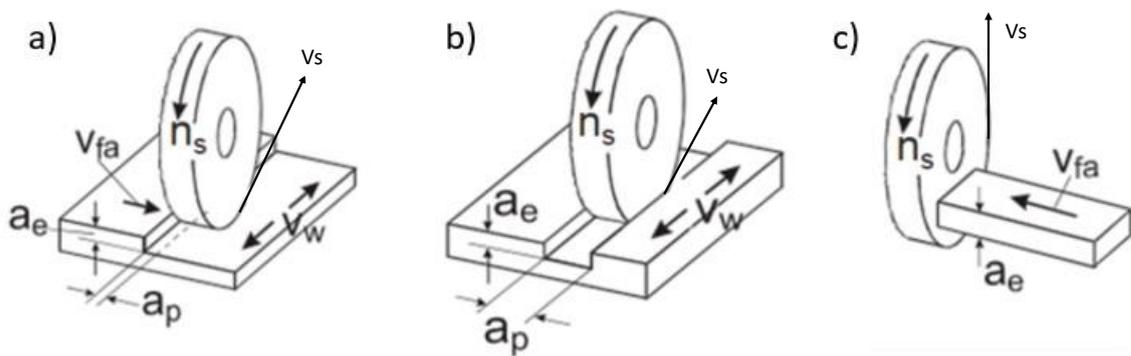


Figura 2.3 – Representação esquemática dos processos de retificação plana: (a) periférica longitudinal, (b) periférica de passagem ou mergulho e (c) frontal (adaptado de KLOCKE, 2009).

Em que:

V_s é a velocidade de corte

V_{fa} é a velocidade de avanço;

n_s é a rotação do reboleto;

a_e é a penetração de trabalho;

a_p é a profundidade de corte;

2.1.2. Mecanismo de Formação do cavaco

O processo de remoção do cavaco na retificação é feito pelo conjunto das arestas de corte de centenas de abrasivos na superfície de corte do reboleto; ele depende, principalmente, das propriedades físicas entre o material da peça e a partícula abrasiva, da operação de dressagem e do meio ou atmosfera de usinagem. Ele ocorre por meio de três etapas: atrito, sulcamento ou cisalhamento e remoção de cavaco de fato (MARINESCU et al., 2007).

Primeira etapa – Atrito: Ocorre por meio do início do contato entre a peça e a partícula abrasiva do reboleto. A deformação elástica se inicia por meio do atrito desenvolvido através dessa interação, conforme há a penetração da partícula na peça. Essa etapa pode ser visualizada na Figura 2.4.

Segunda etapa – Sulcamento ou Cisalhamento: Nesta etapa há o aumento da espessura de cavaco não deformado (h_{cu}) conforme a partícula penetra na peça, ampliando assim, as tensões compressivas na superfície que está sendo retificada. De acordo com o sentido de retificação, o material da peça é deslocado para frente e para as laterais, caracterizado pela deformação plástica. A área de contato reboleto-peça irá aumentar à medida que as partículas abrasivas adentram na peça, de modo que o atrito e as deformações

plásticas no material aumentam na mesma proporção. Na região de cisalhamento, há a dissipação de energia na forma de atrito, calor e deformação. Essa etapa também pode ser visualizada na Figura 2.4.

Terceira etapa – Remoção de cavaco: ela ocorre quando a penetração da aresta de corte da partícula abrasiva atinge um valor crítico, e assim gera uma tensão crítica mínima para que ocorra a ruptura de material. São sob essas condições que o cavaco se forma de fato, e grande parte da energia gerada é consumida somente na remoção do material. Na Figura 2.4, também é possível visualizar esta etapa.

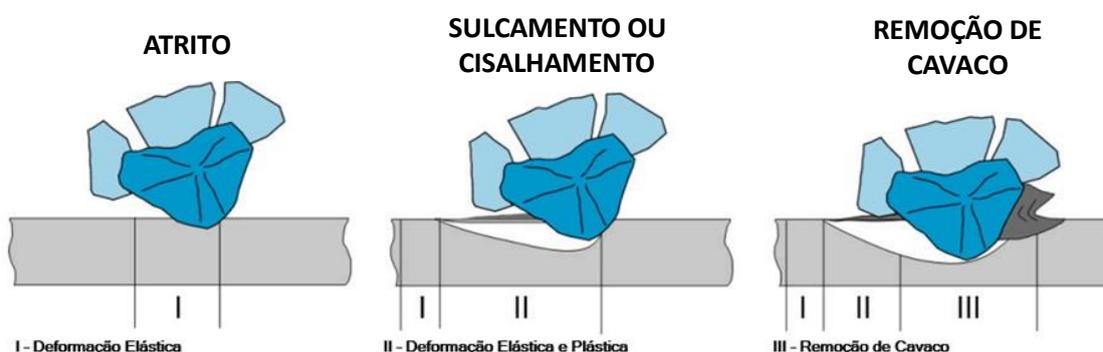


Figura 2.4 – Etapas de formação do cavaco na retificação (TEIXEIRA et al., 2021, adaptado).

2.1.3. Principais Parâmetros operacionais

Há vários parâmetros que englobam o processo de retificação, e, quando há uma combinação adequada entre eles, o processo se torna mais produtivo e com melhores resultados. Pode-se considerar como elementos básicos de todo processo de retificação os seguintes parâmetros: Retificadora, rebolo, peça, fluido de corte, atmosfera e parâmetros de corte, nos quais se incluem a operação de dressagem (ROWE, 2014).

A seguir será dada uma maior ênfase em alguns dos principais parâmetros operacionais que constituem o processo de retificação.

2.1.3.1. Rebolos para retificação de aço endurecido

O rebolo apresenta várias características em sua composição final, porém, uma das mais importantes, se trata do tipo de material abrasivo. Pode-se dizer que existem 4 principais classes de materiais para rebolos, são eles: o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carboneto de silício (SiC), o nitreto cúbico de boro (cBN) e o diamante. Entre eles, os dois primeiramente citados são considerados como abrasivos convencionais, enquanto, os dois últimos, como

superabrasivos (MACHADO et al., 2015).

As propriedades, assim como as principais aplicações destes materiais abrasivos estão resumidos na Tabela 2.1.

Tabela 2.1 – Propriedades e aplicações dos abrasivos (RUZZI, 2019; MACHADO et al., 2015, adaptado).

Abrasivo	Estrutura cristalina	Dureza Knoop [kgf/mm ²]	Condutiv. térmica relativa	Estabilidade de térmica [°C]	Afinidade química	Aplicações
Al ₂ O ₃	Hexagonal	2100	1	1750	Cerâmicas, óxidos, vidros	Aços em geral e ferro fundido
cBN	Cúbica	4700	35 - 120	1400	Nenhuma	nodular
SiC	Hexagonal	2400	10	1500	Materiais que assimilam carbono	Ferros fundidos em geral, ligas não ferrosas, cerâmicas, metal duro
Diamante	Cúbica	8000	100 - 350	800		

Porém, para cada classe de abrasivo existem certas variações e, neste trabalho, será dado uma maior ênfase para o Al₂O₃, uma vez que este é o abrasivo convencional recomendado para a usinagem de materiais com elevada resistência mecânica, nos quais se incluem os aços em geral. Para esta classe existem as seguintes variações: sinterizado convencional, monocristalino, fundido, grãos zirconados e grãos cerâmicos (seeded gel) (SAINT-GOBAIN, 2019). As características (particularidades) destas variações estão descritas na

Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Variações do óxido de alumínio e suas características (ELFUSA, 2019; SAINT-GOBAIN, 2019).

Varição	Particularidade
Sinterizado convencional	Óxido de alumínio convencional
Monocristalino	Apresenta alta dureza e uma boa borda com múltiplos prismas, uma grande capacidade de retificação com um baixo calor
Fundido	Alta pureza, alta capacidade de reposição de arestas e uma boa tenacidade
Grãos zirconados	Melhor desempenho para operações de desbaste
Grãos cerâmicos	Proporciona maior friabilidade para o rebolo

Além do tipo de abrasivo, o rebolo, de modo geral, apresenta as seguintes características na sua composição final: tamanho do grão (grosseiro, médio, fino ou muito fino), ligante (vitricado, resinoide ou metálico), estrutura (aberta ou fechada), dureza, entre outros (ROWE, 2014).

2.1.3.2. Fluido de corte

A grande maioria das operações de retificação são realizadas com a presença do fluido corte. Sua presença neste processo possui como principais funções a lubrificação da zona de corte e refrigeração da peça, como também para a limpeza da superfície do rebolo e proteção contra corrosão para as superfícies recém usinadas, mas esta última irá depender do tipo de fluido empregado, pois alguns fluidos podem promover a deterioração da pintura da máquina (MALKIN; GUO, 2008).

Os fluidos de corte são responsáveis pela diminuição da ocorrência de danos térmicos, uma vez que eles ajudam na remoção do calor gerado na zona de corte e na diminuição das forças de corte e minimização tensões residuais de tração que são prejudiciais às peças

(BELENTANI et al., 2014). Deste modo, seu uso torna crucial para minimizar os danos térmicos na peça e garantir eficiência no processo de retificação e, além do tipo de fluido, há outros fatores que influenciam no processo, como a forma e local de aplicá-lo, o posicionamento do bocal, tipo/geometria e número de bocais. A seleção correta de um método de aplicação de fluido na zona de corte pode aumentar a capacidade de lubrificação e resfriamento, gerando menos forças de corte e superfícies com menores valores de rugosidade (DA SILVA et al., 2015).

Os fluidos de corte, de modo geral, podem ser classificados conforme proposto por Diniz, Marcondes e Coppini (2014) e apresentada na Figura 2.5.

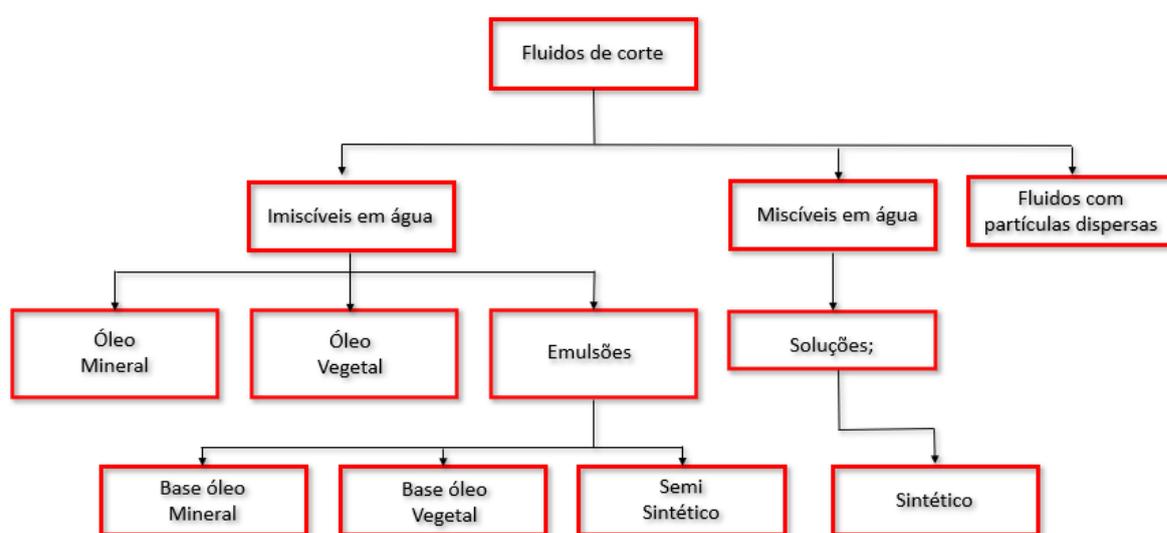


Figura 2.5 – Classificação dos fluidos de corte aplicados em retificação (RUZZI, 2019; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014, adaptado).

