

LUCAS ALFREDO BARBOSA DE CASTRO

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE DO
AÇO INOXIDÁVEL ABNT 316 M APÓS A
RETIFICAÇÃO EM DIVERSAS CONDIÇÕES DE
CORTE**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2021

LUCAS ALFREDO BARBOSA DE CASTRO

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT
316 M APÓS A RETIFICAÇÃO EM DIVERSAS CONDIÇÕES DE CORTE**

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: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Professor Dr. Rosemar Batista da Silva.

Uberlândia - MG

2021

LUCAS ALFREDO BARBOSA DE CASTRO

**AVALIAÇÃO DA INTEGRIDADE DA SUPERFÍCIE DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT
316 M APÓS A RETIFICAÇÃO EM DIVERSAS CONDIÇÕES DE CORTE**

Trabalho de conclusão de curso **APROVADO** pelo
Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Mecânica da Universidade Federal de
Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de
Fabricação.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

Me. Mayara Fernanda Pereira – Pós-Graduanda em nível de Doutorado – FEMEC -
UFU

Prof. Dr. Rodrigo de Souza Ruzzi – Centro Universitário Ingá – UNINGÁ – Maringá -
PR

Uberlândia, Agosto de 2021

DEDICATÓRIA

A Deus, aos meus pais e amigos
que sempre me apoiaram.

AGRADECIMENTOS

Eu gostaria de agradecer primeiramente a Deus pela saúde e por toda a força nos momentos difíceis nesta trajetória acadêmica, pela oportunidade de estar concluindo este Projeto de Fim de Curso e estar me graduando nesta instituição de excelência que é a UFU.

Eu agradeço de coração aos meus pais por terem se esforçado tanto para me proporcionar a melhor condição possível para a minha formação e por todo o carinho e suporte, o que foi de suma importância para a realização deste trabalho.

Eu agradeço pelos bons amigos Pedro Henrique Leite, Carolina Aparecida de Almeida e Ana Lídia Martins Rodrigues, quem tive a sorte de conhecer na graduação. São pessoas que sempre estiveram junto a mim, crescendo juntos em conhecimento e que tornaram essa jornada mais leve e prazerosa. A Ana Lídia Martins Rodrigues eu agradeço ainda por ser tão atenciosa e querida, e também pela empatia e auxílio quanto minha ansiedade, um obstáculo constante para meu desenvolvimento acadêmico e também para a conclusão deste projeto.

Eu também sou grato à Universidade Federal de Uberlândia (UFU) pelo ensino de qualidade e aos seus profissionais que contribuíram para realização deste trabalho, principalmente dos Laboratórios de Usinagem Convencional (LUC), de Ensino Pesquisa em Usinagem (LEPU), e de Tribologia e Materiais (LTM). Dentre estes profissionais, eu destaco os técnicos do LUC, Dr. Alcione dos Reis e Thiago Pereira por me auxiliarem nas operações de usinagem, como também ao Doutorando Felipe dos Anjos Rodrigues Campos pelo auxílio na obtenção das imagens no Microscópio Eletrônico de Varredura. Agradeço em especial ao Dr. Rodrigo de Souza Ruzzi pelo auxílio na montagem dos espectogramas referentes aos resultados de microdureza.

Por fim agradeço ao professor Dr. Rosemar Batista da Silva, pela sua orientação, por ter acreditado em mim, por todo o direcionamento do projeto e no empenho para que este fosse realizado. A minha enorme gratidão por toda a paciência e disponibilidade em me orientar.

“A felicidade pode ser encontrada mesmo nas horas mais difíceis, se você lembrar de acender a luz”

J. K. Rowling

CASTRO, L. A. B.; **Avaliação da integridade da superfície do aço inoxidável ABNT 316 M após a retificação em diversas condições de corte**. 2021. 71 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

RESUMO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão que ocupa posição de destaque na indústria metal-mecânica por principalmente ser a primeira opção em garantir a combinação entre bom acabamento e desvio dimensional estreito. O aço inoxidável também apresenta grande destaque nesta indústria, haja vista sua ampla aplicação em componentes mecânicos que requerem elevada resistência a corrosão, como equipamentos que processam celulose, rolos compressores na indústria têxtil e tanques na indústria química. Contudo, algumas de suas propriedades, tais como a baixa condutividade térmica e alta taxa de encruamento, durante a usinagem reduzem usinabilidade dos aços inoxidáveis em relação aos aços endurecidos, por exemplo. Além disso, sabe-se que condições de corte não adequadas podem levar a danos à integridade da superfície dos componentes, com destaque para queima de retífica, perda ou ganho de dureza e alterações metalúrgicas que podem afetar a sua funcionalidade. Como muitos componentes da indústria metal mecânica necessitam da etapa de retificação para atingirem as tolerâncias geométricas (por exemplo, a rugosidade) e dimensionais de projeto, tais como moldes e itens de cutelaria, por exemplo, torna-se importante determinar as condições adequadas de retificação e fornecer dados para a indústria tomar como referência. Neste contexto, este trabalho visou avaliar a integridade da superfície do aço inoxidável austenítico 316 M após a retificação plana em diferentes condições de corte com penetração de trabalho de 10 μm e 30 μm , e velocidade da peça de 2,7 m/min e 7,5 m/min. Como variáveis de saída foram avaliadas a rugosidade, imagens da superfície retificada e microdureza. Os resultados mostraram que integridade superficial foi afetada negativamente pelo aumento da penetração de trabalho e da velocidade da peça. Houve aumento de dureza próxima a superfície retificada ao empregar condições de corte mais severas.

Palavras-Chaves: Usinagem, Retificação plana tangencial, aço inoxidável austenítico 316 M, Penetração de trabalho, Velocidade da peça, integridade superficial.

CASTRO, L. A. B.; **Evaluation of the surface integrity of ABNT 316 M stainless steel after grinding at various cutting conditions**. 2021. 71p. Final Graduation Project (Bachelor of Mechanical Engineering) – Faculty of Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia.

ABSTRACT

Grinding is an abrasion machining process that stands out for the metal-mechanical industry, mainly because it is the first option to ensure combination of good surface finish and tight dimensional deviation. Stainless steel plays a major role for the industry, once it has a wide application in mechanical components in modern society that require high corrosion resistance that makes it suitable for applications in more severe conditions of use and high durability such as cellulose processing equipment, steamrollers in the textile industry and tanks from the chemical industry. However, some of stainless steels properties such, as low thermal conductivity and high work hardening during machining, reduces its machinability in comparison with hardened steels. Besides, it is known from literature that wrong selection of cutting conditions can adversely affects surface integrity of a component, causing problems such as grinding burn, hardness drop or rise and some metallurgical alterations that may affect its functionality. Since several components from metal working industry generally are subjected to grinding stage to achieve geometric tolerances (for instance the surface roughness) and dimensional ones from a project, such as cutlery items and injection mold parts, for example, it is important to determine proper grinding conditions and provide data for industry to use as a reference. Into this context, this work aims to evaluate the surface integrity of the of 316 M austenitic stainless steel after peripheral surface grinding under different cutting conditions with radial depth of cut of 10 μm and 30 μm , and workspeed of 2.7 m/min and 7.5 m/min. Surface roughness, images from the ground surfaces and microhardness of workpiece were the output variables analyzed. The results showed that surface integrity was adversely affected by the increase in depth of cut and workspeed. Increase of hardness next to the machined surface was recorded after grinding under severest cutting conditions.

Key Words: Machining, Peripheral surface grinding, ABNT 316 M austenitic stainless steel, Radial depth of cut, Workspeed, Surface integrity.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema representativo da retificação plana tangencial (Adaptada de PEREIRA, 2018).	20
Figura 2 - Especificação de rebolos (Adaptada de Stemmer, 1992).	22
Figura 3 - Representação das etapas de formação do cavaco na retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).	24
Figura 4 - Variação da rugosidade da superfície pela variação da profundidade de corte com velocidade de trabalho fixa de $v_w = 0,1$ m/s (adaptado de Manimaran e Kumar, 2013).....	37
Figura 5 - Variação da rugosidade superficial pela variação da velocidade da peça com profundidade de corte fixa de $a_e = 40$ μ m (adaptado de Manimaran e Kumar, 2013).....	37
Figura 6 - Endurecimento de superfície resultante da deformação plástica induzida pela usinagem (adaptado de Rhouma et al., 2019).	40
Figura 7 - Imagem MEV da superfície retificada em condição sem lubrificação (adaptado de Manimaran, 2013).....	41
Figura 8 - Retificadora Plana Tangencial P36, Mello, utilizada nos ensaios.	45
Figura 9 - Rebolo de óxido de alumínio branco utilizado no ensaio.....	46
Figura 10 - Máquina serra-fita usada para cortar as amostras de aço inoxidável ABNT 316 M.	47
Figura 11 - Esquema para ilustrar as regiões da peça que foram retificadas.	48
Figura 12 – Sistema de montagem da peça na morsa sobre a mesa da retificadora.	48
Figura 13 - Rugosímetro portátil utilizado e os pontos de amostragem.	51
Figura 14 - Localização das indentações da medição Vickers na superfície retificada (distâncias em mm).	51
Figura 15 - Microdurômetro SHIMADZU-HMV utilizado para a medição de microdureza.	52
Figura 16 - Base com lixadeira manual com uma pista utilizada para o lixamento da amostra para medição da dureza de referência.	53
Figura 17 - Valores de rugosidades para os parâmetros R_a , R_z , R_q e R_t do aço inoxidável ABNT 316 M em função da penetração de trabalho e velocidade da peça.....	56
Figura 18 - Imagens das superfícies retificadas do aço AISI 316 M a olho nu em diferentes condições de corte.	59
Figura 19 - Imagens das superfícies retificadas do aço AISI 316 M em diferentes condições de corte obtidas via MEV (escala de 50 μ m)	61
Figura 20 - Microdurezas medidas nas superfícies do aço AISI 316 M após retificação em várias condições de corte.	64

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável 316 M (adaptado de PIZZI et al., 1997).	32
Tabela 2 - Variáveis de entrada adotados na execução do ensaio de retificação em cheio.	49
Tabela 3 - Valores obtidos para parâmetros de rugosidade para o aço inoxidável austenítico ABNT 316 M para cada condição de corte.	55

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

ABREVIATURAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
ASM	<i>American Society for Metals</i>
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
HRC	Dureza Rockwell“C”
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IT	Índice de Tolerância
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
SAE	Associação dos Engenheiros Automotivos

SÍMBOLOS

a_d (μm)	Profundidade de dressagem
a_e (μm)	Penetração de trabalho
a_p (μm)	Profundidade de corte
h_{eq} (μm)	Espessura de corte equivalente
R_a (μm)	Desvio médio aritmético
R_{ku} (μm)	Fator de achatamento do perfil (Kurtosis)
R_q (μm)	Desvio médio quadrático
R_{sk} (μm)	Fator de assimetria do perfil (Skewness)
R_t (μm)	Altura total do perfil
R_z (μm)	Altura máxima do perfil
U_d	Grau de recobrimento do rebolo
v_j (l/min)	Vazão do fluido de corte
v_s (m/s)	Velocidade de corte
v_w (m/min)	Velocidade da peça

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	14
INTRODUÇÃO	14
CAPÍTULO II	18
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
2.1 Usinagem por abrasão	18
2.2 O processo de retificação	19
2.2.1 Retificação plana tangencial	20
2.3 Rebolo e seus componentes	20
2.5 Principais variáveis no processo de retificação	25
2.6 Aços inoxidáveis	27
2.6.1 Classificação dos aços inoxidáveis	29
2.6.2 Aços inoxidáveis austeníticos	31
2.6.3 Usinabilidade dos aços inoxidáveis	33
2.7 Qualidade e integridade das superfícies	34
2.8 Rugosidade	35
2.9 Alterações na integridade subsuperficial	38
2.9.1 Deformação plástica	39
2.9.2 Alteração na microdureza	39
2.9.3 Surgimento de trincas	41
2.9.4 Tensões residuais	42
2.9.5 Queima da superfície retificada	43
CAPÍTULO III	45
MATERIAIS E MÉTODOS	45
3.1 Máquina-ferramenta	45
3.2 Ferramenta de corte	46
3.3 Material da peça	47
3.4 Parâmetros de corte	49
3.5 Variáveis de saída	50
3.5.1 Rugosidade	50
3.5.2 Microdureza	51
3.5.3 Imagem da superfície retificada	53
CAPÍTULO IV	55
RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
4.1 Rugosidade da superfície	55

4.2	Imagens das superfícies retificadas	59
4.3	Microdureza	63
CAPÍTULO V		67
CONCLUSÕES		67
Sugestões para trabalhos futuros		68
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		69

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A usinagem por abrasão, como técnica de remoção de material por meio da ação de grãos abrasivos, foi o primeiro mecanismo de remoção de material utilizado pela humanidade como se observa desde a idade da pedra, em que através de um aparato rudimentar utilizando-se de uma vara pressionada em rotação e com auxílio de areia era possível realizar furos em rodas de pedras. Já na idade antiga há vestígios do uso do rebole rotativo utilizado na afiação de armas e ferramentas. No Egito antigo (2000 a.C), por exemplo, os abrasivos naturais eram usados para polir joias, vasos e ornamentos. Além disso, em Samuel 13:20 pela frase “Assim, eles tinham que ir aos filisteus para afiar seus arados, enxadas, machados e foices” até mesmo no Antigo Testamento há evidência do emprego do princípio da usinagem por abrasão em que os homens já praticavam a afiação de suas ferramentas de trabalho. Contudo, foi na Era Moderna, com o aumento da industrialização, que a importância da usinagem por abrasão se intensificou com seu uso inicial em peças de máquinas de costura e componentes para bicicletas, o que desde então se faz presente na confecção de manufaturados (MALKIN; GUO, 2008).

Atualmente, processos de fabricação que utilizam usinagem por abrasão são muito empregados para atender a demanda de vários setores da indústria, principalmente na metal-mecânica como na usinagem de moldes para injeção de plástico, afiação de ferramentas de corte e de vários itens de cutelaria (facas, por exemplo), face de bielas e de várias partes de rolamentos, dentre outros. A retificação normalmente é primeira opção para a produção de peças que exigem ótimo acabamento (rugosidade média aritmética, R_a , entre $0,2\ \mu\text{m}$ e $1,6\ \mu\text{m}$) e desvios dimensionais estreitos (representados, por exemplo, por qualidade de trabalho (IT) que varia entre IT06-IT03), ou quando o material a ser trabalhado possui elevada dureza. Ela ainda é empregada em situações em que há limitações por outros processos de usinagem que empregam ferramenta com geometria definida, como por exemplo o torneamento e o fresamento, ou mesmo para corrigir defeitos de operações precedentes (DA SILVA, 2018).

O mecanismo de remoção de material na operação de retificação ocorre por meio da ação de milhares partículas abrasivas de natureza não-metálica, muito duras e de arestas afiadas com geometria não definida presentes no rebolo. Elas removem o material da superfície da peça pela abrasão resultante da pressão aplicada e movimento relativo entre as superfícies (MACHADO et al., 2009).

A retificação é um processo que requer certo cuidado, pois sendo uma das etapas finais na fabricação da peça, um erro nesse estágio pode resultar na perda da funcionalidade da mesma e em seu decorrente descarte, trazendo sérios prejuízos. Por causa dos pequenos valores de penetração de trabalho e da baixa condutividade térmica da maioria dos abrasivos convencionais utilizados nos rebolos, tais como óxido de alumínio e carbetto de silício, grande parte do calor gerado no processo é direcionado à peça (MARINESCU et al., 2004). Outro aspecto da retificação a se considerar é a elevada temperatura alcançada na interface rebolo-peça, devido ao intenso atrito e deformação plástica promovido pelos grãos abrasivos, principalmente quando se utiliza rebolos abrasivos convencionais (de óxido de alumínio e carbetto de silício). Estes fatores podem resultar em problemas na integridade da peça, como diminuição ou aumento da dureza em regiões bem próximas da superfície retificada, indução de tensões residuais de tração, surgimento de trincas e alterações microestruturais, bem como alterações dimensionais relacionadas à expansão térmica. Desta forma, torna-se necessária a adequação dos parâmetros de corte, tais como penetração de trabalho, velocidade da peça, tipo e vazão do fluido de corte, dentre outros, a fim de minimizar e ou evitar a ocorrência de danos térmicos nas peças e, conseqüentemente, prejuízos (DA SILVA, 2018).

