BRUNO SOUZA ABRÃO

RETIFICAÇÃO DE AÇO ENDURECIDO COM APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE PELA TÉCNICA MQL CONTENDO GRAFENO E NANOTUBOS DE CARBONO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2022

BRUNO SOUZA ABRÃO

RETIFICAÇÃO DE AÇO ENDURECIDO COM APLICAÇÃO DE FLUIDO DE CORTE PELA TÉCNICA MQL CONTENDO GRAFENO E NANOTUBOS DE CARBONO

Tese apresentada no Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **DOUTOR EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

UBERLÂNDIA – MG

2022

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

A161 Abrão, Bruno Souza, 1994-
2022 Retificação de aço endurecido com aplicação de fluido de corte pela técnica MQL contendo grafeno e nanotubos de carbono [recurso eletrônico] / Bruno Souza Abrão. - 2022.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: http://doi.org/10.14393/ufu.te.2022.392
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica. I. Silva, Rosemar Batista da, 1974-, (Orient.). II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:
Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

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

ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 332, COPEM				
Data:	29/07/2022	Hora de início:	08:00	Hora de encerramento:	12:40
Matrícula do Discente:	11823EMC010				
Nome do Discente:	Bruno Souza Abrão				
Título do Trabalho:	Retificação de Aço Endurecido com aplicação de Fluido de Corte pela técnica MQL contendo Grafeno e Nanotubos de Carbono				
Área de concentração:	Materiais e Processos de Fabricação				
Linha de pesquisa:	Processos de Fabricação (Usinagem e Soldagem)				
Projeto de Pesquisa de vinculação:	CNPq - Universal, P. No. 426018/2018-4, Monitoramento da integridade de peças submetidas ao processo de retificação por meio da técnica da impedância eletromecânica FAPEMIG, PPM-00492-18- PPM XII" "Aplicação De Lubrificantes Sólidos Dispersos em Fluido de Corte em Operações de Retificação"				

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Arthur Alves Fiocchi - FEMEC/UFU; Louriel Oliveira Vilarinho - FEMEC/UFU; Eduardo Carlos Bianchi - UNESP; Amauri Hassui - UNICAMP e Rosemar Batista da Silva - FEMEC/UFU, orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Rosemar Batista da Silva, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.

Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 03/08/2022, às 23:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Carlos Bianchi**, **Usuário Externo**, em 04/08/2022, às 08:52, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Amauri Hassui**, **Usuário Externo**, em 04/08/2022, às 09:45, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Louriel Oliveira Vilarinho**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/08/2022, às 10:59, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

Documento assinado eletronicamente por **Arthur Alves Fiocchi**, **Professor(a) do Magistério Superior**, em 04/08/2022, às 16:10, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015.

A autenticidade deste documento pode ser conferida no site https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **3798174** e o código CRC **B047F7C4**.

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Valéria e José Antônio, e as minhas irmãs Júlia e Amanda.

AGRADECIMENTOS

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

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e aos Laboratórios de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) e de Usinagem Convencional (LUC) pela oportunidade de desenvolvimento desta pesquisa.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de doutorado e apoio financeiro na realização desta pesquisa.

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

À Dra. Mayara Fernanda Pereira pela grande amizade e por sempre estar presente e disposta a ajudar-me com dedicação durante as diversas etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Ao Professor Dr. Leonardo Rosa Ribeiro da Silva pela amizade e por sempre estar disposto a ajudar-me em todas as demandas durante a realização das etapas posteriores aos ensaios experimentais.

Aos doutorandos Guilherme Bernardes Rodrigues e Walter dos Santos Motta Neto, e ao mestrando Alessandro Augusto Olimpio Ferreira Vittorino, por todo auxílio durante as etapas de avaliação das variáveis de saída.

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

À empresa Alcar Abrasivos e Winter pelo fornecimento dos rebolos e dressadores, respectivamente, utilizados nos ensaios.