De acordo com Machado et al. (2015) os óleos de origem vegetal e animal apresentam um alto custo e rápida deterioração, ainda assim, possuem aplicações como aditivos, nos fluidos minerais, melhorando as propriedades lubrificantes. Porém, devido à baixa condutividade térmica e baixo calor específico, estes óleos são ineficazes na condução do calor para fora da região de corte.

As propriedades dos óleos minerais estão ligadas ao comprimento da cadeia, da estrutura molecular e do grau de refino, estes são obtidos a partir do refino do petróleo. Por sua vez, os óleos integrais, podem ser denominados como óleos minerais puros ou com aditivos (geralmente de alta pressão) (MACHADO et al., 2015).

Os fluidos emulsionáveis e semissintéticos pertencem a categoria de emulsões. Fluidos emulsionáveis são compostos bifásicos de óleos minerais adicionados à água (proporção de 1:10 a 1:100) mais agentes emulsificantes ou surfactantes que garantem a uniformidade da

mistura. Estes possuem uma maior aplicação quando o efeito do resfriamento é mais importante que o efeito da lubrificação (KLOCKE, 2009).

Do mesmo modo que as emulsões, as soluções consistem em mais de 90% de água. No entanto, as soluções não possuem óleo mineral em sua composição, sendo constituído, por exemplo, de polímero ou sais. E, uma vez que estes são dissolvidos molecularmente, não há a necessidade de acionar emulsificantes para obter uma distribuição fina e uniforme do concentrado. Não havendo a necessidade de emulsificantes, não surgirá problemas de espuma e a resistência a microrganismos é melhor do que a das emulsões, no entanto, as soluções possuem uma certa desvantagem nas propriedades de lubrificação quando comparadas as emulsões (KLOCKE, 2009).

Na Figura 2.6 é exposto um quadro comparativo contendo alguns tipos de fluido de corte. Deste modo, pode-se observar que o óleo emulsionável, junto ao óleo semissintético, apresentam um maior equilíbrio entre lubrificação e refrigeração. Vale ressaltar a eficiência do óleo mineral em lubrificação e a função de refrigeração do fluido sintético. Partindo do ponto de vista de custos e ambiental, o fluido sintético torna-se a melhor opção, seguido pelo semissintético, óleo emulsionável e óleo integral (IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).

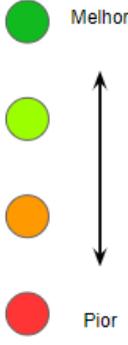
	Óleo integral	Óleo emulsionável	Semissintético	Sintético	
Remoção de calor	Red	Orange	Light Green	Green	
Lubrificação	Green	Light Green	Orange	Red	
Manutenção	Green	Red	Orange	Light Green	
Filtrabilidade	Red	Orange	Light Green	Green	
Meio ambiente	Red	Orange	Light Green	Green	
Custo	Red	Orange	Light Green	Green	
Vida do rebolo	Green	Light Green	Orange	Red	

Figura 2.6 – Propriedades e características dos fluidos de corte na retificação (adaptado de IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).

Visando a melhoria das propriedades do fluido de corte, como condutividade térmica e lubrificação, várias pesquisas têm sido realizadas adicionando partículas sólidas junto ao fluido de corte com o intuito de aumentar a capacidade de refrigeração na zona de corte através do uso da técnica MQL. Estas nanopartículas podem incluir metal (Cu, Ag), óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 , CuO), MoS_2 , grafite, grafeno, como também simples, dupla ou multi paredes de nanotubos de carbono (carbon nanotubes – CNTs) (MAO et al., 2013; ZHANG et al., 2015).

Para a retificação dos aços endurecidos, diversos trabalhos relatam a aplicação de

fluidos de corte à base de óleo diluídos em água, majoritariamente a uma proporção de 1:19 (TAWAKOLI et al., 2009; SADEGHI et al., 2010; HADAD et al., 2012; BIANCHI et al., 2017).

2.1.3.3. Parâmetros de corte

Para que se faça a correta seleção dos parâmetros no processo de retificação é necessário ter o entendimento das grandezas físicas relacionadas a este processo. Nesse tópico serão apresentados e descritos os principais parâmetros do processo de retificação plana tangencial.

a. Velocidade de corte (v_s)

A velocidade de corte ou velocidade periférica do rebolo pode ser calculada conforme a Eq. 1 (MALKIN; GUO, 2008):

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60.1000} \quad (1)$$

Em que:

V_s é a velocidade de corte (m/s);

d_s é o diâmetro do rebolo (mm);

n_s é a rotação do rebolo (rpm).

Valores típicos de velocidade de corte para o processo de retificação com rebolos convencionais podem variar entre 30 e 38 m/s. Este parâmetro afeta o comportamento dos esforços de corte, desgaste do rebolo, acabamento e queima superficial da peça e vibrações da máquina-ferramenta. Conforme aumenta-se a velocidade de corte, haverá uma menor remoção no volume de cavaco, de modo que a espessura dos cavacos removidos é menor, resultando na diminuição das forças de corte, rugosidade da peça e desgaste do rebolo (BIANCHI et al., 1997; ROWE, 2013).

b. Velocidade da peça (v_w)

Para o processo de retificação plana tangencial, a velocidade da peça é a mesma que

a velocidade da mesa. Esta velocidade está diretamente relacionada com o acabamento final da peça, uma vez que o aumento de v_w tende a aumentar a rugosidade da superfície, pois o tempo de contato entre rebolo/peça diminuirá, havendo assim uma maior quantidade de material removido por cada grão e, conseqüentemente, um aumento nos esforços de corte (JACKSON; DAVIM, 2011; PAIVA, 2020). Para a relação v_s/v_w , são comumente empregados valores de 100 a 200 para a retificação plana tangencial, embora haja relatos de valores elevados para tal relação (MALKIN & GUO, 2008).

c. Penetração de trabalho (a_e)

Este parâmetro é medido no plano de trabalho e representa a profundidade de penetração do rebolo na peça, em outras palavras, representa a profundidade de material removida da peça em cada passagem da mesa (MARINESCU et al., 2016).

Os valores de penetração de trabalho podem variar de 10 μm – 50 μm para a retificação plana tangencial (MALKIN & GUO, 2008). O aumento deste parâmetro acarreta o aumento de abrasivos ativos, ocorrendo assim maiores esforços de corte, maior calor gerado no processo e, conseqüentemente, um pior acabamento superficial (KLOCKE, 2009).

d. Profundidade de corte (a_p)

A profundidade de corte refere-se à profundidade axial ou penetração do rebolo na peça medida em uma direção perpendicular ao plano de trabalho. Esta grandeza também pode ser definida como largura efetiva de corte, ou seja, é a largura do rebolo que está em contato com a peça e permite a remoção de material (MARINESCU et al., 2016). Normalmente ela é selecionada em função do rebolo, podendo variar seu valor entre 1/4 e 4/5 do valor da largura do rebolo (MACHADO et al., 2015).

e. Taxa de remoção de material (Q_w)

Este parâmetro representa o volume de material removido por unidade de tempo. O aumento deste parâmetro causa deterioramento no acabamento da peça, e ele pode ser determinado conforme a Eq. 2 (MALKIN; GUO, 2008).

$$Q_w = a_p \cdot a_e \cdot v_w \quad (2)$$

Em que:

Q_w é a taxa de remoção de material (mm^3/min);

a_e é a penetração de trabalho (mm);

a_p é a profundidade de corte (mm);

V_w é a velocidade da peça (mm/min).

2.2. Integridade de Superfícies Retificadas

A superfície usinada tem resultado de um processo que envolve geração de calor, deformações plásticas, recuperação elástica, ruptura, vibrações e tensões residuais (MACHADO et al., 2015). Tais fatores podem influenciar regiões subsuperficiais, além da própria superfície usinada. As peças submetidas ao processo de retificação podem ter a qualidade avaliada de duas maneiras: através da análise da topografia e por meio dos aspectos das integridades superficial e subsuperficial. Geralmente em termos dos parâmetros de rugosidade, a topografia compreende a geometria da peça usinada. A integridade superficial engloba os aspectos causados principalmente devido as altas temperaturas alcançadas no processo de retificação, como a formação de camadas de óxido, queima de retífica, formação de trincas ou microtrincas, além da alteração de dureza e da textura da peça. Para ao que se refere a integridade subsuperficial, pode-se observar alterações logo abaixo da superfície usinada, como alterações mecânicas e metalúrgicas apresentadas sob a forma de danos térmicos, alterações microestruturais, transformações de fase, além de variações na dureza, dentre outros (MALKIN; GUO, 2008).

2.2.1. Acabamento superficial

Existem quatro características básicas para determinar a topografia de uma certa superfície: forma, ondulação, falhas e rugosidade. O contorno macroscópico e a variação na forma geométrica da superfície, estão, respectivamente, relacionados à forma e ondulação. As trincas, inclusões e bolhas, referem-se as falhas. A rugosidade consiste nas variações microgeométricas da superfície, com pequenos comprimentos de onda (MACHADO et al., 2015). Tais características podem ser observadas na Figura 2.7.

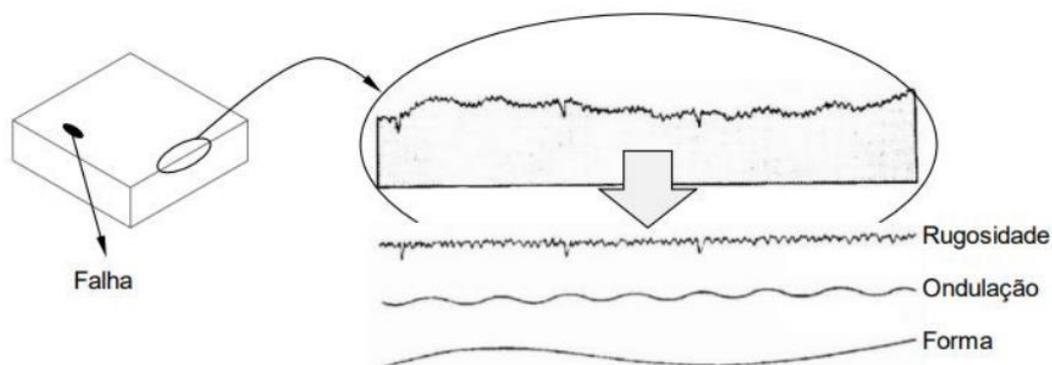


Figura 2.7 – Representação ilustrativa dos aspectos presentes em uma dada superfície (ETTL et al., 1998).

Os parâmetros de rugosidade podem ser classificados em três grupos: parâmetros de amplitude, parâmetros de espaço e os parâmetros híbridos (combinação entre amplitude e espaço) (MACHADO et al., 2015). Porém, os parâmetros de amplitude são normalmente mais utilizados para avaliar a topografia de uma determinada superfície usinada. A seguir é apresentado a especificação dos parâmetros de amplitude R_a e R_z , segundo Gadelmawla et al. (2002).

- Parâmetro R_a : Este parâmetro é determinado por meio do desvio médio aritmético das alturas em relação à linha central média. Este é o parâmetro mais utilizado para controle da qualidade, no entanto se trata de um parâmetro médio, podendo assim camuflar o comportamento da superfície usinada.
- Parâmetro R_z : Este parâmetro resulta da diferença em altura entre a média dos cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos ao longo do comprimento de avaliação. Ele possuiu uma maior sensibilidade para eventuais picos elevados e/ou vales mais profundos.

