

AMANDA SOUZA ABRÃO

**CONTRIBUIÇÃO PARA O PROCESSO DE
RETIFICAÇÃO PLANA DE SUPERFÍCIES
INTERROMPIDAS**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2023

AMANDA SOUZA ABRÃO

**CONTRIBUIÇÃO PARA O PROCESSO DE RETIFICAÇÃO PLANA DE
SUPERFÍCIES INTERROMPIDAS**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia como requisito parcial para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

Co-orientador: Prof. Dr. Bruno Souza Abrão

Banca Examinadora:

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

Dra. Mayara Fernanda Pereira - FEMEC - UFU

Dr. Alcione dos Reis - FEMEC - UFU

UBERLÂNDIA – MG

2023

DEDICATÓRIA

Aos meus pais José Antônio e Valéria, e aos meus irmãos Júlia e Bruno.

AGRADECIMENTOS

A Deus, primeiramente, por ter abençoado meus passos, sempre me dando força, saúde e motivação para a realização deste trabalho.

Aos meus pais Valéria Piva de Souza Abrão e José Antônio Abrão, e aos meus irmãos Bruno Souza Abrão e Júlia Souza Abrão, por sempre me incentivarem com muito amor, carinho e dedicação, e sempre estarem presentes me apoiando tanto nos momentos de alegria quanto nos de dificuldade.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva e ao meu co-orientador Prof. Dr. Bruno Souza Abrão por todo apoio, dedicação, paciência, conhecimento e incentivo, essenciais para a realização deste trabalho.

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) pela oportunidade de desenvolvimento deste projeto.

A todos os professores, técnicos e alunos do LEPU pela amizade e contribuição ao longo do desenvolvimento do trabalho.

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

ABRÃO, A. S. **Contribuição para o processo de retificação plana de superfícies interrompidas.** 2023. 69 p. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

RESUMO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão, no qual a remoção de material ocorre por meio da ação de partículas abrasivas de geometria não definida que são pobres condutores de calor que, aliadas à baixa taxa de remoção de material, gera grande quantidade de calor que é transferido para a peça. Dependendo da situação, este calor pode gerar danos de origem térmica (queima, alterações microestruturais, trincas, entre outros) e comprometer a funcionalidade da peça. Uma situação que ainda não está totalmente compreendida na literatura é como os danos térmicos se comportam em peças de superfícies interrompidas. Neste sentido, o presente trabalho visa contribuir para geração de dados no processo de retificação plana tangencial em amostras de aço Inoxidável 316 UF com superfícies interrompidas, utilizando um rebolo de óxido de alumínio sob diferentes condições de corte. Foram testadas amostras com 4 e 6 ressaltos (que configuram a superfície interrompida) e 3 diferentes valores de penetração de trabalho (15 μm , 30 μm e 45 μm). Como variáveis de saída, foram estudados os parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_t e R_q), microdureza das peças, potência de retificação, além da textura e qualidade das superfícies retificadas por meio de imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura. Em geral, os resultados mostraram que a utilização de menores valores de penetração de trabalho, resultou em menores valores de rugosidade além de gerar as superfícies com melhor textura. A microdureza sofreu influência praticamente desprezível. Quanto ao número de ressaltos, quanto menor este número, menores foram os valores de rugosidade e melhor textura superficial das peças.

Palavras-chave: *retificação; rebolo de óxido de alumínio; aço Inoxidável 316 UF; superfícies interrompidas; número de ressaltos, integridade superficial.*

ABRÃO, A. S. **Contribution to the plane grinding process of interrupted surfaces.** 2023. 69 p. Monograph. Federal University of Uberlândia –MG

ABSTRACT

Grinding is a machining process by abrasion, in which material removal occurs through abrasive grits with non-defined geometry that have poor thermal conductivity, which, combined with the low material removal rate, generates a large amount of heat that is transferred to workpiece during grinding. Depending on the case, this heat can cause thermal damages such as burning, microstructural changes, cracks, among others) and thereby compromise the functionality of the component. In this sense, a situation that is not yet fully known in the literature is how thermal damage behaves in parts with interrupted surfaces. In this sense, the present work aims to contribute generation of data to peripheral surface grinding of a ABNT 316 UF stainless steel samples with number of channels using an aluminum oxide grinding wheel under different cutting conditions. Samples with 4 and 6 channels were tested (that comprises an interrupted surface) and 3 different radial depth of cut values (15 μm , 30 μm and 45 μm). As output variables, the roughness parameters (Ra, Rz, Rt and Rq), microhardness, grinding power and texture and quality of the ground surfaces (through Scanning Electron Microscopy) images were studied. In general, the results showed that the use of lower radial depth of cut values resulted in lower roughness values and surfaces with better texture. The influence of channels on the microhardness was practically negligible. In terms of number of grooves, the smaller the number of grooves, the lower surface roughness and improved surface texture.

Keywords: *Grinding; aluminum oxide grinding wheel; ABNT 316 UF stainless steel; interrupted surfaces; number of channels, surface integrity.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Os seis elementos envolvidos na retificação plana tangencial (Adaptado de MARINESCU et al., 2007).	4
Figura 2.2 – Elementos básicos do processo de retificação plana tangencial: a) sistema rebolo-peça, b) ampliação da zona de retificação de a) relação geométrica das principais grandezas físicas do processo (ABRÃO, 2018).	5
Figura 2.3 – Vistas frontal e em perspectiva de 4 corpos de prova que foram submetidos a retificação cilíndrica (TARRENTO, 2018). (a) geometria com superfície contínua, (b) 2 canais, (c) 6 canais e (d) 12 canais.	7
Figura 2.4 – Peças de trabalho em aço AISI 4340 endurecido aplicadas a testes de corte interrompido (RIBEIRO et al., 2020).	9
Figura 2.5 – Esquema da estrutura de um rebolo convencional (Adaptado de WANG et al., 2016).	10
Figura 2.6 - Forma de especificação de rebolos (ABRÃO, 2018).	11
Figura 2.7 – Valores de rugosidade Ra para os principais processos de fabricação (adaptado de BARRIOS et al., 2011).	19
Figura 3.1 – Fluxograma com as principais informações referentes aos ensaios experimentais do aço ABNT 316 UF	24
Figura 3.2– Amostras com ressaltos.	25
Figura 3.3 – Retificadora plana tangencial Mello.	26
Figura 3.4 – Máquina-ferramenta com a utilização do fluido de corte.	26
Figura 3.5 – Refratômetro.	27
Figura 3.6 – Rebolo empregado nos ensaios a) sem montagem na máquina-ferramenta e b) montado na máquina-ferramenta.	28
Figura 3.7 – Microdurômetro utilizado para medição.	29
Figura 3.8 – Dressador utilizado nos ensaios a) sem posicionamento na máquina-ferramenta b) com posicionamento na máquina-ferramenta	30
Figura 3.9 – Morsa utilizada nos ensaios (já sendo utilizada para fixar uma amostra).	31
Figura 3.10 – Posicionamento da peça em uma morsa de precisão sobre a mesa magnética da máquina-ferramenta.	31
Figura 3.11 – Montagem da peça e posicionamento do rugosímetro para a medição de rugosidade.	32

Figura 3.12 – Posicionamento das medições e microdurômetro.	33
Figura 4.1 – Rugosidade média (R_a) em função penetração de trabalho e número de ressaltos das amostras.	35
Figura 4.2 – Rugosidade R_z em função penetração de trabalho e número de ressaltos das amostras.	36
Figura 4.3 – Rugosidade R_q em função penetração de trabalho e número de ressaltos das amostras.	36
Figura 4.4 – Rugosidade R_t em função penetração de trabalho e número de ressaltos das amostras.	37
Figura 4.5 – Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço Inoxidável 316 UF após processo de retificação, com peças de 4 ressaltos.	41
Figura 4.6 – Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço Inoxidável 316 UF após processo de retificação, com peças de 6 ressaltos.	42
Figura 4.7 – Maiores valores de microdureza encontrados para cada caso	44
Figura 4.8 – Superfícies retificadas (MEV)	45
Figura 4.9 – Peças com queima superficial	46
Figura 4.10 – Potência de retificação obtida a partir de diferentes penetrações de trabalho em superfícies com 6 ressaltos.	47
Figura 4.11 – Potência de retificação obtida a partir de diferentes penetrações de trabalho em superfícies com 4 ressaltos.	48

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Propriedades mecânicas dos principais tipos de carbetos de silício e óxido de alumínio (adaptado de MALKIN, 2008).	12
Tabela 3.1 – Principais parâmetros de corte utilizados.	29
Tabela 4.1 – Média dos valores de Rugosidade R_a	37
Tabela 4.2 – Média dos valores de Rugosidade R_z	38
Tabela 4.3 – Média dos valores de Rugosidade R_q	38
Tabela 4.4 – Média dos valores de Rugosidade R_t	39

LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS

A_c (μm)	Área de contato rebolo/peça
a_d (μm)	Profundidade de dressagem
a_e (μm)	Penetração de trabalho
AISI	American Iron and Steel Institute
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ANSI	American National Standards Institution
a_p (μm)	Profundidade de corte
b (μm)	Largura de retificação
b_d (μm)	Largura do dressador
d_s (mm)	Diâmetro do rebolo
e_c (J/mm^3)	Energia específica de corte
h_{cu} (μm)	Espessura de cavaco não deformado
h_{eq} (μm)	Espessura equivalente de corte
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
n_s (rpm)	Rotação do rebolo
P (W)	Potência de corte em retificação
Q_w (mm^3)	Taxa de remoção de material
R_a (μm)	Desvio aritmético médio do perfil avaliado
R_q (μm)	Desvio médio quadrático do perfil avaliado
R_z (μm)	Altura máxima do perfil

R_t (μm)	Altura total do perfil
s_d (mm) dressagem	Passo de
U_d	Grau de recobrimento do rebolo
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V_s (m/s)	Velocidade de corte
V_w (m/min)	Velocidade da peça
V_f (m/min)	Velocidade de avanço do rebolo
d_w (mm)	Diâmetro da peça

Sumário

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	3
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1 Processo de retificação	3
2.2 Retificação de superfícies interrompidas	6
2.3 Rebolos.....	10
2.4 Grandezas físicas da retificação plana	13
2.5 Calor e temperatura durante o processo de retificação	16
2.6 Calor e temperatura durante o processo de retificação	16
CAPÍTULO III	24
METODOLOGIA.....	24
CAPÍTULO IV	35
RESULTADOS E DISCUSSÃO	35
4.1 Rugosidade	35
4.2 Microdureza	41
4.3 Textura superficial.....	44
4.4 Potência de retificação	47
CAPÍTULO V	50
CONCLUSÕES	50
Sugestões para trabalhos futuros.....	52
Referências Bibliográficas.....	53

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A retificação é um processo de usinagem por abrasão, no qual a remoção de material ocorre por meio da ação de partículas abrasivas (GROOVER, 2014). De acordo com Marinescu et al. (2007), o processo é composto por alguns elementos básicos, sendo eles: rebolo, peça, atmosfera de usinagem (com destaque para fluido de corte, ar ambiente e ar comprimido), retificadora e os resíduos da retificação (cavacos). Dessa forma, para o desenvolvimento do processo e remoção do material utiliza-se um rebolo que rotaciona em altas velocidades (normalmente maiores que 30 m/s) e é composto por milhares de partículas abrasivas, configurando uma ferramenta de corte com geometria não definida. Em geral, a retificação é muito utilizada na fabricação de componentes mecânicos, os quais necessitam de elevada qualidade geométrica (rugosidade R_a menor que 1,6 μm) e dimensional (qualidade IT06-IT03) (ALVES, 2007), como também uma alternativa para usinar materiais endurecidos.

Diante da busca pelo aumento na produtividade nos processos de usinagem, em alguns casos, é necessária a utilização de maiores valores de parâmetros de corte, como a velocidade da peça e penetração de trabalho, por exemplo. Mas isso implica também no desenvolvimento de máquinas mais potentes, ferramentas mais resistentes ao desgaste, que implica no aumento do consumo de energia elétrica e, conseqüentemente, eleva o preço do produto final, principalmente pela operação usinagem por abrasão, com destaque para a retificação (normalmente uma das últimas operações na cadeia de produção de peças usinadas) (KRUSZYNSKI; WOJCIK, 2001). Dependendo da ordem de grandeza do parâmetro de corte empregado, por exemplo, ele elevará ou reduzirá a energia específica do processo. Neste caso, a energia específica é determinada pela potência (P) e a taxa de remoção volumétrica de material (Q_w) (MALKIN, 1989).

No caso do parâmetro velocidade de corte (V_s), por exemplo, quando ela é aumentada irá implicar no aumento da energia específica de corte por influenciar diretamente na potência do processo. Com isso, maior será geração de calor que dependendo de sua magnitude poderá ser transferido em grande parte para a peça e gerar problemas chamados de danos térmicos. Por exemplo, ao se empregar rebolos de abrasivos convencionais, durante a retificação, a geração de calor poderá ser tão elevada e ser transferida para a peça e, de acordo com Marinescu et al. (2007), o calor na peça poderá gerar a ocorrência de danos térmicos à peça e levando, em última instância, a sua inutilização e prejuízos financeiros.

Os principais tipos de danos térmicos observados em peças retificadas são a queima da peça, alteração da dureza superficial e em camadas próximas a superfície retificada, trincas na peça, tensão residual de tração (MALKIN; GUO, 2007). A maioria dos estudos encontrados na literatura sobre danos térmicos têm sido realizados em superfícies contínuas, por exemplo, em capas e lateral de roletes de rolamentos, mesas de retificadoras, bits, bedames, dentre outras. Para superfícies interrompidas são poucos os trabalhos que abordam estudos de retificação e a reação dos parâmetros de corte com os danos térmicos. As superfícies interrompidas são normalmente investigadas em processos de fresamento e torneamento, mas para a retificação a literatura é escassa, de forma que o tema se torna promissor para ser investigado também em processos de retificação. Uma aplicação seria a de muitos moldes para injeção de plástico com superfícies que não são contínuas e com ressaltos e rebaixos que necessitam ser retificados para ter melhor qualidade geométrica e dimensional. Desta forma, torna-se um tópico de oportunidade para pesquisa.

Durante o processo de retificação em superfícies interrompidas, há alguns momentos que a ferramenta perde o contato com a peça, em que não há acoplamento da ferramenta com a peça, e assim não há remoção de material no local em que há o corte interrompido, que em tese favorece a redução de temperatura (AL-ZAHARNAH, 2006). Isso ocorre visto que há períodos intercalados de resfriamento (KOUNTANYA, 2008).

Diante disso, o presente trabalho possui como objetivo avaliar a retificabilidade de peças com superfície interrompida em aço inoxidável ABNT 316 UF. Será testado também o número de ressaltos, 4 e 6, para identificar se o número de rebaixos altera principalmente a microdureza próxima a superfície que foi retificada. Foi empregado o processo retificação plana com rebolo de óxido de alumínio sob diferentes condições de corte. Além da microdureza, serão avaliados a rugosidade, textura superficial (MEV) e a potência elétrica.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os temas relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa que estão relacionados ao processo de retificação e suas grandezas físicas, propriedades dos rebolos, calor e temperatura desenvolvidas no processo, material e características das peças. Além disso, serão abordados os tópicos relacionados à retificação de superfícies interrompidas e a integridade superficial de componentes retificados.

2.1 Processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem por abrasão na qual a remoção de material ocorre por meio da utilização de partículas abrasivas (DAVIM, 2010; GROOVER, 2014), que são aglomeradas por meio de ligante e formam um reboło. Essas partículas abrasivas são de natureza não metálica e estão dispostas com orientação irregular do reboło, além de possuírem arestas de corte com geometria não definida (MALKIN; GUO, 2008).

Dentre as principais aplicações, ela é destinada a usinagem de componentes que necessitam de combinação entre menores desvios geométricos, com destaque para valores de rugosidade Ra ($<1,6 \mu\text{m}$) e tolerâncias dimensionais estreitas (qualidade de trabalho entre IT6 a IT3) (MACHADO et al., 2009) e ainda como alternativa na usinagem de materiais endurecidos que normalmente apresentam limitações que os impedem de serem usinados por outros processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, como também por processos não convencionais de usinagem.

Há alguns tipos de retificação, sendo diferenciadas pela interação do reboło e peça e pela forma da peça, como observado na Figura 2.1 (MALKIN; GUO, 2008).