Aos meus pais, Valéria Piva de Souza Abrão e José Antônio Abrão, e às minhas irmãs Amanda Souza Abrão e Júlia Souza Abrão, por sempre me incentivarem com muito amor, carinho e dedicação, como também estarem constantemente presentes me apoiando tanto nos momentos de alegria quanto naqueles de dificuldade.

ABRÃO, B. S. **Retificação de aço endurecido com aplicação de fluido de corte pela técnica MQL contendo grafeno e nanotubos de carbono.** 2022. 164 F. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

RESUMO

O processo de usinagem por abrasão possui vasta aplicação em diversos setores industriais por conseguir a combinação de baixos valores de rugosidade (R_a < 1,6 µm) e tolerâncias dimensionais estreitas (IT6 a IT3), contudo ela é um processo que envolve elevada energia específica. O material abrasivo dos rebolos convencionais possui baixa condutividade térmica e os cavacos gerados com pequenas dimensões, de forma que a maior parte do calor é direcionado para a peça, tornando imprescincível a utilização de fluido de corte para a refrigeração da zona de corte. A técnica de aplicação de fluido de corte convencional (abundância) é a mais empregada, entretanto em razão da crescente preocupação com as questões de segurança do trabalho, ambientais e econômicas tornou-se necessário o estudo de novas formas de aplicação do fluido de corte, com destaque para a mínima quantidade de lubrificante (MQL). Mas por outro lado, a técnica MQL apresenta limitações no que diz respeito à redução de temperatura do processo, o que tem motivado desenvolvimento de nova linha de pesquisas, dentre elas aquela que adiciona partículas sólidas ao fluido visando melhorar a capacidade de refrigeração e de lubrificação. Neste sentido, o presente trabalho objetivou o estudo da dispersão de partículas de nanotubos de carbono e grafeno ao fluido de corte durante a retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido SAE 52100 empregando diferentes tipos de rebolo abrasivo (Al_2O_3 convencional e seeded gel). Os seguintes parâmetros de corte foram testados: a velocidade de avanço V_f (1,0 mm/min e 1,5 mm/min) e a velocidade da peça V_w (0,29 m/s e 0,57 m/s). Como resultados, houve o aumento da rugosidade e deterioração da textura superficial com o aumento da velocidade de avanço e a redução da velocidade da peça. O emprego do rebolo seeded gel e o fluido contendo as partículas sólidas resultou em melhor acabamento. O maior V_f e menor V_w gerou as maiores variações de microdureza e aumento dos desvios de cilindricidade. O emprego do rebolo seeded gel e das condições MQL+Grafeno e MQL+Nanotubos de carbono minimizaram a ocorrência de danos de origem térmica. A potência de retificação reduziu com o uso do rebolo seeded gel e os fluidos contendo partículas sólidas.

Palavras-chave: *Retificação Cilíndrica; Aço endurecido; Fluido de Corte; Técnica MQL; Nanotubos de carbono; Grafeno multicamadas; Integridade superficial e sub-superficial.*

ABRÃO, B. S. **Grinding of hardened steel with application of cutting fluid by the MQL technique containing graphene and carbon nanotubes.** 2022. 164 F. Doctoral thesis, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