Em um trabalho de retificação onde avaliou-se quatro classes de aços rápidos de baixa liga, Jaworski, Trzepiecinski e Stachowicz (2016) utilizaram um rebolo de óxido de alumínio com grana mesh de 24, duas penetrações de trabalho ($15\ \mu\text{m}$ e $35\ \mu\text{m}$) e dois valores de velocidade de avanço da peça ($4\ \text{m/min}$ e $6\ \text{m/min}$). Foram relatados valores de rugosidade (parâmetro R_a) entre $0,5\ \mu\text{m}$ e $0,8\ \mu\text{m}$, sendo que os maiores valores foram registrados quando se fez uso dos maiores valores de penetração de trabalho e velocidade de avanço da peça.

2.2.2. Alterações subsuperficiais

Os danos de origem térmica são os principais associados com as alterações subsuperficiais causadas pelo processo de retificação, devido as altas temperaturas atingidas

no processo e tendo em vista que a maior parte deste calor gerado é transferido para a peça, principalmente quando se faz uso de rebolos convencionais. Dependendo dos requisitos do projeto, estes danos térmicos podem levar à inutilização das peças e gerar prejuízos.

Os principais danos de origem térmica, segundo Malkin & Guo (2008), são descritos a seguir:

- Queima superficial da peça: a queima superficial pode se tornar visível pela presença de tons azulados oriundos da formação de camada de óxido. Devido a queima de retifica, o rebolo pode perder partículas abrasivas, ocorrendo a adesão delas na peça, aumentando assim, os esforços de corte. Em alguns materiais (como aços temperados e revenidos), a queima superficial pode levar a uma redução no limite da resistência à fadiga, em função da formação de uma microestrutura não favorável.
- Tensões residuais: Elas surgem decorrentes de deformações plásticas não-uniformes que ocorrem próximas a superfície da peça. Essas tensões residuais afetam o comportamento mecânico do material. As interações mecânicas entre as partículas abrasivas e a peça resultam em tensões residuais de compressão, às quais são consideradas favoráveis quanto as propriedades dos materiais. As tensões residuais de tração, são formadas devido as elevadas temperaturas desenvolvidas na zona de corte, junto aos esforços mecânicos.
- Têmpera superficial: Em função das temperaturas desenvolvidas na zona de corte e da taxa de resfriamento, pode haver uma diminuição na dureza superficial da peça. A peça também estará sujeita à formação de estruturas martensíticas não-revenidas, uma vez que a temperatura de austenitização do material é atingida, seguida de um processo de resfriamento rápido.
- Trincas: Elas surgem devido ao aquecimento excessivo na zona de corte durante o processo de retificação. A sua intensidade varia, podendo tornar-se visível imediatamente após o processo de retificação ou algum tempo depois. As tensões trativas na superfície, contribuem para as trincas não serem aparentes, necessitando assim, de um ataque químico na peça. Tais trincas provocam uma redução no limite de resistência a fadiga do material, além de aumentar a susceptibilidade à processos corrosivos (ROWE, 2014).

As altas temperaturas atingidas durante o processo de retificação na superfície da peça podem causar alterações na microestrutura, porém estas alterações podem ser causadas por meio das deformações plásticas ocorridas na superfície. Uma vez que a temperatura não exceder a temperatura de recristalização do material, pode ocorrer o fenômeno do encruamento, resultando no aumento na resistência e dureza através das deformações

(CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

A medição da dureza é largamente aplicada para especificação de materiais, estudos, pesquisas e em comparações de materiais. A dureza é uma propriedade mecânica de um material que avalia a resistência à deformação plástica localizada, ela pode ser obtida por meio de uma carga aplicada a um indentador sobre a superfície do material e o quanto essa carga resultará em área residual projetada. A microdureza Vickers é obtida por meio de um penetrador de diamante em forma de pirâmide de base quadrada (CALLISTER; RETHWISCH, 2012).

De modo geral, os aços são retificados após tratamento térmico de endurecimento (têmpera e revenimento), deste modo, pode ocorrer tanto a diminuição da dureza próximo à superfície retificada (devido a um revenimento excessivo que ocorre), como também, se a peça atingir a temperatura de austenitização, pode ocorrer a formação de uma camada branca (com dureza superior àquela inicial) proveniente de um processo de retêmpera que ocorre devido ao rápido resfriamento consequente da aplicação do fluido de corte (MALKIN; GUO, 2008).

Desta forma, a microdureza se trata de uma variável que reforça os resultados da análise microscópica do material, de modo a avaliar as possíveis transformações microestruturais que possam ter ocorridos na peça durante o processo, melhorando a análise da integridade da peça.

2.3. Aços Rápidos

Os aços rápidos representam uma classe de aços com aplicação principalmente para ferramentas de corte. Devido a sua elevada tenacidade e relativa resistência ao desgaste, eles são utilizados para a fabricação de ferramentas de corte, tais como brocas, bits, machos e fresas (ASM METALS HANDBOOK, 1989). Seu nome (do inglês *High Speed Steel – HSS*) compreende dois fatores: (a) suas ligas pertencem ao sistema multi componente FeC-X, em que X representa um grupo de elemento de liga, como Cr (cromo), W (tungstênio) ou Mo (molibdênio), V (vanádio) e Co (cobalto), são os principais; (b) tais ligas apresentam a capacidade de manter um elevado nível de dureza quando submetidas a elevadas temperaturas provenientes do corte de metais, que no século XX eram considerados materiais de ferramentas que permitiam elevadas velocidades de corte quando comparados com os aços carbono utilizados em ferramentas (BOCCALINI; GOLDENSTEIN, 2001).

De acordo com a quantidade e balanço dos diferentes elementos de liga, obtém-se as características mecânicas dos aços rápidos. Condizente com a finalidade de utilização deste material, são desejáveis propriedades específicas em detrimento de outras, podendo ter este ajuste a partir do balanço de elementos. Em vista da sua utilização em diversos tipos de

aplicação, e com o avanço tecnológico desses materiais, na década de 1990, já havia sido disponibilizadas cerca de 150 variações de composições deste aço (ASM METALS HANDBOOK, 1989).

Em princípio, o aço rápido é composto por duas categorias: a categoria T que corresponde aos tipos predominante ao tungstênio, e a categoria M que corresponde aos tipos predominantes com teor de molibdênio (CHIAVERINI, 2005).

O aço rápido possui como sua principal característica a capacidade de operar em velocidades de corte e outras condições durante o processo que elevam a temperatura do gume cortante da ferramenta (cerca de 550°C à 600°C), com uma boa tenacidade. Nessas temperaturas, os aços rápidos são capazes de reter a dureza que lhes permitem continuar com a operação de usinagem e, após a operação, eles readquirem a dureza original. Esta característica é a mais importante propriedade dos aços rápidos e ela denomina-se como “dureza a quente”. Além disso, tendo em vista o grande teor de carbono e elementos de liga formadores de carbonetos, forma-se um elevado número de carbonetos de liga, o que resulta em uma alta resistência ao desgaste quando comparado com outros tipos de aço para ferramenta, e conseqüentemente tem-se um aumento na sua vida útil. Também devido a sua composição, os aços rápidos se tornam facilmente endurecíveis por têmpera através da secção inteira, mesmo pelo resfriamento em óleo ou em banhos de sal e, nessas condições, a tendência a empenamento ou ruptura é menor (CHIAVERINI, 2005).

Algumas das principais utilizações do aço rápido podem ser visualizadas na Figura 2.8 (VENDRAME, 2015).

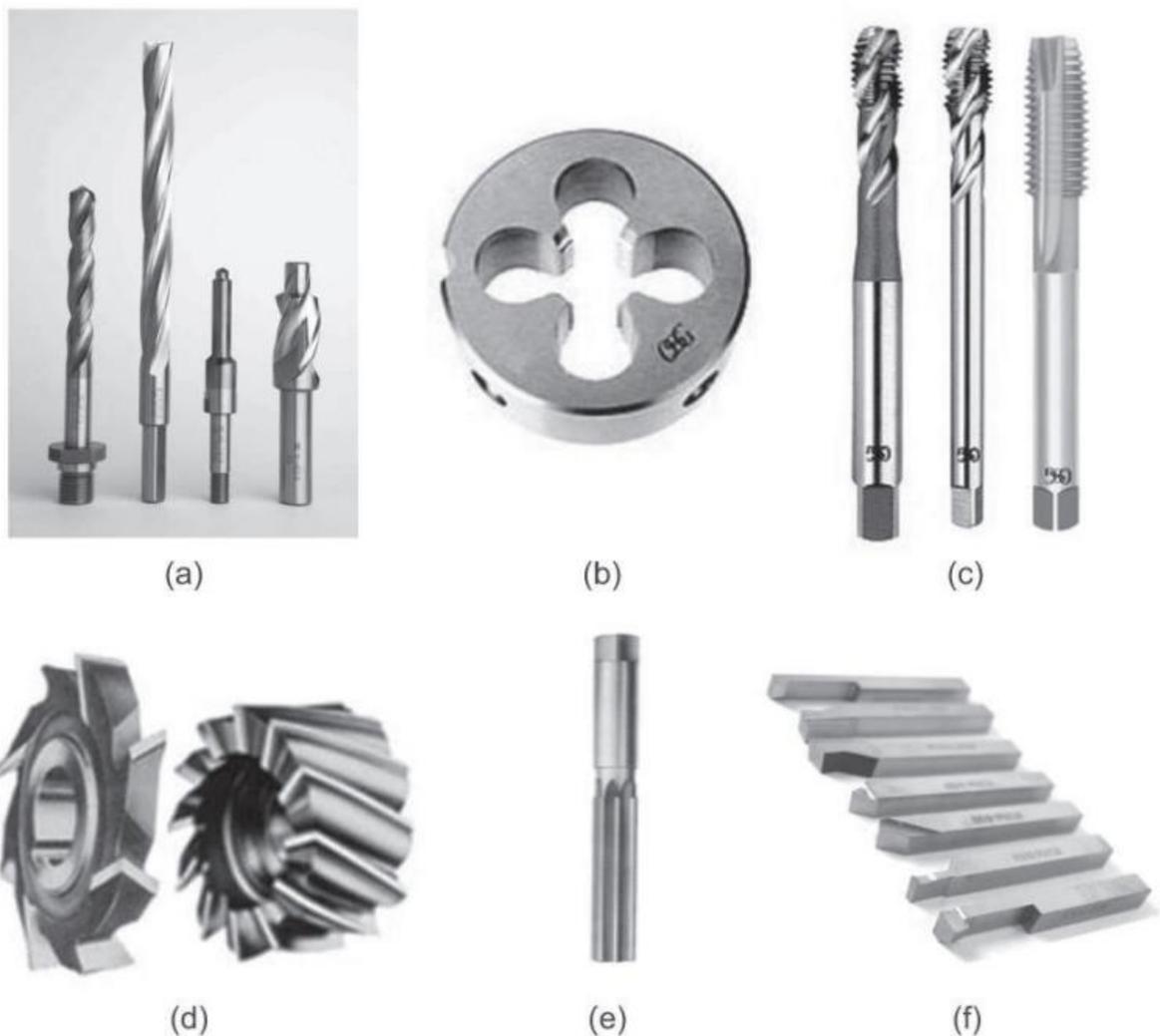


Figura 2.8 – Ferramentas fabricadas em Aço-Rápido: ¹(a) brocas, ¹(b) cossinetes, ¹(c) machos, ²(d) fresas, ²(e) alargadores, ²(f) bits. 1 - (OSG, n.d.) 2 - (INDAÇO, 2015).