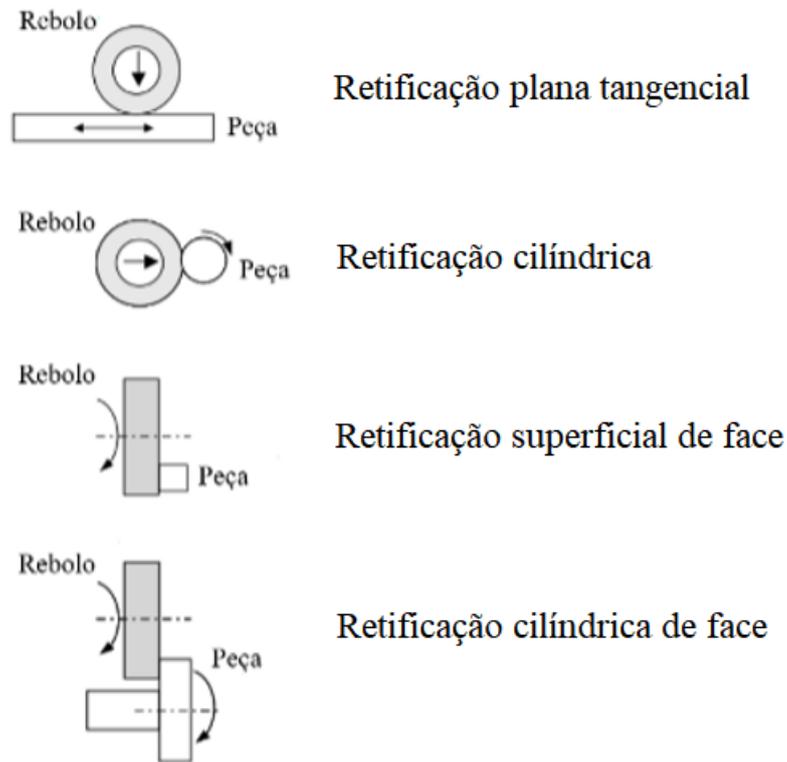


Figura 2.1 – Quatro processos básicos de retificação utilizando rebolo reto (adaptado de MARINESCU et al., 2007).

Embora este processo seja bem empregado na indústria metal-mecânica, dentre outras, ele apresenta alguns desafios que o torna peculiar em relação a outros processos de usinagem convencional. São muitas variáveis a serem controladas, principalmente do rebolo que não é substituído como as outras ferramentas de corte, com insertos, brocas, fresas, em que há normas específicas sobre os tipos de desgaste e critérios de fim de vida. Como exemplo, pode-se comparar o processo de retificação com o processo fresamento, em que para o primeiro é despendida uma grande quantidade de energia para remover pouca quantidade material (MACHADO et al., 2009). Além disso, há um elevado gasto de energia mecânica, a qual é transformado em calor na zona de retificação, ou seja, gera altas temperaturas na região de contato entre abrasivo e peça (MALKIN; GUO, 2008) e que não é benéfico para o processo em termos de qualidade superficial.

Diferentemente de outros processos de usinagem convencional, na retificação o rebolo precisa ter as suas arestas de corte restauradas, regularização de sua superfície com os poros desobstruídos, sem que ele seja retirado do eixo árvore. Isso é feito por meio da dressagem

periódica. Além disso, outras peculiaridades da retificação são a natureza dos abrasivos convencionais, os quais são cerâmicos e, portanto possuem baixa condutividade térmica; as pequenas dimensões dos abrasivos que fazem com que sejam utilizados baixos valores de penetração de trabalho em relação ao processo de fresamento, por exemplo; os cavacos gerados pelo processo são de menores dimensões o que dificulta a dissipação de calor gerado na retificação por este elemento. Com isso, este calor gerado pelo processo é responsável em várias situações por ocasionar os danos térmicos nas peças retificadas, queimas de retifica, grande variação na microdureza e microestrutural, tensões residuais de tração, trincas, entre outros. Por isso, este processo é considerado complexo por envolver um número de variáveis operacionais maior que aqueles dos processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida. Especialmente na retificação, o uso de fluidos refrigerantes é praticamente imprescindível para refrigerar a peça e assim evitar o seu comprometimento (MALKIN; GUO, 2008).

No presente trabalho, foi utilizada a retificação plana tangencial de passagem. Sendo assim, a retificação plana é o processo em que são retificadas peças com superfícies planas (KRAR, 1994; MAGNANI, 2013). Em geral, ela possui algumas variáveis principais, sendo a velocidade de corte (V_s), velocidade da peça (V_w) e a penetração de trabalho (a_e), como apresentado na Figura 2.2 e conforme será apresentado de forma mais detalhada na seção 2.4 (GROOVER, 2010).

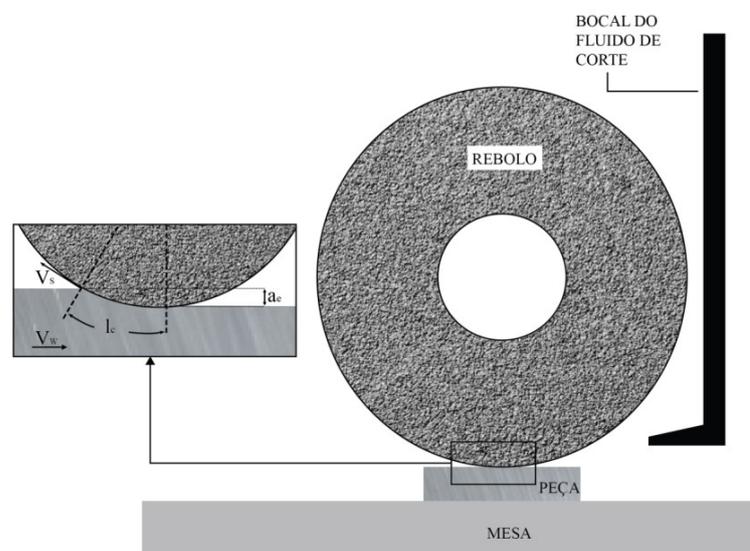


Figura 2.2 - Elementos básicos do processo de retificação plana tangencial: a) sistema rebolo-peça, b) ampliação da zona de retificação de a) relação geométrica das principais grandezas físicas do processo (ABRÃO, 2018).

No processo de retificação plana, em geral, a peça se desloca longitudinalmente ou transversalmente – normalmente está presa à mesa da máquina, enquanto o rebolo rotaciona em velocidades muito superiores àquelas utilizadas nos processos de usinagem convencional (normalmente acima de 30 m/s) e também se movimenta verticalmente para adentrar na superfície a ser usinada. Entretanto, há algumas operações em que a peça também realiza movimentos de rotação. Os processos de retificação podem se classificar de acordo com o movimento relativo existente entre o rebolo e a peça, e em relação à superfície que será usinada (ABRÃO, 2018).

2.2 Retificação de superfícies interrompidas

As superfícies interrompidas representam as peças que possuem ranhuras ou rasgos, canais ou cavidades, dentre outras características que as diferenciam de superfícies contínuas. Sob a perspectiva de usinagem, a ferramenta de corte não tem suas arestas em contato contínuo com a superfície usinada (LAKSHMANAN et al., 2014), como apresentado na Figura 2.3, onde há quatro diferentes superfícies cilíndricas, sendo que a Figura 2.3 (a) é contínua e as outras com superfícies interrompidas, superfícies com 2, 6 e 12 canais, Figura 2.3 (b), 2.3 (c) e 2.3 (d), respectivamente.

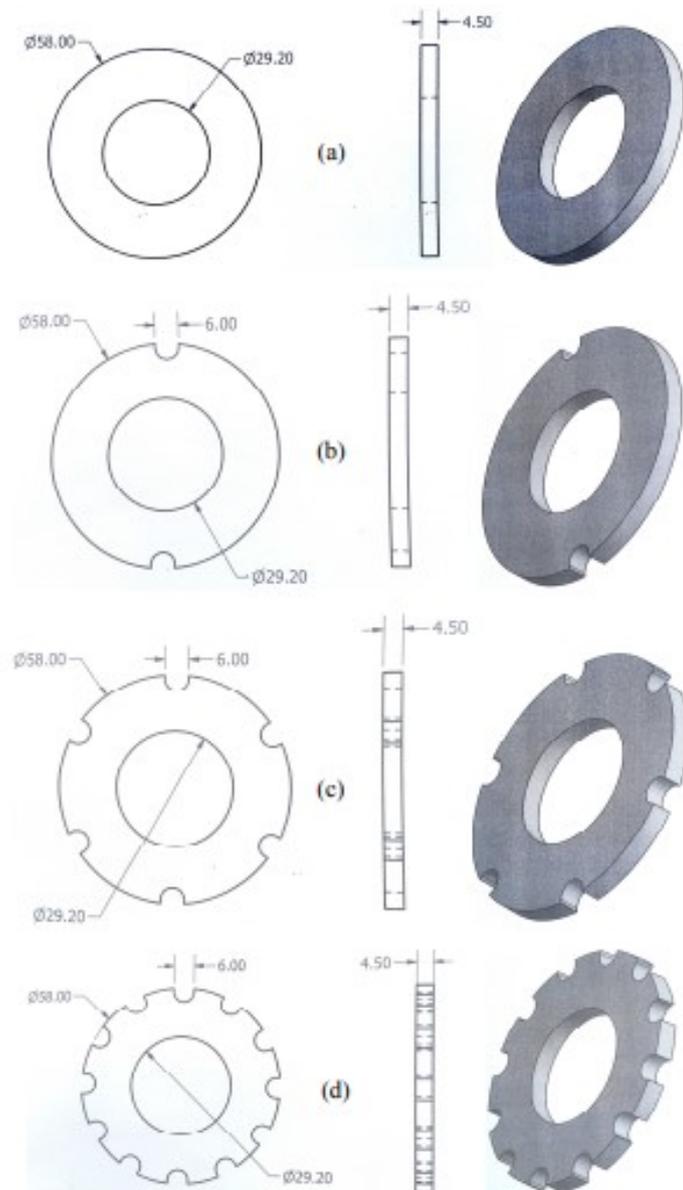


Figura 2.3 – Vistas frontal e em perspectiva de 4 corpos de prova que foram submetidos a retificação cilíndrica. (a) geometria com superfície contínua, (b) 2 canais, (c) 6 canais e (d) 12 canais (TARRENTO, 2018).

Em geral, percebe-se que há diversas aplicações de peças que são consideradas uma superfície interrompida, como eixos de virabrequim, moldes, brocas, dentre outras e que as vezes os parâmetros de corte mais adequados são negligenciados, pois há possibilidade de formação de rebarbas e de queima em regiões onde a área de contato com o rebolo abrasivo é pequena. A literatura sobre parâmetros de corte recomendados para superfícies interrompidas ainda é escassa.

Por outro lado, há autores que consideram que a retificação em superfícies interrompidas proporciona a redução de danos térmicos nas peças (MELLO et al., 2018), visto que os canais contribuem para reduzir a temperatura na área de contato, ou seja, possibilita um fluxo de ar através das interrupções (DINIZ; OLIVEIRA, 2008). Além disso, os canais também são favoráveis para o transporte de fluido de corte para a área de contato, ou seja, auxilia na redução da temperatura na zona de corte (KIRSCH; AURICH, 2014; LI; AXINTE, 2016).

Sendo assim, apesar da usinagem de superfícies interrompidas ser considerada uma alternativa para reduzir os danos térmicos causados pelo processo, a maior parte das pesquisas relacionadas a este tema são referentes aos processos de fresamento e torneamento. Embora o processo de retificação seja muito utilizado na indústria metal-mecânica, dentre outros, visando a realização da melhoria de acabamento superficial de componentes como também ajustes geométricos mais eficientes, há poucos trabalhos sobre os processos de retificação de peças com canais (TARRENTO, 2018). Entretanto, cabe ressaltar que é um caminho promissor quando se estuda os processos de retificação em razão da maior parte do calor gerado no processo ser direcionado à peça, gerando danos de origem térmica aos componentes.

Em estudo realizado por Rodriguez et al. (2020) foram desenvolvidos ensaios de retificação de superfícies interrompidas contendo 2, 6 e 12 canais (Figura 2.2). Ao analisar imagens obtidas de MEV, os autores constataram que os valores de rugosidade Ra das superfícies interrompidas foram cerca de 100 % maiores em comparação com aqueles gerados nas superfícies contínuas.

Em outra pesquisa de Mello et al. (2017) analisaram o acabamento superficial e a circularidade de discos de aço temperado AISI 4340 após a retificação cilíndrica de mergulho de peças com diferentes canais (0, 2, 6 e 12) com três valores de velocidade de avanço do rebolo (0,25, 0,50 e 0,75 mm/min). Eles observaram que, em relação às peças com canais, a rugosidade tende a reduzir conforme o número de canais e o avanço do rebolo aumentam. Eles também monitoraram o desgaste do rebolo e relataram que este foi mais sensível ao número de canais.

Ribeiro et al. (2020) analisaram a retificação de superfícies circulares interrompidas (2, 6 e 12 canais) em aço temperado AISI 4340 utilizando rebolo de óxido de alumínio vitrificado. Foram utilizadas taxas de alimentação de 0,25, 0,50 e 0,75 mm/min, com velocidade de corte de 32 m/s, sob lubrificação convencional. Os autores relataram que não houve regiões com queima, e o aumento da velocidade de avanço gerou uma queda de até 68,7 % nos valores de rugosidade da superfície, 40,5 % nos erros de forma e um aumento no desgaste diametral do rebolo médio de 90,9 %. Eles relataram ainda que o desgaste do rebolo foi mais acentuado para

aquelas superfícies com o maior número de ao número de interrupções (canais) nas amostras e este foi cerca 252 % maior que aquele gerado pelo rebolo na usinagem de superfície sem os canais, devido ao constante acoplamento e desacoplamento do rebolo ao entrar em contato e deixar a superfície, respectivamente (RIBEIRO et al., 2020).

Outro estudo desenvolvido por Ribeiro et al. (2020) em retificação cilíndrica, os autores usinaram peças de aço AISI 4340 endurecidos com (2, 6 e 12) e sem canais (Figura 2.4) com rebolos de óxido de alumínio branco com diferentes ligantes, vitrificadas e resinóides, sob a condição de lubri-refrigeração convencional e avaliaram a integridade das amostras e o desvio de circularidade. Eles relataram o aumento do desvio de circularidade para as peças com as superfícies interrompidas, principalmente pelo maior gradiente e variação térmica pela qual os componentes foram submetidos, visto que houve momentos de geração de calor durante o corte e momentos apenas com a ação do fluido de corte. Ademais, a redução no poder de retificação foi observada na usinagem de peças com geometria definida, visto que havia momentos de alternância de corte em cheio e corte vazio, juntamente com a maior lubrificidade da interface de contato proporcionada pela maior penetração de o fluido de corte em interrupções geométricas. Eles concluíram que o rebolo de óxido de alumínio com liga vitrificada gerou os menores valores de poder de retificação em comparação com ligação resinóide. Ademais, para as condições analisadas, não houve alterações microestruturais que inviabilizassem o uso dos componentes.

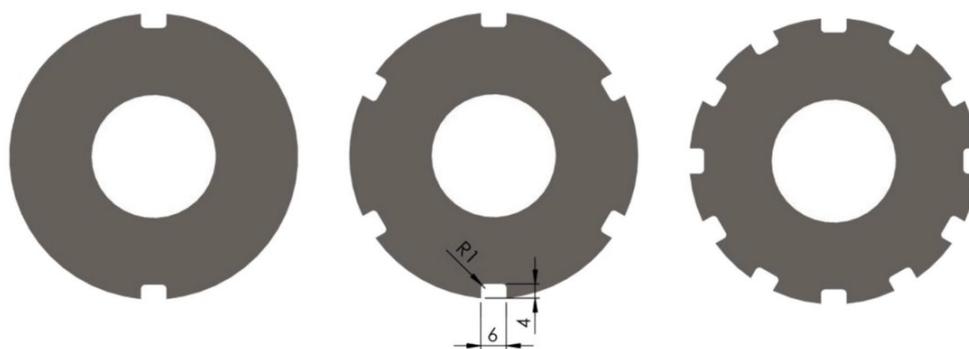


Figura 2.4 – Amostras em aço AISI 4340 endurecido com superfícies interrompidas após retificação cilíndrica, com rebolos de óxido de alumínio branco vitrificadas e resinóides, sob a condição de lubri-refrigeração convencional (RIBEIRO et al, 2020).

2.3 Rebolos

Os rebolos são ferramentas de corte utilizadas no processo de retificação, os quais são considerados refratários, com exceção dos superabrasivos, possuem baixa condutividade térmica. Eles são compostos por milhares de partículas abrasivas que possuem elevada dureza, de natureza não metálicas e apresentam múltiplas arestas de corte, as quais não possuem geometria definida, diferentemente daquelas ferramentas de corte convencionais, que possuem geometria de corte definida. O rebolo possui 3 componentes principais os abrasivos que ficam aderidos na matriz, o aglomerante (ligante) e os poros, como apresentado esquematicamente na Figura 2.5 (SCHUIITEK, 2001; ROWE, 2014).