ABSTRACT

The abrasion machining process has wide application in several industrial sectors for achieving the combination of low roughness values (Ra < 1.6 μm) and narrow dimensional tolerances (IT6 to IT3), however it is a process in which a high specific energy is generated. The abrasive material of conventional grinding wheels has low thermal conductivity and the chips generated are small, so that most of the heat is directed to the workpiece, so becoming essential to use cutting fluid to cool the cutting area. The cooling system most used for grinding is the conventional technique of supplying cutting fluid (flooding). However, due to the growing concern with work safety, environmental and economic issues, it became necessary to study new ways of applying the cutting fluid, with emphasis on the Minimum Quantity of Lubrication (MQL). On the other hand, the MQL technique has limitations regarding the process temperature reduction, which has motivated the development of a new line of research, among them the one that adds solid particles to the fluid to improve the cooling and lubrication functions. In this sense, the present work aimed to study the dispersion of carbon nanotubes and graphene particles in the cutting fluid during the external cylindrical plunge grinding of SAE 52100 hardened steel using different types of abrasive grinding wheel (conventional Al_2O_3 and seeded gel). The following cutting parameters tested were: the feed speed V_f (1.0 mm/min and 1.5 mm/min) and the workpiece speed V_w (0.29m/s and 0.57 m/s). As a result, there was an increase in the roughness and deterioration of the surface texture with the increase in the feed speed and the reduction in the workpiece speed. The use of the seeded gel grinding wheel and the fluid containing the solid particles resulted in a better finish. The highest V_f and lowest V_w generated the highest microhardness variations and increased cylindricity deviations. The use of the seeded gel grinding wheel and the conditions MQL+Graphene and MQL+Carbon nanotubes minimized the occurrence of thermal damage. The grinding power was reduced with the use of the seeded gel grinding wheel and the fluids containing solid particles.

Keywords: *Cylindrical Grinding; Hardened steel; Cutting fluid; MQL technique; Carbon nanotubes; Multilayer graphene; Surface and sub-surface integrity*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Quatro processos básicos de retificação utilizando rebolo reto (Adaptado de MARINESCU et al., 2007). 7
Figura 2.2 - Ação das partículas abrasivas sobre a superfície da peça (Adaptado de KOENIG e KLOCKE, 1996 apud MARINESCU et al., 2016). 10
Figura 2.3 - Etapas de deformação elástica e plástica na remoção de material (adaptado de KLOCKE, 2009). 11
Figura 2.4 - Variáveis do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho. 12
Figura 2.5 - Desgaste do rebolo abrasivo: a) Desgaste plano do abrasivo (Adaptado de ROWE, 2014); b) Micro desgaste das partículas abrasivas; c) Ilustração esquemática do macro desgaste do rebolo abrasivo (Adaptado de WEGENER et al., 2011). 32
Figura 2.6 - Influência do grau de recobrimento U_d sobre a superfície do rebolo abrasivo (Adaptado de KLOCKE, 2009). 34
Figura 2.7 - Possíveis alterações observadas em componentes retificados em razão das elevadas temperaturas encontradas no processo (Adaptado de KONIG et al., 1977 apud BOOTHROYD e KNIGHT, 1989). 36
Figura 2.8 - Superfície retificada do aço ABNT N2711 empregando V_s = 36 m/s, V_w = 2,4 m/min e a_e=50 µm e rebolo de óxido de alumínio (SILVA et al., 2018). 37
Figura 2.9 - Análise microestrutural do aço AISI 52100 após processo de retificação (Adaptado de HUANG et al. 2012). 38
Figura 2.10 - Funções requeridas para os fluidos de corte (Fonte: próprio autor). 40
Figura 2.11 - Algumas características de fluidos de corte (Adaptado de DIN 51385, 2013 e BRINKSMEIER et al., 1999 apud WINTER, 2013). 41
Figura 2.12 - Classificação dos fluidos de corte (Adaptado de DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014; RUZZI, 2019). 45
Figura 2.13 - Distorção do perfil devido às dimensões do apalpador (Adaptado de BHUSHAN, 2013). 57
Figura 2.14 - Textura superficial do aço endurecido 1045 submetido à retificação com diferentes condições de lubri-refrigeração (ZHANG, LI e JIA et al., 2015). 60
Figura 2.15 - Desvio de circularidade dos componentes retificados sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração (Adaptado de RUZZI et al., 2016). 62
Figura 2.16 - Análise microestrutural do aço AISI 52100 submetido à retificação em diferentes velocidades de corte (Adaptado de HUANG et al., 2015). 64
Figura 2.17 - Perfis de microdureza durante a retificação do aço endurecido 1045 sob diferentes condições de corte (SHABGARD et al., 2017). 66