Na retificação do aço rápido, um dos principais desafios está relacionado com os diferentes tipos de carbonetos presentes em sua estrutura, uma vez que estes dificultam na remoção de material por apresentarem elevados valores de dureza. Na Figura 2.9 são apresentados os valores de dureza dos diferentes constituintes do aço rápido e dos principais abrasivos empregados na retificação. É possível observar que os carbonetos presentes na microestrutura dos aços rápidos apresentam uma dureza próxima a do Al_2O_3 e do SiC, que são utilizados na fabricação de rebolos convencionais.

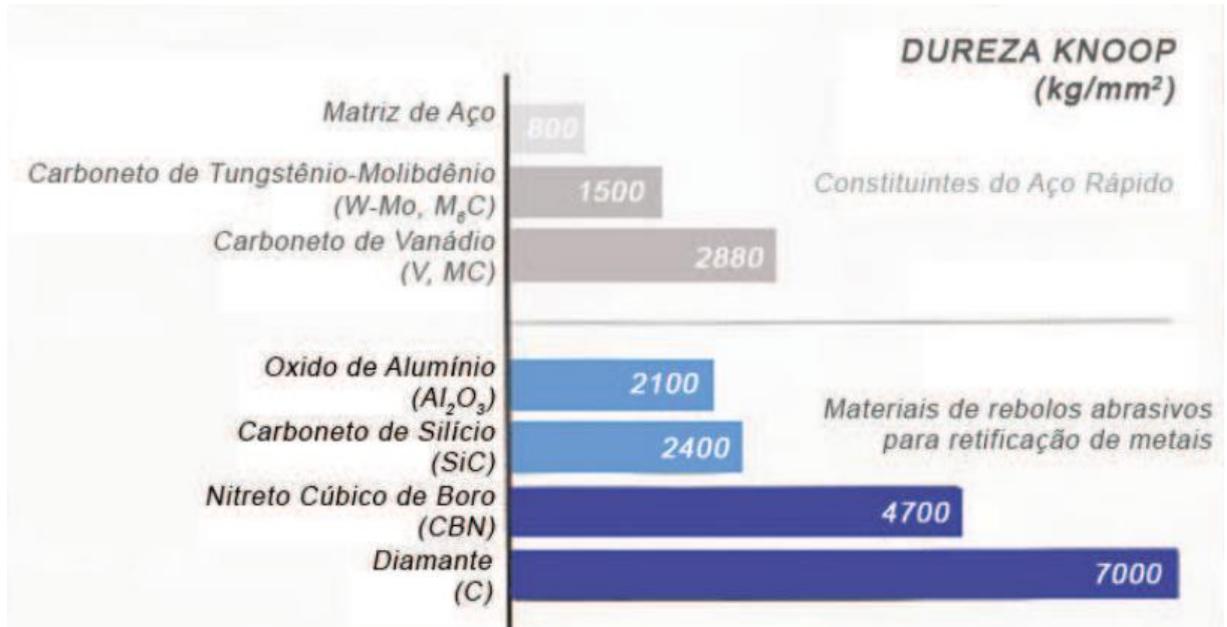


Figura 2.9 – Dureza dos constituintes do aço rápido e dos principais tipos de abrasivos utilizados em retificação de metais (BADGER, 2003).

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os equipamentos (máquina-ferramenta, rebolo e o material da peça) utilizados nos ensaios de retificação, assim como as condições de corte, os parâmetros de entrada e saída e os instrumentos de medição com a descrição dos procedimentos durante a experimentação. O fluxograma contendo as etapas desenvolvidas neste trabalho está representado na Figura 3.1.

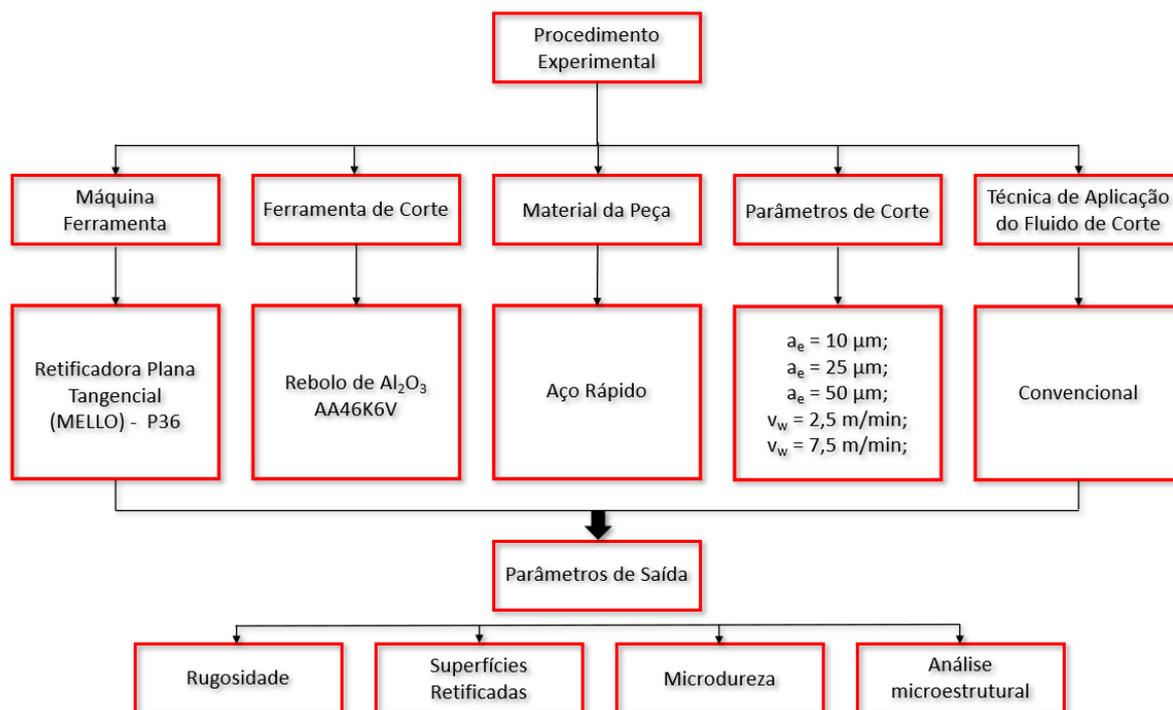


Figura 3.1 – Fluxograma do procedimento experimental desenvolvido.

3.1. Equipamentos e materiais utilizados

Os ensaios experimentais foram realizados em uma retificadora plana tangencial, do fabricante MELLO, modelo P36, que possui rotação constante de 2400 rpm e uma potência mecânica nominal de 2,24 kW. Ela possui resolução referente ao movimento vertical do rebolo igual de 5 µm e se encontra no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da FEMEC – UFU.

O rebolo utilizado é tipo reto e de óxido de alumínio branco de especificação AA46K6V, com dimensões de 264 mm x 127 mm x 25,4 mm, diâmetro externo, diâmetro interno e espessura, respectivamente.

As peças que foram utilizadas nos ensaios de retificação são de aço rápido com uma dureza de 63±2 HRc. Elas possuem uma seção quadrada de 3/8" x 1,85" de comprimento, em média.

O fluido de corte utilizado foi o Vasco 7000, sendo ele um fluido semissintético de base vegetal que foi diluído em água a uma proporção de 1:19 (5%), com um Brix correspondente a 2,9 e que foi aplicado via técnica convencional (abundância) com vazão de 10 l/min.

3.2. Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte empregados nos ensaios experimentais de retificação do aço rápido estão apresentados na Tabela 3.1. Tanto a velocidade de corte, velocidade da peça e penetração de trabalho foram adotados com base em valores normalmente utilizados na retificação de aço endurecido com dureza semelhante a esta do aço rápido.

Tabela 3.1 – Parâmetros e variáveis de corte utilizados.

Parâmetros	Valor Adotado
Velocidade de corte (V_s)	33 m/s
Velocidade da peça (V_w)	2,5 m/min e 7,5 m/min
Penetração de trabalho (a_e)	10 μ m, 25 μ m e 50 μ m
Fluido de corte	Semissintético de base vegetal – Vasco 7000
Vazão	10 l/min (Técnica Convencional)
Diluição do fluido em água	1:19 (5%)
Brix	2,9

Antes de cada ensaio de retificação o rebolo foi submetido à operação de dressagem com o auxílio de um dressador do tipo ponta única de diamante, onde foi adotado um grau de recobrimento (U_d) igual a 3. Com a finalidade de ajustar o valor da largura de atuação do dressador, de modo a garantir um grau de recobrimento igual a 3, foi feito o monitoramento da ponta do dressador. Deste modo, o dressador foi levado ao microscópio estéreo, do fabricante Olympus, modelo SZ61, antes de cada operação de dressagem, com uma ampliação de 35x, a fim de medir o raio de ponta do dressador. Por meio da Eq. 3, foi possível garantir a mesma condição de dressagem para cada ensaio.

Na Figura 3.2 de a) a f) são mostradas as imagens da ponta do dressador, em que a imagem a) representa a medida antes do primeiro ensaio de retificação e f) antes do último.

$$b_d = \sqrt{8 \cdot r_p \cdot a_d} \quad (3)$$

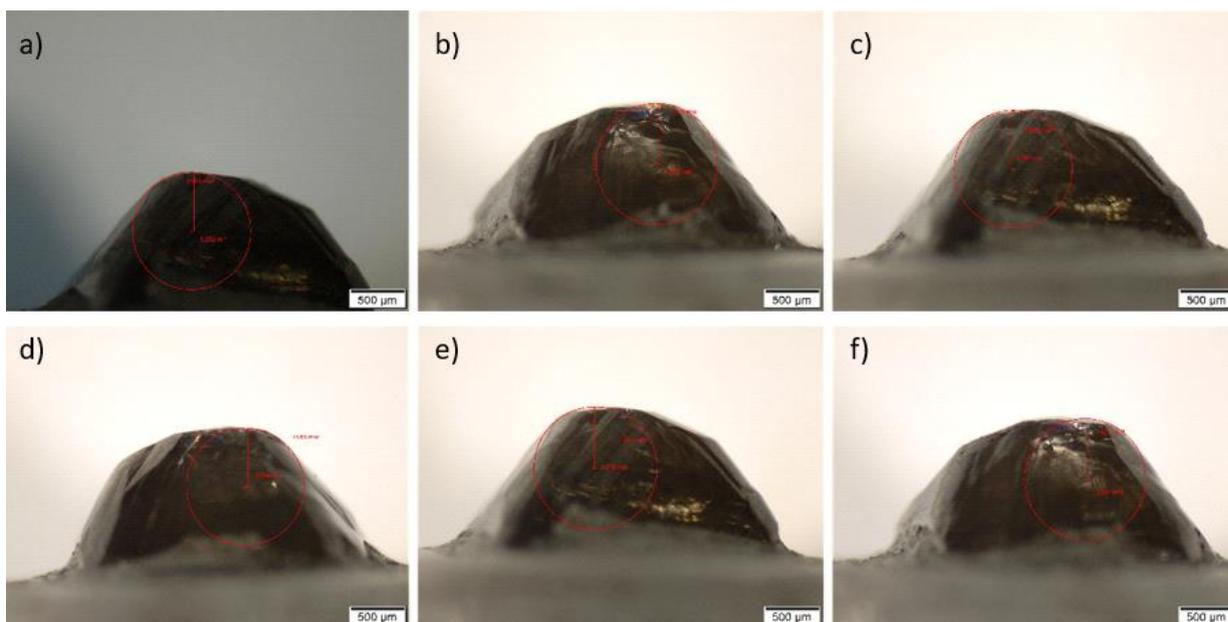


Figura 3.2 – Imagens da ponta de diamante do dressador ao longo das operações de dressagem.