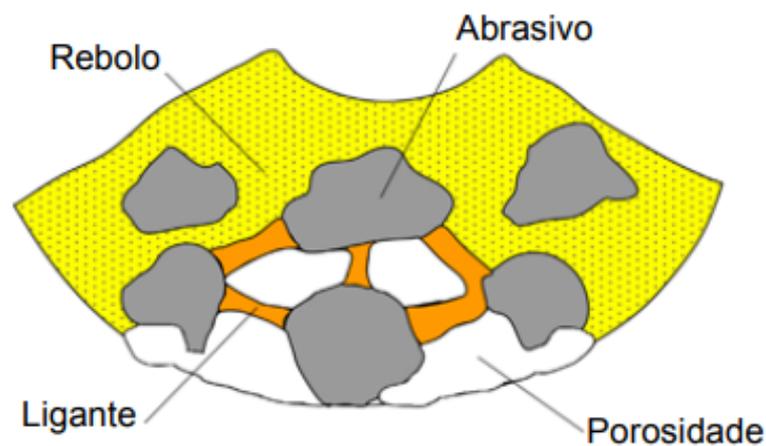


Figura 2.5 – Esquema da estrutura de um rebolo convencional (Adaptado de WANG et al., 2016).

Para uma seleção correta do rebolo e maior eficiência do processo de retificação, é preciso entender com detalhes cada um de seus cinco elementos a saber: material do abrasivo, sua granulometria mesh (que está relacionado com tamanho da partícula abrasiva), tipo do aglomerante, estrutura, dureza e ligante. Na Figura 2.6 é apresentada as formas de realizar as especificações dos rebolos, levando em consideração algumas características.

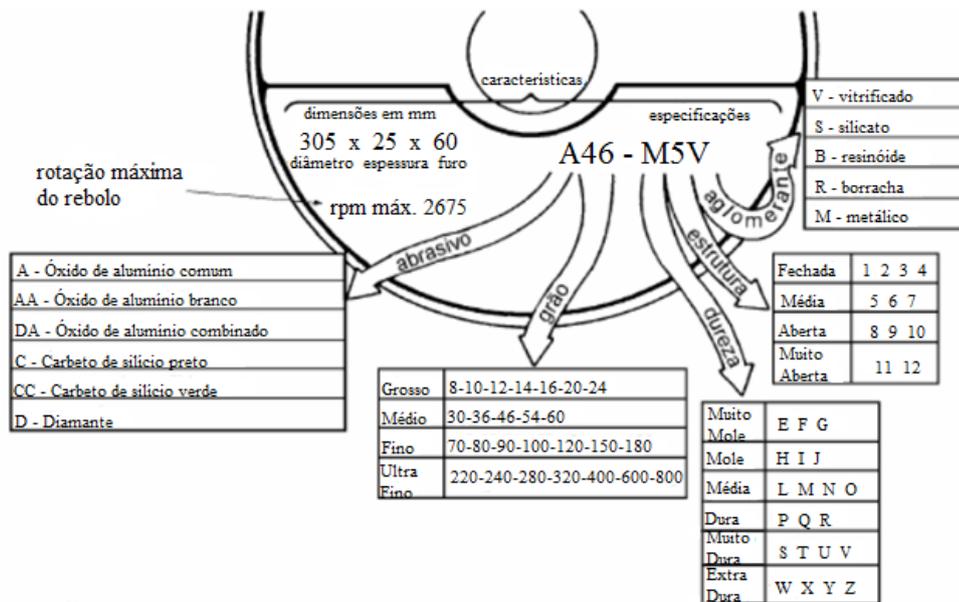


Figura 2.6 – Esquema para especificação de rebolos abrasivos convencionais (adaptado de MALKIN, 2008).

Quanto à composição química, as partículas abrasivas podem ser classificadas considerando a sua composição química e dureza (MALKIN, 1989; SHAW, 1996). Além disso, em geral, os rebolos são especificados de acordo com a granulometria (mesh) e, quanto maior a grana, menor será a dimensão da partícula abrasiva. Por exemplo, para uma grana mesh 30 o tamanho do grão seria de aproximadamente 564 μm , enquanto que para uma grana mesh 60 o tamanho do grão é aproximadamente igual a 282 μm .

Há algumas características principais a serem analisadas em uma partícula abrasiva. Primeiramente, é importante ressaltar que a partícula abrasiva deverá ser mais dura do que o material a ser retificado (MALKIN, 1989). Outra característica é a friabilidade do abrasivo, sendo ela uma tendência da partícula abrasiva a desintegração em pequenos fragmentos sob pressão (MARINESCU et al., 2004), ou seja, é a capacidade que um abrasivo tem de se fraturar e ter suas arestas de corte expostas e afiadas.

No geral, há dois grupos distintos de partículas, os naturais e artificiais. Os materiais abrasivos naturais são extraídos da natureza, e pode-se citar o diamante, esmeril, entre outros. Já os artificiais, eles são desenvolvidos sinteticamente, e pode-se citar a alumina sinterizada, carboneto de tungstênio, óxido de alumínio, entre outros. Os abrasivos artificiais se diferem em relação aos abrasivos naturais, uma vez que eles eliminam os problemas das impurezas e

inconsistência dos abrasivos naturais (KRAR, 1994) e, portanto, apresentam melhor desempenho para operações que exigem melhor qualidade superficial e desvios geométricos mais estreitos. Os grupos materiais mais empregados na elaboração dos rebolos para a retificação são o óxido de alumínio (Al_2O_3) e o carbeto de silício (SiC). Os rebolos de óxido de alumínio são normalmente utilizados na usinagem de materiais com elevada resistência à tração, com destaque para os ferrosos como o aço e suas ligas, com exceção dos ferros fundidos em geral. Já o rebolo de carbeto de silício normalmente é recomendado para a retificação de materiais com baixa resistência à tração, nos quais incluem-se os não ferrosos e cerâmicas, com destaque para praticamente todas as classes de ferros fundidos e as superligas, compósitos e plásticos (ROWE, 2009). Embora aqui tenham sido citados estes dois grupos principais, há vários sub-grupos para cada um deles e que são selecionados com base em aplicações mais específicas, como pode ser analisado na Tabela 2.1, a qual apresenta suas aplicações e principais propriedades mecânicas dos abrasivos convencionais.

Tabela 2.1 - Propriedades mecânicas dos principais tipos de carbeto de silício e óxido de alumínio (ABRÃO, 2018).

Abrasivo	Dureza Vickers Kg/cm²	Dureza Relativa	Aplicação
SiC verde	2 840	1,6	Carbetos, cerâmicas
SiC preto	2 680	1,75	Ferro fundido, cerâmicas, não ferrosos dúcteis
Al_2O_3 rubi	2 260	1,55	Aços ferramentas e aços de alta liga
Al_2O_3 branco	2 120	1,75	Aços em geral
Al_2O_3 marrom	2 040	2,8	Fins gerais
$\text{Al}_2\text{O}_3/10\%\text{ZrO}$	1 960	9,15	Retificação pesada
$\text{Al}_2\text{O}_3/40\%\text{ZrO}$	1 460	12,65	Retificação pesada

Os ligantes ou aglomerantes são responsáveis por juntar as partículas abrasivas e que naturalmente irá se desgastar com o uso do rebolo, assim como acontece com as partículas abrasivas (CHIAVERINI, 2005), e as vezes a taxa de desgaste será ainda maior. Além disso, ele deve ser selecionado considerando a resistência às forças de retificação, a rigidez, a temperatura máxima atingida no processo de retificação e a reação do mesmo com o fluido de corte utilizado (MALKIN; GUO, 2008). Os principais tipos de ligante são o vitrificado,

resinoide e metálico. O ligante vitrificado, que é de natureza não orgânica, é o mais empregado na fabricação de rebolos para a retificação, apresentando dureza superior à encontrada pelo ligante resinoide. O ligante resinoide compreende as resinas termofixas fenólicas e plastificantes e são orgânicos, apresentando menor vida em comparação aos outros ligantes. Já os ligantes metálicos, normalmente são utilizados em conjunto com os superabrasivos (diamante e CBN) e possuem maior condutividade térmica e resistência ao desgaste quando comparado ao vitrificado e resinoide (MARINESCU et al., 2016)

Os poros também fazem parte da estrutura do rebole. É comum indicar o número de poros pelo grau de porosidade, ou ainda relacioná-lo com a estrutura. Os poros visam auxiliar no alojamento dos cavacos e introdução do fluido de corte na região de corte. Assim, um rebole pouco poroso significa que tem baixa porosidade, é chamado de fechado e recomendado para operações de acabamento. No caso de rebole com grande número de poros, tem elevada porosidade, e assim é conhecido como rebole de estrutura aberta e, portanto, é recomendado para operações de desbaste, quando os valores de penetração de trabalho são mais elevados (KING; HAHN, 1986; ROWE, 2014).

Quanto à dureza do rebole, ela está associada à dificuldade de extração de partícula abrasiva de sua superfície. Sendo assim, pode-se considerar a dureza como a resistência do rebole ao arrancamento das partículas abrasivas do material aglomerante (MALKIN, 1989), ou ainda como a capacidade do ligante de reter o abrasivo durante a usinagem.

2.4 Grandezas físicas da retificação plana

Segundo Diniz (2004), faz-se necessária a definição de algumas grandezas de importância na retificação para entender alguns fenômenos, os parâmetros de corte (velocidade de corte, penetração de trabalho, velocidade da peça) e ainda o desgaste do rebole, as forças de usinagem que agem no processo e principalmente.

2.4.1 Velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte é um parâmetro de muita importância na retificação, pois ela determina a vida do rebole, influenciando no acabamento superficial das peças e no mecanismo

de remoção da partícula abrasiva. Sendo assim, a velocidade de corte (V_s) refere-se ao deslocamento de um ponto (partícula) na superfície de corte de um rebolo (WINTER, 2004). Ela pode ser expressa pela seguinte equação (GRAF, 2004):

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (\text{m/s}) \quad (2.1)$$

Em que: d_s significa o diâmetro do rebolo em mm e n_s refere-se ao número de rotações do rebolo em rpm.

Além disso, a velocidade de corte exerce grande influência sobre o comportamento do desgaste do rebolo, forças de corte, vibrações da máquina, acabamento, queima de retífica da peça, entre outros. Em geral, a velocidade de corte elevada remove um menor volume de cavaco, visto que uma mesma partícula abrasiva remove uma menor quantidade de material, ou seja, há um aumento da sua frequência de contato com a peça. Desta forma, o aumento da velocidade de corte é faz com que o número de partículas abrasivas seja maior e a espessura do cavaco removido é menor, diminuindo as forças de corte e rugosidade da peça, como também reduz a taxa de desgaste do rebolo. Entretanto, visto que há uma maior intensidade de contato das partículas com a peça, ocorre uma elevação de temperatura e, conseqüentemente, a peça pode estar mais propensa a danos térmicos (BIANCHI, 1990).

Os danos térmicos estão associados com as alterações subsuperficiais, os quais podem ser causados por processos de retificação, visto que o processo gera altas temperaturas e grande parte do calor é transferido para peça (MARINESCU, 2017).

2.4.2 Velocidade da peça (V_w)

A velocidade da peça (V_w) é coincidente com a velocidade da mesa da retificadora para o processo de retificação plana tangencial, além de estar relacionada aos impactos que as partículas provocam na peça (BIANCHI, 1990). O aumento da velocidade da peça gera um aumento na taxa de remoção de material e os cavacos resultantes irão possuir uma espessura maior. Além disso, os valores da força tangencial de corte serão maiores (GRAF, 2004). Ainda de acordo com Graf (2004), o cálculo da velocidade da peça pode ser representado pela equação 2.2.

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60} \quad (2.2)$$

2.4.3 Penetração de trabalho (a_e)

A penetração de trabalho é definida como a penetração do rebolo na peça, a qual será medida da espessura de material removido por passagem da peça (ou revolução) (MARINESCU et al., 2007), ou seja, representa o quanto a ferramenta penetra na peça e é medida no plano de trabalho e direção perpendicular à velocidade da peça ou avanço (DINIZ et al., 2003).

Diante disso, um aumento na penetração de trabalho gera um aumento no número de partículas abrasivas ativas, fazendo que no mesmo tempo de contato, cada partícula abrasiva remova uma quantidade menor de metal. Neste caso, os cavacos formados são mais finos e alongados (BIANCHI, 1990).

Além disso, elevados valores de penetração de trabalho implicam no aumento das forças de corte e, conseqüentemente, nas deformações entre a peça e a ferramenta (LAUER-SCHMALTZ; KÖNIG, 1980), além de também influenciar na integridade superficial dos componentes retificados (ROWE; MORGAN, 1993).

2.4.4 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

A espessura de corte equivalente refere-se a uma medida de profundidade de penetração da ferramenta, ou seja, representa a espessura de camada de material que é arrancada pelo rebolo. O corte está relacionada com a velocidade da peça, penetração de trabalho e velocidade de corte (MARINESCU et al., 2004). Para a retificação plana, ela pode ser definida pela equação 2.3.

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

2.4.5 Energia específica de corte

A energia específica de corte (u) está relacionada com a potência e a força de retificação sobre a taxa de remoção de material. Ela representa a energia dispendida por unidade de volume de remoção de material (SILVA et al., 2000). Na retificação, essa energia é muito maior que em outros processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, visto que grande parte da energia de retificação é gasta em outros mecanismos além da formação de cavaco e porque a taxa de remoção de material neste processo é mais baixa que em processo de usinagem com

ferramentas de geometria definida, como, por exemplo, o fresamento (MALKIN, 1989). Ela pode ser definida pela equação 2.4:

$$u = \frac{P}{Q_w} \quad (2.4)$$

Em que: P é a potência de corte e Q_w é a taxa de remoção volumétrica. Sendo assim, a taxa de remoção volumétrica é dada pela Equação 2.5:

$$Q_w = V_w \cdot a \cdot b = \pi \cdot d_w \cdot V_f \cdot b \quad (2.5)$$

Em que: V_f é a velocidade de avanço do rebolo, b é a largura do rebolo e d_w é o diâmetro da peça.

2.5 Calor e temperatura durante o processo de retificação

Naturalmente, busca-se por um aumento na produtividade nos processos de retificação e, conseqüentemente, visa-se a utilização de parâmetros de corte mais elevados. Neste caso, quando há a utilização de parâmetros mais elevados, ou emprego de condições mais severas de retificação, por exemplo, aumento na penetração de trabalho, ocorre um aumento de consumo de energia durante o processo, que gera elevação na quantidade de calor gerado e resulta no aumento da temperatura no processo. Aliado a isso, ao utilizarem-se rebolos abrasivos convencionais, à base de alumina ou carbetto de silício por exemplo, que possuem baixa condutividade térmica, grande parte da energia gerada no processo é direcionada a peça. Desta forma, podem ocorrer diversas alterações nas propriedades tanto mecânicas como metalúrgicas dos componentes usinados em razão das elevadas temperaturas desenvolvidas no processo (KRUSZYNSKI; WOJCIK, 2001). Os principais danos térmicos que podem ocorrer no processo de retificação são a queima de retificação, alterações microestruturais, variação na dureza da peça em regiões bem próximas da superfície retificada, tensões residuais de tração e trincas. A seguir será feita uma breve definição de cada um destes danos.

Queima de retífica: é o nome dado ao fenômeno de oxidação da superfície da peça retificada, que na maioria dos casos apresenta-se com coloração azulada ou preta nos aços, e ocorre quando são as temperaturas de 450 °C. As tonalidades representam as temperaturas que foram desenvolvidas sobre a superfície, sendo que as mais escuras são produzidas por elevadas temperaturas, enquanto as mais claras estão relacionadas às temperaturas menores (MARINESCU et al., 2004).

Alterações microestruturais: as elevadas temperaturas geradas durante o processo de retificação podem fazer com que o material da peça atinja ou exceda a sua temperatura de austenitização. Desta forma dependendo da taxa de resfriamento do material, na superfície da peça pode ocorrer a formação de uma fina camada de martensita, ou seja, o material terá sua dureza elevada em relação a região que não sofreu dano. Além disso, pode ocorrer também o revenimento do material, resultando em redução de sua dureza (MARINESCU et al., 2004).

Tensões residuais: de acordo com Rowe (2014), as partículas abrasivas atuam sobre a superfície da peça resultando em um fluxo plástico sob condições intensamente compressivas. Desta forma, após o processo de retificação a superfície da peça possui tensões residuais de compressão e estas tensões são favoráveis para o material. Entretanto, podem ocorrer tensões residuais trativas que são prejudiciais ao funcionamento do componente por possibilitar a propagação de trincas.