Dentre às várias classes de aços disponíveis para a fabricação das mais variadas peças, há uma com imensa relevância para a sociedade moderna, o aço inoxidável. Sua importância se dá pela sua elevada resistência a corrosão em ambientes e condições que não seriam suportadas por outros aços, o que abrange aplicações nas indústrias química e petroquímica, de óleo e gás, de alimentos e bebidas, aeroespacial, bélica e na produção de máquinas e equipamentos (VILLARES, 2014). No entanto, por causa destas propriedades e de outras tais como a elevada taxa de encruamento e pobre condutividade térmica, em relação aos aços que não são inoxidáveis, sua usinabilidade é dificultada e conseqüentemente sua retificação. Citam-se como exemplo algumas propriedades do aço inoxidável AISI 304

e um aço comum ao carbono. No estiramento a frio do aço inoxidável 304 observa-se uma resistência à tração da ordem de 250 kgf/mm² (2.450 MPa). Com uma porcentagem de deformação idêntica, se aplicada em um aço comum ao carbono, ele não produziria mais do que cerca de 140 kgf/mm² (1.370 MPa) (CHIAVERINI, 1990). Já quando comparadas as condutividades térmicas a 300 K entre o aço inoxidável AISI 304 e o aço carbono observa-se a discrepância de valores de 14,9 W/mK e 60,5 W/mK, respectivamente (INCROPERA, 2008), o que demonstra uma condutividade térmica cerca de 75% inferior do aço AISI 304 em relação ao aço carbono. E esta propriedade pode afetar a quantidade de calor que será direcionada para a peça durante a retificação com os rebolos abrasivos convencionais.

Diante deste cenário, este presente trabalho pretende contribuir para o desenvolvimento da operação de retificação de aço inoxidável, avaliando principalmente a integridade da sua superfície, dada a importância tanto deste processo de usinagem quanto deste material para a indústria metal mecânica. Para isso, foram variados os parâmetros: penetração de trabalho e a velocidade da peça e como estes parâmetros afetaram na integridade do aço inoxidável austenítico ABNT 316 M. Os resultados poderão servir de referência para os usuários de usinagem.

A sequência de desenvolvimento deste trabalho é composta por cinco capítulos, sendo constituído pela revisão bibliográfica, materiais e métodos, resultados e discussões, e a conclusão, sendo abordados da seguinte forma:

CAPÍTULO I – contextualiza o trabalho e apresenta o processo da retificação e suas particularidades, o aço inoxidável como o material de estudo e os objetivos do trabalho.

CAPÍTULO II – capítulo destinado à revisão bibliográfica que foi tomada como base para o desenvolvimento do trabalho, abordando-se tópicos importantes para o entendimento como: processo de retificação, mecanismo de retirada de material no processo abrasivo, ferramenta de corte, parâmetros de entrada e saída do processo, aços inoxidáveis e suas propriedades, aço inoxidável austenítico e integridade das superfícies.

CAPÍTULO III – contém a metodologia utilizada para a realização dos procedimentos experimentais no que diz respeito à preparação das amostras, as

máquinas e ferramentas utilizadas, os instrumentos de medição, os parâmetros de corte e de saída testados.

CAPÍTULO IV – neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e então feitas as análises e discussões a respeito.

CAPÍTULO V – seção em que são apresentadas as conclusões obtidas no trabalho a partir das análises do capítulo anterior, assim como também são propostas sugestões para trabalhos futuros.

Por último, são apresentadas as referências bibliográficas que foram consultadas para a elaboração deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada uma breve revisão bibliográfica sobre processos de usinagem por abrasão com ênfase no processo de retificação e seus principais elementos, o mecanismo de formação de cavaco em retificação e as suas grandezas físicas, aços inoxidáveis austeníticos e sua usinabilidade, como também a qualidade de superfícies usinadas que serão utilizados para a entendimento da retificação de aço inoxidável austenítico.

2.1 Usinagem por abrasão

Os processos de usinagem convencionais podem ser classificados em duas categorias, os que empregam ferramentas de geometria definida e aqueles que as arestas de corte possuem geometria não definida. Neste sentido as operações de usinagem por abrasão, na qual inclui-se a retificação, diferem dos processos de geometria definida quanto as características de formação do cavaco e remoção do material da peça, sendo neste caso realizado pela ação mecânica dos grãos abrasivos. Estes sendo partículas não metálicas e extremamente duras, cujas arestas apresentam orientação e forma irregular (MACHADO et al., 2009).

Como exemplos de sua grande abrangência na indústria metal-mecânica citam-se várias operações em que a usinagem por abrasão se faz presente como por exemplo nas operações de brunimento de cilindros de blocos de motor de combustão interna, afiação de ferramentas de corte, lapidação de esferas de mancais de rolamento e em retificação de eixos virabrequim, moldes para matrizes e de injeção, sendo a retificação o processo de estudo deste trabalho (MALKIN; GUO, 2008; MACHADO et al., 2009).

Quanto ao seu emprego a usinagem por abrasão, ela está presente em situações em que são necessários ótimos acabamentos (valores de R_a menores que $1,6 \mu m$) aliados a baixos desvios dimensionais, de forma a atingir tolerâncias dimensionais estreitas, por exemplo qualidade de trabalho (IT) na faixa de IT06 a IT03, em que são

obtidos através da retificação com abrasivos convencionais (MALKIN; GUO, 2008). Além disso, os processos que usam abrasão também são empregados em peças cujo material apresenta elevada dureza, geralmente superior a 42 HRc, ou mesmo quando são muito frágeis. Ela também pode ser aplicada para a correção de defeitos formados a partir de processos anteriores de usinagem convencional ou mesmo quando estes apresentam limitações para a fabricação do componente (DA SILVA, 2018).

2.2 O processo de retificação

A retificação é uma operação de usinagem por abrasão e de vital importância para várias indústrias, principalmente a indústria metal-mecânica, uma vez que é capaz de proporcionar a fabricação de componentes com tolerâncias dimensionais e geométricas superiores às obtidas em operações que utilizam ferramentas de corte com geometria definida (como torneamento, fresamento, furação etc.). Como na retificação o corte é proporcionado por pequenas arestas dos grãos abrasivos combinadas com baixos valores de penetração de trabalho, é possível produzir componentes com desvios dimensionais e geométricos inferiores àqueles obtidos em operações que utilizam ferramentas de corte com geometria definida, por exemplo, o fresamento (DA SILVA, 2018). Em geral, a qualidade de trabalho proporcionada pelo processo de retificação varia entre IT6 e IT3 (MACHADO et al., 2009). Portanto, por se tratar de uma operação de acabamento, assim sendo uma das últimas etapas com que o componente trabalhado é submetido, qualquer dano à integridade da superfície, forma e ou geometria que esteja fora da tolerância permitida poderá representar perda de uma peça nesta etapa, pois o valor agregado ao material nesta fase já é muito elevado devido aos outros processos que o antecederam (Soares, 2002).

A principal classificação dos processos de retificação se dá pela superfície a ser usinada, assim se a superfície é cilíndrica, o processo será de retificação cilíndrica; se a peça possui superfície plana o processo para usinar esta peça será o processo de retificação plana. Neste sentido, a retificação abrange operações como retificação cilíndrica externa longitudinal, de mergulho ou sem centros (*centerless*), retificação cilíndrica interna e retificação plana tangencial ou frontal (MALKIN; GUO, 2008). Sendo a retificação plana tangencial o objeto de estudo deste trabalho.

2.2.1 Retificação plana tangencial

A retificação plana tangencial, ilustrada pela Figura 1, ocorre por meio da interação entre o rebolo e a peça, em que o eixo do rebolo é posicionado paralelo à superfície retificada. A mesa da máquina-ferramenta onde a peça é colocada, promove um movimento de avanço alternativo e um movimento de avanço transversal, enquanto o rebolo executa o movimento de rotação e de avanço radial (este implica na penetração de trabalho radial). A forma mais comum de fixação das peças é feita através placas magnéticas ou eletromagnéticas, que atraem os materiais ferrosos com força suficiente para suportar os esforços da retificação, já quando não são ferrosos a fixação se dá de forma mecânica por meio de morsas e outros dispositivos, como suportes especiais.

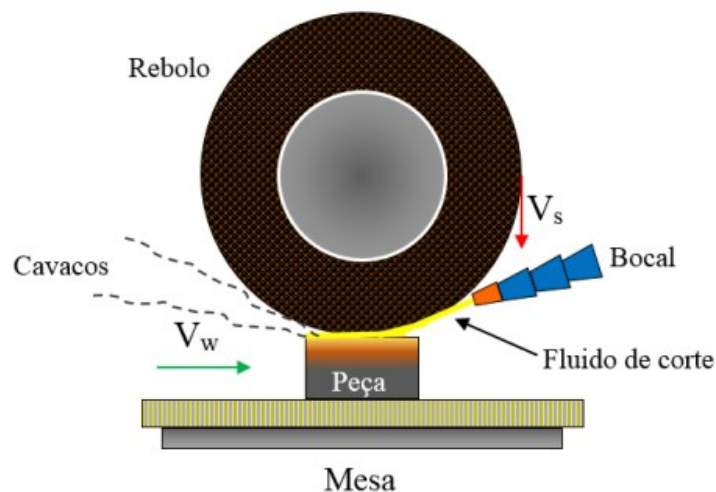


Figura 1 – Esquema representativo da retificação plana tangencial (Adaptada de PEREIRA, 2018).

2.3 Rebolo e seus componentes

O rebolo de retificação é uma ferramenta de corte que normalmente na forma cilíndrica que gira acoplado a um eixo em altas velocidades de corte (≥ 30 m/s) e entra em contato com a peça a ser retificada, resultando na remoção de material pela ação de seus múltiplos grãos abrasivos (MALKIN; GUO, 2008). De uma forma simplificada, o rebolo pode ser entendido como uma ferramenta com diversas micro-arestas de

corte que não possuem geometria definida como aquelas observadas nas ferramentas como bits, brocas e insertos (ASM METALS HANDBOOK, 2004).

Os três componentes básicos de um rebolo são: o abrasivo, ligante (aglomerante) e sua estrutura.

São necessárias cinco características para que se defina o tipo de rebolo: tipo de abrasivo, granulometria mesh, aglomerante, grau de dureza e estrutura.

- Tipo de abrasivo: os principais tipos de abrasivos convencionais são a base de óxido de alumínio e carbeto de silício. As características dos abrasivos que determinam sua eficiência na remoção de material são: dureza e estrutura do abrasivo, forma do grão abrasivo, a friabilidade e afinidade química, além da condutividade térmica (DA SILVA, 2018; MACHADO et al., 2009);
- Granulometria: Indica o tamanho das partículas abrasivas do rebolo, sendo mensurado pela grana mesh, uma relação entre uma dimensão linear pré-definida com o número de partículas que a ocupa, tendo uma maior grana correspondendo à grãos abrasivos de menores dimensões e vice-versa. Cada material a ser usinado requer um tamanho de grãos mais adequado, sendo a escolha por grãos abrasivos menores destinados à operação com materiais de elevada dureza enquanto grãos maiores são empregados em materiais dúcteis (PEREIRA, 2018);
- Aglomerante: os ligantes são classificados principalmente em vitrificados, resinóides e metálicos. Eles têm a finalidade de fazer a união entre os grãos abrasivos e assim conferir a forma do rebolo. Segundo Stemmer (1992), o ligante deve satisfazer três exigências: deve ser suficientemente resistente; deve formar pontes entre grãos com seções transversais suficientemente grandes para suportar os esforços de corte entre o grão abrasivo e o ligante, e deve existir uma energia de ligação suficientemente elevada para garantir a fixação do grão;
- Grau de dureza: A dureza de um rebolo neste caso é a sua resistência ao arrancamento dos grãos, ou seja, sua capacidade de reter os grãos abrasivos durante a usinagem. Assim, um rebolo macio poderá ter os seus grãos abrasivos desprendidos mais rapidamente, enquanto um rebolo duro retém fortemente seus grãos, mesmo após terem perdido sua capacidade de corte (PEREIRA, 2018).

- Estrutura: A estrutura do rebolo tem relação direta com a densidade e com o espaçamento médio entre os grãos abrasivos. A estrutura fechada é indicada pelos números 0, 1, 2, 3; a estrutura média pelos números 4, 5, 6; e de 7 a 12, ou em alguns casos que o número 16 é o limite, a estrutura é aberta. Rebolos com estrutura aberta oferecem mais espaços para alojamentos do cavaco, o que reduz a tendência ao entupimento dos poros, por isso são recomendados para operação de desbaste. Uma estrutura fechada determina um aumento no número de arestas cortantes na periferia do rebolo, possuem menor quantidade de poros e por isso podem ser mais facilmente preenchidos durante a usinagem, o que leva a um entupimento mais rápido do rebolo, em relação a um rebolo com estrutura aberta. Por esta razão, menores devem ser os valores de penetração de trabalho e assim são recomendados para a retificação em condição de acabamento. (DA SILVA, 2018; MALKIN; GUO, 2008).

Na Figura 2 é apresentada a especificação técnica de um rebolo abrasivo convencional.

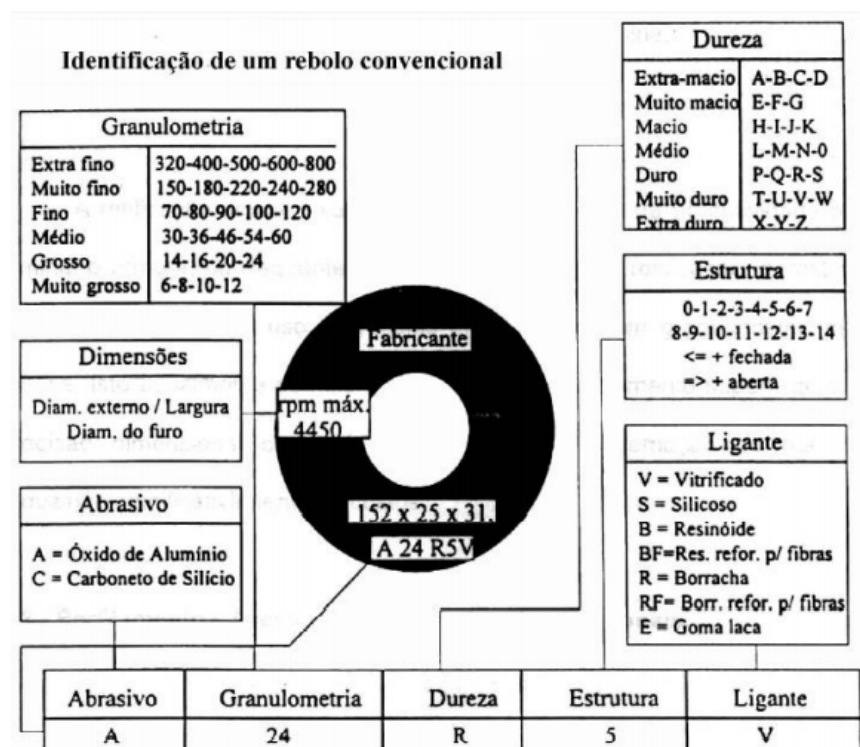


Figura 2 - Especificação de rebolos (Adaptada de Stemmer, 1992).

Em geral, à medida que a usinagem progride, a força de retificação nem sempre é suficiente para causar a fratura e renovação das arestas afiadas do rebolo, com também para a não remoção dos grãos que não possuem mais arestas afiadas, ou seja, que estão desgastados. Com isso se faz necessário a operação de dressagem do rebolo, que consiste no condicionamento da superfície, desobstruindo os poros cujos cavacos foram alojados durante a usinagem e também reafiando as arestas que estavam desgastadas. Isso normalmente é feito com pontas de diamantes sintéticos. A importância dessa operação se deve aos danos à integridade da peça que o rebolo pode causar na peça quando perde sua capacidade de corte. Dentre os danos, os mais comuns são a queima da peça (mudança na coloração que pode indicar perda ou aumento de dureza) e deterioração da superfície usinada, o que pode exigir retrabalho peça ou até mesmo o seu descarte (MACHADO et al., 2009).