As demais condições de dressagem estão dispostas na Tabela 3.2 e, na Figura 3.3 é mostrada a foto da montagem experimental da operação de dressagem.

Tabela 3.2 – Condições de dressagem.

Variável	Valor adotado
Tipo de dressador	Ponta única
Profundidade de dressagem (a_d)	20 μm
Largura do dressador (b_d)	0,3 mm
Grau de recobrimento (U_d)	3
Passo de dressagem (S_d)	0,085 mm
Tempo de dressagem (t_d)	7,4 s
Número de passes	3



Figura 3.3 – Foto de operação de dressagem.

3.3. Planejamento experimental dos ensaios de retificação

Para preparação das amostras, foi utilizado os parâmetros de corte mais brandos ($v_w = 7,5$ m/min e $a_e = 10$ μ m). Para os ensaios de retificação, foram variados 3 valores de penetração (a_e) de trabalho e 2 valores de velocidade da peça (v_w). O critério de parada de cada ensaio foi uma remoção de material na altura da peça igual a 100 μ m, deste modo, foi analisado 10 passes com a_e de 10 μ m, 4 passes com a_e de 25 μ m e 2 passes com a_e de 50 μ m. Vale salientar que um passe se refere a passagem do rebole sobre a peça (ida) e o seu retorno sem incremento da penetração de trabalho (spark-out).

As condições testadas no processo retificação plana tangencial do aço rápido com rebole convencional de óxido de alumínio branco estão expostas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Condições de corte utilizadas nos ensaios experimentais de retificação.

Condição	Velocidade de peça (v_w)	Penetração de trabalho (a_e)
1	7,5 m/min	10 passes de 10 μ m
2	2,5 m/min	10 passes de 10 μ m
3	7,5 m/min	4 passes de 25 μ m
4	2,5 m/min	4 passes de 25 μ m
5	7,5 m/min	2 passes de 50 μ m
6	2,5 m/min	2 passes de 50 μ m

3.4. Variáveis de saída e metodologia para suas medições

Para avaliação do processo de retificação plana tangencial do aço rápido com rebolo convencional de óxido de alumínio, este trabalho contou com as seguintes variáveis de saída: rugosidade da superfície usinada (parâmetros Ra e Rz), imagens da superfície retificada via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), microdureza e microestrutura abaixo da superfície retificada. Em sequência serão apresentados os equipamentos e os parâmetros utilizados, assim como a metodologia destas variáveis de saída.

3.4.1. Rugosidade das superfícies retificadas

As medições de rugosidade foram obtidas por meio de um rugosímetro portátil do fabricante Taylor Hobson, modelo Surtronic S100 (Figura 3.4), pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC UFU. Foram realizadas 3 medições em cada peça e analisados os parâmetros Ra (desvio médio aritmético das alturas em relação à linha central média) e Rz (diferença em altura média dos cinco picos mais altos e os cinco vales mais profundos ao longo do comprimento de avaliação) (ABNT NBR ISO 4287, 2002), com um *cut-off* de 0,8 mm.

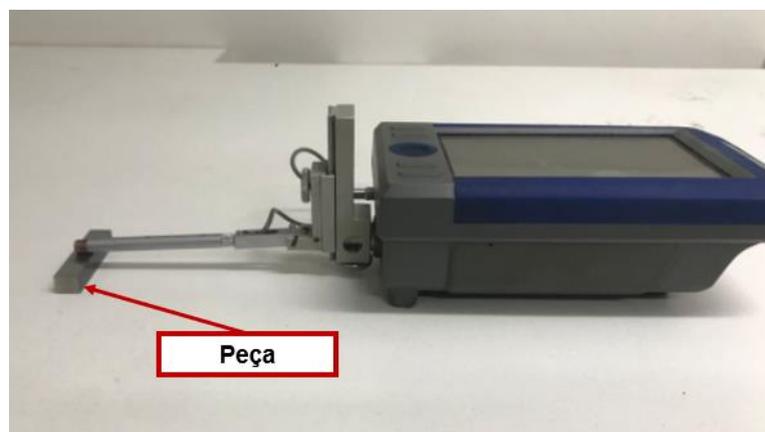


Figura 3.4 – Medição de rugosidade da superfície retificada.

3.4.2. Imagens das superfícies retificadas

Para a análise das superfícies retificadas foi utilizado um microscópio eletrônico de varredura (MEV), do fabricante HITACHI, modelo TM 3000, com uma ampliação de 1500x, pertencente ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC – UFU.

Por meio da obtenção destas imagens é possível observar a textura da superfície e identificar os mecanismos de corte e dos sulcos formados pelos grãos abrasivos na superfície da peça em função das condições de corte utilizadas.

3.4.3. Medição de microdureza abaixo da superfície retificada

Para as medições de microdureza, utilizou-se um microdurômetro Vickers Shimadzu, modelo HMV-G, com uma carga de 0,5 kgf por 15 segundos, presente no Laprosolda da FEMEC – UFU. As medições de microdureza foram realizadas em uma superfície plana e perpendicular à superfície retificada, partindo de uma distância de 20 μm da superfície e chegando até 300 μm , com uma distância vertical de 20 μm entre cada medição até a distância de 120 μm . Para a distância de 150 μm até 300 μm abaixo da superfície retificada, foi espaçado uma distância de 50 μm na direção vertical entre cada medição.

3.4.4. Microestrutura abaixo da superfície retificada

Para a análise da microestrutura, as amostras foram lixadas seguindo a sequência de granulometria mesh de 80, 120, 320, 400, 600 e 1200. Posteriormente, as amostras foram submetidas ao processo de polimento com alumina de granulometria de 1,0 μm , com posterior ataque químico para revelação da microestrutura. O ataque químico foi realizado com o reagente Nital, com uma concentração de 10% e um tempo aproximado de 5 segundos. O equipamento utilizado para visualização da microestrutura das amostras foi o microscópio óptico Olympus BX51M do LEPU-FEMEC-UFU.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos após a retificação plana do aço rápido com rebolo de óxido de alumínio conforme variáveis de entrada propostas na Tabela 3.1 para todas as variáveis de saída analisadas.

4.1. Rugosidade da superfície

Os resultados dos valores de rugosidade média dos parâmetros Ra e Rz do aço rápido em diferentes condições de corte são apresentados, respectivamente, na Figura 4.1 e Figura 4.2. Foram testadas diferentes condições de corte: 3 valores de penetração de trabalho com diferentes números de passes (10 passes de 10 μm , 4 passes de 25 μm e 2 passes de 50 μm) e dois valores de velocidades da peça (2,5 e 7,5 m/min).

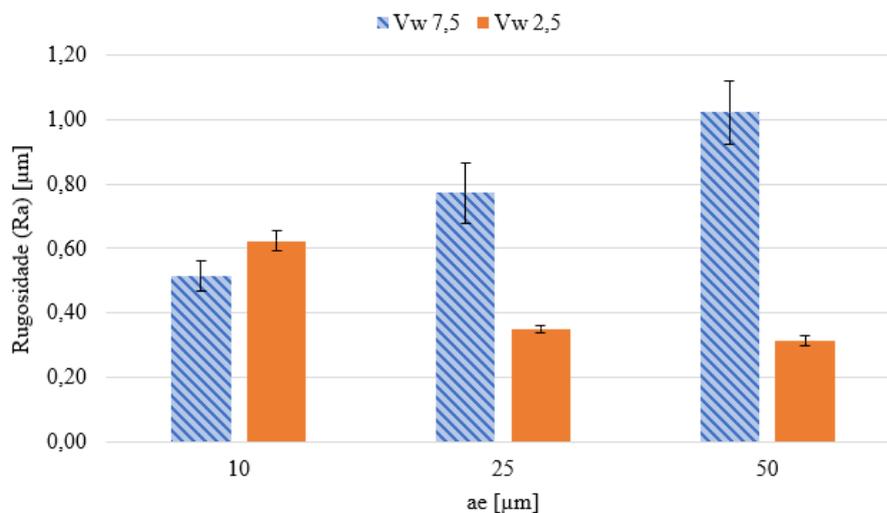


Figura 4.1 – Rugosidade média (Ra) do aço rápido em função da penetração de trabalho e do número de passes.

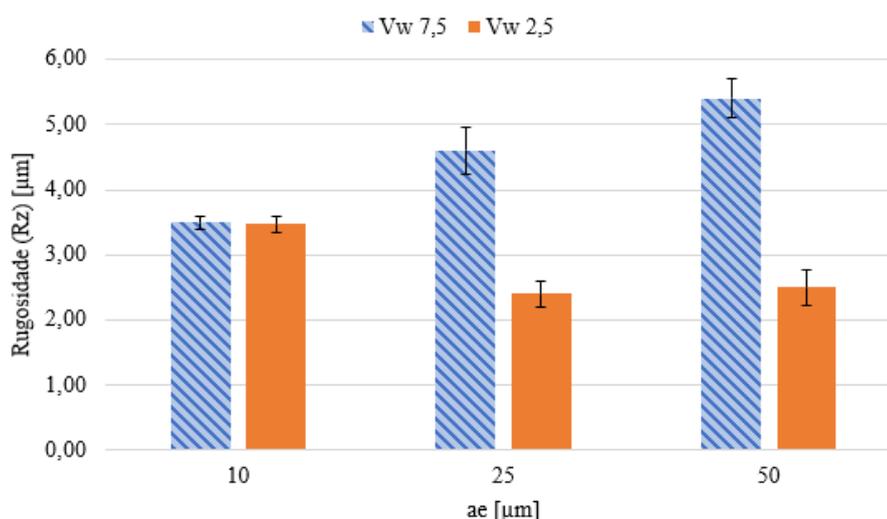


Figura 4.2 – Rugosidade média (Rz) do aço rápido em função da penetração de trabalho e do número de passes.

A partir da análise dos gráficos obtidos de rugosidade Ra e Rz, Figura 4.1 e Figura 4.2, respectivamente, é possível notar uma explícita tendência de aumento nos valores de rugosidade com o aumento da penetração de trabalho (a_e) para as condições em que foram empregadas uma maior velocidade da peça ($v_w = 7,5$ m/min). Já para as condições em que se empregou um menor v_w (2,5 m/min), os valores de rugosidade, reduziram quando a penetração de trabalho foi aumentada de 10 para 25 e 50 μm , embora eles sejam menores que aqueles para a maior velocidade da peça. Essa diferença de tendência mostrou uma maior diferença entre os valores de rugosidade obtidos após a retificação com v_w menor

combinada com maior a_e de 50 μm . Considerando esta mesma penetração de trabalho, houve uma diminuição de 69,6% no valor médio de rugosidade, parâmetro Ra, da condição de $v_w = 7,5$ m/min para a condição em que se utilizou $v_w = 2,5$ m/min.

Ao fazer a análise dos resultados em função da velocidade da peça (v_w), os resultados estão de acordo com o que é normalmente relatado na literatura. Sabe-se que o aumento da velocidade da peça aumenta a taxa de remoção de material específica ($Q'w$), e leva a maiores espessuras de cavaco não deformado e espessura de corte equivalente, o que contribui para maiores valores de rugosidade, o que reflete na deterioração do acabamento (KLOCKE, 2009).