Figura 3.1 - Fluxograma contendo as principais informações relacionadas aos ensaios experimentais de retificação. 69
Figura 3.2 – Retificadora cilíndrica externa Ferdimat, modelo UA61. 70
Figura 3.3 - Dimensões do corpo de prova do aço endurecido SAE 52100 empregado nos ensaios experimentais de retificação. 71
Figura 3.4 - a) Montagem do dressador, b) e c) Foto do dressador fliesen empregado durante as operações de dressagem obtida em um microscópio óptico. 72
Figura 3.5 - Sistema de medição de viscosidade (dinâmica e cinemática) e massa específica. .. 75
Figura 3.6 – Sistema de medição de condutividade térmica. 76
Figura 3.7 - Sistema de aplicação de fluido de corte pela condição convencional. 77
Figura 3.8 - Sistema de aplicação de fluido de corte pela técnica MQL: a) Bocal MQL; b) sistema bomba-seringa. 78
Figura 3.9 - Fluido de corte semissintético: a) sem água e sem grafeno; b) com partículas de grafeno dispersas. 79
Figura 3.10 - Fluido de corte semissintético: a) sem água e sem nanotubos de carbono e b) com partículas de nanotubos de carbono dispersas. 80
Figura 3.11 - Metodologia adotada para medição da rugosidade. 81
Figura 3.12 - Procedimento de medição de microdureza: a) equipamento; b) esquema para seleção das indentações. 83
Figura 3.13 - Peça presa ao suporte utilizado para análise via MEV. 84
Figura 3.14 - Máquina de medir a três coordenadas Mitutoyo, modelo BR-M443. 85
Figura 3.15 - Sistema utilizado na obtenção dos valores de potência elétrica nos ensaios de retificação cilíndrica (Adaptado de RESENDE, 2021). 86
Figura 4.1 – Valores de rugosidade R_a do aço endurecido SAE 52100 após ensaios de retificação em função da velocidade de avanço, velocidade da peça, tipo de rebolo abrasivo e condição de lubri-refrigeração. 87
Figura 4.2 – Valores de rugosidade R_z do aço endurecido SAE 52100 após ensaios de retificação em função da velocidade de avanço, velocidade da peça, tipo de rebolo abrasivo e condição de lubri-refrigeração. 92
Figura 4.3 – Valores de rugosidade R_t do aço endurecido SAE 52100 após ensaios de retificação em função da velocidade de avanço, velocidade da peça, tipo de rebolo abrasivo e condição de lubri-refrigeração. 93
Figura 4.4 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio da rugosidade R_a: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração. 95
Figura 4.5 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio da rugosidade R_z: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração. 96

Figura 4.6 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio da rugosidade R_t: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração..... 96
Figura 4.7 – Perfis de microdureza referentes aos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração convencional: a) rebolo de óxido de alumínio convencional; b) rebolo seeded gel. 98
Figura 4.8 – Perfis de microdureza referentes aos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração MQL: a) rebolo de óxido de alumínio convencional; b) rebolo seeded gel. 101
Figura 4.9 – Perfis de microdureza referentes aos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração MQL+Grafeno: a) rebolo de óxido de alumínio convencional; b) rebolo seeded gel. 103
Figura 4.10 – Perfis de microdureza referentes aos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração MQL+Nanotubos de carbono: a) rebolo de óxido de alumínio convencional; b) rebolo seeded gel. 104
Figura 4.11 – Perfis de microdureza em aço SAE 52100 após a retificação com rebolo de óxido de alumínio convencional, velocidade da peça de 0,29 m/s e velocidade de avanço de 1,5 mm/min, para todas as condições de lubri-refrigeração. 106
Figura 4.12 – Microdureza na região mais próxima à superfície retificada para todas as condições de corte e de lubri-refrigeração avaliadas..... 107
Figura 4.13 – Microestrutura do aço endurecido SAE 52100 submetido a ensaios de retificação utilizando V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,5 mm/min à diferentes condições de lubri-refrigeração: a) convencional; b) MQL; c) MQL+Grafeno; d) MQL+NC. 108
Figura 4.14 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) referentes aos ensaios de retificação do aço endurecido SAE 52100 submetido à diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração. 111
Figura 4.15 – Principais eventos observados sobre as superfícies retificadas de aço endurecido SAE 52100: a) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo Al_2O_3, V_f = 1,5 mm/min e V_w = 0,29 m/s; b) condição de lubri-refrigeração MQL, rebolo seeded gel, V_f = 1,0 mm/min e V_w = 0,29 m/s; c) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo Al_2O_3, V_f = 1,5 mm/min e V_w = 0,57 m/s; d) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo Al_2O_3, V_f = 1,5 mm/min e V_w = 0,57 m/s; e) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo seeded gel, V_f = 1,5 mm/min e V_w =0,57 m/s; f) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo seeded gel, V_f = 1,0 mm/min e V_w = 0,29 m/s. 115
Figura 4.16 – Desvios de cilindricidade dos componentes de aço endurecido SAE 52100 submetidos à retificação cilíndrica externa de mergulho sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração..... 116