Durante a operação de dressagem, utilizando o dressador de ponta única de diamante por exemplo, o rebolo é trabalhado como uma peça sendo usinada por torneamento, enquanto o dressador tem a função da ferramenta de corte. Assim, enquanto o rebolo gira, a ponta de diamante se desloca por sua espessura retirando uma pequena camada da superfície. Com isso, os grãos são afiados, os que estão desgastados são arrancados, e as partículas de material aderidas no rebolo são removidas (MALKIN; GUO, 2008).

Dentre os vários parâmetros envolvidos na dressagem, o que melhor pode quantificá-la é o grau de recobrimento (U_d) do rebolo, fator que estabelece a relação existente entre a largura de atuação do dressador (b_d) e o avanço por volta do dressador (S_d), como é mostrado na Eq. (1). Assim, quanto maior o grau de recobrimento mais fina é a rosca produzida na superfície do rebolo, o que promove um elevado número de grãos abrasivos atuantes, resultando na melhoria do acabamento da peça mas com a desvantagem de promover a elevação da temperatura de retificação (MACHADO et al., 2009).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad \text{Eq. (1)}$$

2.4 Mecanismos de formação do cavaco

Para que ocorra a retirada de material da peça é necessário que haja uma pressão dos grãos abrasivos sobre a peça em conjunto com o movimento relativo entre as superfícies (velocidade de corte, v_s) e também da velocidade da mesa (v_w). A formação de cavaco no processo de retificação é peculiar, já que o grão abrasivo não possui geometria definida.

Com o tempo as arestas dos abrasivos do rebolo se desgastam devido às forças de corte e elevado coeficiente de atrito com a superfície da peça, se arredondando e perdendo a capacidade de remover material adequadamente. Desta forma, uma importante propriedade dos grãos é a friabilidade, a capacidade de fratura do grão para se manter afiado. Quando a agressividade do rebolo não está satisfatória, seja por desgaste dos grãos ou entupimento dos poros, faz-se a afiação do mesmo que é denominada operação de dressagem, mantendo assim as condições de corte (GUIMARÃES, 2016).

Desta forma, a remoção de material se dará de formas diferentes para cada tipo de material, seja ele de característica dúctil ou mais frágil. O mecanismo de formação de cavaco em dúcteis, ilustrado na Figura 3, se dá pelas seguintes etapas (MARINESCU et al., 2007):

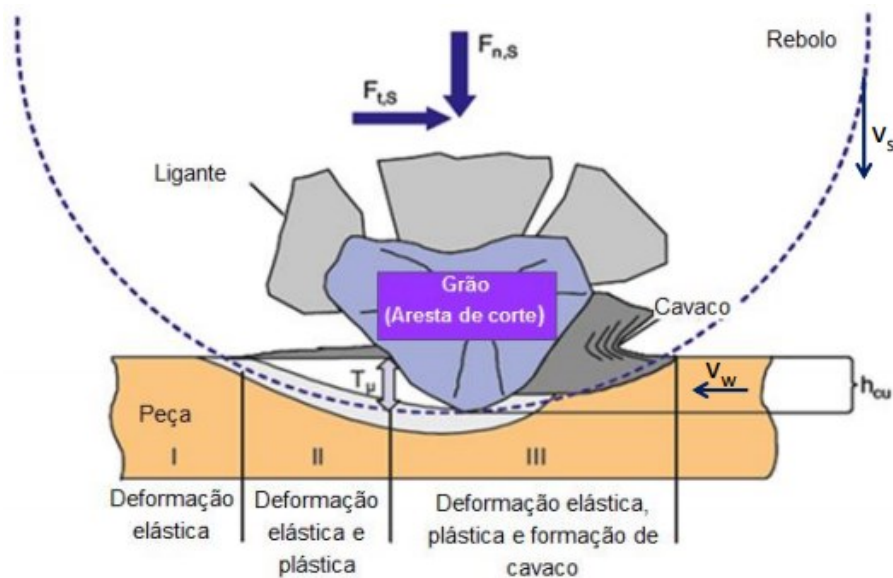


Figura 3 - Representação das etapas de formação do cavaco na retificação (Adaptado de KLOCKE, 2009).

- Etapa 1: A aresta cortante do grão entra em contato com a peça já exerce em uma pequena profundidade sobre a mesma, causando inicialmente apenas deformação elástica.
- Etapa 2: O grão abrasivo adentra um pouco mais na peça, o material vai sendo empurrado e colocado de lado pela aresta cortante, porém, sem a remoção de fato de material, ou seja, nesta etapa estão presentes as deformações elásticas e plástica.
- Etapa 3: Com uma penetração do grão ainda maior na peça, atinge-se um valor crítico que garante a remoção de material da peça, o cavaco é então formado, ocorrendo assim o arranque de material.

Já na formação de cavaco pela retificação de materiais duros e frágeis tem-se que a região de deformação elástica e plástica é bem pequena, por causa da baixa ductilidade dos mesmos. Assim, ao invés de inicialmente apenas serem deformados pela penetração da aresta de corte, eles se fraturam, resultando em lascamento e gerando cavacos fragmentados (MARINESCU et al., 2007).

2.5 Principais variáveis no processo de retificação

Segundo King & Hahn (1986), para planejar a execução da retificação é necessário estabelecer relações entre as variáveis de entrada e as de saída do processo. Mas para isso é preciso conhecer e compreender quais as grandezas físicas mais importantes que regem o processo de retificação, com destaque para a velocidade de corte, velocidade periférica da peça (ou da mesa no caso da retificação plana tangencial), penetração de trabalho, profundidade ou largura de usinagem, comprimento de contato reboło-peça e espessura de corte, dentre outros. Alguns deles serão comentados a seguir:

- Velocidade de corte (v_s): É a velocidade tangencial em m/s de um ponto na superfície do reboło e que exerce grande influência no processo. Em geral, os valores de velocidade de corte com rebolos abrasivos convencionais situam-se entre 30 e 38 m/s. O aumento da velocidade de corte implica em maior número de grãos abrasivos atuando na interface e retirando unitariamente menos material. Com isso, há menores forças de corte que contribui para reduzir os

valores de rugosidade da peça e proporcionar menor taxa de desgaste do rebolo já que ocorre menos solicitação em cada grão. Por outro lado, maiores velocidades de corte tornam o rebolo mais duro, o que dificulta o desprendimento de grãos que eventualmente estejam desgastados. Além de maior frequência de contato dos grãos nestas condições de elevadas velocidades de corte, os grãos desgastados irão ter maior área de contato com a superfície da peça sendo retificada, o que pode fazer com que mais calor seja gerado no processo e, como em grande parte ele é direcionado para a peça, esta estará mais propensa a ocorrência de danos térmicos (MALKIN; GUO, 2008; Bianchi, 1997);

- Velocidade da Peça (v_w): Na retificação plana, a velocidade da peça em mm/min ou m/min é a mesma da mesa da máquina retificadora e esta velocidade está relacionada com a intensidade que os grãos abrasivos atuam na superfície da peça. Por exemplo, quando a velocidade é baixa e a penetração de trabalho é elevada, os impactos dos grãos abrasivos do rebolo na peça são pequenos. O tempo de contato grão/peça e o número de grãos ativos são maiores, assim cada grão abrasivo opera menos força de corte e por mais tempo, sendo uma operação menos incisiva e que gera cavacos alongados. Como os grãos permanecem mais tempo com a peça acabam desgastando mais, o que favorece o crescimento das forças de corte uma vez que se desgastam e não há força o suficiente para retirá-los do ligante ou fraturá-los. Já quando a velocidade da peça é alta e a penetração do rebolo é baixa, o impacto de trabalho na interface é mais severa e são formados cavacos mais curtos. Como o tempo de contato dos grãos e o número de grãos ativos são menores, as forças de corte tendem a ser mais severas e isso proporciona maior fratura e desprendimento dos grãos, que assim mantém forças de corte mais constantes e há maior desgaste do rebolo em comparação com a condição anterior (Bianchi, 1997);
- Penetração de trabalho (a_e): É a grandeza física de usinagem medida no plano de trabalho e perpendicular à direção do avanço. Ela representa a medida da espessura de material em mm retirado pelo rebolo em cada revolução. O aumento na profundidade de corte causa também um aumento no número de grãos ativos e em seu tempo de contato com a peça, além do aumento da área de contato, o que resulta em uma maior parcela de atrito e riscamento, desde o início da formação do cavaco até sua expulsão. Assim, o atrito e riscamento entre os cavacos removidos e a peça promovem a elevação temperatura na região de

corte, que tem como consequência a elevação da rugosidade da peça, do nível de emissão acústica e das forças de corte (tangencial e normal) (Bianchi, 1997);

- Profundidade ou largura de usinagem (a_p): É a distância axial que o rebolo adentra tangencialmente à superfície da peça, medida na direção perpendicular ao plano de trabalho (GUIMARÃES, 2016);
- Comprimento de contato rebolo-peça (l_c): É o comprimento efetivo de contato em mm em forma de arco entre a peça e o rebolo durante o processo de retificação (GUIMARÃES, 2016);
- Espessura equivalente de corte (h_{eq}): Representa a espessura de material que os grãos removem da peça, podendo ser calculado pela Eq. (2). É uma variável que tem influência na severidade da retificação, nas forças de corte e energia dispendida no processo, como também em outras características de desempenho, incluindo rugosidade da superfície e desgaste do rebolo. No caso da rugosidade, por exemplo, o aumento no valor da espessura de corte equivalente, seja pelo aumento da penetração de trabalho (a_e) como da velocidade da peça (v_w), ou mesmo pela diminuição da velocidade de corte (v_s), resulta no aumento na quantidade de material removido da superfície da peça, levando ao aumento dos esforços de corte da operação e, como consequência, levando ao comprometimento da qualidade superficial das peças retificadas (MALKIN; GUO, 2008).

$$h_{eq} = a_e \frac{v_w}{v_s} \quad \text{Eq. (2)}$$

2.6 Aços inoxidáveis

É impossível imaginar o mundo industrializado sem a existência dos aços, os quais são empregados na fabricação de vários bens de consumo e responsáveis por movimentar vários setores da economia em nível mundial. Eles estão presentes desde em estruturas mecânicas, construções, automóveis, navios, utensílios domésticos, instrumentos de cirurgia, dentre outros.

Porém os aços de modo geral tendem, com o tempo, a se transformarem de maneira natural em compostos, em que ocorre uma reação química espontânea

conhecida como corrosão. O decorrente prejuízo causado pela corrosão, que em alguns países somam-se cerca de 3% do PIB, incentivou a busca por maneiras de se diminuir estes prejuízos, seja pela criação de barreiras contra a corrosão como pintar uma superfície metálica, utilizar revestimentos ou fazer metalizações. Mas uma outra maneira é desenvolver ligas que sejam mais resistentes à corrosão, e nesta abordagem se encontram os aços inoxidáveis (CARBÓ, 2008).

Segundo Chiaverini (1990), corrosão é definida com um ataque gradual e contínuo ao metal advindo do meio em que se encontra e que pode ser atmosférico, químico, líquido ou gasoso. Ela se dá pela interação do material metálico com outro não metálico e com isso ocorre a formação de um produto ou vários compostos que comumente são sais e óxidos. Ainda segundo Chiaverini (1990), quando não ocorre corrosão do material verifica-se a existência de uma película aderida à superfície por forças atômicas, e esta é um produto da reação do material base com o meio que o circunda. Assim, quando o material sofre avaria e tão logo a camada protetora é retirada forma-se uma nova camada no lugar, protegendo novamente o metal.

Nesse sentido, é notável a resistência à corrosão dos aços inoxidáveis em comparação às outras classes de aços, o que se deve a presença de elementos de liga em sua composição, os quais conferem outras propriedades importantes que influenciam na sua utilização na indústria metal-mecânica, por exemplo. Neste contexto, o cromo, compondo em pelo menos 10,5% em peso, se destaca pela sua importância como elemento de liga nos aços inoxidáveis, por conferir resistência à corrosão ao combinar com o oxigênio, principalmente em elevadas temperaturas, (OUTOKUMPU, 2013).

É também comum a adição de outros elementos de liga como o níquel cuja aplicação resultada geralmente no aumento da ductibilidade e tenacidade do material, tendo o seu emprego com a função de promover uma microestrutura austenítica. O manganês, por sua vez, é adicionado em aços inoxidáveis para melhorar sua ductibilidade a quente, além de ter efeito estabilizador da austenita em baixas temperaturas e da ferrita em altas. O manganês, que é formador de austenita, também pode substituir parte do níquel no aço inoxidável. Já o molibdênio é um elemento que contribuiu para o aumento da resistência a corrosão, uniforme ou localizada, e seu emprego resulta em um pequeno aumento da resistência mecânica e promove o surgimento de uma microestrutura ferrítica. Quanto ao silício, ele

aumenta a resistência à oxidação, tanto em altas temperaturas quanto em soluções fortemente oxidantes em temperaturas mais baixas, além de promover uma microestrutura ferrítica e no aumento a resistência (OUTOKUMPU, 2013).

2.6.1 Classificação dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são classificados em cinco grandes grupos: aços inoxidáveis ferríticos, austeníticos, martensíticos, duplex e os endurecidos por precipitação (PADILHA et al., 2006; SINHA et al., 2006), e são apresentados a seguir:

- Aços inoxidáveis ferríticos: Eles contêm essencialmente entre 10,5 a 30% de Cr com adições de Mn e Si e ocasionalmente Mo, Ni, Al, Ti ou Nb para conferir características particulares. Eles têm a característica de permanecerem ferríticos em temperatura ambiente e elevada, em que a ferrita intersticial proporciona boa ductilidade e tenacidade ao aço. O emprego deles se dá por causa de sua boa ductilidade, resistência a corrosão generalizada e oxidação em alta temperatura, resistência a corrosão por pitting e também à fragilização por corrosão sob tensão, além de geralmente apresentar custo mais baixo do que os aços austeníticos. Algumas aplicações deles são na indústria química, petroquímica, celulose e indústrias de papel e em instalações de dessalinização (PADILHA et al., 2006; SINHA et al., 2006);
- Aços inoxidáveis austeníticos (Fe-Cr-Ni): Em geral, os aços inoxidáveis austeníticos são ligas de Fe-Cr-Ni-C e Fe-Cr-Mn-Ni-N contendo entre 16 a 26% de Cr, 0,75 a 19,0% de Mn, 1 a 40% de Ni, 0,03 a 0,35% de C, e N suficiente para estabilizar austenita em temperatura ambiente e elevadas. Eles ocuparam uma posição de destaque devido a características como maior resistência à corrosão, alta resistência mecânica e tenacidade em temperaturas elevadas e ambientes, excelentes propriedades criogênicas, apelo estético e combinações de propriedades específicas que podem ser obtidas por diferentes composições. Estas características resultam na mais ampla utilização dentre os aços inoxidáveis (cerca de 65 a 70% do total produzido), principalmente para fabricação de utensílios domésticos, como facas e talheres (PADILHA et al., 2006; SINHA et al., 2006);

- Aços inoxidáveis martensíticos (Fe-Cr-C): Os aços inoxidáveis martensíticos contêm entre 11,5 a 18% Cr, 0,08 a 1,20% de C e outros elementos de liga com menos de 2 a 3%. Eles possuem a menor resistência à corrosão dentre os aços inoxidáveis, porém sendo ela ainda satisfatória para meios não tão agressivos. A alta dureza provocada pela estrutura martensítica, uma fase rica em carbono, frágil e muito dura, e sua forte resistência ao desgaste faz com que estes materiais sejam muito utilizados em cutelaria, instrumentação cirúrgica e odontológica (PADILHA et al., 2006; SINHA et al., 2006);
- Aços inoxidáveis duplex: Estes aços contêm entre 18 a 29% de Cr, 2,5 a 8,5% de Ni e 1 a 4% Mo, até 2,5% de Mn, até 2% de Si e até 0,35% de N. Eles possuem uma estrutura mista de ferrita e austenita, cujas frações volumétricas variam entre 30% e 70% em uma estrutura duplex, sendo esta proporção determinante nas propriedades do material, em que se busca uma boa combinação de resistência à corrosão com resistência mecânica. Esta combinação favorável de propriedades torna esta classe de aços inoxidáveis amplamente empregados na indústria de petróleo e gás, celulose e papel, e nas indústrias de tratamento de resíduos. Aplicações típicas são em soluções aquosas contendo cloretos, onde substituem com vantagem os aços inoxidáveis austeníticos, que são mais suscetíveis a tensões e corrosão por pite (PADILHA et al., 2006; SINHA et al., 2006);
- Aços inoxidáveis endurecidos por precipitação (PH): Estes aços foram desenvolvidos com a finalidade de oferecer alta resistência mecânica e tenacidade razoável, com resistência à corrosão superior quando comparada aos aços inoxidáveis martensíticos. Isso é possível por meio da formação de precipitados em uma estrutura austenita ou martensítica. Praticamente todos os aços PH têm um baixo teor de carbono, em torno de 0,1% em peso e com adições de níquel. Normalmente, o molibdênio é adicionado para aumentar a resistência mecânica e à corrosão e os precipitados são obtidos por meio de adições de alumínio, titânio, nióbio ou cobre. Com isso, eles são empregados para aplicações aeroespaciais (PADILHA et al., 2006; SINHA et al., 2006);

Por ser o foco deste trabalho, ênfase será dada a classe de aços inoxidáveis austeníticos.