Para a influência da penetração de trabalho (a_e) nos resultados de rugosidade, a análise é similar àquela feita para velocidade da peça, v_w , e o aumento de a_e também resultará em uma maior taxa de remoção de material e maiores esforços de corte, o que mostrou uma contribuição no aumento dos valores de rugosidade para as condições em que se empregou um $v_w = 7,5$ m/min. O aumento da penetração de trabalho implica em um maior número de partículas abrasivas do rebolo em contato com a peça, o que faz com que mais calor seja gerado no processo, com isso afetando as forças de corte e piorando as condições tribológicas que afetam negativamente a textura da peça. Porém, para as condições em que foram empregados um $v_w = 2,5$ m/min, mostrou-se uma melhora no acabamento superficial com o aumento da penetração de trabalho.

Paiva et al. (2020), ao realizarem um estudo sobre retificação do aço SAE 52100 com rebolo de óxido de alumínio branco sob diferentes condições de corte, entre eles dois valores de v_w (3 e 7 m/min) e dois valores de a_e (10 e 30 μm), relataram aumentos para os valores de rugosidade conforme aumentaram-se esses parâmetros. Os autores atribuem esse fato ao aumento da espessura do cavaco não deformado e, conseqüentemente, ao aumento na taxa de remoção de material, que por sua vez afeta negativamente o acabamento da peça. Observou-se ainda que aumento velocidade da peça exerceu uma influência mais significativa na rugosidade superficial do que o aumento na penetração de trabalho.

Em outro trabalho de retificação de aço endurecido (IS 2062, dureza de 55 ± 2 HRc) com rebolo de óxido de alumínio (AA54K5V6), Srivastava et al. (2020) analisaram 2 velocidades da peça (8 e 12 m/min) e 4 penetrações de trabalho (6, 12, 18 e 24 μm) e constataram que os maiores valores de rugosidade foram encontrados para as condições mais severas de retificação, maiores valores de penetração de trabalho e velocidade da peça. Os autores relatam que tais resultados estão ligados ao aumento da espessura de cavaco não deformados e a área de contato entre rebolo e a peça, e à medida que se aumenta estes dois parâmetros, resulta na elevação dos esforços de corte, levando a um pior acabamento superficial.

Dentre as condições de retificação avaliadas, o maior valor de rugosidade (Ra) foi obtido

para a condição em que se implicou a maior velocidade de peça ($v_w = 7,5$ m/min) e a maior penetração de trabalho ($a_e = 50$ μm), ainda assim, este resultado se encontra abaixo do limite superior de rugosidade (R_a) considerado para o processo de retificação na literatura (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2014).

4.2. Imagens das superfícies retificadas

As imagens obtidas das superfícies retificadas em diferentes condições de corte estão apresentadas na Figura 4.3. Foram analisadas 6 condições de corte de a) a f), seguindo a sequência de condições de 1 a 6 apresentadas na Tabela 3.3.

Das Figura 4.3 a), c) e e), em que a velocidade da peça foi mantida constante em $v_w = 7,5$ m/min, é possível observar que, conforme aumentou-se a penetração de trabalho e juntamente diminuiu-se o número de passes, houve deterioração na textura da superfície. Isso pode estar relacionado com a maior profundidade de corte empregada, que por sua vez, resulta em uma maior remoção de material a cada passe do rebolo (MARINESCU et al., 2016).

Já nas Figura 4.3 b), d) e f), cujas imagens foram obtidas das superfícies usinada com a velocidade da peça (v_w) constante em 2,5 m/min, notou-se que houve uma melhora na textura superficial da peça, conforme aumentou-se a penetração de trabalho e diminuiu o número de passes.

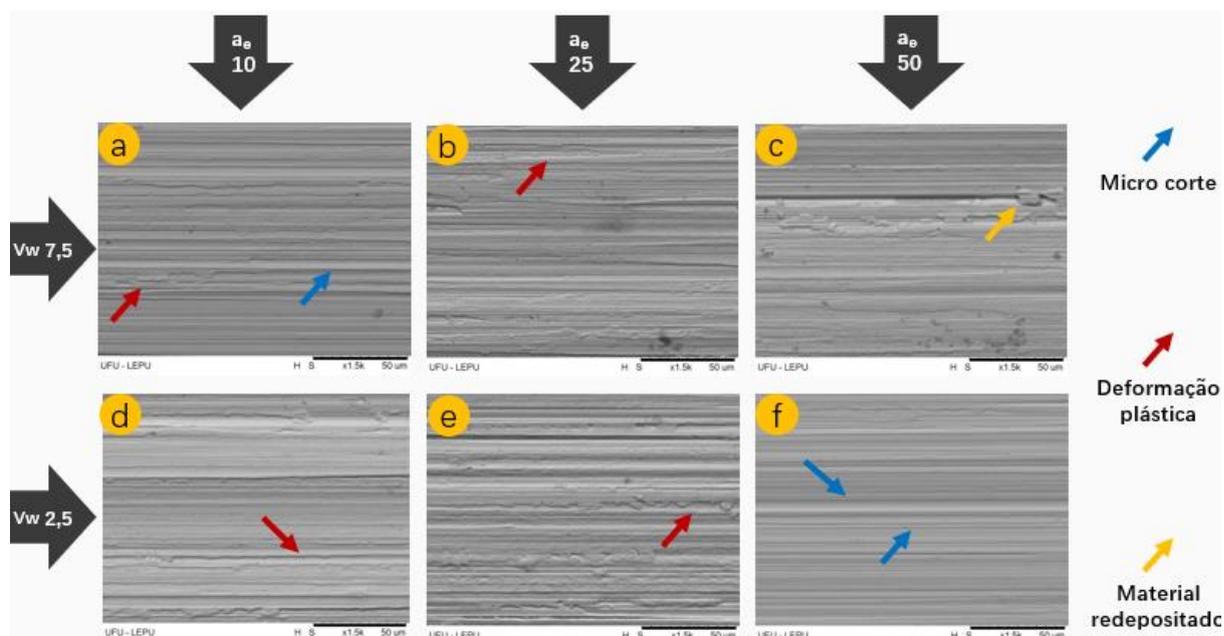


Figura 4.3 – Imagens de MEV das superfícies de aço rápido retificadas em diferentes condições de corte.

De modo geral, é possível notar um pior acabamento para as superfícies que foram retificadas utilizando uma maior velocidade da peça ($v_w = 7,5$ m/min). Este resultado pode estar relacionado com o fato de haver uma maior geração de calor e aumento nas forças de corte durante o processo e, na condição em que se utilizou uma maior penetração de trabalho ($a_e = 50$ μ m) combinado com a maior velocidade da peça, é possível observar a ocorrência de material redepositado na superfície da peça, destacado com a seta amarela (Figura 4.3-e). O aumento na geração de calor reduz a resistência ao cisalhamento da peça, o que a torna mais dúctil e favorece a ocorrência de material depositado na superfície retificada, deteriorando assim a sua textura e o acabamento (MARINESCU et al., 2012).

A ocorrência de deformação plástica foi observada na maioria das superfícies analisadas e se encontram destacadas com as setas na cor vermelha na Figura 4.3 (a-b-c-d). Esta ocorrência pode estar relacionada com a dissipação da energia gerada na região de cisalhamento.

Por outro lado, o mecanismo de micro corte foi predominante na condição em que se utilizou um $v_w = 2,5$ m/min e $a_e = 50$ μ m (Figura 4.3-f), este mecanismo de corte encontra-se destacado com a seta azul, onde é possível observar riscos mais regulares e sem interrupção, sem a ocorrência de deformações plásticas para as laterais do sulco.

Ruzzi et al. (2020) ao realizarem a retificação do aço AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio convencional, sob diferentes condições de lubrificação, observaram nas imagens das peças obtidas a ocorrência de deformações plásticas com o aumento no avanço (maior profundidade de corte) e principalmente para as condições em que se utilizaram a técnica convencional de lubrificação.

Em outro trabalho em que se realizou a retificação do aço SAE 52100, Paiva et al. (2020) testaram diversas condições de corte e a aplicação de nanopartículas de grafeno presente no fluido de corte aplicados via técnica MQL. Os autores relataram a ocorrência de deformações plásticas na superfície retificada para a condição mais severa ($v_w = 7$ m/min e $a_e = 30$ μ m), a qual se fez ausente o uso das nanopartículas de grafeno.

4.3. Microdureza abaixo da superfície retificada

Os perfis de microdureza abaixo da superfície retificada do aço rápido para as diferentes condições testadas estão apresentados na Figura 4.4. As condições avaliadas foram as seis condições, conforme Tabela 3.3, onde o número de cada condição corresponde a cada medição realizada representadas por números indicados na legenda da Figura 4.4, de 1 a 6, respectivamente. As condições variadas foram 3 valores de penetração de trabalho a_e em combinação com diferentes números de passes (10 passes de 10 μ m, 4 passes de 25 μ m e 2 passes de 50 μ m) e 2 v_w (2,5 e 7,5 m/min), totalizando uma remoção final de material na

altura da peça igual a 100 μm .

De modo geral, é possível notar que houve um aumento da microdureza próximo a 20 e 40 μm da superfície retificada para todas as condições testadas (exceto a Condição 1 – $a_e = 10 \mu\text{m}$ e $v_w = 7,5 \text{ m/min}$ – em que os valores não tiveram grandes variações em torno da dureza de referência do material). Já os maiores valores obtidos foram por volta de 880 HV onde foram obtidos após a usinagem sob condição severa – Condição 6 – $a_e = 50 \mu\text{m}$ e $v_w = 2,5 \text{ m/min}$. A partir da distância de 100 μm abaixo da superfície retificada, houve menores variações nos valores de microdureza, resultando em uma dureza média de 751 HV, esse valor pode ser adotado como dureza de referência do material.

As condições em que foram empregadas uma maior penetração de trabalho, mostraram uma maior variação na microdureza, resultando nos maiores valores obtidos, 870 HV para a Condição 5 e 880 HV para a Condição 6, que correspondem a um aumento de 15,8% e 17,2% nos valores de microdureza, respectivamente.

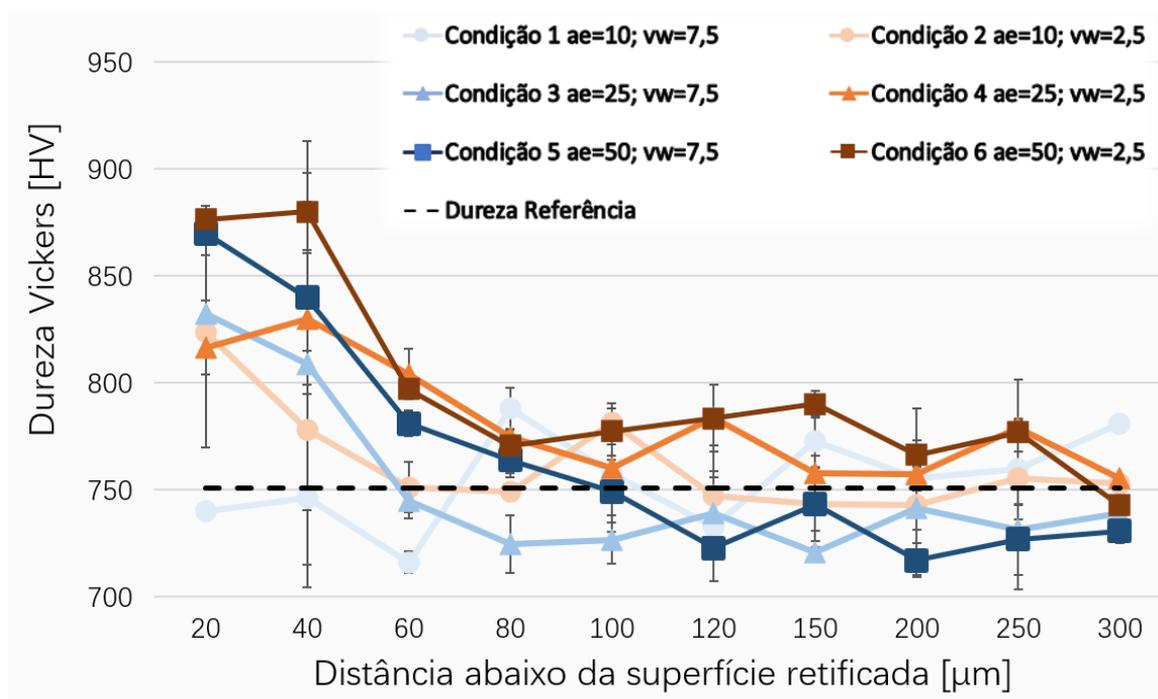


Figura 4.4 – Microdureza abaixo da superfície retificada sob diferentes condições de corte.