Figura 4.17 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio do desvio de cilindricidade: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração. 120
Figura 4.18 – Picos de potência elétrica obtidos durante ensaios de retificação do aço endurecido SAE 52100 sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração..... 121
Figura 4.19 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio de potência: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração. 125

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Parâmetros de corte selecionados em diferentes pesquisas para o processo de retificação cilíndrica 22

Tabela 2.2 – Propriedades dos abrasivos seeded gel e Al_2O_3 convencional (Adaptado de LINDSAY, 1989; MALKIN e GUO, 2008; FATHALLAH et al., 2008) 31

Tabela 2.3 - Principais parâmetros de rugosidade (Norma ISO 4287) (MACHADO et al., 2009). 56

Tabela 3.1 – Parâmetros de entrada dos ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho 73

Tabela 3.2 – Propriedades dos fluidos de corte a 25 °C empregados nos ensaios experimentais 74

Tabela 4.1 – Análise de variância (ANOVA) referente aos parâmetros de rugosidade R_a. 94

Tabela 4.2 – Análise de variância (ANOVA) referente aos parâmetros de rugosidade R_z. 94

Tabela 4.3 – Análise de variância (ANOVA) referente aos parâmetros de rugosidade R_t. 94

Tabela 4.4 – Análise de variância (ANOVA) referente aos resultados de microdureza. 107

Tabela 4.5 – Análise de variância (ANOVA) referente aos resultados de desvio de cilindricidade. 119

Tabela 4.6 – Análise de variância (ANOVA) referente aos resultados de potência de retificação. 124

LISTA DE ABRAVIAÇÕES E SÍMBOLOS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
a_d (µm)	Profundidade de dressagem
a_e (µm)	Penetração de trabalho
AISI	Instituto Americano de Ferro e Aço
Al_2O_3	Óxido de alumínio
a_p (µm)	Profundidade de corte
b_d (µm)	Largura do dressador
b_w (µm)	Largura de retificação
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CNT	Nanotubos de carbono
CuO	Óxido de cobre
d_e (mm)	Diâmetro equivalente
d_s (mm)	Diâmetro do rebolo
d_w (mm)	Diâmetro da peça
EDS	Espectroscopia por Energia Dispersiva
f_{ad}	Avanço axial do dressador
F_n (N)	Componente de Força normal de retificação
F_t (N)	Componente de Força tangencial de retificação
GO	Óxido de grafeno
hBN	Nitreto de boro hexagonal
h_{eq} (µm)	Espessura equivalente de corte
HR	Dureza Rockwell
HV	Dureza Vickers
IT	Índice de tolerância