2.6.2 Aços inoxidáveis austeníticos

Nessa classe são contempladas principalmente as ligas Fe-Cr-Ni, embora existam ligas onde parte da porcentagem do níquel foi substituída por manganês e nitrogênio. Eles apresentam estrutura predominantemente austenítica, não sendo endurecíveis por tratamento térmico. Eles podem apresentar teor de níquel entre 6 e 26%, 16 e 30% de cromo e menos de 0,30% de carbono em peso, com um teor total de elementos de liga de, pelo menos, 26%. Estes aços possuem ampla faixa de utilização, que vai desde a indústria química, alimentícia até para indústria de refino de petróleo, como também para aplicações que haja demanda por boa resistência à corrosão, facilidade de limpeza e ótimas características de fabricação (MODENESI, 2001 apud CAMARGO, 2008). Outras aplicações desta classe de aços estão presentes na indústria naval, equipamentos que processam celulose e na indústria têxtil em rolos compressores, como também em válvulas e bombas, peças de trocadores de calor, tanques de indústrias químicas, dentre outras. A ampla aplicação desses tipos de aços é resultado da combinação de propriedades específicas que podem ser alcançadas por meio de diferentes composições. Essas propriedades incluem maior resistência à corrosão, resistência mecânica elevada e tenacidade em ambientes de altas temperaturas, excelentes características criogênicas, apelo estético, entre outros (PADILHA et al., 2006; SINHA et al., 2006).

Em temperatura ambiente, estes aços possuem um baixo limite de escoamento, e elevado limite de resistência e ductilidade.

Segundo Chiaverini (1990), as principais características dos aços austeníticos são:

- não magnéticos;
- não endurecíveis por serem austeníticos;
- quando estes aços sofrem encruamento, observa-se o valor dureza obtido é bem superior ao que se encontraria em outros aços submetidos a mesma deformação. Este aumento, além do usual da dureza, pode ser atribuído à instabilidade da austenita que, sob o esforço das tensões do encruamento, transforma-se parcial e gradualmente em ferrita. Esta ferrita, supersaturada de

carbono, nas mesmas condições que uma martensita, contribui para o endurecimento excepcional do aço. O estiramento a frio, como por exemplo, do aço inoxidável AISI 304, pode produzir resistência à tração da ordem de 250 kgf/mm² (2.450 MPa); com uma porcentagem de deformação idêntica, se aplicada em um aço comum ao carbono, não produziria mais do que cerca de 140 kgf/mm² (1.370 MPa) (CHIAVERINI, 1990).

Um reaquecimento a temperaturas moderadas do aço encruado, que se encontrará no estado ferrítico, restaura a austenita.

Dentre os aços inoxidáveis austeníticos escolheu-se o ABNT 316 M como objeto de estudo deste trabalho pois trata-se da classe de aços de maior aplicação na indústria metal-mecânica devido às propriedades que se tornam vantajosas e que são obtidas por meio de diferentes composições.

É importante ressaltar a opção pelo uso da liga modificada do aço ABNT 316, a qual está indicada com a letra “M” na nomenclatura ABNT 316 M. Esta liga é obtida com uma pequena alteração na composição química dentro da faixa permitida em sua especificação e no processo de fabricação, em que a finalidade é de melhorar a usinagem deste aço sem, contudo, alterar sua classificação ABNT (PIZZI et al., 1997). Sua composição química está indicada na Tabela 1.

Tabela 1 – Composição química do aço inoxidável 316 M (adaptado de PIZZI et al., 1997).

MATERIAL	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	Cu	N
316M	0.05	0.44	1.76	0.040	0.020	17.48	11.82	2.15	0.29	0.0246

2.6.3 Usinabilidade dos aços inoxidáveis

Os aços inoxidáveis austeníticos podem ser considerados aqueles de pior usinabilidade entre os aços inoxidáveis (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014). A usinabilidade pode ser entendida como uma forma de mensurar a facilidade com que pode ser usinado um dado material, que depende tanto das suas características e propriedades bem como das variáveis do processo como as interações entre peça e da ferramenta, ação do fluido e das condições de corte. Assim, é necessária a definição de vários parâmetros do processo para a possível comparação e entendimento dos resultados (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014).

Quanto às características inerentes aços inoxidáveis que dificultam sua usinagem o destaque é para as seguintes (DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014):

- Alto coeficiente de dilatação térmica: resulta em expansões do material em elevadas temperaturas com tensões residuais e possíveis alterações dimensionais quando resfriados, havendo dificuldades em adequar as restrições geométricas de projeto;
- Baixa condutividade térmica: dificulta a extração do calor da região de corte, o que pode gerar danos térmicos tanto à ferramenta quanto à integridade da superfície. Pode-se citar como exemplo os valores de condutividade térmica a 300 K do aço inoxidável AISI 304 (austenítico) e do aço comum ao carbono por exemplo, que são 14,9 W/mK e 60,5 W/mK, respectivamente (INCROPERA, 2008).
- Alto coeficiente de atrito: promove aumento da potência de corte e implica em aumento da rigidez da máquina para evitar vibração, além de intensificar a energia térmica na interface de corte.
- Elevada tensão de ruptura: dificulta o corte do material conforme ocorre seu encruamento, demandando resistência necessária da ferramenta e aumento da potência de corte.

Estas propriedades dos aços inoxidáveis austeníticos se transformam em desafios na usinabilidade deles, principalmente por causa da elevada taxa de desgaste das ferramentas o que leva ao pobre acabamento das peças. Além disso,

durante o corte destes materiais uma camada encruada de alta resistência é formada na superfície sendo usinada, o que dificulta ao avanço da ferramenta. Os cavacos gerados normalmente são do tipo contínuos em decorrência da alta ductilidade do material, que somado ao coeficiente de atrito elevado na interface metal/ferramenta, causam um grande aquecimento na região de corte. Este aquecimento é intensificado pela característica dos aços inoxidáveis em não dissipar efetivamente o calor gerado dado sua baixa condutibilidade térmica. Com isso, são desenvolvidas elevadas temperaturas na região de corte que por sua vez comprometem a vida útil da ferramenta e prejudicam a integridade superficial da peça usinada. Por esta razão, a boa prática é empregar baixos valores de velocidade de corte, o que implica em baixa produtividade quando comparada com aquela dos aços comuns ao carbono, por exemplo aço ABNT 1045 no estado recozido (CAMARGO, 2008).

2.7 Qualidade e integridade das superfícies

Na retificação, como já mencionado neste trabalho, o processo requer um gasto de energia extremamente alto por volume unitário de material removido em comparação com operações de geometria definida. E como nos casos dos aços inoxidáveis que possuem baixa condutividade térmica, a maior parte desta energia é convertida em calor e se concentra na zona de trabalho. Com isso, altas temperaturas são desenvolvidas na zona de corte o que pode causar vários tipos de danos térmicos à peça, comprometendo sua integridade. Além disso, a expansão térmica da peça durante a retificação contribui para imprecisões e distorções do produto final (MALKIN; GUO, 2008).

A qualidade de um produto é um termo que inclui todos os aspectos necessários para que um componente mecânico funcione corretamente, podendo ser verificada a partir da topografia e também pela integridade da superfície e da subsuperfície. Neste sentido a topografia, que é um aspecto da geometria da superfície, é analisada por parâmetros de rugosidade. Já a integridade pode ser analisada na superfície pelo aparecimento de defeitos como queima de retífica, oxidação causada pelas altas temperaturas na interface de contato metal-peça, mudanças de dureza e textura, e aparição de trincas ou microtrincas. Na subsuperfície, por sua vez, o que impera são

as possíveis mudanças mecânicas e metalúrgicas como transformações de fases e alterações metalúrgicas, resultando em mudanças de propriedades em relação ao metal base (MALKIN; GUO, 2008).

Como a retificação tem a finalidade de proporcionar o estado final da peça, o cuidado com a qualidade resultante tem grande importância para garantir o funcionamento adequado, evitando prejuízos financeiros como o descarte da peça ou o seu retrabalho. Daí a importância em desenvolver estudos para a determinação de condições adequadas de corte e evitar tais prejuízos.

A seguir, nas seções 2.8 e 2.9, os aspectos da qualidade (topografia e integridade) serão brevemente abordados.

2.8 Rugosidade

Uma das características finais mais importantes da peça ao se observar após sua retificação refere-se a rugosidade superficial, que Machado et al. (2009) definem como a característica do perfil gerado pelas irregularidades finas e erros microgeométricos resultantes da ação inerente dos processos de corte. Sua importância se dá pela fase final da fabricação da peça, pois através da retificação serão alcançados o acabamento e as tolerâncias previstas em projeto para o correto funcionamento da mesma.

Neste sentido Marinescu et al. (2004) citam vários fatores que podem alterar a rugosidade de uma superfície após sua retificação, tais como a profundidade distinta dos abrasivos do rebolo, o espaçamento irregular dos mesmos, o efeito da operação de dressagem do rebolo na densidade dos grãos, como também o efeito do seu desgaste, o estado da deflexão dos grãos, efeito do faiscamento do rebolo na saída (spark out) e a adesão na interface entre a peça e os grãos abrasivos do rebolo.

Os parâmetros para a avaliação da rugosidade são definidos a partir da norma ABNT NBR ISO 4287 (2002) que são:

- Desvio aritmético médio (R_a): média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem;

- Desvio médio quadrático (R_q): raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem;
- Altura máxima do perfil (R_z): soma da máxima altura dos picos e a maior profundidade dos vales do perfil, no comprimento de amostragem;
- Altura total do perfil (R_t): soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade do vale no comprimento de amostragem;
- Fator de assimetria do perfil, ou skewness (R_{sk}): quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas e o valor R_q ao cubo, no comprimento de amostragem;
- Fator de achatamento do perfil, ou kurtosis (R_{ku}): quociente entre o valor médio dos valores das ordenadas à quarta potência e o valor R_q à quarta potência, no comprimento de amostragem.

No trabalho realizado por Manimaran e Kumar (2013) em retificação do aço inoxidável AISI 316 com rebolo de alumina sol-gel, os autores analisaram o desempenho da técnica de resfriamento criogênico em relação a outras condições de lubrificação: a seco e com fluido de corte semissintético. A velocidade de corte foi mantida fixa em $v_s = 31,4$ m/s e eles testaram quatro valores de penetração de trabalho ($a_e = 10$ μm , 20 μm , 30 μm e 40 μm) e três velocidades da peça (0,1 m/s, 0,125 m/s e 0,15 m/s). Como resultados, eles concluíram que a técnica criogênica proporcionou uma redução de cerca de 32% nas forças de retificação, entre 30 e 49% de melhoria na rugosidade da superfície e entre 45 e 49% na redução da temperatura, mesmo realizando a usinagem com maiores taxas de remoção de material. Quanto ao acabamento superficial, os resultados mostraram a tendência de piora da rugosidade, indicado pelo parâmetro R_a , conforme o aumento da penetração de trabalho, como pode ser visto na figura 4. Além disso, a tendência de piora da rugosidade também apresentou o mesmo comportamento quanto ao incremento da velocidade da peça, indicado pela Figura 5.

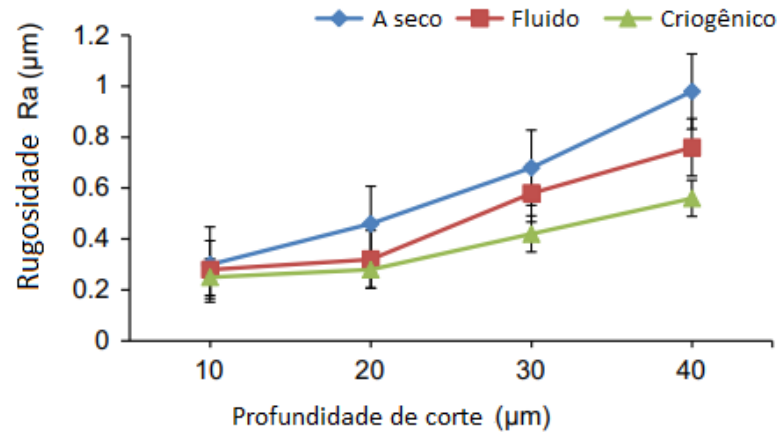


Figura 4 - Variação da rugosidade da superfície pela variação da profundidade de corte com velocidade de trabalho fixa de $v_w = 0,1$ m/s (adaptado de Manimaran e Kumar, 2013).

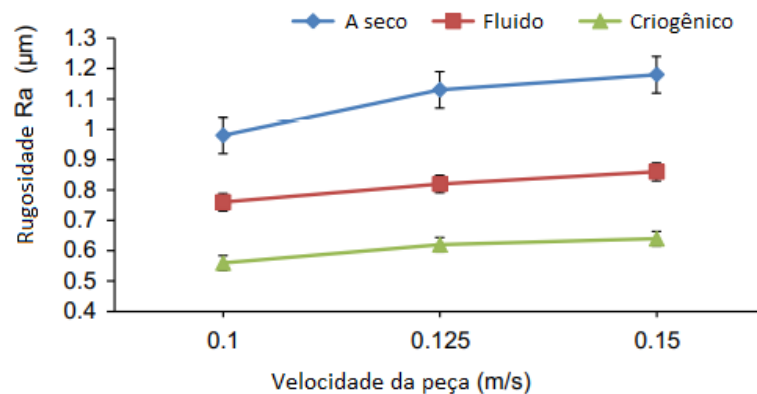


Figura 5 - Variação da rugosidade superficial pela variação da velocidade da peça com profundidade de corte fixa de $a_e = 40$ µm (adaptado de Manimaran e Kumar, 2013).

Estes mesmos pesquisadores afirmaram que ao aumentar a penetração de trabalho aumenta, a temperatura de usinagem também aumenta, o que resulta na diminuição da dureza da peça em camadas bem próximas à superfície. Essa queda de dureza durante o processo faz com que o material flua em torno dos grãos e em passagens subsequentes, e então pequenas partículas aderidas ao rebolo podem se soltar e se fundirem novamente na superfície da peça. Este efeito é chamado de empastamento e resulta em superfícies de baixa qualidade. Além disso, uma temperatura mais baixa na região de corte permite que o material mantenha dureza suficiente para que o corte seja feito por um grão mais afiado e promova melhor remoção do material. Os autores também afirmaram que o aumento na remoção de material causado pelo aumento da velocidade da peça implica em maior área de atrito

para os grãos, o que leva à fratura e também ao desprendimento deles do rebolo. Assim o desgaste do rebolo é mais acentuado e resulta em uma superfície com menor acabamento.

Sivaraman et al. (2018), por sua vez, estudaram a otimização dos parâmetros de retificação no aço inoxidável austenítico AISI 317L com rebolo de SiC com foco na redução dos valores de rugosidade da peça. Eles testaram o tamanho de grão (mesh de #60 e #120), penetração de trabalho (20 μm , 30 μm e 40 μm) e velocidade da peça (0,2, 0,5 e 0,8 mm/s). Como resultados, eles relataram que o aumento do tamanho de grão (menor grana mesh), da velocidade da peça e da penetração de trabalho resultou em maiores valores de rugosidade. Por outro lado, ao fixar o tamanho do grão juntamente com a penetração de trabalho, quanto mais se incrementa a velocidade da peça mais a rugosidade aumenta. Isso comprova que quanto maior a espessura de corte equivalente, causado tanto pelo aumento da penetração de trabalho quanto pelo aumento da velocidade da peça, maior será a rugosidade obtida tendo em vista a condição mais severa de corte (MALKIN; GUO, 2008). O que é confirmado pelo menor valor de rugosidade encontrado quando aplicado um menor tamanho de grão juntamente com a menor penetração de trabalho e velocidade da peça.