As condições 2, 3 e 4 apresentaram um aumento de aproximadamente 10% na microdureza para uma distância de 20 μm da superfície retificada, enquanto a condição 1 não apresentou grandes variações. Nota-se que as maiores variações de microdureza ocorreram nas amostras que foram retificadas para as condições em que se empregou um maior valor de penetração de trabalho a_e , portanto condições mais severas de retificação. Este resultado pode ser explicado pelo aumento na espessura de cavaco não deformado e na espessura de

cutte equivalente e, também, no aumento do comprimento de contato do rebolo com a peça, que são diretamente proporcionais a penetração de trabalho, o que resultam em um aumento significativo na temperatura de retificação e geração de calor. Com isso, a peça está mais propensa a variações de natureza mecânica, neste caso a microdureza.

Na retificação do aço endurecido IS 2062 (55 ± 2 HRc) com rebolo de óxido de alumínio (AA54K5V6), Srivastava et al. (2020) testaram várias condições de corte, entre eles $2 v_w$ (8 m/min e 12 m/min) e $4 a_e$ (6 μ m, 12 μ m, 18 μ m e 24 μ m) e relatam que houve aumento na microdureza abaixo da superfície retificada para todas as condições testadas. Além disso, os maiores aumentos de microdureza foram registrados nas peças que foram usinadas com condições em que se empregou os maiores valores de a_e e v_w .

4.4. Microestrutura abaixo da superfície retificada

As imagens das microestruturas abaixo da superfície retificada são apresentadas nas figuras Figura 4.5 e Figura 4.6, onde se encontra os resultados para todas as seis condições testadas neste trabalho, representadas de a) a f). Na Figura 4.5 são apresentadas as imagens da microestrutura da região onde o rebolo fez o primeiro contato com a peça, região denominada como entrada do rebolo, enquanto, na Figura 4.6, são expostas imagens da região de saída do rebolo, região oposta a região de entrada do rebolo. As linhas horizontais amarelas que se faz presente em algumas imagens (Figura 4.5 - c, e, f e Figura 4.6 - e) representam uma distância de 100 μ m abaixo da superfície retificada.

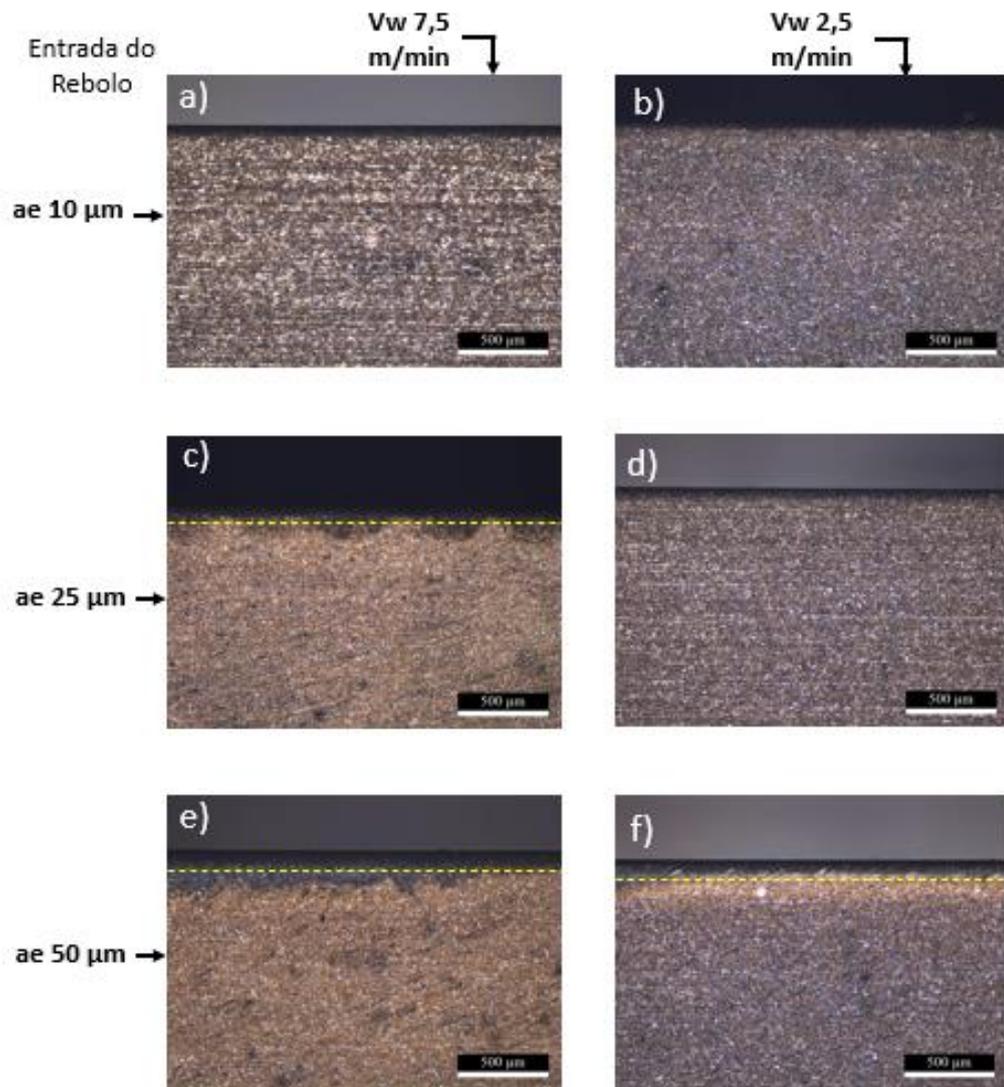


Figura 4.5 – Microestrutura abaixo da superfície retificada do aço rápido sob diferentes condições de corte - região de entrada do rebolo na peça.

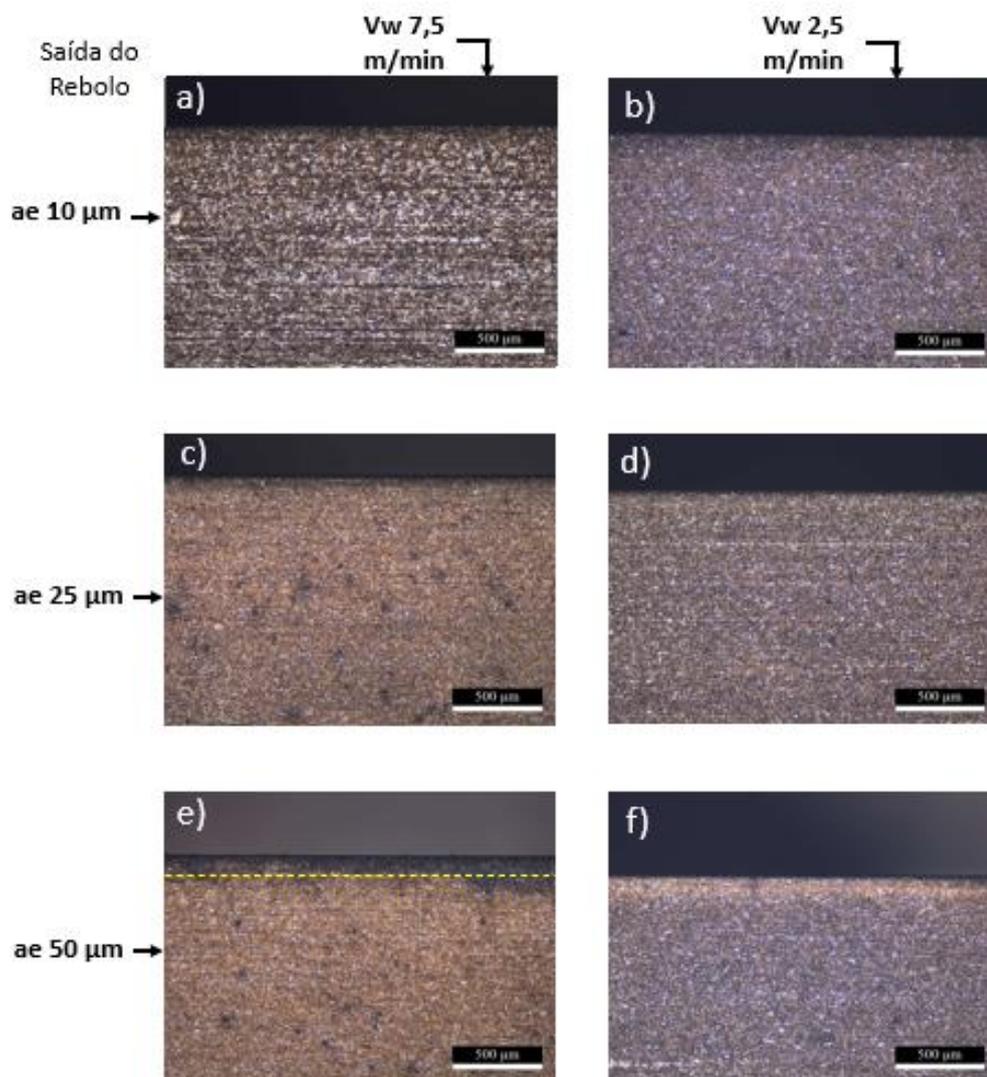


Figura 4.6 – Microestrutura abaixo da superfície retificada do aço rápido sob diferentes condições de corte - região de saída do rebolo na peça.

Devido as altas taxas de deformação plástica, somadas ao atrito das partículas dos abrasivos, o processo de retificação tem como resultado uma grande quantidade de calor gerado na zona de corte e, com isso, geralmente se espera uma queda de dureza devido ao revenimento do material. Contudo, essas elevadas taxas de deformação podem resultar em um endurecimento devido ao encruamento, ou ainda propiciar transformações na microestrutura e tensões residuais. Estes efeitos plásticos-mecânicos e o amolecimento pela temperatura ocorrem simultaneamente durante a retificação (MALKIN; GUO, 2008; JI et al., 2017).

Das Figura 4.5 e Figura 4.6 é possível visualizar que, em regiões mais afastadas da superfície retificada, não houve alterações na microestrutura. Entretanto, para condições mais severas, observa-se regiões mais escuras próximas a superfície retificada. Estas regiões

correspondem a uma alteração na microestrutura do material e, ao se relacionar esses resultados com os resultados de microdureza já apresentados, pode-se afirmar que houve um aumento na sua dureza naquela região.