l_c (mm)	Comprimento de contato rebolo/peça
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
LUC	Laboratório de Usinagem Convencional
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MgO	Óxido de magnésio
MoS_2	Bissulfeto de molibdênio
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
MWCNT	Nanotubo de carbono de múltiplas paredes
NBR	Norma Brasileira
n_s (rpm)	Rotação do rebolo
n_w (rpm)	Rotação da peça
P (W)	Potência de corte em retificação
q_s	Relação entre a velocidade do rebolo e da peça
Q_w (mm³/min)	Taxa de remoção de material
R_a (µm)	Desvio aritmético médio do perfil avaliado
r_p (µm)	Raio de ponta do dressador
R_z (µm)	Altura máxima do perfil
SAE	Sociedade dos Engenheiros Automotivos
SiC	Carbeto de silício
t_d (s)	Tempo de dressagem
T_μ (µm)	Profundidade de corte crítica
u (J/mm^3)	Energia específica
U_d	Grau de recobrimento do rebolo
V_f (mm/min)	Velocidade de avanço
v_{fad}	Velocidade de dressagem
V_s (m/s)	Velocidade de corte
V_w (m/min)	Velocidade da peça

Z_s (µm)	Volume de desgaste do rebolo abrasivo
Z_w (µm)	Volume de material removido no processo

SUMÁRIO

CAPÍTULO I 1
Introdução 1
CAPÍTULO II 6
Revisão bibliográfica 6
2.1 Processo de retificação cilíndrica 6
2.2 Parâmetros do processo 11
2.3 Comentários Gerais sobre Rebolos 23
2.4 Danos térmicos encontrados em peças após a retificação 35
2.5 Fluidos de corte em retificação 39
2.6 Integridade da superfície e sub-superfície de peças retificadas 55
CAPÍTULO III 68
Metodologia 68
3.1 Equipamento 69
3.2 Material de trabalho 71
3.3 Rebolo abrasivo 71
3.4 Condições de usinagem na retificação 73
3.5 Condições de lubri-refrigeração 74
3.6 Variáveis de saída 80
CAPÍTULO IV 87
Resultados e Discussão 87
4.1 Rugosidade 87
4.2 Microdureza 97
4.3 Análise das Superfícies Retificadas 109
4.4 Desvio de Cilindricidade 115
4.5 Potência de Retificação 120
CAPÍTULO V 126
Conclusões 126
Sugestões para trabalhos futuros 129
Referências Bibliográficas 130

CAPÍTULO I

Introdução

A retificação é um processo de usinagem por abrasão realizada por meio de um rebolo, que é composto de milhares de partículas abrasivas de elevada dureza, não metálicas, apresentam geometria não definida e estão dispostas com orientação irregular. Apesar de ser um processo de custo relativamente alto para realização e alguns outros processos de usinagem conseguirem a obtenção de valores de rugosidade similares a este, sua vantagem está no fato de conseguir a combinação de tolerâncias dimensionais estreitas (IT6 a IT3) com baixos valores de rugosidade (R_a < 1,6 μm) (MALKIN e GUO, 2008) e também por permitir usinar materiais de média e elevada dureza.

Contudo, na retificação com rebolos abrasivos convencionais, a maior parte do calor transformado na zona de corte é conduzida à peça, uma vez que a principal matéria prima destes rebolos (normalmente grãos de óxido de alumínio ou de carbeto de silício) apresenta baixa condutividade térmica. Além disso, por causa das pequenas penetrações de trabalho empregadas, os cavacos produzidos possuem pequenas dimensões. Como consequência, pouco calor da zona de corte será removido por eles o que pode resultar em danos térmicos no componente usinado (MARINESCU et al., 2016). Essa questão merece maior atenção para os materiais que são mais susceptíveis a danos de origem térmica, como o aço SAE 52100, aço ABNT N2711M e aços rápidos, dentre outros (GUIMARÃES et al., 2019).