Trincas: segundo Marinescu et al. (2004), durante o processo de retificação, a peça sofre expansão (durante o contato do rebolo abrasivo com a peça são atingidas elevadas temperaturas, e este aquecimento resulta na expansão térmica da peça) e contração térmica (durante as várias voltas do rebolo sobre a peça, mesmo que em milésimos de segundo de intervalo entre uma volta e outra a peça se resfria, ocasionando a contração da mesma). A tensão residual ao final do processo será a diferença entre o efeito dos vários ciclos de expansão e contração da peça, ou seja, ao efeito predominante, que dependerá das condições de corte empregadas, do fluido de corte e do tipo de rebolo, como também das propriedades da peça. E isso poderá originar trincas no componente usinado.

Diante disso, entende-se que o processo de retificação em superfícies interrompidas favorece o desenvolvimento de temperaturas inferiores em relação àquelas geradas durante corte de superfícies contínuas ou as convencionais, visto que durante o corte interrompido, há

a ocorrência de fenômenos de aquecimento (remoção de material) e resfriamento (sem remoção de material), ou seja, isso contribui para a diminuição da temperatura (KOUNTANYA, 2008).

Em algumas pesquisas de Mello (2017) e Tarrento (2018), os autores analisaram a retificação em superfícies interrompidas, com 2, 6 e 12 entalhes (canais). Considerando que em situações mais severas de usinagem, como há maior taxa de remoção e temperatura, há maiores possibilidades de ocorrer queima na superfície das peças, resultando na formação de camada branca (MELLO, 2017). Estes dois autores analisaram a microestrutura do material usinado com as condições mais severas. Além da utilização de superfícies com três quantidades de entalhes diferentes, ambos utilizaram a velocidade de avanço radial sendo 0,75 mm/min e condição de lubri-refrigeração convencional. De acordo com os autores, independentemente do número de entalhes da superfície retificada, não ocorreram danos térmicos nas peças, contribuindo assim para resistência mecânica e qualidade microestrutural do material (MELLO, 2017; TARRENTO, 2018).

Mas por outro lado, conforme foi relatado por Rodriguez et al. (2020) em seus estudos ao realizarem o processo de retificação de superfícies interrompidas contendo 2, 6 e 12 canais, eles observaram um maior desgaste do rebolo para as peças com maiores interrupções ou canais. Estes dois pontos que se contradizem indicam que é preciso aprofundar no conhecimento dos mecanismos de corte, estudar mais variáveis de saída do processo de retificação e em diferentes materiais. Portanto, foi neste contexto em que se baseou o desenvolvimento deste trabalho.

2.6 Integridade superficial das peças retificadas

A análise da integridade da superfície das peças durante e após a usinagem é de grande importância, pois irá determinar se o componente se encaixa ou não nas especificações requeridas, seja de textura, acabamento e outras tolerâncias geométricas, como também de tolerâncias dimensionais. A seguir será apresentado um breve comentário sobre as principais variáveis utilizadas para verificar a integridade superficial das peças retificadas.

2.6.1 Rugosidade

Nos processos de fabricação, o acabamento superficial é avaliado em termos de vários parâmetros de rugosidade, as quais são definidas como desvios de forma microgeométricos caracterizados como o conjunto de saliências e reentrâncias encontradas nas superfícies de qualquer material. Sendo assim, as irregularidades são causadas por ações que são inevitáveis

Figura 2.7 – Valores de rugosidade R_a para os principais processos de fabricação (adaptado de BARRIOS et al., 2011).

Além disso, é importante utilizar outros tipos de parâmetros avaliação da rugosidade, o apenas, pois em alguns casos, parâmetro R_a pode ocultar picos altos e vales baixos, uma vez que ele utiliza a média das distâncias entre o pico e os vales em determinado perfil. Neste caso, é importante analisar a rugosidade de dez pontos (R_z) (BET, 1999). Na equação 2.6.1 é apresentado o cálculo de R_z (GADELMAWLA et al., 2002).

$$R_z = \frac{1}{n} \left(\sum_{i=1}^n p_i - \sum_{i=1}^n v_i \right) \quad (2.6)$$

Outro parâmetro de rugosidade bastante empregado para avaliar superfícies usinadas é a altura máxima para o cálculo de $R_{máx}$ e R_t , os quais consistem na diferença de altura do maior pico da amostra em um comprimento avaliado com seu vale mais baixo. O $R_{máx}$ é realizado no intervalo de comprimento de medição e R_t é calculado no comprimento total avaliado (BET, 1999).

Diante disso, ressalta-se que a rugosidade influencia em algumas propriedades do material, como na resistência a fadiga, visto que superfícies com muita rugosidade permitem o surgimento de concentradores de tensão, ou seja, favorece o surgimento de trincas de fadigas (SMITH; HASHEMI, 2012).

Em um estudo em retificação plana tangencial do aço SAE 52100 com o rebolo de óxido de alumínio, desenvolvido por Abrão (2018), onde o autor variou alguns parâmetros de corte, incluindo a penetração de trabalho (10 μm e 30 μm), velocidade da peça (3 m/min e 7 m/min) e as condições de lubri-refrigeração. Especificamente sobre a penetração de trabalho, o aumento deste parâmetro elevou os valores da rugosidade (entre 0,3 μm e 0,7 μm) ao usar um fluido de corte aplicado pela técnica convencional. Eles atribuíram esta elevação da rugosidade à maior área de contato entre os abrasivos e a peça, o que piora as condições tribológicas e reflete negativamente no acabamento. A mesma justificativa foi apresentada Pereira et al. (2021) ao realizarem ensaios de retificação plana tangencial com rebolo de óxido de alumínio do aço inoxidável martensítico VP420 e observarem elevação dos valores de rugosidade R_a com o aumento da penetração de trabalho,

Desta forma, o processo retificação é recomendado para situações em que acabamento (R_a entre 0,1 μm e 1,6 μm seja superior e desvios dimensionais menores (qualidade de trabalho entre IT06 e IT03) sejam solicitados em relação aos outros processos de usinagem convencionais com ferramenta de geometria definida (MACHADO et al., 2009).

2.6.2 Alterações sub-superficiais: Microdureza

A dureza é uma propriedade mecânica que avalia a resistência do material a uma carga que provoca uma deformação plástica (ALVES, 2007). E durante a usinagem à medida que parte do calor do processo de retificação é direcionada para peça, estas promovem alterações das propriedades dos materiais, com destaque para a dureza (MARINESCU et al., 2004).

Sendo assim, a dureza é obtida por meio da uma submissão de carga no indentador sobre a superfície da peça (SUTERIO, 2005). Ou seja, a resistência do material em relação ao indentador, pode ser obtida pela equação 2.7 (PAULA, 2007).

$$H = \frac{P}{A_0} \quad (2.7)$$

Em que: H representa a resistência do material, P é igual à carga aplicada na indentação e A_0 é a área projetada na indentação.

A avaliação de microdureza está associada à microestrutura das camadas abaixo da superfície que foram afetadas pela parcela de calor que é direcionada para a peça durante a retificação, ou seja, o calor gerado pode ocasionar alterações microestruturais resultando na alteração de dureza em regiões que variam desde a superfície até camadas bem próximas (MARINESCU et al., 2004). Caso ocorra a formação de uma camada de martensita não revenida, o material irá apresentar dureza superior à sua dureza livre de danos térmicos, enquanto que uma dureza inferior será observada caso haja a geração de revenimento.

Pereira et al. (2021), analisaram a retificação plana tangencial do aço inoxidável martensítico, com o uso do rebolo de óxido de alumínio branco, variando a penetração de trabalho (10 μm e 25 μm). Foi analisado que o aumento da penetração de trabalho (de 10 μm para 25 μm) gerou um aumento percentual de 8 % e 15 %, respectivamente, na microdureza do material. Isso ocorreu visto que houve uma maior geração de calor entre rebolo e peça devido ao aumento da penetração de trabalho, proporcionando danos superficiais e sub-superficiais, analisados pela variação na microdureza perpendicularmente a superfície retificada.

2.6.3 *Textura superficial*

A textura superficial é bastante utilizada para avaliar a qualidade superficial de componentes retificados. Ela refere-se à uniformidade e qualidade dos sulcos gerados com a observação de regiões com material deformado e deslocado, além da verificação de presença ou não de trincas (ABRÃO, 2018). A análise da textura superficial pode ser realizada por meio de microscópio ótico ou por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV).

Abrão (2018) analisou a retificação plana tangencial do aço SAE 52100 com o rebolo de óxido de alumínio, variando alguns parâmetros de corte, incluindo a penetração de trabalho (10 μm e 30 μm), velocidade da peça (3 m/min e 7 m/min) e as condições de lubri-refrigeração. Em relação à penetração de trabalho, a utilização de 30 μm resultou em sulcos não tão uniformes quanto às peças que foram retificadas com a penetração de trabalho 10 μm e foi constatada maior quantidade de áreas contendo deformações plásticas de material. Este comportamento está relacionado a uma maior quantidade de partículas abrasivas usinando o material e, conseqüentemente, em um maior atrito que afeta a textura superficial dos componentes. Além disso, Ruzzi (2022) também desenvolveu ensaios de retificação plana tangencial de aço rápido, utilizando o rebolo de óxido de alumínio, e observaram que o aumento no valor da penetração de trabalho levou a deterioração na textura superficial da peça. Eles justificaram que penetração de trabalho resulta em maior taxa de remoção de material, gerando maiores temperaturas e afetando negativamente a textura das superfícies usinadas.

2.6.4 *Potência de retificação*

Durante a retificação é importante realizar a avaliação da potência de retificação pois ela indica a eficiência do processo. A potência pode ser influenciada por qualquer variação dos parâmetros de entrada que influenciam na taxa de remoção de material e na espessura equivalente de corte, visto que ocasiona o aumento dos esforços de corte e, conseqüentemente, da potência de retificação (ROWE, 2014). A potência de corte pode ser analisada pela Equação 2.8.

$$P = V_s \cdot F_t \quad (2.8)$$

Tarrento (2018) realizaram um estudo em retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 em 4 condições distintas (peça com geometria contínua, peça com 2 canais, peça com 6 canais e peça com 12 canais), utilizando o rebolo de CBN de ligante vitrificado, variando a velocidade de mergulho e dois tipos de sistemas de refrigeração. O autor constatou que a potência consumida durante o processo de retificação foi maior para as peças com geometria contínua, sendo isso observado para as três diferentes velocidades de mergulho e os diferentes tipos de sistemas de refrigeração utilizados. Eles atribuíram ao fato de que o rebolo em contato com as peças com geometrias contínuas possui área de contato maior que aquela observada ao usinar superfícies interrompida, e portanto há maior geração de calor e proporciona condições tribológicas mais desfavoráveis. Esta geometria também afeta a potência de corte, de forma ela é reduzida ao usinar superfícies interrompida com maior número de canais nas amostras.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentados os procedimentos adotados para a realização dos ensaios experimentais tais como os equipamentos, materiais e acessórios empregados neste trabalho, bem como os parâmetros de corte. Serão detalhados também os parâmetros de saída analisados. Na Figura 3.1 é apresentado um fluxograma contendo as principais informações necessárias no desenvolvimento da presente pesquisa. Na sequência cada um destes parâmetros será abordado brevemente.

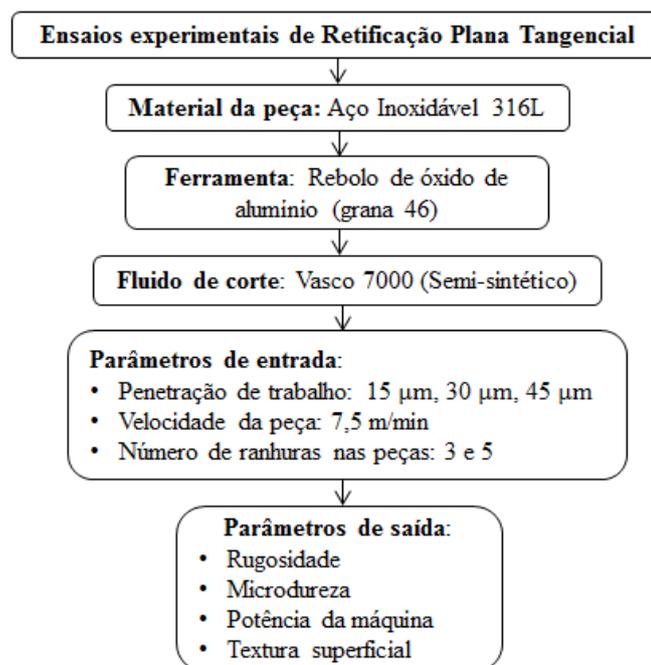


Figura 3.1 - Fluxograma com as principais informações referentes aos ensaios experimentais do aço ABNT 316 UF.

3.1 Material da peça

O material da peça utilizado neste trabalho foi aço inoxidável 316 UF (UF significa fácil usinabilidade). Foram preparadas 4 amostras para os ensaios de retificação com as dimensões 12 mm de largura x 52 mm de comprimento x 17 mm de altura.

Com o intuito de verificar a utilização de ressaltos e seus benefícios, foram preparadas 4 amostras a partir de peças com superfícies contínuas. Em duas peças, foram realizadas 4 ressaltos, e nas outras 2 amostras, foram realizadas 6 ressaltos, como apresentado na Figura 3.2 a) e b) respectivamente. Para gerar os ressaltos, foram realizados canais através do processo de fresamento e todas possuem 4 mm de largura.

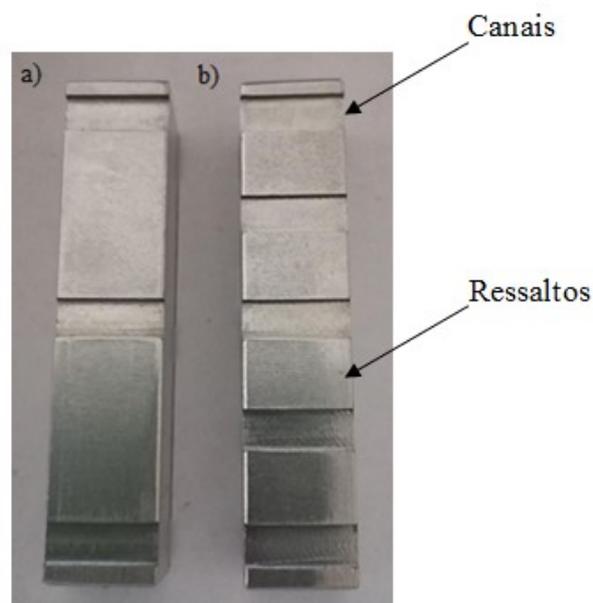


Figura 3.2– Amostras de aço ABNT 316 UF a) 4 ressaltos; b) 6 ressaltos.

3.2 Máquina-ferramenta

Para a realização dos ensaios experimentais deste projeto, foi utilizada uma retificadora plana tangencial (Figura 3.3), modelo P36, do fabricante Mello S. A., com rotação constante de 2 400 rpm, potência de 3 HP e resolução no eixo que contém o nônio que regula a penetração radial do rebolo, igual a 5 μ m. A retificadora plana tangencial utilizada é um equipamento semi-

automático e possui uma mesa magnética que pode realizar movimentos transversal e longitudinal.



Figura 3.3 – Retificadora plana tangencial Mello.

Foi utilizado o fluido semissintético à base de óleo éster vegetal e miscível em água, Vasco 7 000, com densidade igual a $0,98 \text{ g/cm}^3$, ponto de fulgor de 134° da fabricante Blaser Swissslube que foi aplicado via a técnica de aplicação convencional (abundância) a uma vazão de 9 l/min . Na Figura 3.4 é mostrado o sistema rebolo-peça-fluido de corte do processo de retificação. Adotou-se uma concentração do fluido de corte igual a 1:19 que é equivalente a um brix 4 %, o qual foi medido com um refratômetro (Figura 3.5).



Figura 3.4 – Sistema Rebolo-Peça e fluido de corte.



Figura 3.5 – Refratômetro.

3.3 Rebolos abrasivo

Foi utilizado um rebolo de óxido de alumínio branco (Al_2O_3) do tipo reto com especificação AA60K6V, do fabricante Norton – Saint Gobain Abrasives, com dimensões de 303 mm x 25 mm x 76 mm. O rebolo foi balanceado previamente ao posicionamento na máquina-ferramenta com o intuito de evitar vibrações durante o processo. O rebolo utilizado nesta pesquisa é apresentado na Figura 3.6 a) sem montagem e b) montado na máquina.



Figura 3.6 – Rebolo empregado nos ensaios, a) sem montagem na máquina-ferramenta e b) montado na máquina-ferramenta.

3.4 Planejamento dos ensaios e parâmetros de corte

Anteriormente aos ensaios de retificação, as superfícies perpendiculares à superfície a ser usinada, foram lixadas com lixas de carvão de silício com diferentes de granulometria, na sequência grana mesh 220, 320, 600, 800 e 1 000. Este procedimento foi necessário também para a avaliação da medição de microdureza, a qual foi realizada no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM – FEMEC/UFU), a partir de um microdurômetro da marca SHIMADZU HMV-2 series com penetrador Vickers, como apresentado na Figura 3.7. Para a realização da medição deste parâmetro foi empregada uma carga de 490,3 mN ($HV_{0,05}$) e tempo de aplicação de 15 segundos. A microdureza média encontrada para este material (medida no centro e nas laterais superiores e inferiores da peça) foi de 327 HV.