2.9 Alterações na integridade subsuperficial

Como já comentado previamente, no processo da retificação são desenvolvidas elevadas temperaturas na região de corte e isso se deve à várias razões, dentre elas à: característica refratária do rebolo normalmente de abrasivo cerâmico convencional, óxido de alumínio ou carbetto de silício (compostos por partículas abrasivas cerâmicos que possuem baixa condutividade térmica), elevados valores de velocidade de corte (acima de 30 m/s), ângulo de saída dos grãos abrasivos predominantemente negativos, cavacos com sessões pequenas, quando comparados com os processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, torneamento por exemplo (MALKIN; GUO, 2008). Além disso, no caso de retificação de materiais de pobre condutividade térmica, como ligas à base de níquel e de titânico, como também de aço inoxidável, estes problemas se agravam, já que o calor gerado no processo tende a ficar concentrado no interface ferramenta-peça (PEREIRA, 2018).

Segundo Machado et al. (2009), as altas temperaturas geradas pelo processo podem acarretar danos à integridade da peça, tais como:

- Deformação plástica;
- Alteração na microdureza;
- Surgimento de microtrincas;
- Indução de tensões residuais;
- Alterações microestruturais (queima).

A seguir serão feita uma breve abordagem sobre cada um dos últimos danos mencionados.

2.9.1 Deformação plástica

A deformação plástica é uma alteração na peça comumente observada no processo de usinagem de desbaste em que ocorre tanto na superfície quanto abaixo dela, podendo afetar negativamente a sua integridade. Ela é caracterizada por meio da presença de estruturas metalúrgicas alongadas na direção do fluxo de deformação (MACHADO et al., 2009). Dependendo da intensidade de deformação plástica, podem ser acompanhados problemas como alterações de dureza em regiões bem próximas da superfície retificada, surgimento de trincas, indução de tensões residuais de tração, e alterações microestruturais, bem como alterações dimensionais relacionadas à expansão térmica (DA SILVA, 2018).

2.9.2 Alteração na microdureza

A dureza da peça pode se alterar no decorrer do seu corte transversal por consequência de alterações metalúrgicas causadas pelo processo de corte. A exemplo dos aços, dependendo das temperaturas alcançadas e do tempo de resfriamento na região de corte, pode haver o surgimento de martensita não revenida ou mesmo o revenido desta martensita. No primeiro caso observa-se o aumento da

microdureza das regiões atingidas enquanto no segundo caso a dureza diminui em relação ao estado original (MACHADO et al., 2009).

Em um trabalho desenvolvido por Rhouma et al. (2019), os autores verificaram a influência dos processos de retificação e de torneamento na distribuição de tensões residuais sobre a resistência à corrosão sob tensão do aço inoxidável austenítico AISI 316L (dureza igual a 180 HV) em meio de cloreto. A retificação foi executada com um rebolo de código 99A46H7VNE, aplicando-se uma velocidade da peça de $v_w = 4$ m/min e uma penetração de trabalho $a_e = 10$ μm . A ocorrência ou não de aumento de dureza das superfícies usinadas foi avaliada por meio da medição de microdureza na seção transversal. Eles informaram que para a superfície que foi torneada a dureza alcançou 480 HV, enquanto aquela que foi retificada resultou em 280 HV. Ou seja, ambos processos resultaram em elevação da dureza em relação àquela de referência. Este aumento da microdureza está associado com deformação plástica que pode ser visualizada pelas imagens de microscópio óptico da seção transversal, em que são vistas bandas deslizantes perto da superfície, indicados na Figura 6. Além disso, o perfil de microdureza mostrou que a camada deformada plasticamente pelo processo de retificação corresponde até 0,2 mm abaixo da superfície.

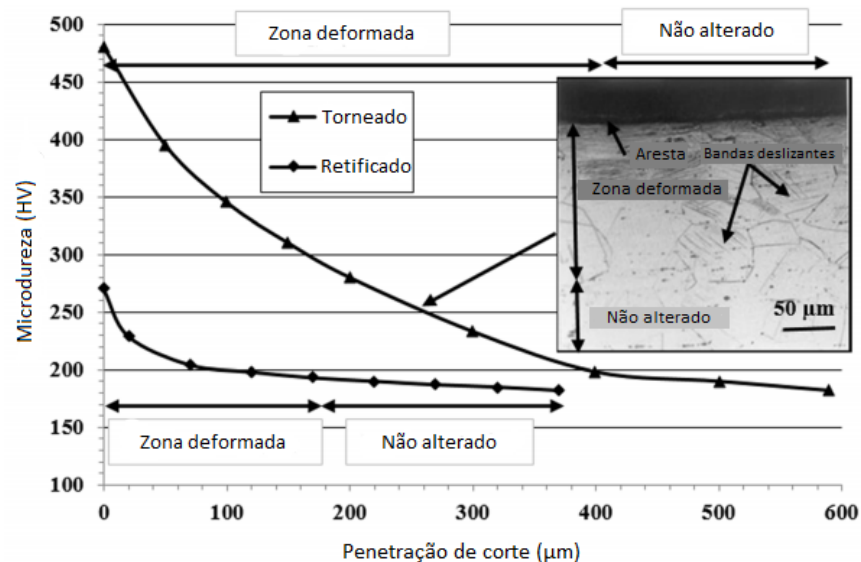


Figura 6 - Endurecimento de superfície resultante da deformação plástica induzida pela usinagem (adaptado de Rhouma et al., 2019).

2.9.3 Surgimento de trincas

As trincas são descontinuidades que prejudicam a resistência do material por serem concentradores de tensão, além de prejudicarem muito a resistência à fadiga e à corrosão sob tensão. Elas podem ser notadas sem o uso de aparelhos, a olho nu, ou com ajuda de microscópios ferramenteiros ou mesmo com microscópios eletrônicos de varredura (MEV) (MACHADO et al., 2009).

Trincas oriundas do processo de retificação foram observadas por Manimaran e Kumar (2013) na superfície de inoxidável AISI 316 após a retificação com rebole de alumina sol-gel na condição a seco de $v_w = 0,15$ m/s, $a_e = 40$ μ m, $v_s = 31,4$ m/s, indicado na Figura 7. Eles constataram que elas foram de origem térmica. Isso se justifica por ser a condição de operação mais severa entre as testadas nesta pesquisa, pois foi imposta a maior penetração de corte, a maior velocidade da peça e a ausência de lubrificação na região de corte, indicando que houve tensões trativas induzidas de tal magnitude a formar uma trinca. Os autores não notaram trincas ao utilizar as técnicas de lubri-refrigeração criogênica e com fluido de corte.

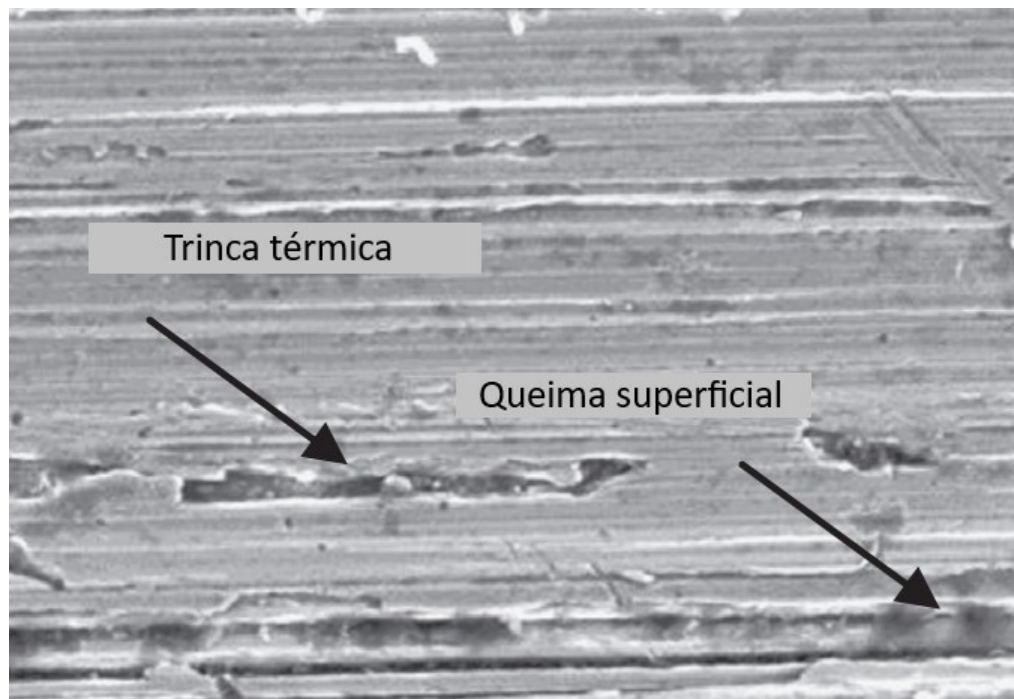


Figura 7 - Imagem MEV da superfície retificada em condição sem lubrificação (adaptado de Manimaran, 2013).

2.9.4 Tensões residuais

As tensões residuais geram consequências no comportamento mecânico da peça, especialmente em sua resistência à fadiga, além de serem responsáveis por variações dimensionais inesperadas, resultando em dificuldade na montagem de equipamentos que as constituem. Além disso, no processo da retificação é possível que haja o surgimento tanto de trincas de origem trativas como também compressivas decorrentes das tensões residuais na peça. A maior ocorrência de uma ou de outra será devido às condições de corte empregadas, como o tipo de rebolo, velocidades adotadas, penetração de trabalho, dentre outros parâmetros (OLIVEIRA, 2015).

No trabalho de Kumar et. al (2017), por meio de medições com difração de raios-X, os autores notaram altas magnitudes de tensões residuais de tração que foram geradas na superfície das amostras de aço inoxidável AISI 304L após às operações de retificação, fresamento e torneamento, ao contrário das tensões residuais compressivas induzidas observadas nas peças que foram submetidas ao polimento. Na retificação, especificamente, foram registrados tensão trativas da ordem de 192 ± 40 (MPa) na direção de usinagem, 15 ± 31 (MPa) à 45° da direção de usinagem e 15 ± 39 (MPa) na direção perpendicular.

Rhouma et al. (2019), investigando os efeitos da retificação e do torneamento na distribuição das tensões residuais no aço inoxidável AISI 316L por difração de raios-X, observaram valores de tensão residual em direções paralelas e perpendiculares às direções de usinagem. Os resultados mostraram uma importante heterogeneidade na distribuição das tensões residuais na superfície do material, o que pode estar relacionado à heterogeneidade da deformação plástica causada pelo processo da retificação. Eles relataram para as medições para a superfície retificada valores de tensão residual variando entre $+ 141$ e $+ 473$ MPa na direção de retificação (tensões trativas) e variando entre $- 157$ a $+ 254$ MPa (tensões compressivas e trativas) na direção perpendicular.

As tensões residuais de tração são causadas pelas deformações resultantes das altas temperaturas que ocorrem na interface ante a formação do cavaco. Na zona de corte ocorre a dilatação térmica do material próximo da superfície da peça devido ao aquecimento, porém ela é limitada pelo material logo abaixo dela, o que resulta em

tensões trativas como reação. Elas podem ser mais intensas conforme o incremento das condições de corte é imposto ao processo, chegando a tal ponto de interferir muito na resistência mecânica e favorecer o surgimento de trincas perpendiculares a superfície (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2004).

2.9.5 Queima da superfície retificada

Como já exposto anteriormente, o processo da retificação envolve muita energia para remover pouco material comparativamente a outros processos de corte, o que a caracteriza como uma operação mais suscetível a provocar alterações indesejadas na peça quando os parâmetros da operação não forem adequadamente definidos. Neste sentido, uma das alterações que mais se observa é a queima da superfície do material da peça, também chamada de queima de retífica, uma vez que as temperaturas alcançadas podem provocar mudanças microestruturais em sua superfície e subsuperfície. A queima da peça ocorre por consequência da formação de camadas de óxido na superfície da mesma, sendo um dos problemas mais encontrados de natureza térmica no processamento de diversos materiais metálicos. Essa oxidação ocorre devido às altas temperaturas atingidas em presença de oxigênio durante o processo de retificação, causando mudanças na microestrutura da subsuperfície e com isso alterações em suas propriedades como os valores de microdureza. Esta queima pode ser identificada em muitos casos a olho nu, pela alteração que ocorre cor do material, mas não é algo que ocorre em todos os casos, o que faz necessário analisar as camadas abaixo da superfície para verificar seu nível alteração. Neste sentido, é importante realizar medições de microdureza no perfil da peça a fim de investigar a zona afetada termicamente (MALKIN; GUO, 2008; MARINESCU et al., 2004).

No trabalho realizado por Manimaran e Kumar (2013) sobre retificação do aço inoxidável AISI 316 em diversas condições de lubrificação e com rebolo de alumina sol-gel, os autores verificaram a ocorrência de danos térmicos com destaque para marcas de queima em superfícies que foram usinadas com maiores valores de penetração de trabalho principalmente na condição a seco. Eles também relataram a ocorrência de queimas em algumas superfícies que foram retificadas com o fluido de

corte semissintético em penetrações de trabalho e velocidades de peça mais elevados, o que eles atribuíram a dificuldade do fluido de corte de alcançar a zona de corte e atenuar as temperaturas.

CAPÍTULO III

MATERIAIS E MÉTODOS

Nesta sessão serão apresentados todos os equipamentos e instrumentos utilizados nos ensaios de retificação, bem como o material da peça, ferramenta de corte, os parâmetros de corte e variáveis de saída analisados. Será também apresentada a metodologia empregada para a realização dos ensaios e medição das variáveis de saída.

3.1 Máquina-ferramenta

Neste trabalho foi utilizada a retificadora plana tangencial, da fabricante Mello S.A Máquinas e Equipamentos, modelo P-36, pertencente ao Laboratório de Usinagem Convencional (LUC), da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia (Figura 8). Ela possui rotação constante igual a 2400 rpm, potência nominal do motor de 2,24 kW resolução no anel graduado da manivela para o deslocamento radial do rebole no eixo Z é de 5 μm .



Figura 8 - Retificadora Plana Tangencial P36, Mello, utilizada nos ensaios.

3.2 Ferramenta de corte

Como ferramenta de corte foi utilizado o rebolo de óxido de alumínio branco, especificação AA46K8V, do fabricante Saint-Gobain, e de dimensões 264 mm por 25mm por 127 mm (diâmetro externo, espessura e diâmetro interno), ilustrado na Figura 9. Este rebolo possui granulometria mesh 46, cujo tamanho do grão é médio, e dureza intermediária. Já o ligante apresenta estrutura média, nem totalmente aberta e nem totalmente fechada, e seu aglomerante é vitrificado. Esta ferramenta foi escolhida levando em consideração fatores como o uso da alumina como partícula abrasiva recomendada para retificar materiais com elevada resistência à tração, como é o caso de aços em geral, aços rápidos, aços temperados e cementados, aços inoxidáveis, sendo este último o material de estudo deste trabalho (MACHADO et al., 2009). O ligante vitrificado, é o mais empregado na fabricação de rebolos, com menor custo de fabricação que o ligante resinóide. Ele em geral não é suscetível a reações químicas com o fluido de corte pois é inorgânico, além de proporcionar elevada precisão dimensional (DA SILVA, 2018).



Figura 9 - Rebolo de óxido de alumínio branco utilizado no ensaio.

3.3 Material da peça

O material da peça que foi usinado neste trabalho foi o aço inoxidável austenítico ABNT 316 M fornecido pela Villares Metals com código V316UF. A sigla UF significa usinagem fácil. Inicialmente foi necessária a preparação das amostras a serem retificadas a partir de uma barra de retangular de 300 mm de comprimento por 60 mm de largura por 50 mm de altura. Para isso, isso foi usada a máquina de serra fita Franho, modelo FM 20 (Figura 10), do LUC, para cortar a barra, com uma serra feita em aço rápido.



Figura 10 - Máquina serra-fita usada para cortar as amostras de aço inoxidável ABNT 316 M.