O aço SAE 52100 é empregado na fabricação de componentes de rolamento e para citar como exemplo da sua importância, em 2020 eram diariamente são montados cerca cinco mil automóveis no Brasil, sendo que em cada automóvel existem pelo menos 10 rolamentos (ANFAVEA, 2020). A maior parte dos componentes de um rolamento

metálico necessita da operação de retificação. Como a retificação normalmente é realizada no fim da cadeia produtiva quando o componente já apresenta elevado valor agregado, é imprescindível atenção para esta questão, a fim de evitar prejuízos econômicos.

Por estas razões, normalmente são utilizados fluidos de corte em grandes vazões durante o processo de retificação, visando principalmente uma maior remoção do calor gerado na interface rebolo/peça. Os fluidos apresentam como principais funções a refrigeração e a lubrificação (ROWE, 2014). A refrigeração está relacionada com a retirada de calor gerado na zona de corte e reduzindo a porcentagem de calor que será conduzida até a peça. Em relação à função de lubrificação, esta visa a redução do atrito existente entre o rebolo e o material usinado, ou seja, proporciona uma maior facilidade do corte do material além de atenuar a geração de calor causada pela usinagem (MARINESCU et al., 2004).

A técnica de aplicação de fluido de corte mais empregada é a convencional, que consiste na utilização de fluido de corte em elevadas vazões, normalmente variando de 240 L/h a 1800 L/h (ASTAKHOV e JOKSCH, 2012). Contudo, cabe ressaltar que a crescente preocupação com as questões econômicas (elevado custo de muitos fluidos e atividades com a manutenção e descarte deles, dentre outras), ambientais (quando descartados incorretamente esses fluidos afetam de maneira catastrófica o meio ambiente) e de segurança do trabalho (estes fluidos possuem em sua composição componentes químicos que podem ocasionar diversas doenças aos operadores das máquinas) tornou necessário o desenvolvimento de novas formas de aplicação do fluido de corte visando à solução destes problemas (KLOCKE, 2009).

A técnica da Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL) surgiu como uma alternativa mais sustentável por utilizar uma vazão de fluido bastante inferior à convencional (equivale a 0,1 % das vazões encontradas na técnica convencional), onde nesta condição as partículas de fluido são impulsionadas por ar comprimido. Apesar de apresentar potencial na substituição da condição convencional por empregar uma quantidade de fluido bastante inferior, como apresentado em trabalhos desenvolvidos por Fragoso et al. (2016), Abrão et al. (2017) e Leppert (2018), sendo assim uma técnica mais sustentável e econômica, a condição MQL possui algumas limitações em processos de retificação, principalmente relacionadas à capacidade de refrigeração do sistema o que tem levado a obtenção de superfícies retificadas de pobre acabamento, como também elevação de forças de corte e maiores temperaturas da peça.

Hadad e Sharbati (2016) e Huang et al. (2016) verificaram que em comparação com a condição convencional a técnica MQL apresentou os maiores valores de temperatura desenvolvidas no processo em razão do menor consumo de fluido de corte durante a retificação. Em estudos desenvolvidos por Garcia et al. (2020), ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho no aço endurecido AISI 52100 foram realizados e os resultados obtidos mostraram que a condição de lubri-refrigeração MQL proporcionou maiores desvios de circularidade, em comparação com a técnica convencional, como consequência de maiores dilatações térmicas do componente usinado a que eles atribuíram às maiores temperaturas desenvolvidas na zona de corte. Isso ocorreu por causa da menor capacidade de refrigeração da condição MQL em relação à técnica convencional.

A fim de melhorar a capacidade de refrigeração da técnica MQL, várias pesquisas vêm sendo desenvolvidas, com destaque para uma das mais promissoras que tem sido o emprego de fluidos híbridos. O surgimento destes fluidos ocasionou a atualização da classificação dos fluidos de corte, que consiste em adicionar ao fluido base partículas sólidas, contribuindo assim para melhoria das propriedades do mesmo. Algumas das principais partículas sólidas que tem sido adicionadas ao fluido de corte em várias pesquisas em usinagem são o óxido de alumínio (Al_2O_3), dissulfeto de molibdênio (MoS_2), grafeno, grafite, nanotubos de carbono (MAO et al., 2013; GAO et al., 2018; MOLAIE, ZAHEDI e AKBARI, 2018).