Figura 3.7 – Microdurômetro utilizado para medição de dureza.

Os parâmetros de corte empregados neste trabalho foram: três valores de penetração de trabalho (15 μm , 30 μm e 45 μm). Estes parâmetros foram selecionados com base em ensaios preliminares realizados para este trabalho e também na experiência do orientador deste trabalho em processos de retificação de aços endurecidos e inoxidáveis. As principais informações que foram utilizadas para o desenvolvimento da pesquisa estão dispostas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais parâmetros de corte utilizados.

Tipo de operação	Retificação plana tangencial
Rebolos	AA60K6V
Corpos de prova	Aço Inoxidável 316 UF (327 HV) 12 mm de largura, 52 mm de comprimento e 17 mm de altura
Fluido de corte	Semissintético de base vegetal – VASCO 7 000 com vazão de 9 l/min
Velocidade da peça [m/min]	7,5
Penetração de trabalho [μm]	15, 30 e 45

Variáveis de saída	Rugosidade (R_a , R_z , R_t e R_q) Textura superficial Microdureza Potência da máquina
--------------------	---

Sendo assim, para realização dos testes, o rebolo foi dressado (antes de cada ensaio) com um dressador de diamante do tipo estático com ponta única de diamante, do fabricante Winter. Esse dressador possui um raio de ponta de 0,3 mm e os parâmetros de dressagem utilizados foram o grau de recobrimento do rebolo (U_d) de 3, profundidade de dressagem (a_d) de 25 μm , velocidade de dressagem (V_d) de 240 mm/min, sendo realizado 3 passes e $b_d = 0,3175$ mm. Geralmente o ocorre um desgaste da ponta de diamante do dressador e isso afeta os parâmetros geométricos da dressagem. Desta forma, o grau de recobrimento foi mantido em todos os ensaios através do ajuste da profundidade de dressagem e o valor de b_d se manteve constante. A Figura 3.8 a) e b) apresenta o dressador utilizado para os ensaios.



Figura 3.8 – Base com dressador utilizado nos ensaios a) sem posicionamento na máquina-ferramenta b) com posicionamento na máquina-ferramenta.

Em função da pequena dimensão das amostras, foi utilizada uma morsa de precisão para fixação delas na mesa magnética da máquina-ferramenta (Figura 3.9). O posicionamento da peça em uma morsa de precisão sobre a mesa magnética da máquina-ferramenta conforme disposto na Figura 3.10.

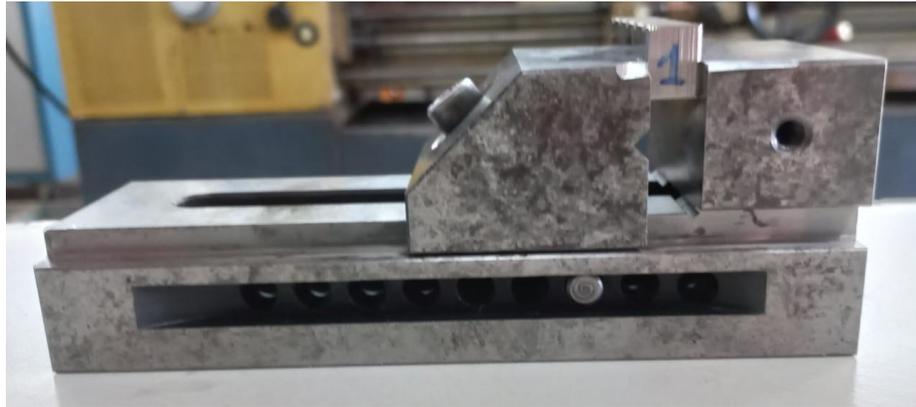


Figura 3.9 – Morsa de precisão utilizada nos ensaios (já sendo utilizada para fixar uma amostra).



Figura 3.10 – Posicionamento da peça em uma morsa de precisão sobre a mesa magnética da máquina-ferramenta.

3.5 Variáveis de saída

As variáveis de saída utilizadas na avaliação do componente retificado foram à rugosidade, microdureza, textura superficial e potência de retificação. A seguir serão apresentados os procedimentos de medição e monitoramento das mesmas.

3.5.1 Rugosidade

Para a análise da rugosidade, foi utilizado um rugosímetro portátil do fabricante Mitutoyo modelo SJ-201, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$, e as medições foram realizadas no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU – UFU). Foram realizadas cinco medições em cada superfície usinada, sendo todas perpendiculares à direção de avanço do rebolo, conforme a Figura 3.11, além de ser utilizado um comprimento de amostra de $0,8 \text{ mm}$. Considerando as cinco medições realizadas, para a análise dos resultados foram realizados a média e o desvio padrão das medições. Os valores dos parâmetros relativos à rugosidade medidos e avaliados foram R_a (desvio aritmético médio do perfil avaliado), R_z (altura máxima do perfil), R_q (desvio médio quadrático do perfil avaliado) e R_t (altura total do perfil).

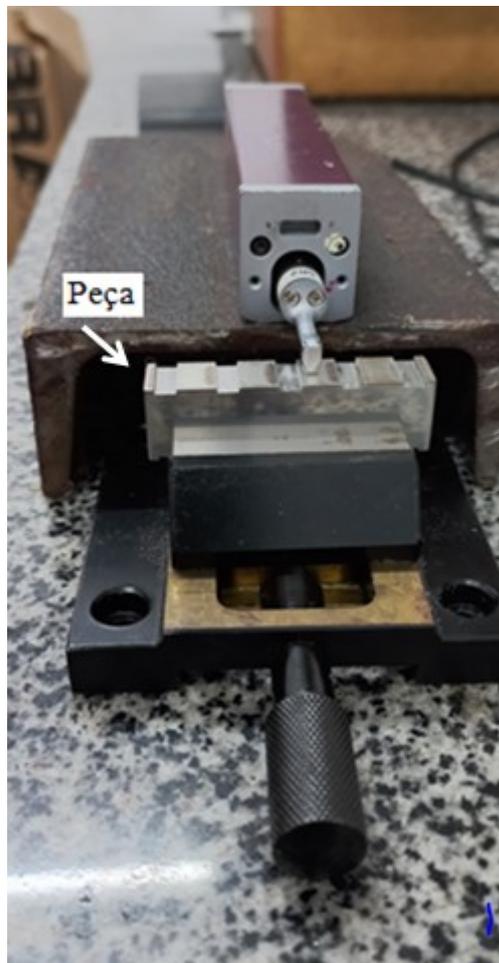


Figura 3.11 – Montagem da peça e posicionamento do rugosímetro para a medição de rugosidade.

3.5.2 Microdureza

Após os ensaios de retificação, foi medida a microdureza das peças. Para isso, as amostras passaram por algumas etapas, sendo elas o lixamento e limpeza, seguindo os mesmos procedimentos apresentados anteriormente, no tópico 3.4. Em seguida, foram realizadas as medições de microdureza em um microdurômetro da marca Shimadzu HMV-2 séries com penetrador Vickers pertencente ao Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM – UFU). Sendo assim, para a medição foi empregada uma carga de 490,3 mN ($HV_{0,05}$) e tempo de aplicação de 15 segundos. O início das medições ocorreu a partir de 30 μm abaixo da superfície retificada com intervalos de 30 μm , considerando a norma ASTM E92. O microdurômetro é o mesmo apresentado anteriormente, utilizado antes das realizações dos testes. Na Figura 3.12 apresentado o posicionamento das medições e o microdurômetro utilizado..

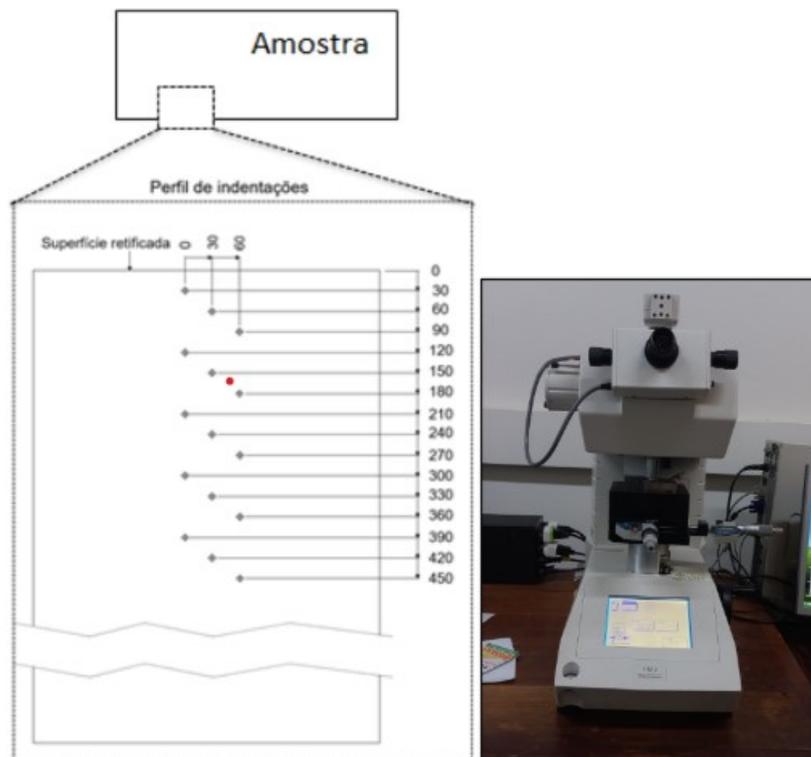


Figura 3.12 – Posicionamento das medições e microdurômetro.

3.5.3 Textura superficial

Para a análise da textura superficial das amostras utilizou-se Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), modelo TM3000, equipado com um Sistema de Energia Dispersiva (EDS), com ampliação de 1,5k que se encontra no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC – UFU. Inicialmente, as peças foram limpas por meio da cuba ultrassônica, visando remover às impurezas e cavacos aderidos a superfície das amostras. Em seguida, as peças foram fixadas em uma morsa de precisão e, assim foi possível a utilização do MEV para avaliar a textura superficial das peças usinadas e identificar quaisquer alterações na superfície, como trincas, entre outros.

3.6.4 Potência

A potência de retificação foi medida para cada ensaio, a qual foi obtida por meio dos valores de tensão elétrica e corrente elétrica que alimenta e circula no motor de indução trifásico (2,25 kW de potência nominal), sendo ela monitorada por dois sensores de efeito hall em cada fase, um para a tensão elétrica e outro para a corrente elétrica.

O sistema de aquisição dos valores de tensão e corrente elétrica foi desenvolvido no LEPU. O mesmo é conectado a um computador, sendo que na realização de cada ensaio ocorre a geração de um arquivo contendo três valores de tensão e três de corrente elétrica, obtendo desta forma a potência elétrica pelo produto da tensão e corrente elétrica em cada fase. Maiores detalhes sobre o funcionamento e montagem deste sistema de monitoramento podem ser obtidos no trabalho de Guimarães (2016).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados e discussão dos mesmos obtidos após a retificação plana sob diferentes penetrações de trabalho e número de ressaltos do aço Inoxidável 316 UF. As variáveis de saída analisadas nesta pesquisa foram a rugosidade, microdureza, textura superficial e potência de retificação.

4.1 Rugosidade

Nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4 são apresentados os resultados referentes aos parâmetros de rugosidade R_a , R_z , R_q e R_t respectivamente. No geral, todos os parâmetros apresentaram comportamentos semelhantes e aumentaram de acordo com o aumento da penetração de trabalho, conforme relatado na literatura. Em relação às diferentes geometrias das peças (4 e 6 ressaltos), percebe-se que, apesar de ser bem discreto, quanto maior o número de ressaltos, maior a rugosidade.

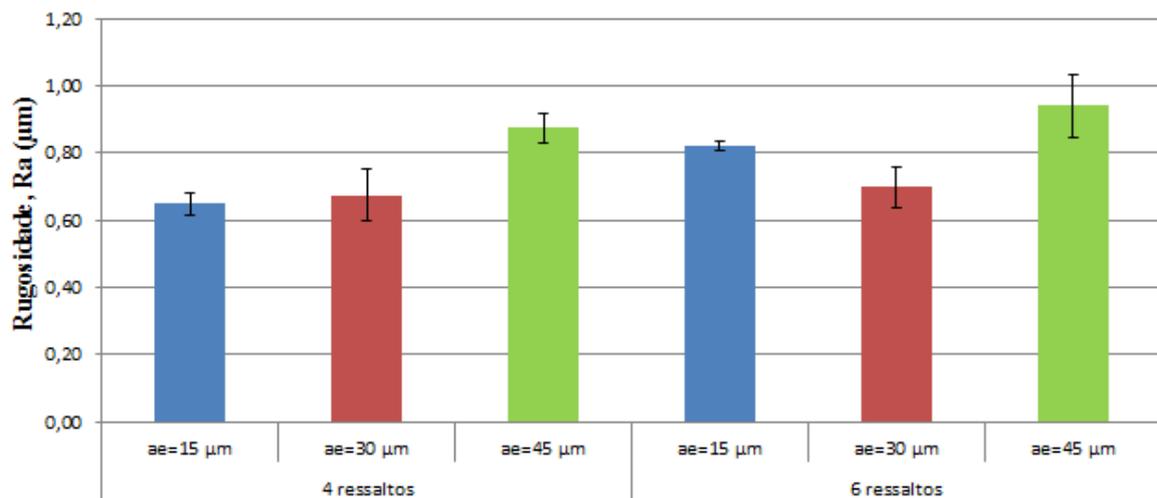


Figura 4.1 – Rugosidade R_a em função penetração de trabalho e número de ressaltos das amostras.

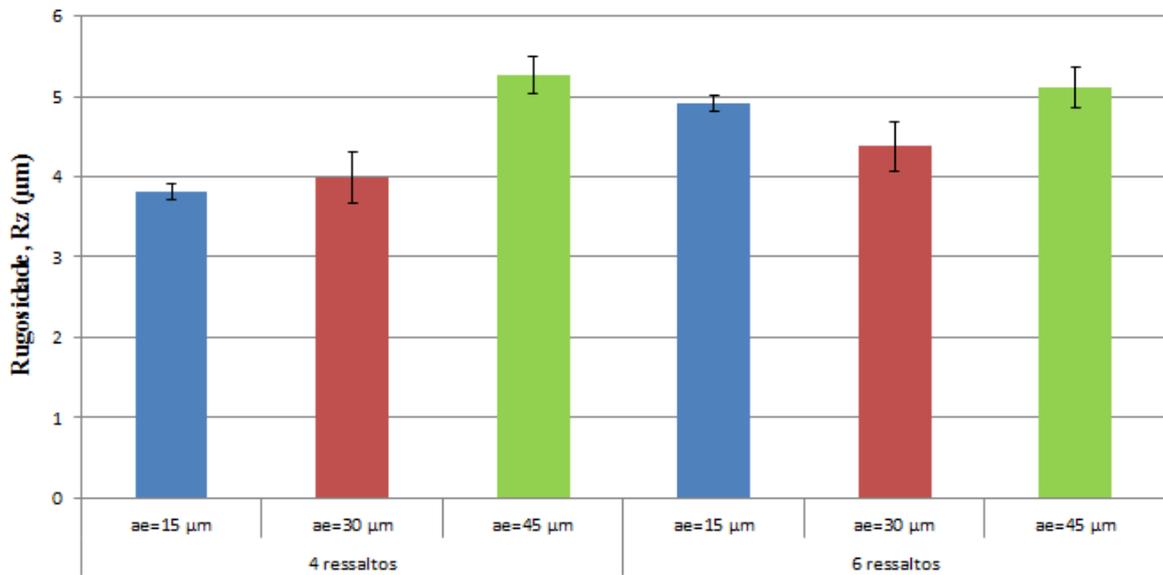


Figura 4.2 – Rugosidade R_z em função penetração de trabalho e número de ressaltos das amostras.