Foram preparadas 4 amostras cujas dimensões são: 50 mm de comprimento x 18 mm de largura x 10 mm de altura, sendo a face 50 mm por 18 mm a escolhida para realizar a retificação. Além disso, decidiu-se por dividir a superfície de trabalho escolhida em duas regiões (Figura 11) de modo que cada metade (25mm x 18mm) pudesse ser utilizada para a retificação com uma nova condição de corte ou teste.

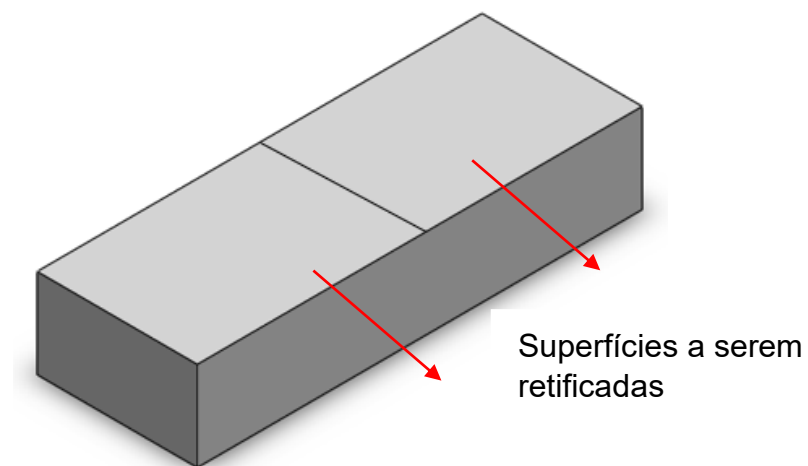


Figura 11 - Esquema para ilustrar as regiões da peça que foram retificadas.

Por último, finalizou-se a preparação das amostras com condições brandas de retificação em que se adotou a velocidade da peça (V_w) de 7,5 m/min e penetração de trabalho de (a_e) de 5 μm , deixando-as padronizadas e prontas para o início dos testes. Como o material das amostras é o aço inoxidável austenítico, o qual possui características não ferro-magnéticas, foi necessário utilizar uma morsa de precisão que foi montada sobre a mesa ferromagnética da retificadora para realizar a fixação da amostra a ser retificada (Figura 12).



Figura 12 – Sistema de montagem da peça na morsa sobre a mesa da retificadora.

3.4 Parâmetros de corte

Neste trabalho foram selecionadas como variáveis de entrada a penetração de trabalho (a_e) e a velocidade da peça (v_w). Foram selecionados dois valores para cada variável analisada enquanto as outras condições de corte se mantiveram constantes, todos informados na Tabela 2. Não houve réplica dos ensaios. A seleção destes parâmetros foi baseada em faixa de parâmetros de corte (penetração de trabalho e velocidade da peça) já testados em vários trabalhos conduzidos pelos pesquisadores do Grupo de Usinagem por Abrasão da Universidade Federal de Uberlândia, coordenado pelo orientador deste trabalho, citando como exemplo a tese de doutorado e na dissertação de mestrado desenvolvidas por Guimarães (2016) e Pereira (2018), respectivamente, quem também realizaram ensaios de retificação e em aços inoxidáveis.

Tabela 2 - Variáveis de entrada adotados na execução do ensaio de retificação em cheio.

Parâmetro	Valor/unidade
Penetração de trabalho (a_e)	10 μm e 30 μm
Profundidade de corte (a_p)	25 mm
Velocidade da peça (v_w)	2,7 m/min e 7,5 m/min
Velocidade de corte (v_s)	33,18 m/s
Fluido de corte	Semissintético de base vegetal, Vasco 7000, fabricante Blaser Swisslube
Técnica de aplicação do fluido	Convencional
Vazão do fluido de corte (v_f)	10,5 l/min
Grau de recobrimento do rebolo (U_d)	3
Profundidade de dressagem (a_d)	3 passes de 25 μm

Neste trabalho foi realizada a operação de dressagem no rebolo antes de cada ensaio a fim garantir o mesmo condicionamento do rebolo em todos os ensaios. Para isso, foi utilizado um dressador de ponta única de diamante sintético do fabricante Winter. A dressagem do rebolo foi realizada utilizando a técnica de aplicação convencional de fluido de corte de base vegetal 7000 com BRIX de 3,5% medido por um refratômetro. Para este procedimento adotou-se um grau de recobrimento do

rebolo (U_d) igual a 3, valor comumente utilizado em operações de dressagem de rebolos com granulometria similar a esta em vários trabalhos conduzidos pelos pesquisadores do Grupo de Usinagem por Abrasão da Universidade Federal de Uberlândia. E a condição de corte utilizada foi de 3 passes de 25 μm de profundidade, totalizando uma profundidade de dressagem total teórica do rebolo igual a 75 μm , sendo esta operação realizada a cada dois ensaios de retificação, dada a pequena área de retificação.

3.5 Variáveis de saída

As variáveis de saída escolhidas para avaliar o efeito dos parâmetros de retificação na integridade do material foram a rugosidade superficial, microdureza e imagens da superfície obtidas pelo MEV. A metodologia utilizada para avaliação destas variáveis será comentada a seguir.

3.5.1 Rugosidade

O perfil de rugosidade da superfície da amostra foi obtido com o auxílio de um rugosímetro portátil Surtronic, modelo S-100 Series do fabricante Taylor Hobson. Ele possui resolução igual a 0,01 μm e é constituído de uma ponta do apalpador feita de diamante com 2 μm de raio. Foi utilizado um suporte com haste ajustável para elevação e ajuste da agulha do apalpador e adotado um comprimento de onda do filtro (cut-off) de 0,8 mm e um comprimento de medição de 4 mm. As medições foram realizadas ao afinal de cada teste após o último passe com o apalpador do rugosímetro sendo posicionado para movimentar no sentido do maior comprimento da superfície de trabalho, perpendicularmente ao sentido de retificação que foi executada na direção de menor comprimento da superfície. A fim de se obter um valor mais confiável estatisticamente optou-se por realizar 2 medições, equidistantes em aproximadamente 8 mm, em cada superfície de modo a executar a média aritméticas das medições. O equipamento utilizado, bem como os pontos de medição foram registrados na Figura 13.

Foram selecionados os parâmetros de rugosidade mais empregados comumente para a análise de superfícies retificadas: o desvio aritmético médio do perfil (R_a), desvio médio quadrático do perfil avaliado (R_q), altura máxima do perfil (R_z) e a altura total do perfil (R_t).



Figura 13 - Rugosímetro portátil utilizado e os pontos de amostragem.

3.5.2 Microdureza

Para a análise dos efeitos da retificação na microdureza da superfície da peça, foram selecionados doze pontos que seriam feitas as medições por meio de endentações Vickers ao longo da superfície que foi retificada, conforme o esquema mostrado na Figura 14.

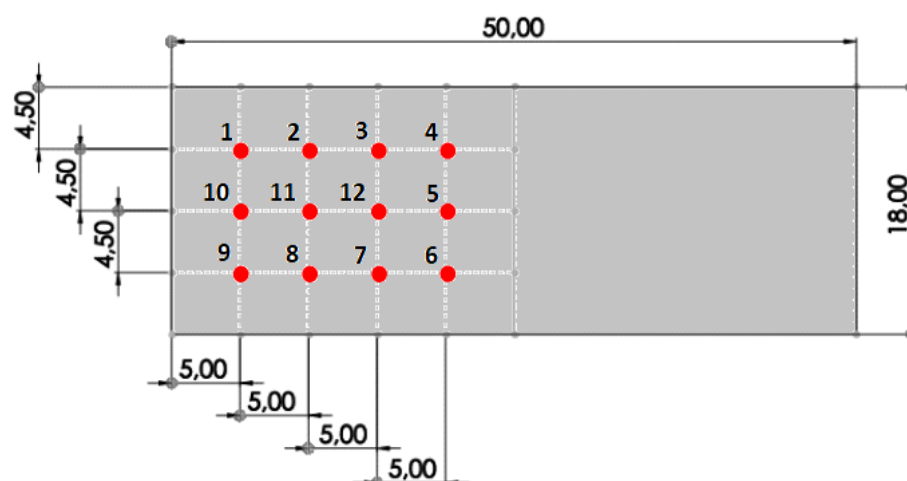


Figura 14 - Localização das indentações da medição Vickers na superfície retificada (distâncias em mm).

Para a realização dos testes de microdureza foi utilizado o microdurômetro da marca SHIMADZU-HMV com penetrador Vickers, Figura 15, pertencente ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. Selecionou-se uma carga normal de 490,3 mN (HV0,05) por um período de 13 segundos. Para cobrir todo o campo de durezas em toda superfície, foi feita a interpolação das durezas na área abrangida pelas indentações com o uso do programa MATLAB (MATrix LABoratory) do fabricante MathWorks®. Assim foi possível obter os espectrogramas, gráficos que apresentam dinamicamente a densidade espectral de energia para cada condição de corte, que serão apresentados na seção de resultados e discussões.

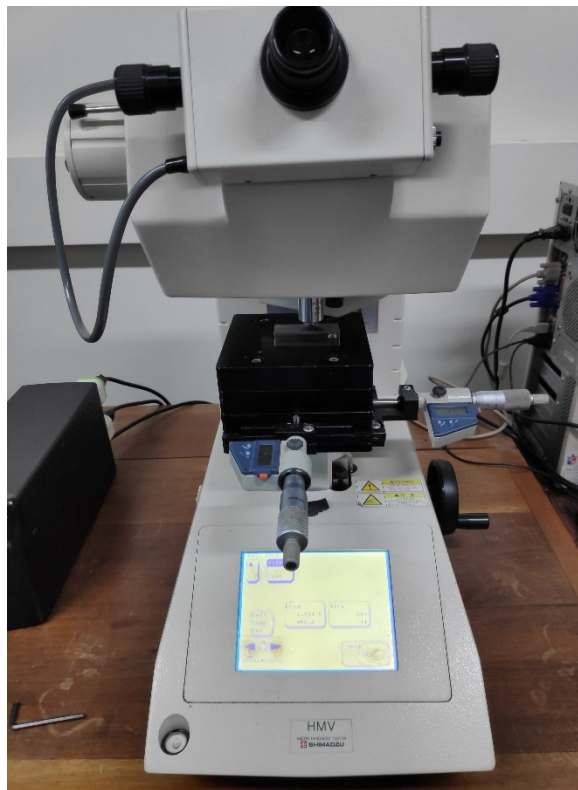


Figura 15 - Microdurômetro SHIMADZU-HMV utilizado para a medição de microdureza.

Para obtenção da dureza de referência, ou seja, em região que não há influência do processo de retificação na amostra, preparou-se uma amostra especialmente para este fim. Selecionou-se uma região que correspondesse à face perpendicular à superfície que foi retificada. Para isso foram utilizadas lixas d'água de carbeto de silício, fabricadas pela Rocast Perfection, de granulometria mesh na sequência

crescente de 40, 80, 120, 220 e 400. Foi realizado o lixamento manual por meio lixadeira metalográfica de uma pista com água corrente (Figura 16). Na sequência, foram realizadas dez medições de microdureza em regiões a partir de 500 μm da superfície retificada até o centro da amostra com o mesmo microdurômetro utilizado para a medição da dureza na superfície retificada, bem como com os mesmos valores de carga e tempo de indentação. Nesta região normalmente não há influência do processo de retificação e, por isso, pode ser considerada como dureza de referência. O valor de referência corresponde à média aritmética dos valores obtidos.

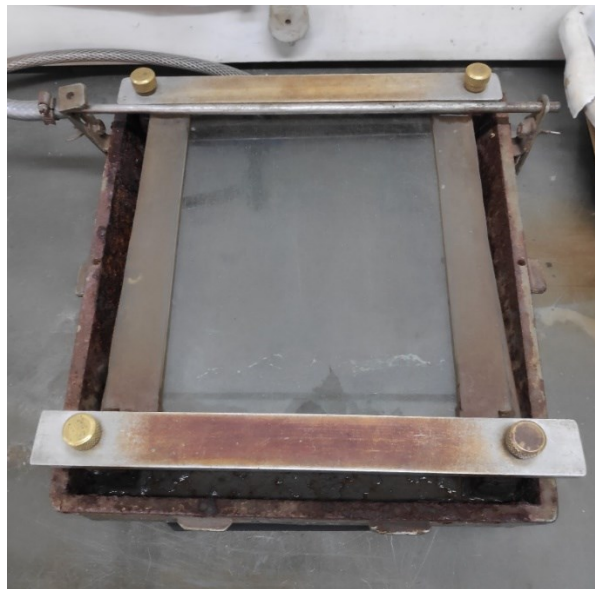


Figura 16 - Base com lixadeira manual com uma pista utilizada para o lixamento da amostra para medição da dureza de referência.

3.5.3 Imagem da superfície retificada

As imagens das superfícies das amostras retificadas foram obtidas através do microscópio eletrônico de varredura (MEV), TM3000, localizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC-UFU. Para a avaliação das imagens das superfícies retificadas no MEV, foi necessária a preparação de todas as amostras. Elas foram limpas com acetona em um copo Becker colocado em um aparelho que funciona por vibração ultrassônica, Coleparmer 8848, e posteriormente secadas. Na sequência, as amostras foram inicialmente analisadas a olho nu de forma

a verificar a ocorrência de falhas visíveis. Então, para a avaliação da superfície retificada no MEV e detecção de ocorrência de anomalias superficiais, adotou-se uma ampliação de 1500 vezes para a inspeção utilizando-se o detector de elétrons secundários a uma distância de trabalho (entre o feixe de elétrons e as amostras) de 5,60 mm e tensão elétrica de aceleração de 5,0 kV e escala de 50 μm .

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados os resultados e discussão obtidos após os ensaios experimentais da retificação plana do aço inoxidável ABNT 316 M com o rebolo de óxido de alumínio branco em diversas condições de corte. Na sequência são apresentados os resultados para as variáveis: rugosidade, microdureza e as imagens das superfícies retificadas.

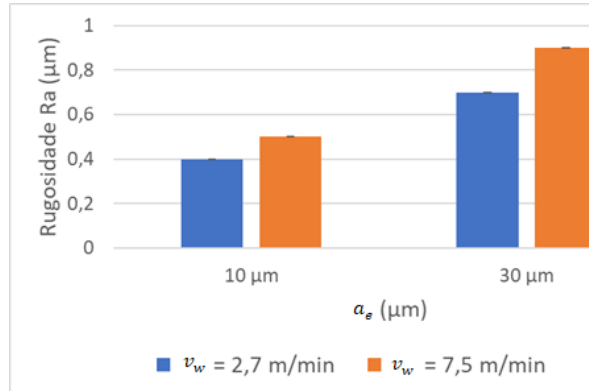
4.1 Rugosidade da superfície

Na Tabela 3 e de forma gráfica nas Figuras 17 a), b), c) e d) estão apresentados os valores para os diversos parâmetros de rugosidade analisados neste trabalho, constituídos pela rugosidade média (R_a), a rugosidade média máxima (R_z), rugosidade média quadrática (R_q) e da altura total do perfil (R_t).

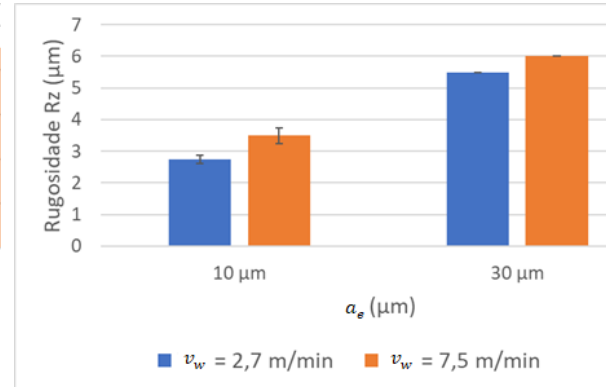
Tabela 3 - Valores obtidos para parâmetros de rugosidade para o aço inoxidável austenítico ABNT 316 M para cada condição de corte.