Ao analisar os resultados de microdureza sem nenhum resultado complementar, não é capaz de identificar a causa de elevação de dureza, podendo ter ocorrido devido ao endurecimento secundário (re-têmpera) ou encruamento devido a esforços mecânicos (HE et al., 2019).

Os aços rápidos apresentam em sua microestrutura a denominada austenita retida que representa a quantidade de austenita que não é totalmente transformada em martensita durante o processo de têmpera. Esta austenita possui a tendência de se transformar em martensita sob altas temperaturas e níveis de tensão, resultando em uma fase martensítica frágil devido a não ter sido revenida (MESQUITA, 2016).

Em um trabalho onde foi avaliado a retificação do aço rápido utilizando rebolo convencional de SiC e diferentes valores de penetração de trabalho (10, 15, 20 e 30), Vendrame (2019) relatou aumento de dureza próximo a superfície para quase todas as amostras e condições analisadas. O autor atribuiu tais resultados ao efeito combinado do acúmulo de calor gerado pelo rebolo das altas taxas de deformação do processo, e a tendência do material em formar martensita não revenida.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos resultados obtidos após a retificação plana tangencial do aço rápido com rebolo de óxido de alumínio branco sob diferentes condições de corte, pode-se obter as seguintes conclusões:

- Uma melhor textura superficial da peça foi obtida após a usinagem com uma combinação de menor velocidade da peça (v_w) e maior penetração de trabalho (a_e), sendo 50% menor em relação a condição em que se empregou menor penetração de trabalho ($0,62 \mu\text{m}$ para $0,31 \mu\text{m}$). Pelas imagens das superfícies usinadas é possível inferir que houve mecanismo de micro corte por parte do rebolo e foram registrados menores valores de rugosidade para esta condição;
- Para as condições em que se empregou uma maior velocidade da peça, os valores de rugosidade mostraram-se maiores conforme houve aumento da penetração de trabalho, onde para a condição mais severa foi registrado um valor de rugosidade R_a de $1,02 \mu\text{m}$, que está abaixo do limite superior considerado para processo de retificação ($R_a = 1,6 \mu\text{m}$). Porém, para as condições de menor velocidade da peça, o comportamento foi o oposto;
- As variações na microdureza resultaram em um aumento de dureza do material abaixo da superfície retificada. As maiores variações se deram para as condições em que se empregaram uma maior penetração de trabalho, onde foram registrados um aumento de 15,8% e 17,2% para as condições 5 e 6, respectivamente;

- Para a maioria das condições analisadas, a velocidade da peça não mostrou grande influência nos valores de microdureza;
- Correlacionando os resultados de microdureza e microestrutura, pode-se concluir que o aumento da dureza do material é proveniente das alterações microestruturais sob as altas temperaturas de corte desenvolvidas no processo de retificação.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

As sugestões para que trabalhos futuros possam contribuir e aprofundar mais o estudo e complementar os resultados obtidos nesta pesquisa são:

- I. Utilizar partículas sólidas dispersas no fluido de corte, por exemplo com nanotubos de carbono, grafeno e óxido de alumínio, via a técnica MQL nas mesmas condições investigadas neste trabalho.
- II. Testar rebolos de óxido de alumínio monocristalino para a retificação do aço rápido e avaliar também a vazão do fluido de corte e número de bocais, como também os parâmetros da operação de dressagem: tipo de dressador e grau de recobrimento.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR ISO 4287 **Especificações geométricas dos produtos (GPS) – rugosidade: método do perfil – termos, definições e parâmetros da rugosidade**. Rio de Janeiro, 2002.

ASM METALS HANDBOOK. **ASM Handbook, Volume 16: Machining**. 9th. ed. [s.l.] : ASM International, 1989.

BADGER, J. **Grindability of conventionally produced and powder-metallurgy high-speed steel**. CIRP annals, v. 56, n. 1, p. 353-356, 2007.

BADGER, J. **Grindability of high speed-steels**. [S.l.]: Erasteel, 2003.

BELENTANI, Rafael de Mello et al. **Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel**. Materials Research, v. 17, n. 1, p. 88-96, 2014.

BIANCHI, E. C., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., DA SILVA JÚNIOR, C. E., VALARELLI, I. D., AGUIAR, P. R., **“Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Frágeis e Dúcteis”**, RBCM – Journal of Brazilian Society Mechanical Sciences, Vol. XIX – No 3, 1997, 410-425;

BOCCALINI, M.; GOLDENSTEIN, H. **Solidification of high speed steels**. International Materials Reviews, IOM Communications for the Institute of Materials, v. 46, n. 2, p. 92–115, 2001.

CALLISTER, William D.; RETHWISCH, David G. **Fundamentals of materials science and engineering: an integrated approach**. 4th editio ed. [s.l.]: John Wiley & Sons, 2012.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerias, tratamentos térmicos, principais tipos**. [S.l.]: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 2005.

DA SILVA, R. B., **The Effect of Nozzle Type and its Positioning on Surface Integrity of VP100 Steel After Grinding**. 10.20906/CPS/COB-2015-2459. 2015.

DE OLIVEIRA TEIXEIRA, P., BRIMMERS, J. AND BERGS, T. **Investigation of Mechanical Loads Distribution for the Process of Generating Gear Grinding**. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 5(1), p.13, 2021.
<https://doi.org/10.3390/jmmp5010013>.

DINIZ, Anselmo Eduardo; MARCONDES, Francisco Carlos; COPPINI, Nivaldo Lemos. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 9a Ed. ed. São Paulo: Artliber, 2014.

ELFUSA. **Abrasivos**. 2019. Disponível em:
<http://www.elfusa.com.br/pt/produtos/abrasivos/bt>. Acesso em: 04 jul. 2022.

ETTL, P., SCHMIDT, B., SCHENK, M., LASZLO, I., HÄUSLER, G., **"Roughness parameters and surface deformation measured by 'Coherence Radar'"**, Proceeding of SPIE – The International Society for Optical Engineering, 3407, 1998, 133-140;

GADELMAWLA, E.S., KOURA, M.M., MAKSOU, T.M., ELEWA, I.M. AND SOLIMAN, H.H. **Roughness parameters. Journal of materials processing Technology**, 123(1), pp.133-145, 2002.

HADAD, M. J., TAWAKOLI, T., SADEGHI, M. H., SADEGHI, B., **"Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process"**, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 54-55, 2012.

HE, B. et al. **A survey of methods for detecting metallic grinding burn**. Measurement: Journal of the International Measurement Confederation, [s. l.], v. 134, p. 426–439, 2019.

INDAÇO. **Catálogo Grupo Indaço 5ª Edição – 2015**. Disponível em: <<https://www.catalogos.armazemfabricas.com.br/catalogo-indaco-2015.pdf>>. Acesso em: 06 de ago. de 2022.

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, [s. l.], v. 45, n. 15, p. 1696–1705, 2005.

JACKSON, MARK J., AND J. PAULO DAVIM. **Machining with abrasives**. New York: Springer, 2011.

JAWORSKI, J.; TRZEPIECINSKI, T.; STACHOWICZ, F. **Effect of Grinding Parameters on the Surface Quality of Cutting Tools Made of High-Speed Low-Alloy Steels**. Strength of Materials, [s. l.], v. 48, n. 4, p. 566–572, 2016.

Jl, K. et al. **Surface integrity of quenched steel 1045 machined by CBN grinding wheel and SiC grinding wheel**. International Journal of Structural Integrity, [s. l.], v. 8, n. 2, p. 179–187, 2017.

KLOCKE, F. **Manufacturing processes 2**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2009.

KRAJNIK, P. et al. **Particularities of grinding high speed steel punching tools**. In: Advanced Materials Research. Trans Tech Publications Ltd, 2011. p. 177-182.

MACHADO, Álisson Rocha et al. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 3. ed. São Paulo: Blucher, 2015.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding Technology: Theory and Application of Machining with Abrasives**. Second Edition. New York, NY: Industrial Press, 2008.

MAO, C., ZHANG, J., HUANG, Y., et al., **"Investigation on the effect of nanofluid parameters on MQL grinding"**, Materials and Manufacturing Processes, v. 28, n. 4, pp. 436-442, 2013.

MARINESCU, I. D. et al. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. [s.l.] : CRC

Press, 2007.

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. AND OHMORI, H. **Tribology of abrasive machining processes**. William Andrew, 2012.

MESQUITA, R. A. **Tool steels: Properties and performance**. Taylor & Francis Group, 6000 Broken Sound Parkway NW, Suite 300, Boca Raton, FL 33487-2742: CRC Press, 2016.

NUSSBAUM, G. C. **Rebolos e abrasivos: Tecnologia básica**. 1.ed. São Paulo: Ícone, 3 volumes, 1988.

OSG. Catálogo de Produtos vol. II. OSG Sulamericana de Ferramentas Ltda. Disponível em: <https://osg.com.br/docs/catalogos/catalogo_geral_osg/web/catalogo_geral_vol2_PT-BR_ESP.pdf>. Acesso em: 06 de ago. de 2022.

PAIVA, R.L., RUZZI, R.S., OLIVEIRA, L.R., BANDARRA FILHO, E.P., NETO, L.M., GELAMO, R.V., SILVA, R.B. **Experimental study of the influence of graphene platelets on the performance of grinding of SAE 52100 steel**. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2020 Sep;110(1):1-2.

PAIVA, Raphael Lima de. **Análise de desempenho do processo de retificação do aço SAE 52100 em diferentes condições de lubri-refrigeração**. 2020. 209 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2020.

ROWE, W. B. **Principles of Modern Grinding**. 2. ed. OX: ELSEVIER, 2014. 444p.

RUZZI, R. de S. **Retificabilidade das ligas de níquel Inconel 625 e Inconel 718**. 2019. 160f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2019.2242>

RUZZI, R. S., SILVA, L.R., SILVA, R.B., SILVA JUNIOR, W.M., BIANCHI, E.C. **Topographical analysis of machined surfaces after grinding with different cooling lubrication techniques**. Tribology International. 2020 Jan 1; 141:105962.

SADEGHI, M. H., HADAD, M. J., TAWAKOLI, T., VESALI, A., EMAMI, M., “**An investigation on surface grinding of AISI 4140 hardened steel using minimum quantity lubrication-MQL technique**”, Int J Mater Form, 3, 2010.

SAINT-GOBAIN. **A Norton revolucionou o mercado em vários momentos ao apresentar inovações nos grãos, que são, como todos sabem, a matéria-prima básica dos abrasivos**. 2019 Disponível em: <https://www.nortonabrasives.com/pt-br/graos-abrasivos-e-inovacao-nos-processos>. Acesso em: 04 jul. 2022.

SRIVASTAVA, A., AWALE, A., VASHISTA, M. AND YUSUFZAI, M.Z.K. **Monitoring of thermal damages upon grinding of hardened steel using Barkhausen noise analysis**.

Journal of Mechanical Science and Technology, 34(5), pp.2145-2151, 2020.

TAWAKOLI, T., HADAD, M. J., SADEGHI, M. H., DANESHI, A., STÖCKERT, S., RASIFARD, A., **“An experimental investigation of the effects of workpiece and grinding parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding”**, Internal Journal of Machine Tools & Manufacture, 49, 2009.

VENDRAME, S., **Estudo da integridade da aresta de macho de corte de HSS durante a retificação em várias condições de corte**. 2015. –133 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, Brasil.

ZHANG, Y., LI, C., JIA, D., et al., **“Experimental evaluation of the lubrication performance of MoS₂/CNT nanofluid for minimal quantity lubrication in Ni-based alloy grinding”**, International Journal of Machine Tools and Manufacture, v. 99, pp. 19-33, 2015.