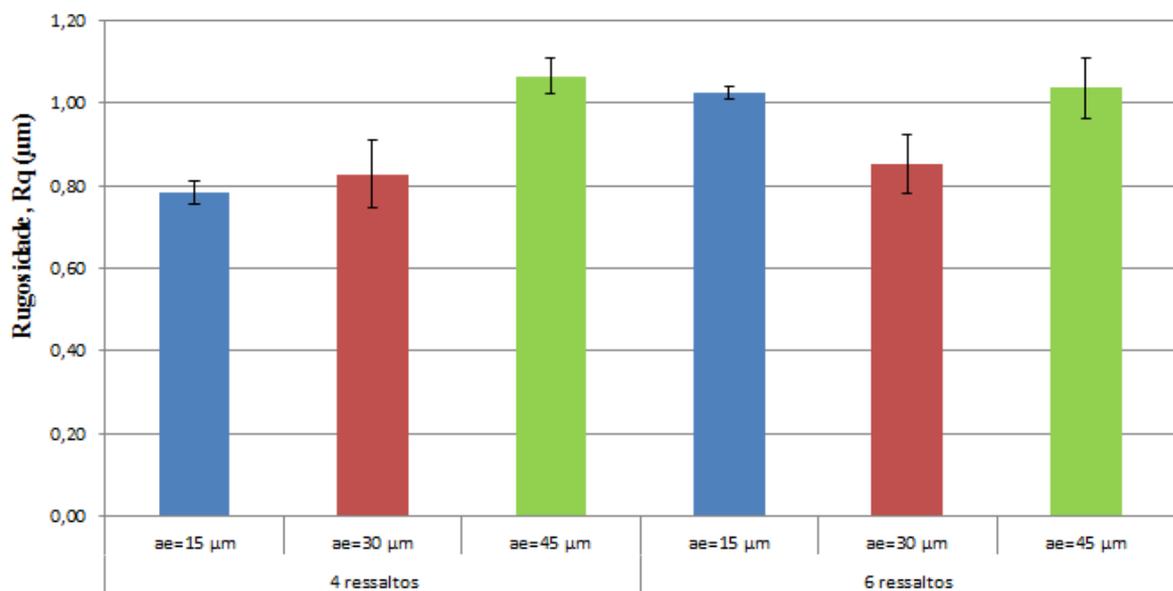


Figura 4.3 – Rugosidade R_q em função penetração de trabalho e número de ressaltos das amostras.

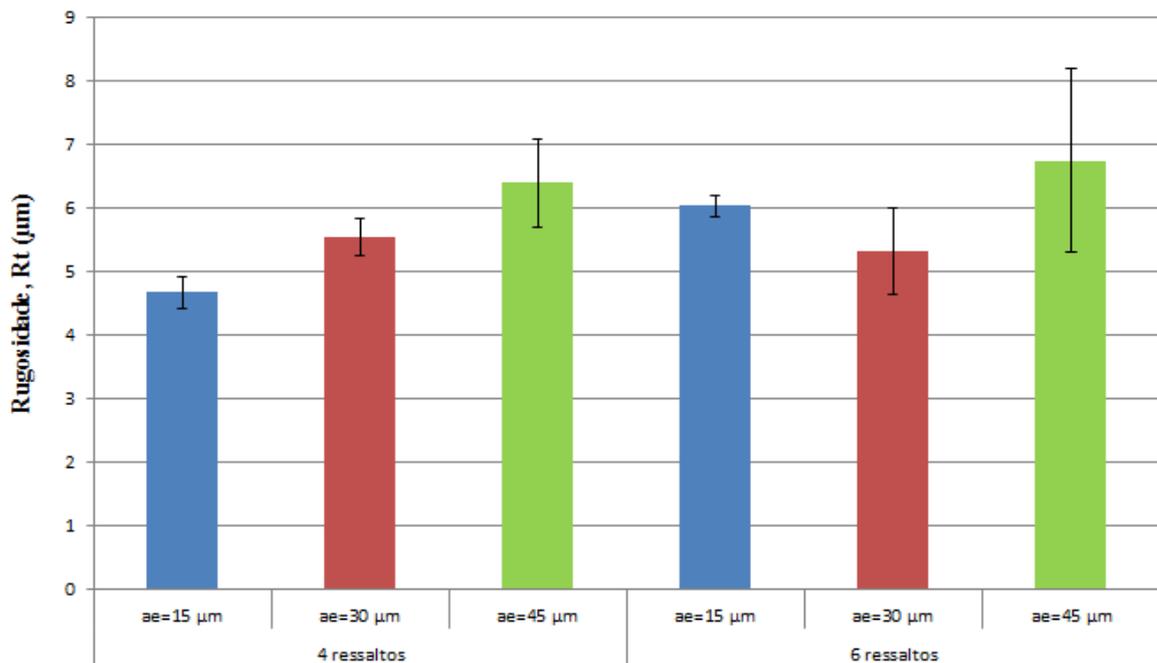


Figura 4.4 – Rugosidade R_t em função penetração de trabalho e número de ressaltos das amostras.

As Tabelas 4.1, 4.2, 4.2 e 4.4 apresentam a média dos valores encontrados para cada parâmetro de rugosidade, considerando o número de ressaltos das amostras e os diferentes valores de penetração de trabalho, como também apresentado nas Figuras 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4.

Tabela 4.1 – Média dos valores de Rugosidade R_a

Número de Ressaltos	Penetração de trabalho (μm)	Rugosidade R_a (μm)
4	15	0,648
	30	0,674
	45	0,876
6	15	0,820

	30	0,698
	45	0,940

Tabela 4.2 – Média dos valores de Rugosidade R_z

Número de Ressaltos	Penetração de trabalho (μm)	Rugosidade R_z (μm)
4	15	3,806
	30	3,990
	45	5,26
6	15	4,916
	30	4,374
	45	5,106

Tabela 4.3 – Média dos valores de Rugosidade R_q

Número de Ressaltos	Penetração de trabalho (μm)	Rugosidade R_z (μm)
4	15	0,784
	30	0,828
	45	1,066
6	15	1,024
	30	0,852
	45	1,036

Tabela 4.4 – Média dos valores de Rugosidade R_t

Número de Ressaltos	Penetração de trabalho (μm)	Rugosidade R_z (μm)
4	15	4,67
	30	5,530
	45	6,390
6	15	6,028
	30	5,326
	45	6,746

De acordo com Klocke (2009), a penetração de trabalho influencia diretamente no parâmetro da rugosidade, pois ao usinar com uma maior penetração de trabalho mais material será removido, implicando em maiores esforços de corte, Assim, como haverá um maior número de partículas abrasivas do rebolo em contato com a peça, maior calor será gerado e piores serão as condições tribológicas das peças retificadas. Para corroborar com esta relação, Bianchi et al. (1997) também estudaram sobre o aumento da penetração de trabalho no processo de retificação e, de acordo com os autores, a utilização de uma maior penetração de trabalho favorecerá a formação de cavacos com formato alongado e fino, e existirá uma maior fração de atrito e riscamento entre os cavacos e a peça, ocasionando a elevação da temperatura na região de corte e deteriorando o acabamento da peça.

Abrão (2021) estudou as diferentes condições de corte e refrigeração do aço endurecido SAE 52100, no processo de retificação cilíndrica, com a utilização de um rebolo de óxido de alumínio (AA46K6V) e relatou que, em geral, os parâmetros de rugosidade R_a e R_z aumentam com o aumento da radial profundidade de corte, e sendo o parâmetro R_z sendo mais sensível para esta variação. O autor apresenta o seguinte argumento, o aumento da penetração de trabalho gerou uma maior remoção de material, ou seja, maior quantidade de grãos abrasivos ficou em contato com a peça, proporcionado maior atrito entre a peça e rebolo, portanto resultando maiores valores de rugosidade.

Ruzzi (2022) analisou o comportamento do aço rápido na retificação plana utilizando um rebolo de óxido de alumínio (AA46K6V), e em diferentes condições de corte, entre elas, 3 valores de penetração de trabalho (10 μm , 25 μm e 50 μm). Ele também notou uma tendência do aumento da rugosidade com o aumento dos valores de penetração de trabalho. Além disso, Paiva et al. (2020) analisaram o aço SAE 52100 durante a retificação com um rebolo de óxido

de alumínio branco sob diferentes condições de corte, entre eles dois valores de penetração de trabalho (10 μm e 30 μm) e também observou um aumento da rugosidade conforme o aumento da penetração de trabalho. Todos os autores citados nesta seção justificam que o aumento da rugosidade a partir do aumento da penetração de trabalho ocorre devido ao aumento da espessura do cavaco não deformado e, conseqüentemente, ao aumento na taxa de remoção de material, ou seja, resulta em valores mais altos para a rugosidade das peças.

Em outro estudo de retificação do aço inoxidável martensítico VP420, com a utilização de um rebolo de óxido de alumínio branco (AA120K8V40W) com dois diferentes valores de penetração de trabalho (10 μm e 25 μm) desenvolvido por Pereira et al. (2021), a autora constatou um aumento em cerca de 40 % nos valores médios de rugosidade R_a e um aumento de 23,5 % no parâmetro da rugosidade R_z . Isso se deve ao fato de em condições mais severas de retificação haver uma maior quantidade de abrasivos em contato com a superfície da peça a ser retificada quando a penetração de trabalho é aumentada. Com isso, a área de contato entre o rebolo e a peça e o comprimento de contato é maior, gerando assim um aumento na espessura de material a ser removido da peça e deteriorando o acabamento (MARINESCU et al., 2016).

Em relação ao número de canais nas geometrias das amostras, Li e Axinte (2016) analisaram que o canal funciona como um reservatório para o transporte do fluido de corte para a área de contato, ou seja, favorece a redução de temperatura na peça e na ferramenta, reduzindo assim a rugosidade (DINIZ; OLIVEIRA, 2008).

Entretanto, no presente trabalho, ocorre bem discretamente que quanto maior o número de canais, maior foi a rugosidade encontrada. Uma possível explicação para isso é que os canais existentes na superfície das peças eram muito estreitos, e o fluido de corte provavelmente não conseguiu alcançar o canal neste caso. Entende-se que quando se finaliza a retificação em uma parte da peça, o rebolo perde o contato (devido ao canal) e logo após isso inicia novamente um novo contato da peça com o rebolo. Nesse novo contato com a peça, o fluido de corte não consegue adentrar na zona de corte, gerando um maior atrito na peça. Ou seja, o aumento no número de canais existentes nas amostras indica que houve um maior atrito nestes casos, influenciando negativamente na rugosidade.

4.2 Microdureza

A microdureza foi medida anterior e posteriormente aos ensaios de retificação. Anteriormente aos ensaios de retificação as peças haviam sido submetidas ao processo de fresamento para formação dos canais, ou seja, foi necessário encontrar a microdureza após esse processo de fresamento para analisar se a retificação alterou esse parâmetro. Antes dos ensaios, a microdureza encontrada foi de aproximadamente 327 HV, considerando as amostras de 4 e 6 ressaltos. Após os ensaios de retificação, a microdureza foi medida novamente, a partir do método apresentado antes da retificação.

Nas Figuras 4.5 e 4.6 são apresentados os gráficos dos perfis de microdureza Vickers medidos abaixo das superfícies das amostras de aço Inoxidável 316 UF, após o processo de retificação plana em diferentes condições de corte, com duas diferentes geometrias, sendo elas superfícies com 4 e 6 ressaltos, respectivamente. A linha pontilhada representa o valor médio da microdureza do material antes do processo de retificação (327 HV), considerando que a microestrutura do material está livre de danos térmicos. Além disso, os outros pontos formam o perfil de microdureza das peças submetidas à retificação sob diferentes condições de corte (penetração de trabalho de 15 μm , 30 μm e 45 μm). Cada ponto no gráfico corresponde à média de duas medições realizadas em diferentes regiões, porém à mesma profundidade da superfície retificada, para cada corpo de prova.

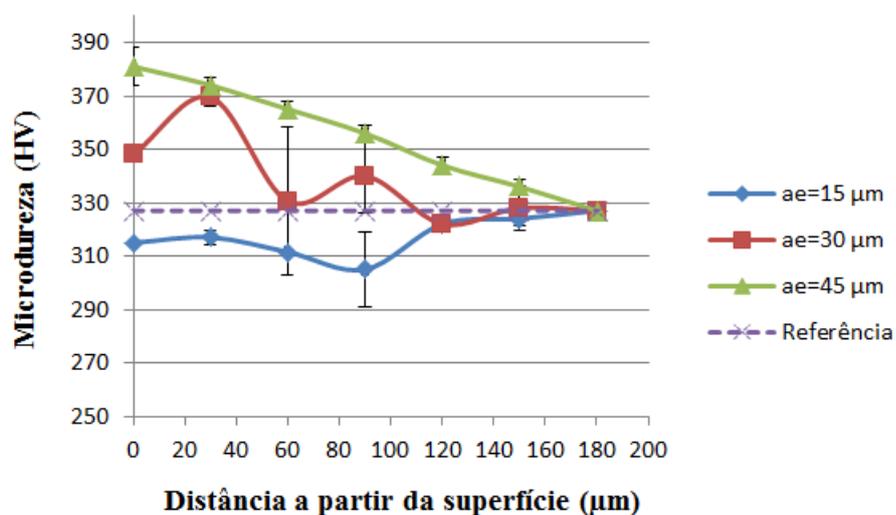


Figura 4.5 – Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço Inoxidável 316 UF após processo de retificação com peças de 4 ressaltos.

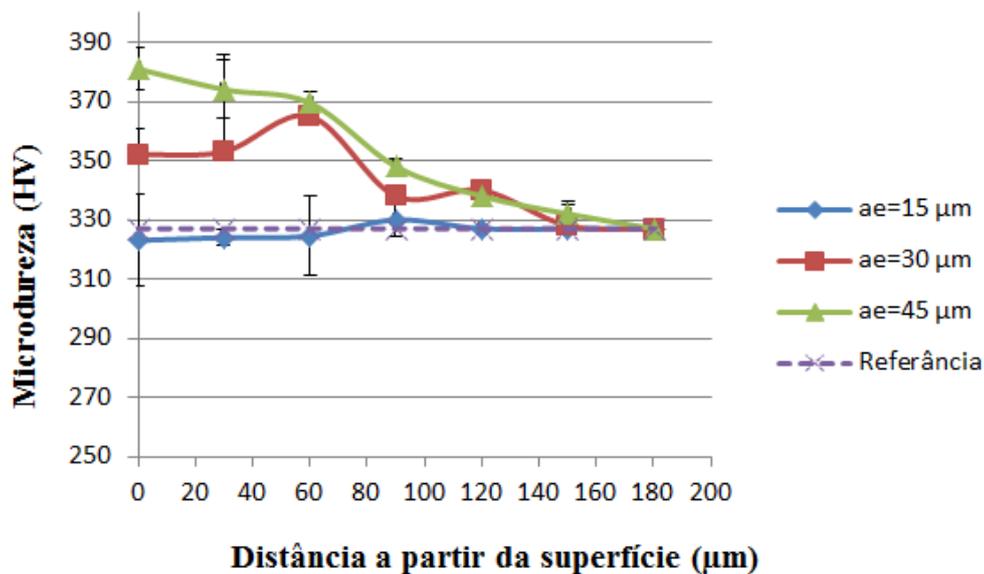


Figura 4.6 – Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço Inoxidável 316 UF após processo de retificação com peças de 6 ressalto.

Os valores de microdureza mais discrepantes encontrados foram para as peças retificadas com penetração de trabalho de 45 μm (a qual houve um aumento de, aproximadamente, 17 %) e, em seguida, para as peças retificadas a partir da penetração de trabalho de 30 μm (a qual houve um aumento de, aproximadamente, 13 %), ou seja, para os maiores valores de penetração de trabalho, os valores de pico da microdureza medidos foram maiores. Isso evidencia a ocorrência de danos térmicos no componente retificado, visto que, para a utilização de maiores valores de penetração de trabalho, normalmente são desenvolvidas maiores temperaturas na região de corte e, portanto, uma maior quantidade de calor é gerada, portanto favorecendo a ocorrência de danos térmicos nas peças. Para os ensaios realizados com a penetração de trabalho de 15 μm, não houve grande variação na microdureza após os ensaios e, portanto pode-se inferir que ao empregar esta penetração de trabalho não foram capazes de alterar a microestrutura da peça retificada.

Em concordância com Morris (2011) e Bianchi et al. (1997), quando há o aumento da penetração de trabalho (a_e), uma maior quantidade de partículas abrasivas entra em contato com a peça, aumentando assim a área e o tempo de contato, o que contribui para elevar as temperaturas da região de corte e, conseqüentemente, maior geração de calor. Ademais, quanto mais calor é gerado, maior será a transferência deste calor para as peças quando se empregam

abrasivos convencionais, como é o caso do rebolo de óxido de alumínio empregado neste trabalho.

Em outros estudos de Huang; Liu; Wu (2016), durante ensaios de retificação tangencial do aço NAK80 (41 HRc), observaram que o aumento de a_c acarretou elevação dos valores de temperatura, conseqüentemente, o que elevou a probabilidade de ocorrência danos térmicos no referido aço. Em outro estudo desenvolvido por Kumar et al (2011), os autores citam que o processo de retificação promove a alta geração de calor na área de contato; e o fluido de corte auxilia para o resfriamento, induzindo a uma deformação plástica do material e, conseqüentemente, afetando a microdureza da peça.