Parâmetro de corte	Parâmetro de rugosidade (valores em μm)							
	R_a		R_z		R_q		R_t	
Velocidade da peça (v_w) (m/min)	2,7	7,5	2,7	7,5	2,7	7,5	2,7	7,5
Penetração de trabalho a_e (μm)	2,7	7,5	2,7	7,5	2,7	7,5	2,7	7,5
10	0,4	0,5	2,75	3,5	0,6	0,69	3,5	4,25
30	0,7	0,9	5,5	6,0	0,99	1,17	6,75	7,5

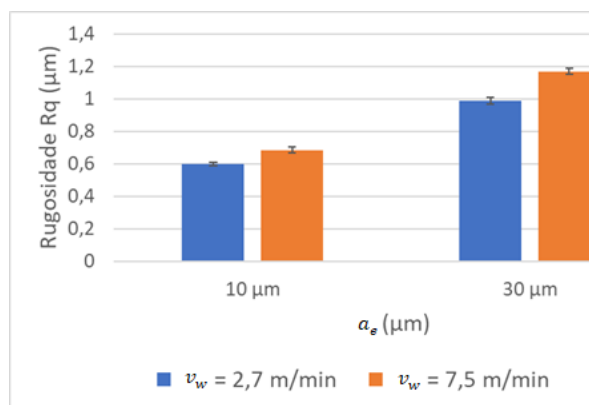
Em geral, de todas as Figuras 17 a) a d), observa-se que houve um aumento dos parâmetros de rugosidade com o aumento tanto da penetração de trabalho (a_e) quanto da velocidade da peça (v_w).



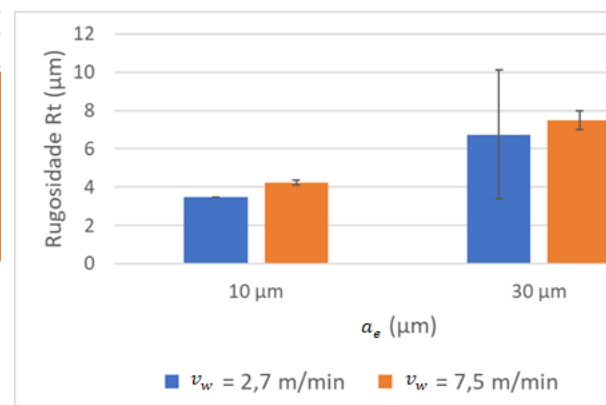
a) Parâmetro Ra



b) Parâmetro Rz



c) Parâmetro Rq



d) Parâmetro Rt

Figura 17 - Valores de rugosidades para os parâmetros Ra, Rz, Rq e Rt do aço inoxidável ABNT 316 M em função da penetração de trabalho e velocidade da peça.

Estes resultados estão de acordo com a tendência relatada na literatura de que o acabamento da superfície piora conforme mais severa a condição de corte é imposta (Machado et al., 2009), e isto pode ser verificado nas Figuras 17 a) a d) para as superfícies de aço inoxidável 316 M. À medida que o rebolo adentra na superfície da peça durante a retificação, o que é proporcionado pelo aumento da penetração de trabalho ajustada no nônio da máquina (eixo que recebe o rebolo) maior é o comprimento de contato. Assim maior é o número de partículas abrasivas do rebolo em contato com a peça e consequentemente maior é área de contato entre rebolo e

a peça. Isto resulta em maiores esforços e corte, o que altera as condições tribológicas e reflete negativamente no acabamento da peça (Bianchi, 1997). Além disso, em uma condição com maior velocidade da peça observa-se que o impacto dos abrasivos na interface é mais intenso, além de haver menos ciclos de abrasão em uma mesma região, o que leva a um acabamento mais grosseiro do local. Esta relação ainda pode ser analisada por meio da espessura de corte equivalente, que é proporcional a penetração de trabalho e a velocidade da peça. Desta forma, se há algum incremento nestes dois parâmetros, a espessura de corte equivalente irá aumentar. Assim, maior será a espessura do cavaco o que também irá interferir na textura e acabamento da peça (MALKIN; GUO, 2008; Bianchi, 1997).

Da Figura 17 a) observa-se o maior valor de rugosidade Ra foi obtido ao usar com a combinação entre penetração de trabalho e velocidade da peça mais elevados, ou seja, condição mais severa de corte, e este valor foi igual a $0,9 \mu\text{m}$. Com isso, os valores de rugosidade Ra obtidos para as peças de aço inoxidável ABNT 316 M permaneceram abaixo de $1,6 \text{ mm}$, que corresponde ao limite superior para valores de rugosidade obtidos em processos de retificação comumente relatados na literatura como referência para processo de retificação de semi-acabamento, como foi o caso do processo empregado neste trabalho (MACHADO et. al., 2009).

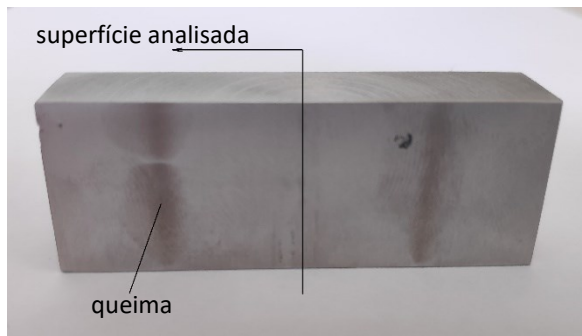
A fim de dar suporte a esta hipótese, Manimaran e Kumar (2013) também encontraram uma tendencia parecida ao realizarem um estudo do efeito do resfriamento criogênico com rebolo de alumina sol-gel com diversas condições de corte bem semelhantes àsquelas empregadas neste trabalho, principalmente no acabamento da peça de aço inoxidável AISI 316. Seus resultados mostraram os valores de rugosidade aumentava com a penetração de trabalho aplicada, como também com o aumento da velocidade da peça (mantendo-se fixa a penetração de trabalho).

Em outro trabalho desenvolvido por Sivaraman et al. (2018), na retificação do aço inoxidável austenítico AISI 317L, os autores testaram duas granulometrias de rebolo, três valores de penetração de trabalho e de velocidade da peça e observaram que o aumento da penetração de trabalho ou da velocidade da peça levou ao aumento do parâmetro de rugosidade Ra. E através da modelagem por método Taguchi, em que os autores concluíram haver boa concordância com os resultados práticos,

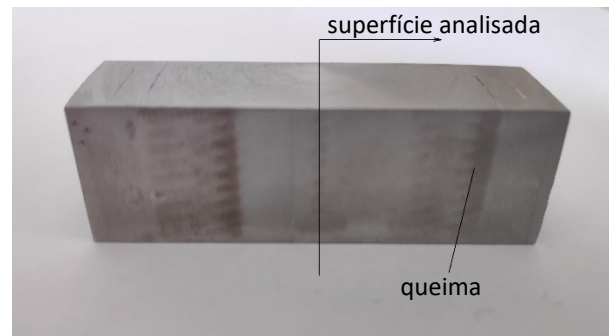
encontram o valor otimizado de rugosidade para o rebolo com maior granulometria e quando aplicadas menores penetrações e velocidades, o qual era o objetivo da pesquisa. Os autores não apresentaram considerações sobre a tendência na melhoria da rugosidade conforme os parâmetros foram aplicados, mas seus resultados coincidem com os resultados observados neste trabalho, em que a hipótese é de redução dos valores de rugosidade conforme diminui-se a espessura de corte equivalente através da aplicação de menores penetrações de trabalho e velocidade da peça. O que implica em menor deformação plástica e menores temperaturas dada pela condição menos severa de corte (MACHADO et. al., 2009; MALKIN; GUO, 2008).

4.2 Imagens das superfícies retificadas

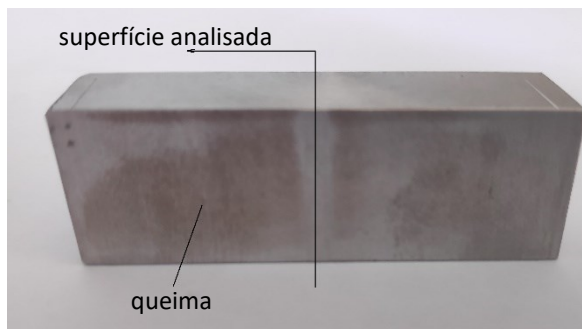
Nesta seção são apresentadas as imagens das superfícies por análise visual, sem ampliação, e também imagens obtidas com o auxílio do MEV das amostras de aço inoxidável austenítico 316 M. As imagens obtidas por meio de análise visual são mostradas nas Figuras 18 a) a d).



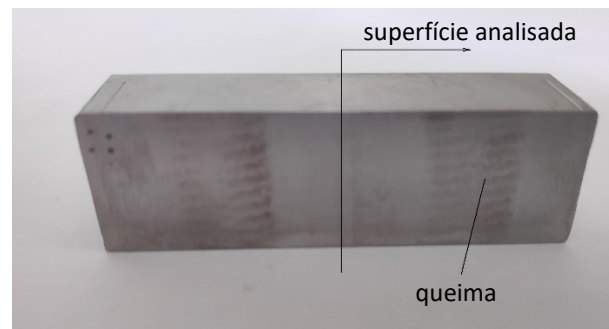
a) $v_w = 2,7$ m/min com $a_e = 10$ μ m



b) $v_w = 7,5$ m/min com $a_e = 10$ μ m



c) $v_w = 2,7$ m/min com $a_e = 30$ μ m



d) $v_w = 7,5$ m/min com $a_e = 30$ μ m

Figura 18 - Imagens das superfícies retificadas do aço AISI 316 M a olho nu em diferentes condições de corte.

A partir destas imagens é possível afirmar que houve indício de queima de aspecto visível em todas as superfícies usinadas, independente da condição testadas. Isso pode ser comprovado pela alteração na cor da peça, que se tornou mais escura que a cor da peça antes da retificação (cinza mais claro). Para as superfícies que foram geradas após a usinagem nas condições mais severas de retificação, Figuras 18 c) e d), em que foi empregada um maior valor de penetração de trabalho, observou-se uma área maior com coloração mais escura em relação aquelas superfícies usinadas com a menor penetração de trabalho (Figuras 18 a) e b)) e a superfície que

foi usinada com a menor velocidade da peça, $v_w = 2,7$ m/min e $a_e = 30$ μ m apresentou-se mais escurecida que as demais. Isso pode ser atribuído ao maior tempo de contato do rebolo com a peça quando se emprega menor velocidade da peça, fazendo com que mais calor seja gerado no processo. Como é conhecido da teoria de usinagem por abrasão que a retificação de materiais principalmente pobres condutores térmicos, como é o caso do aço inoxidável em questão, combinado com rebolos abrasivos convencionais (óxido de alumínio branco, por exemplo) a maior parte do calor gerado será direcionada para a peça em relação a uma peça que foi usinada com maior valor de velocidade da peça (DA SILVA, 2018; MARINESCU et al., 2004). Para superfícies retificadas com uma velocidade maior da peça, não há tempo suficiente para que o calor gerado na interface rebolo-peça se dissipe para o interior da peça por condução, de modo que se concentre na interface de trabalho e promova alterações metalúrgicas na região. Também é possível notar que para a maior velocidade da peça, Figuras 18 b) e d), houve a formação de marcas paralelas, o que pode indicar que houve ocorrência de vibração do rebolo ou da mesa da máquina ferramenta nesta condição. Além disso, com relação ao efeito da penetração de trabalho, nota-se ao empregar um maior valor, $a_e = 30$ μ m, independente da velocidade da peça, a superfície da peça torna-se mais escura, o que indica ocorrência de queima mais severa e piora na integridade da superfície. Isso pode ser atribuído à maior área de contato dos abrasivos do rebolo com a peça, que por sua vez implica em maiores deformações plásticas que leva ao aquecimento da região.

A seguir, nas Figuras 19 a) a d) são apresentadas as imagens das superfícies retificadas obtidas via MEV com uma ampliação de 1500 vezes e escala de 50 μm para a comparação entre as mesmas.

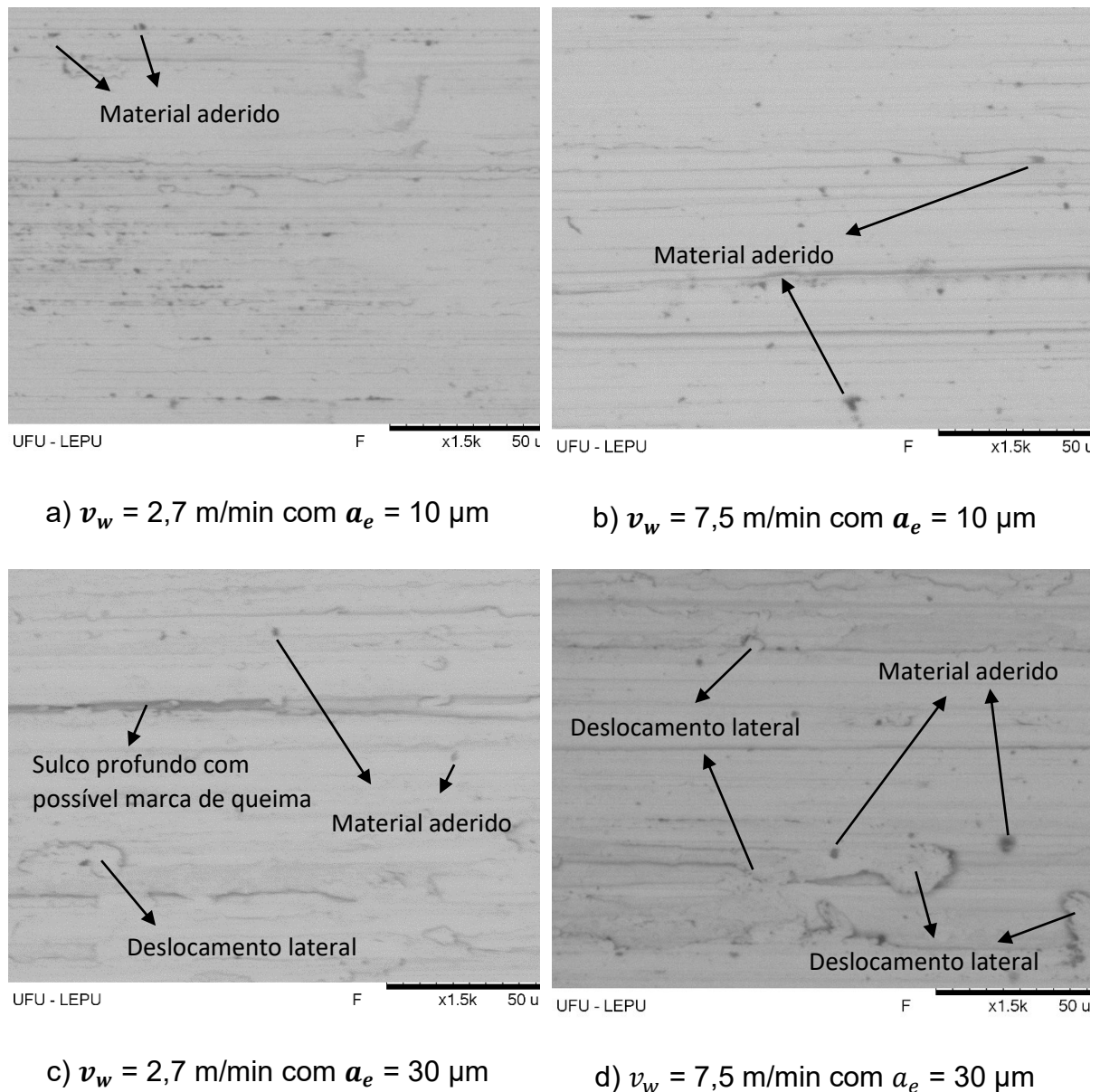


Figura 19 - Imagens das superfícies retificadas do aço AISI 316 M em diferentes condições de corte obtidas via MEV (escala de 50 μm)

Das Figura 19 a) a d) observa-se as marcas de avanço resultantes da passagem das partículas abrasivas sobre a superfície e que são mais evidentes ao empregar condições mais brandas de retificação (Figuras 19 a) e b)). Observa-se ainda que, ao empregar maiores valores de penetração de trabalho, mantendo constante a

velocidade da peça, Figuras 19 c) e d), há uma predominância de eventos que se destacam em relação às imagens das superfícies geradas em condições mais brandas de retificação. Citam-se como exemplos os sulcos mais largos e profundos dado pela maior pressão e área de contato entre os abrasivos e a peça (que refletem negativamente no acabamento da peça), além do descolamento de material para a lateral (ou fluxo de material lateral), os quais são normalmente relatados na literatura como decorrentes de condições de corte mais severas (MALKIN; GUO, 2008). Também se observa ocorrência de deslocamento lateral, e em alguns casos a ocorrência de redeposição de material da peça sobre a superfície, que é material aderido, evidenciando a maior severidade desta condição de corte quando comparado com o emprego de uma menor penetração de trabalho testada.