Além disso, em outro estudo Srivastava et al. (2020) realizaram a retificação do aço endurecido IS 2062 com rebolo de óxido de alumínio e utilizaram algumas condições de corte, entre eles 2 valores de velocidades de corte (8 m/min e 12 m/min) e 4 valores de penetrações de trabalho (6 μm , 12 μm , 18 μm e 24 μm . Eles relataram também, como os outros autores citados anteriormente, que houve aumento na microdureza abaixo da superfície retificada, principalmente para as condições em que se empregou os maiores valores de penetração de trabalho e velocidade de corte, em razão da maior geração de calor.

Em relação à quantidade de ressaltos, observa-se que quase não houve influência nos valores de microdureza das peças, como pode ser analisado na Figura 4.7, o qual mostra os maiores valores de microdureza encontrados para cada caso (variando a penetração de trabalho e número de ressaltos na geometria da peça). Em todos os casos, as amostras com 5 e 4 ressaltos apresentaram seus valores de microdureza bem próximos, quando analisados as diferentes penetrações de trabalho. Em outras palavras, o número de ressaltos nas amostras não influenciou na microdureza. Uma possível justificativa seria que o tamanho dos canais não foram suficientes para interferir na refrigeração e lubrificação do sistema e, conseqüentemente, não influenciou nos danos térmicos causados ao componente usinado.

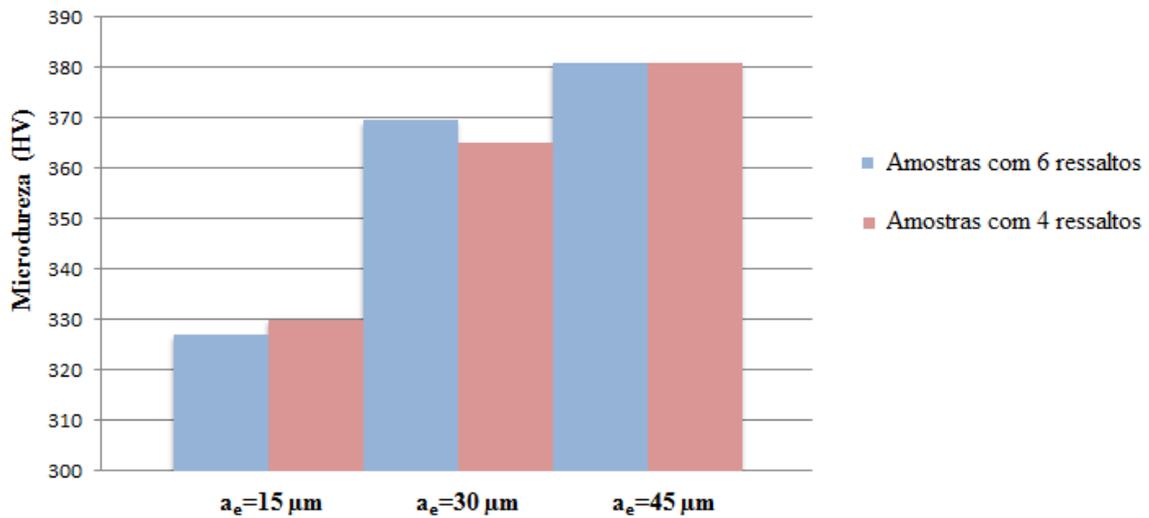


Figura 4.7 - Valores de microdureza do aço ABNT 316 UF para diferentes penetrações de trabalho.

Sendo assim, os ressaltos presentes nas amostras não afetaram significativamente a microdureza do material, resultado que está também de acordo com aqueles encontrados nos trabalhos de Tarrento (2018). O autor analisou a retificação cilíndrica do aço ABNT 4340 em 4 condições distintas (peça com geometria contínua, peça com 2 canais, peça com 6 canais e peça com 12 canais), utilizando o rebolo de CBN de ligante vitrificado e concluiu que não houve variações significativas da microdureza do material, visto que provavelmente, o número de canais adotado nos experimentos favoreceu a integridade da propriedade de dureza das amostras retificadas.

4.3 Textura superficial

Na Figura 4.8 são apresentadas as imagens das superfícies retificadas de aço Inoxidável 316 UF, obtidas via MEV (ampliação de imagem 1,5k), sob as diferentes condições de corte e número de ressaltos. Os principais eventos identificados nas imagens das superfícies foram alterações na textura, deformação plástica, interrupção dos riscos deixados pela passagem das partículas abrasivas.

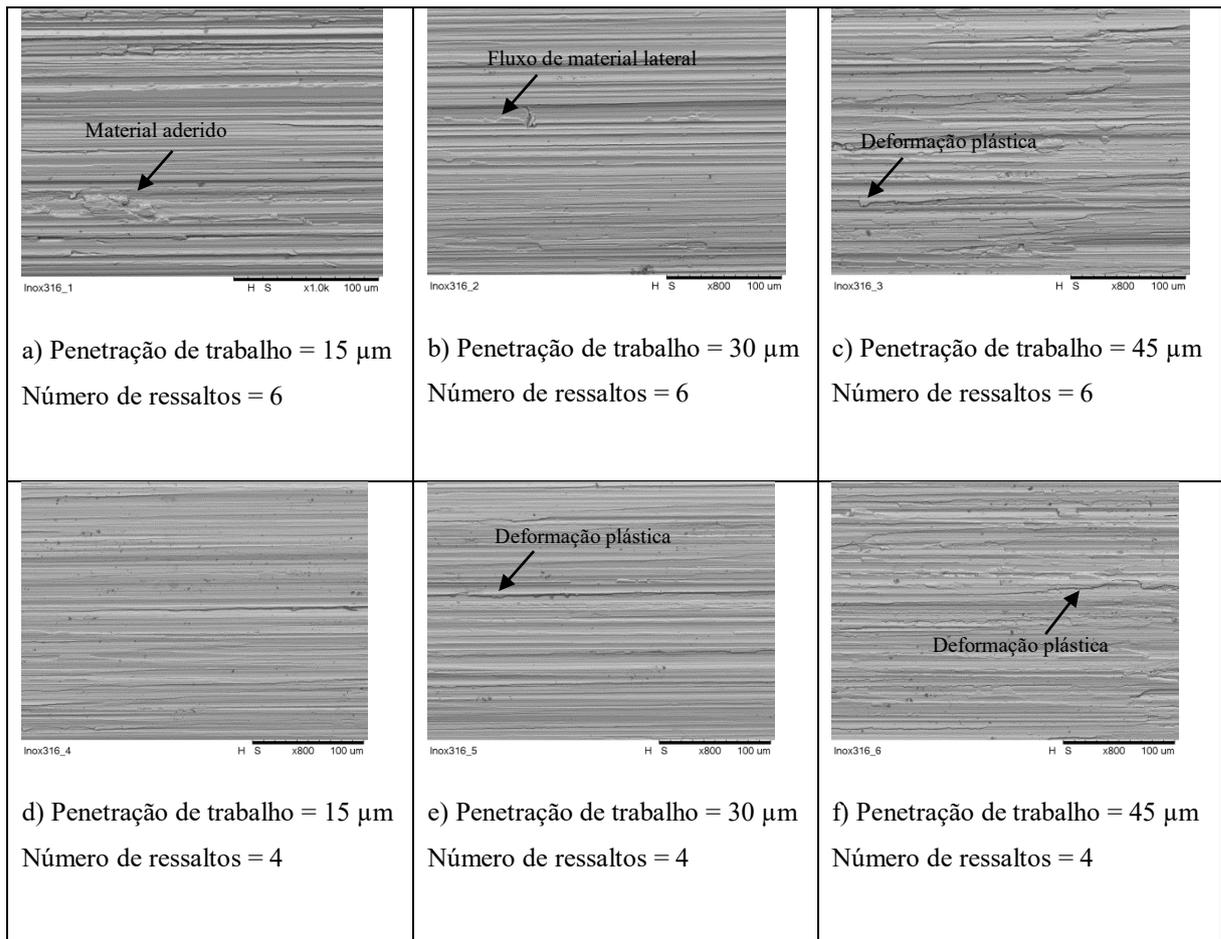


Figura 4.8 – Imagens MEV de superfícies retificadas em diferentes condições de corte.

Em geral, nas superfícies retificadas, foram observados materiais deformados e sulcos, orientados na direção do corte. Considerando a penetração de trabalho, percebe-se que o aumento da penetração de trabalho implicou em peças com maiores valores de rugosidade (Figura 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4) e, conseqüentemente, foi possível observar a partir das imagens do MEV, pela presença de maior quantidade de áreas com material deformado, sulcos mais profundos conforme podem ser observados na Figura 4.8.

Tawakoli et al. (2009) analisaram a influência da penetração de trabalho (de 5 μm a 25 μm), na retificação cilíndrica de mergulho do aço SAE 52100 na qualidade de superfícies usinadas, e relataram que o aumento da penetração de trabalho afetou negativamente a textura das superfícies usinadas. Além disso, Guimarães (2016) observou o processo retificação plana dos aços ABNT N2711M e VPATLAS e concluiu que quanto maior o valor de penetração de trabalho utilizado nos ensaios ocorreu um aumento dos valores de rugosidade, como foi encontrado também no presente trabalho.

Isso se deve ao fato de que há um aumento da deformação plástica com o aumento da penetração de trabalho, ou seja, mais calor é gerado no processo. Esse aumento na geração de calor diminui a resistência ao cisalhamento da peça, tornando o material mais dúctil e favorecendo a ocorrência de material depositado na superfície retificada, consequentemente, piorando a sua textura superficial e o acabamento (MARINESCU et al., 2012).

Além disso, o aumento da penetração de trabalho resulta em sulcos com maior largura, visto que esse aumento acarretará maior área de contato dos abrasivos com a peça e, consequentemente, uma maior quantidade de material estará sendo deformada (DAMASCENO et al., 2017).

Ademais, em relação ao número de ressaltos contidos nas amostras, é possível perceber uma pequena variação em relação a textura superficial das peças. As amostras com 6 ressaltos (Figura 4.8 a), b) e c)) contém mais sulcos e material deformado, quando comparados com as amostras de 4 ressaltos (Figura 4.8 d), e) e f)). É provável que o fluido de corte não tenha sido mais eficaz em relação aos canais e, como o rebolo perde mais vezes o contato com a peça (no local dos canais) e depois adentra na peça novamente, pode ocorrer maior índice de atrito nesses locais e consequentemente, maior taxa de calor (visto que o fluido de corte não consegue adentrar na zona de corte no momento em que o rebolo entra em contato com a peça) . Ou seja, prejudicando a textura superficial das amostras.

Além disso, na Figura 4.9 é apresentado imagens das peças, após o processo de retificação. Como pode ser analisado, é notório que as amostras com mais ressaltos e que foram retificadas com maior penetração de trabalho queimaram superficialmente, ou seja, isso também pode ter influenciado na textura superficial e rugosidade.

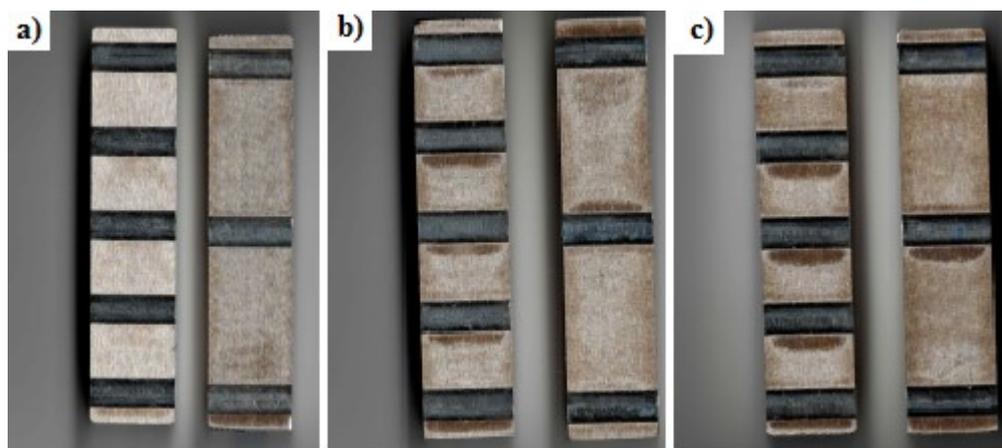


Figura 4.9 - Fotos das peças retificadas, a) utilização da penetração de trabalho de 15 μm , b) utilização da penetração de trabalho de 30 μm e c) utilização da penetração de trabalho de 45 μm .

4.4 Potência de retificação

Os valores de potência elétrica relativos à retificação do aço Inoxidável 316 UF, sob diferentes penetrações de trabalho e número de ressaltos, estão apresentados nas Figuras 4.10 e 4.11, 6 e 4 ressaltos, respectivamente.

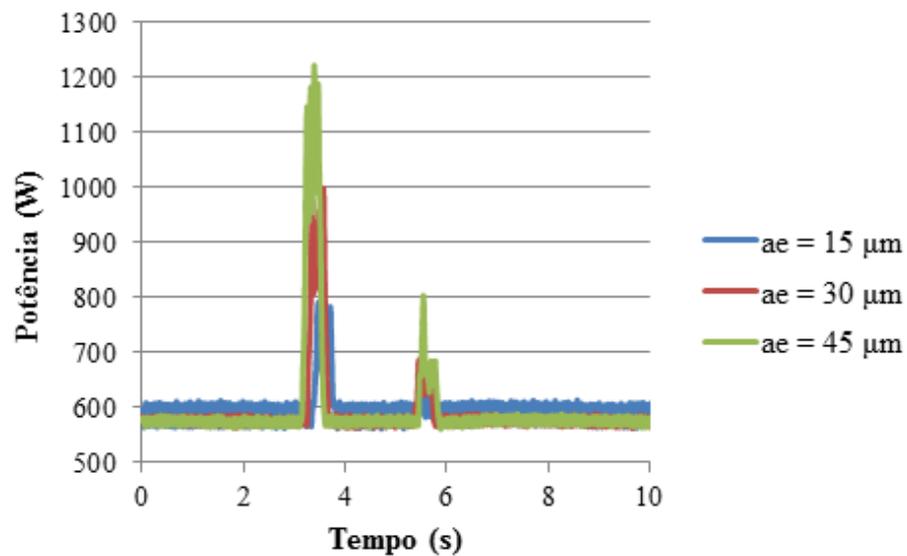


Figura 4.10 – Potência de retificação obtida a partir de diferentes penetrações de trabalho em superfícies com 6 ressaltos.

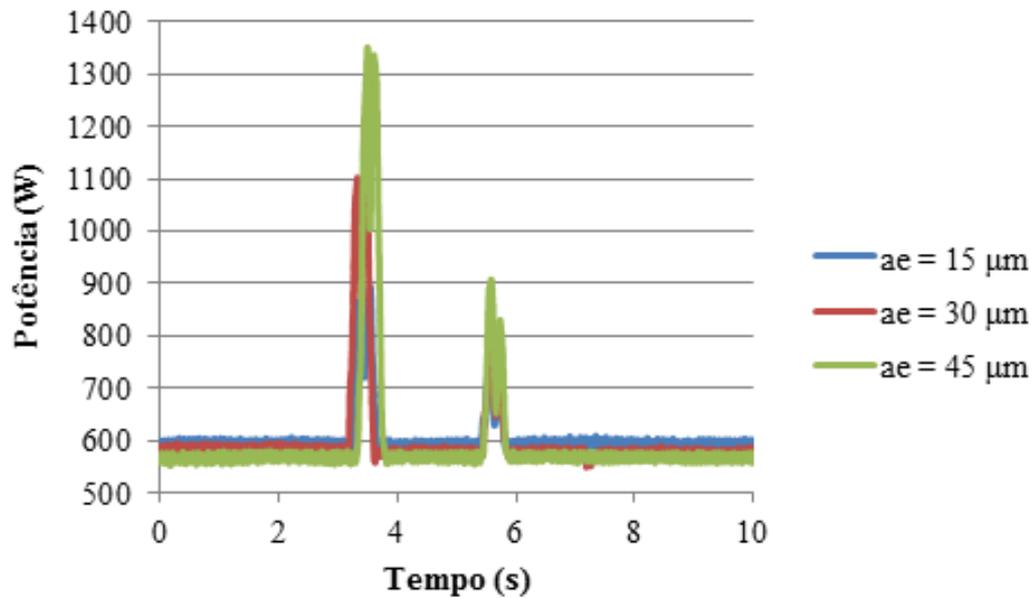


Figura 4.11 – Potência de retificação obtida a partir de diferentes penetrações de trabalho em superfícies com 4 ressaltos.

Ao analisar as Figuras 4.10 e 4.11 observa-se que, no geral, o aumento da penetração de trabalho causou elevação nos valores de potência obtidos, como pode ser observado pelo primeiro pico dos gráficos analisados. Além disso, pode ser analisado que o segundo pico do gráfico se refere ao spark-out. De acordo com Rowe et al. (1997), a penetração de trabalho influencia diretamente sobre a taxa de remoção de material, área de contato rebolo/peça e espessura equivalente de corte. Sendo assim, o aumento da penetração de trabalho nos ensaios de retificação exige maiores esforços de corte para remover uma maior quantidade de material. Ainda em concordância com Rowe et al. (1997), Alexandre et al. (2017) analisaram o processo de retificação tangencial de dois diferentes tipos de aços (aço ABNT 1045 e aço VC131) e, em ambos os materiais, o aumento da penetração de trabalho ocasionou em um aumento da potência requerida pelo processo.

Além disso, outros autores como Kwak; Sim; Jeong (2005) analisaram, no processo de retificação cilíndrica do aço endurecido SCM440, o aumento da potência de retificação, a partir do aumento da penetração de trabalho, em razão da maior quantidade de material a ser removida. Em outro trabalho desenvolvido por Rabiei et al. (2014), o mesmo foi constatado. Eles utilizaram os aços CK45, S305, HSS e 100Cr6 e observaram um aumento das forças de corte com a penetração de trabalho. Sun et al. (2015) também analisaram que as forças de

retificação tendem a aumentar em proporção direta com a profundidade de usinagem e, sendo assim, a potência consumida aumentará, devido a maiores esforços exigidos pela máquina.

Ademais, outro fator que pode ser analisado é que o número de ressaltos das peças também influenciou nos valores obtidos da potência de retificação. Observa-se que as peças que possuem apenas 4 ressaltos, geraram valores mais altos de potência, quando comparadas as peças que possuíam 6 ressaltos, já que as peças com menor quantidade de ressaltos geram resultam em maior área de contato entre rebolo e peça, ou seja, e conseqüentemente exigindo maiores esforços de corte e maior consumo de potência.

Como analisado por Tarrento (2018), a potência consumida durante a retificação é maior para peças com geometria contínua, quando comparado com peças de superfícies interrompidas, já que o rebolo não perde contato com a peça, como ocorre no caso de retificação de superfícies interrompidas. As amostras de superfícies interrompidas tendem a reduzir o consumo de potência, à medida que se aumenta a quantidade de canais nas peças, visto que os canais promovem uma inatividade em algumas áreas de contato e, sendo assim, promove menores esforços de corte e menor consumo de potência e energia elétrica.

Ademais, Mello (2017) também encontrou resultados semelhantes ao analisar amostras do aço ABNT 4340, com 2, 6 e 12 canais e, durante a retificação. O autor observou que as peças com maior número de canais durante a retificação exigiram um menor consumo de potência, quando comparadas com as peças com menor número canais. As peças com maior número de canais geram mais regiões de desacoplamento peça-rebolo durante a usinagem (quando o rebolo perde contato com a peça), ou seja, reduzindo assim a área de contato entre o rebolo e a peça, portanto implicando em menor esforço de corte.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados experimentais obtidos com a retificação plana tangencial do aço Inoxidável 316 UF, sob diferentes condições de corte e diferentes geometrias das peças (com 4 e 6 ressaltos), as seguintes conclusões foram obtidas:

- O aumento da penetração de trabalho resultou no aumento dos valores médios de rugosidade dos parâmetros (R_a , R_z , R_t e R_q). Além disso, o maior número de ressaltos contido nas amostras retificadas gerou também, discretamente, maiores valores de rugosidade, sendo que as amostras com 6 ressaltos aumentaram em torno de 12 %, 10 %, 9 % e 9 % nos parâmetros de rugosidade R_a , R_z , R_t e R_q , respectivamente, quando comparadas com as amostras de 4 ressaltos.
- Em relação à textura superficial, os melhores resultados obtidos foram encontrados nos ensaios com as amostras de menores números de ressaltos e menores penetrações de trabalho, ou seja, com a amostra de 4 ressaltos e com a penetração de trabalho de 15 μm .
- Nas peças retificadas com maiores valores de penetração de trabalho foram registradas maiores alterações na microdureza, sendo valores maiores do que ao encontrado inicialmente, em todas as amostras (com 4 e 6 ressaltos). Entretanto, o número de ressaltos não influenciou este parâmetro.
- A potência elétrica gerada no processo de retificação foi maior nos casos em que se utilizaram os maiores valores de penetração de trabalho. Além disso, o maior número de ressaltos (6 ressaltos) nas amostras retificadas exigiu menor potência quando comparado as amostras de 4 ressaltos. Em relação às peças com 4 ressaltos, quando comparadas as peças de 6 ressaltos, foram encontrados um aumento da potência de 45

%, 12 % e 10 % para as penetrações de trabalho de 15 μm , 30 μm e 45 μm , respectivamente.

Sugestões para trabalhos futuros

As seguintes sugestões para trabalhos futuros serem desenvolvidos com base nesta pesquisa são:

- i. Realizar testes de retificação em peças com superfícies contínuas, visando fazer a comparação com as peças que possuem ressaltos.
- ii. Realizar ensaios de retificação plana tangencial com os mesmos parâmetros utilizados, alterando apenas algumas posições do bocal;
- iii. Testar outros tipos de rebolos, com diferentes granulometrias mesh, na retificação do mesmo aço e comparar com o aço rápido;
- iv. Analisar os desvios geométricos nas amostras retificadas do presente trabalho.

Referências Bibliográficas

ABRÃO, B. S. Retificação plana do aço SAE 52100 com fluido de corte contendo grafeno aplicado pela técnica MQL. 2018. 125 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

ABRÃO, B.S.; PEREIRA, M.F.; da SILVA, L.R.R.; MACHADO, Á.R.; GELAMO, R.V.; de FREITAS, F.M.C.; MIA, M.; da SILVA, R.B. Improvements of the MQL Cooling-Lubrication Condition by the Addition of Multilayer Graphene Platelets in Peripheral Grinding of SAE 52100 Steel. *Lubricants* 2021, 9, 79. <https://doi.org/10.3390/lubricants9080079>

AGOSTINHO, O. L., RODRIGUES, A.C.L., LIRANI, J., Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões. Ed. EdgardBlucher, São Paulo, 1995. 295 p.

ALEXANDRE, Felipe Aparecido *et al.* Chatter Vibration Monitoring in the Surface Grinding Process through Digital Signal Processing of Acceleration Signal. The 4Th International Electronic Conference On Sensors And Applications, [S.L.], p. 1-5, 14 nov. 2017. MDPI. <http://dx.doi.org/10.3390/ecsa-4-04927>.

ALI, Y.M.; ZHANG, L.C. “Surface roughness prediction of ground components using a fuzzy logic approach”. *Journal of Materials Processing Technology* 89–90, p. 561–568, 1999.

ALVES, M. C. S. Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN. 2007. 155f. Tese (Doutorado) - Curso de Doutorado em Ciência e Tecnologia de Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru, 2007

AL-ZAHARNAH. I. T. Suppressing vibrations of machining processes in both feed and radial directions using an optimal control strategy: The case of interrupted cutting. *Journal of Materials Processing Technology*. vol. 172. Pages 305-310. 2006.0000

BET, L. Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor. 1999. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina.

Bianchi, E. C., “Ação das condições de dressagem na retificação de precisão”. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Escola de Engenharia de São Carlos, São Carlos, 1990.

BIANCHI, E. C., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., JÚNIOR, C. E. S., VALARELLI, I. D., AGUIAR, P. R. Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Frágeis e Dúcteis. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, v.XIX, n.3, 1997.

CHIAVERINI, V. *Tecnologia mecânica*. McGraw Hill, 2005.

DAMASCENO, R. F., RUZZI, R. S., FRANÇA, T. V., MELLO, H. J., SILVA, R. B., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Performance evaluation of various cooling-lubrication techniques in grinding of hardened AISI 4340 steel with vitrified bonded CBN wheel. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2017.

DAVIM, J.P. (2010) *Surface Integrity in Machining*. Springer, London.

DINIZ, A. E. Apostila do curso de especialização em Automação Industrial – Processos abrasivos de Usinagem: Retificação com rebolos abrasivos. UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, 2004.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L. “Tecnologia da usinagem dos materiais”. Artiliber Editora Ltda, Campinas, SP, Brasil, 4ª Edição, 2003, p.230-248.

DINIZ, A. E.; OLIVEIRA de., A. J. Hard turning of interrupted surfaces using CBN tools. *Journal of Materials Processing Technology* 195. Pages 275-281. 2008

GADELMAWLA, E. et al. Roughness parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, v. 123, n. 1, p.133-145, 2002.

GRAF, W. „Cylindrical Grinding“. Copyright WST Winterthur Schleiftechnik AG, Schweiz, 87p., 2004.

GROOVER, M.P. *Introdução aos processos de fabricação*. Rio de Janeiro: LTC LIVROS TÉCNICOS E CIENTÍFICOS EDITORA SA, 2014. 737 p.

GROOVER, Mikell P.. *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems*. 4. ed. [S.I.]: John Wiley & Sons, 2010. 1012 p.

GUIMARÃES, C. Retificação plana de aços para moldes e matrizes em várias condições de corte e diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte. 2016. 219p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

HUANG, W.T.; LIU, W.S.; WU, D.H. Investigations into lubrication in grinding processes using MWCNTs nanofluids with ultrasonicassisted dispersion. *J. Clean. Prod.* 2016, 137, 1553–1559.

KING, R. I., HAHN, R. S., “Handbook of Modern Grinding Technology”. 3a Ed., New York, Chapman And Hall, 1992.

KING, Robert I.; HAHN, Robert S.. *Handbook of Modern Grinding Technology*. Us: Springer, 1986. 360 p.

KIRSCH, B., AURICH, J. C. Influence of the macro-topography of grinding wheels on the cooling efficiency and the surface integrity. *Procedia CIRP*, v.13, 2014, p. 8-12.

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

KLOCKE, F.; SOO, S.; KARPUSCHEWSKI, B.; WEBSTER, J.; NOVOVIC, D.; ELFIZY, A.; AXINTE, D.; TONISSEN, S. Abrasive machining of advanced aerospace alloys and composites. *Elsevier, CIRP Annals v. 64*, p.581-604, 2015.

KOUNTANYA, R. Cutting tool temperatures in interrupted cutting_The effect of feeddirection modulation. *Journal of Manufacturing Processes*. Pages 47-55. 2008.

KRAR, Steve F.. *Grinding Technology*. 2. ed. [S.I.]: Cengage Learning, 1994. 342 p.

KRUSZYNSKI, B. W.; WÓJCIK, R.; “Residual stress in grinding”. *Journal of Materials Processing Technology*. Vol. 109, pp. 254-257, 2001.

KUMAR, S.; YADAV, M.; AGRAWAL, P.; KHAN, M. Z.; VASHITA, M. Assessment of microhardness profile in grinding using barkhausen noise technique at various analysis parameters. *ISRN Materials Science*. vol.211. 2011. Disponível em: <<https://www.hindawi.com/journals/isrn/2011/525078/>>.

KWAK, J.S., SIM, S.B., JEONG, Y.D. An analysis of grinding power and surface roughness in external cylindrical grinding of hardened SCM440 steel using the response surface method. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.46, 2005, p. 304-312.

LAKSHMANAN, S.; XAVIOR, M. A. Performance of Coated and Uncoated Inserts during Intermittent Cut Milling of AISI 1030 Steel. *Procedia Engineering*, v. 97, p. 372-380, 2014.

LAUER-SCHMALTZ, H.; KÖNIG, W.. Phenomenon of Wheel Loading Mechanisms in Grinding. *Cirp Annals*, [S.L.], v. 29, n. 1, p. 201-206, 1980. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506\(07\)61322-5](http://dx.doi.org/10.1016/s0007-8506(07)61322-5).

LI, H. N.; AXINTE, D. Textured grinding wheels: A review. *International Journal of Machine Tools & Manufacture* v.109. Pages 8-35. 2016.

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

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

MALKIN, S. Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives. Chichester: Ellis Horwood, Halsted Press, 1989, 275p.

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

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

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

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

MARINESCU, I.D., ROWE, W.B., DIMITROV, B. AND OHMORI, H. Tribology of abrasive machining processes. William Andrew, 2012.

MARINESCU, I.D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. Handbook of Machining with Grinding Wheels, Manufacturing Engineering and Materials Processing, CRC Press, Taylor & Francis Group, London, UK, s596 p., 2007.

MELLO de., H. J.; MELLO de., D. R.; RODRIGUEZ, L. R.; LOPES, J. C.; SILVA da, R. B.; SANCHEZ, L. E. A; HILDEBRANDT, R. A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Contribution to cylindrical grinding of interrupted surfaces of hardened steel with medium grit wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. v.95. Pages 4049-4057. 2018.

MELLO, Hamilton José de. Retificação do aço ABNT 4340 endurecido com geometria interrompida sob condição de refrigeração convencional e otimizada utilizando rebolo de óxido de alumínio com ligante resinoide e vitrificado. 2017. 161 F. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA, Bauru.

MORRIS, T. Abrasive Machining with MQSL. 2011. 277p. Tese de Doutorado, Cranfield University, Cranfield, Reino Unido.

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

PAULA DE, W. Análise de superfícies de peças retificadas com o uso de redes neurais artificiais. 2007. 168 f. Dissertação (Mestrado em Ciências e Tecnologias de Materiais) Faculdade de Ciências de Bauru – UNESP, Bauru, SP. 2007.

PEREIRA, Mayara Fernanda; ABRÃO, Bruno Souza; MELLO, Antonio Vitor de; OLIVEIRA, Rodolfo Fisher Moreira; SILVA, Rosemar Batista da. Análise da qualidade superficial e da microdureza de aço inoxidável martensítico após a retificação / Analysis of surface quality and microhardness of martensitic stainless steel after grinding. Brazilian Journal Of Development, [S.L.], v. 7, n. 8, p. 81667-81675, 17 ago. 2021. South Florida Publishing LLC. <http://dx.doi.org/10.34117/bjdv7n8-400>.

PUERTO, P.; FERNÁNDEZ, R.; MADARIAGA, J.; ARANA, J.; GALLEGO, I. “Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear”. *Procedia Engineering*, vol. 63, pp. 174 – 182, 2013.

RABIEI, F., RAHIMI, A. R., HADAD, M. J., ASHRAFIJOU, M. Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 2014, p. 447-460.

RIBEIRO, F.S.F., LOPES J.C., TALON, A.G. *et al.* Comparative analysis between resinoid and vitrified bond grinding wheel under interrupted cutting. *Int J Adv Manuf Technol* 109, 75–85 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05667-2>

RODRIGUEZ, R.L., LOPES, J.C., GARCIA, M.V. *et al.* Grinding process applied to workpieces with different geometries interrupted using CBN wheel. *Int J Adv Manuf Technol* 107, 1265–1275 (2020). <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05122-2>

ROWE, W. B. *Modern Grinding Techniques*. Scrivener Publishing LLC, 2009.

ROWE, W. B.; MORGAN, M. N., “The effect of deformation on the contact area in grinding”. In: *Annals of the CIRP*, vol. 42/1, 1993.

ROWE, W. *Principles of modern grinding technology*. William Andrew Publishing, 2nd ed. 2014.

RUZZI, Otávio de Souza. *Análise da integridade da superfície do aço rápido após a retificação plana*. 2022. 56 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2022.

SALMON, S. C., *Modern Grinding Process Technology*, MacGraw-Hill, 1992.

SCHUIITEK, A. J. ; SEVERIANO, A. C.; BELLOS, N.L. “Um caso bem-sucedido de uso de rebolos de CBN”. *Máquinas e Metais*, n.429, p.112-125, Outubro, 2001.

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

SMITH, W. F.; HASHEMI, J. “Fundamentos de engenharia e ciência dos materiais”. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 734 p, 2012.

SRIVASTAVA, A., AWALE, A., VASHISTA, M. AND YUSUFZAI, M.Z.K. Monitoring of thermal damages upon grinding of hardened steel using Barkhausen noise analysis. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 34(5), pp.2145-2151, 2020.

SUN, L.; YANG, S.; YANG, L.; ZHAO, P.; WU, P.; JIANG, Z. A new model of grinding forces prediction for machining brittle and hard materials. 13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing. *Procedia CIRP* 27. Pages 192 – 197. 2015.

SUTERIO, R. Medição de tensões residuais por indentação associada à holografia eletrônica. 2005. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina, UFSC, Florianópolis. 2005.

TARRENTO, G. E. Retificação por corte interrompido do aço temperado ABNT 4340, com rebolo de cbn, utilizando refrigeração abundante e alta velocidade. 2018. 122 f. Tese de doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru.

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

WANG, Y., LI C., ZHANG, Y., LI, B., YANG, M. ZHANG, X., GUO, S., LIU, G. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding with diferent nanofluids. *Tribology International*. v. 99, p. 198–210, 2016.

WINTER-GRUPO SAINT GOBAIN. “Retificação” Futuria. Apostila de treinamento da Empresa Winter, Jundiaí, SP, Brasil, 2004.