Quanto à influência exclusiva da velocidade da peça, ao se manter a penetração de trabalho constante, pode-se observar que para maiores valores de velocidade da peça, Figura 19 (b) e (d), as superfícies das peças apresentam uma textura pior, representadas pelos sulcos mais pronunciados. Além disso, há descontinuidades dos riscos ou marcas deixadas pela passagem dos grãos abrasivos, como também maior evidência de material da peça que foi empurrado para o lado, o que prejudica o acabamento e reflete em maiores valores de rugosidade (LIMA, 2016; PEREIRA, 2018). Isso foi confirmado pelos maiores valores de rugosidade de todos os parâmetros (Figuras 17 a) a d)).

Além disso, observou-se a presença de material aderido redepositado em na maioria das superfícies das peças, ou seja, sob todas as condições de corte, que são defeitos oriundos do processo de formação de cavaco que pode não ter sido eficiente pelo amolecimento do material da superfície da peça, que por sua vez é causado por causa das elevadas temperaturas desenvolvidas na interface de corte (PEREIRA, 2018). Porém, é nítido a maior densidade de material aderido conforme mais intensa é a condição de corte.

Manimaran e Kumar (2013), estudando os efeitos do resfriamento criogênico com rebolo de alumina sol-gel no desempenho da retificação no aço inoxidável AISI 316 em diversas condições de lubrificação, obtiveram imagens das peças via MEV e encontraram descontinuidade similares a estas encontradas neste trabalho. Para a condição em que foi empregada a combinação de velocidade fixa da peça de

$v_w = 0,15$ m/s (9 m/min), penetração de trabalho de $a_e = 20$ μ m e lubrificação a seco, os autores observaram tanto deslocamento lateral quanto destacamento de material da peça. Nas mesmas condições de corte, mas utilizando fluido de corte semissintético e refrigeração criogênica, os autores relataram a ocorrência de material aderido e de deslocamento lateral respectivamente.

4.3 Microdureza

Nas Figuras 20 a) a d) são apresentados os valores de microdureza na forma de espectrograma das superfícies do aço AISI 316 M após retificação em várias condições de corte e por estas imagens é possível observar a variação dinâmica da densidade da dureza em toda a sua distribuição amostral. Os menores valores de microdureza estão mais próximos da dureza de referência de 183 HV, representado pelo azul escuro, enquanto os valores mais elevados tendem adquirir coloração avermelhada.

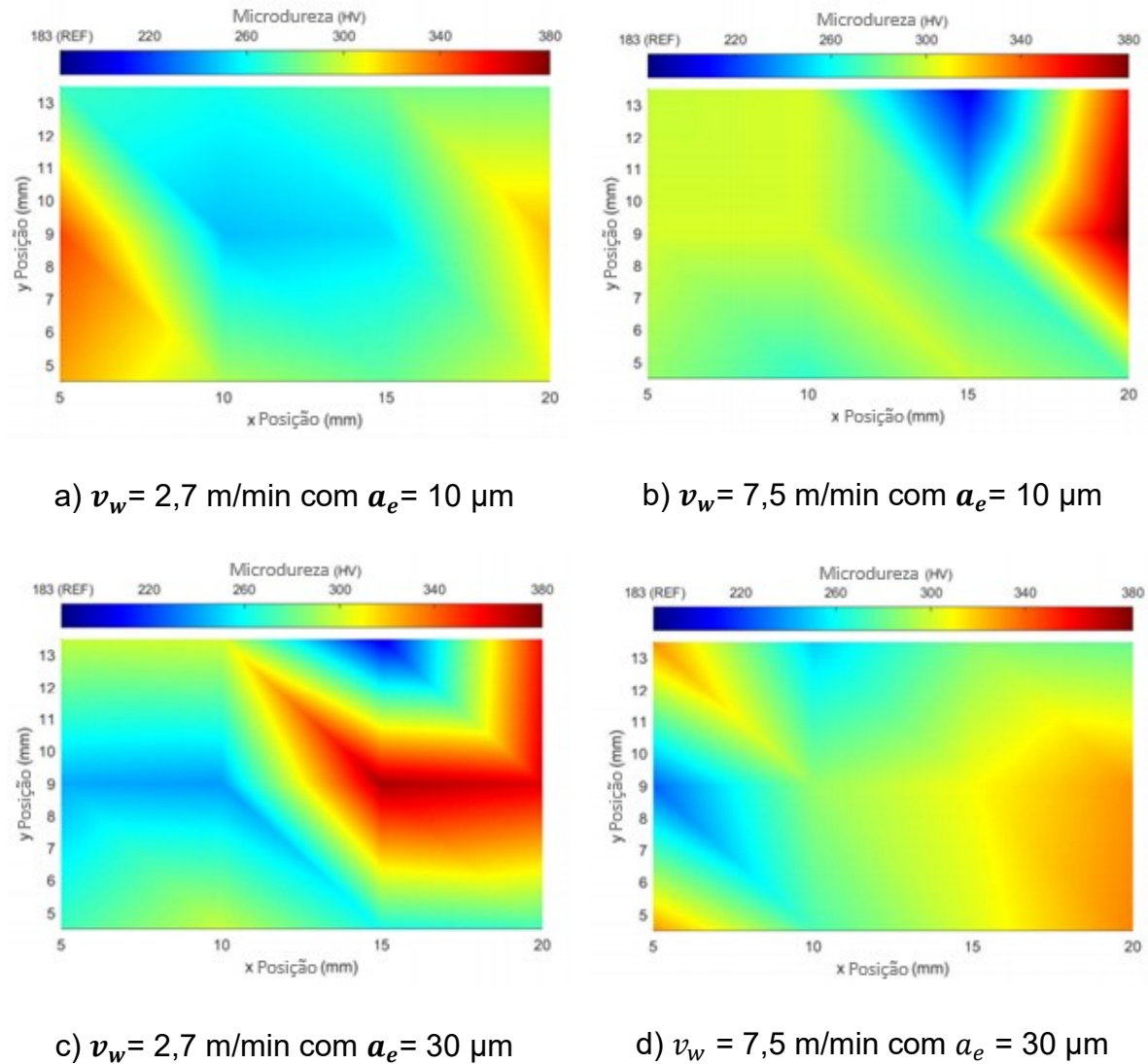


Figura 20 - Microdurezas medidas nas superfícies do aço AISI 316 M após retificação em várias condições de corte.

Destas figuras é possível notar que as superfícies que foram geradas ao empregar os menores valores de penetrações de trabalho, Figuras 20 a) e b), apresentam as menores variações de dureza quando comparado com as imagens das superfícies que foram geradas ao empregar um maior valor de penetração de trabalho. Observa-se ainda que o emprego de uma maior penetração de trabalho combinada com uma menor velocidade da peça (Figura 20 c)) proporcionou uma superfície da peça com evidência de maior dureza. Novamente, o fato de empregar uma menor velocidade da peça implica em maior tempo de contato do rebolo com a peça, o que favorece geração de calor que fica na interface e tende a ser direcionado para a peça (DA SILVA, 2018), implicando em elevação de dureza na superfície neste caso.

Provavelmente houve formação de martensita não revenida que é representada por maior valor de dureza, como este encontrado para esta condição testada. Isso ainda foi favorecido pela baixa condutividade térmica do aço inoxidável como também pelo fato de ter elevada taxa de encruamento em relação aos aços comuns ao carbono. Já ao empregar uma maior velocidade da peça, haveria um tempo de aquecimento mais curto e também uma menor penetração do calor no seu interior (MALKIN; GUO, 2008).

No trabalho conduzido por Kumar et al. (2017) em que eles realizaram vários processos de usinagem (retificação, fresamento, torneamento e polimento) em aço inoxidável austenítico AISI 304L e avaliaram como estes processos iriam afetar a resistência à corrosão sob tensão induzida por cloro. Dentre os parâmetros de integridade de superfície avaliados por estes autores, o destaque foi para a microdureza e constataram que após os ensaios de retificação, fresamento e torneamento a superfícies usinadas apresentaram endurecimento devido à alta densidade de bandas de deformação que surgiram perto da superfície, cuja profundidade atingiu cerca de 60 μm para a retificação. Além disso, também foi observada a ocorrência de transformação de austenita em martensita induzida pela deformação causada pelos estes três processos. Estes resultados corroboram com aqueles que foram observados neste trabalho em que tenham possivelmente ocorrido com o aço inoxidável austenítico ABNT 316 M, justificando o aumento da microdureza observado em todas as condições de corte (Figura 20).

Em outro trabalho, Rhouma et al. (2019), estudaram o efeito dos processos de retificação e do torneamento na distribuição das tensões residuais e sua influência na resistência à corrosão sob tensão do aço inoxidável austenítico AISI 316L em meio de cloreto. O processo de retificação foi realizado com um rebolo de alumina (99A46H7VNE), velocidade da peça de $v_w = 4 \text{ m/min}$ e uma penetração de trabalho $a_e = 10 \text{ }\mu\text{m}$, valores que estão na faixa de parâmetros empregados neste trabalho. Eles realizaram medições de microdureza na seção transversal e relataram os valores de 480 HV e de 280 HV nas superfícies das amostras usinadas pelo torneamento e pela retificação, respectivamente. Eles foram bem superiores ao valor de 180 HV, medido no material como recebido em região em que não há influência de processos de usinagem. Os autores relataram que o aumento na microdureza está associado com a deformação plástica. Além disso, pode-se notar no perfil de microdureza que a camada deformada plasticamente pela retificação vai até 0,2 mm abaixo da superfície.

Este estudo em aço inoxidável austenítico mostra que mesmo em condições mais brandas de retificação, com menores penetrações e velocidades empregadas, houve aumento da microdureza que pode estar relacionada com a alta taxa de encruamento que ocorre em aços inoxidáveis, fortalecendo a hipótese de que também ocorreu isso neste trabalho em aço ABNT 316 M.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

A partir dos resultados e discussões realizadas neste trabalho sobre retificação plana em aço inoxidável austenítico 316 M em diversas condições de corte, as seguintes conclusões podem ser retiradas:

- Todos os parâmetros de rugosidade aumentaram tanto com o incremento da penetração de trabalho quanto com o incremento na velocidade da peça;
- O parâmetro R_a situou-se abaixo de $0,9 \mu\text{m}$, valor bem abaixo do limite superior de $1,6 \mu\text{m}$, que é considerado o valor máximo de referência para rugosidade para processo de retificação de semi-acabamento, portanto indicando que os parâmetros de corte empregados neste trabalho são adequados para a retificação deste material;
- Por meio das imagens das superfícies retificadas sem ampliação foi possível observar evidência de ocorrência de queima de retificação. A severidade da queima ocorreu com o aumento da penetração de trabalho e foi mais intensa para a menor velocidade da mesa.
- Por meio das imagens das peças inspecionadas através do MEV foi possível observar que na retificação em condições com maior penetração de trabalho houve piora textura das peças. Em condições mais severas de usinagem, maior penetração de trabalho, foram observadas nas peças descontinuidades das marcas de retificação e maior quantidade de material da peça que foi deslocado lateralmente, evidenciando que houve deformação plástica mais intensa nestas condições.
- Por meio da análise de microdureza, observou-se que na usinagem em condições de corte mais severas, principalmente com a maior penetração de trabalho, houve elevação de microdureza na superfície retificada.

Sugestões para trabalhos futuros

- Analisar a integridade da superfície de outras classes de aço inoxidáveis como ligas ferríticas, martensíticas, duplex ou endurecidas por precipitação com as mesmas condições de corte deste trabalho para a comparação dos resultados deste trabalho e avaliar a sua retificabilidade.
- Empregar rebolos de alumina branca de diferentes granulometrias mesh e também o rebolo de óxido de alumínio monocristalino na retificação do aço ABNT 316 M.
- Investigar a retificabilidade do inoxidável do aço ABNT 316 M que seja produzido pela técnica da manufatura aditiva em relação ao aço ABNT 316 M produzido por processo convencional (o mesmo deste trabalho) utilizando os mesmos parâmetros de corte testados neste trabalho.
- Analisar os efeitos de parâmetros dressagem, Ud e tipo de dressador, na retificabilidade de aços inoxidáveis.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASM METALS HANDBOOK, 2004. **Machining**, 10th Edition, Volume 16, ASM International, USA

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

BIANCHI, E.C. ET AL. **Análise do comportamento de rebolos convencionais na retificação de aços frágeis e dúcteis**. Revista Brasileira de Ciencias Mecanicas/Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, v. 19, n. 3, p. 410-425, 1997

CAMARGO, Robson., **Verificação da usinabilidade dos aços inoxidáveis austeníticos através do processo de furação**. 2008. 117p. Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica, Campinas, SP.

CARBÓ, H. M. **Aços inoxidáveis: aplicações e especificações**. São Paulo: **ArcelorMittal Brasil**, 2008.

CHIAVERINI, V. **Aços e ferros fundidos: características gerais, tratamento térmico, principais tipos**. 6. ed. São Paulo: ABM, 1990. 576 p.

DA SILVA, R. B., **Usinagem II, Usinagem por Abrasão: Introdução**, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, 2018. Notas de Aula.

Diniz, A.E., Marcondes, F.C., Coppini, N.L, 2014. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. Artiber, 9ª edição.

GUIMARÃES, C. **Retificação plana de aços para moldes e matrizes em várias condições de corte e diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte**. Tese (Doutorado em Materiais e Processos de Fabricação), Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, MG, Brasil, 2016.

INCROPERA, F.P., BERGMAN, T.L., DEWITT, D.P. (2008), **Fundamentos de transferência de calor e de massa**, 6ª ed., Editora LTC, Rio de Janeiro-RJ, 643p

King, R. I., Hahn, R. S., **“Handbook of modern grinding technology”**. 3. ed. New York: Chapman and Hall, 1986.

KLOCKE, F. **Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping**. 1. ed. AC: SPRINGER, 2009. 433p.

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.

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

MACHADO, A.M.; ABRÃO, A.M.; COELHO, R.T.; SILVA, M. B.; 2009. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Editora Edgard Blucher, São Paulo. Brasil, 371p.

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. 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

MARINESCU, I. D., ROWE, W. B., DIMITROV, B., INASAKI, I. **Tribology of abrasive machining processes**. 1.ed. New York: Willian Andrew, 2004. 758p

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels**. CRC Press. New York, 2007.

OLIVEIRA, D., **Retificabilidade do Inconel 718 com base no acabamento e na microdureza**, 2015, 54 f. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

PADILHA, A. F.; PLAUT, R. L.; RIOS, P. R. "Chapter 15: Stainless Steel Heat Treatment". In: George E. Totten (Editor). (Org.). **Steel Heat Treatment Handbook**. 2 ed., USA p. 695-735, 2006.

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.

RHOUMA A. B.; SIDHOM N.; MAKHLOUF K.; SIDHOM H.; BRAHAM C.; et al.. Effect of machining processes on the residual stress distribution heterogeneities and their consequences on the stress corrosion cracking resistance of AISI 316L SS in chloride medium. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, Springer Verlag, 2019, 105, pp.1699-1711.

SILVA, L. S. V: **Influência da espessura de corte equivalente e técnica de aplicação de fluido de corte na integridade da superfície do Inconel 718**. 2017, 63 f. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia – MG.

SINHA, A. K.; WU, C.; LIU, G. "Chapter 1: Steel Nomenclature ". In: George E. Totten (Editor). (Org.). **Steel Heat Treatment Handbook**. 2 ed., USA p. 2-87, 2006.

SIVARAMAN, B. et al. Optimization of grinding parameters in austenitic stainless steel AISI 317L using Taguchi method. **International Journal of Mechanical and Production Engineering Research and Development**, v. 8, n. 2, p. 1033-1038, 2018.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscar, fresas, brochas, rebolos, abrasivos**. 2. ed. Florianópolis: Editora da UFSC, 1995.

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

PIZZI, R.; SALES, W. F.; ABRÃO, A. M. e MACHADO, A. R. (1997), “**Fresamento de Aços Inoxidáveis Austeníticos ABNT 316**”, COBEM - Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Bauru, SP, Brasil.

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