ManojKumar e Ghosh (2014) realizaram ensaios testando nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) adicionadas ao fluido de corte aplicado via MQL durante a retificação do aço endurecido AISI 52100 com rebolo de óxido de alumínio (A60K5V8). Dentre todas as condições de lubri-refrigeração empregadas (convencional, MQL e MQL+MWCNT), os autores relataram que as menores forças de corte foram registradas para ensaios utilizando fluido contendo as partículas de MWCNT, que eles justificaram pela superior capacidade de lubrificação destes nanofluidos, além da maior eficiência em refrigeração do sistema proporcionada pela elevada condutividade térmica dos nanotubos de carbono. A condição MQL+MWCNT também foi a responsável pela maior relação G por garantir a manutenção das arestas de corte afiadas das partículas abrasivas pela excelente lubrificação do sistema. Em relação à rugosidade dos componentes retificados, a condição convencional resultou nos menores valores, seguido de perto pela condição MQL+MWCNT, possivelmente explicado pela maior eficiência em remoção de cavacos na zona de corte.

Ni, Yang e Wu (2018) verificaram a influência da dispersão de grafeno no fluido de corte em termos da relação G e forças de corte obtidas após o processo de retificação do aço AISI 1045. Mediante a análise dos resultados de relação G, os autores observaram um aumento de aproximadamente 28 % desta variável ao empregarem o grafeno em comparação com o fluido sem a adição destas partículas, justificado pelos autores pelo tribo-filme formado na interface rebolo/peça que possibilita melhor lubrificação do sistema e, consequentemente, menor taxa de desgaste do rebolo. A melhoria das propriedades do fluido de corte por meio da adição de partículas de grafeno também foi encontrada na medição dos esforços de corte.

Paiva et al. (2020) desenvolveram ensaios de retificação com rebolo de óxido de alumínio do aço endurecido SAE 52100 empregando diferentes condições de lubri-refrigeração, dentre elas a utilização de fluido com a dispersão de grafeno multicamadas, e observaram que a presença do grafeno, no geral, resultou em menores valores de rugosidade e potência elétrica, como também melhor textura superficial, em comparação com as peças usinadas com o fluido sem adição das partículas de grafeno. A justificativa apontada está relacionada ao tribo-filme formado na interface rebolo/peça e que melhora as condições tribológicas e resulta em superfícies de melhora qualidade.

Neste contexto, esta pesquisa tem como objetivo o estudo da retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido SAE 52100 empregando diferentes tipos de rebolos abrasivos e diferentes partículas sólidas dispersas ao fluido de corte, tentando encontrar as melhores condições de retificação para este material. Para avaliar o desempenho dos rebolos e partículas sólidas foram investigados a integridade superficial da peça por meio da rugosidade, microdureza, análise microestrutural, análise das superfícies usinadas via MEV e desvios macrogeométricos (cilindricidade), como também por meio de variável do processo, a potência de retificação.

Esta tese de doutorado está dividida em seis capítulos:

- Capítulo I: introdução com contextualização relativa ao tema estudado nesta pesquisa e apresentar o objetivo central da tese;
- Capítulo II: abordagem dos principais assuntos necessários para entendimento teórico do tema proposto neste projeto, sendo estes o estudo da retificação cilíndrica externa, parâmetros de corte do processo, rebolos abrasivos, desafios encontrados na retificação, fluidos de corte: características, tipos, técnicas de aplicação e partículas sólidas adicionadas ao fluido de corte, e integridade superficial e sub-superficial de componentes retificados;

- Capítulo III: contempla todo o procedimento experimental adotado, incluindo os equipamentos, material da peça, ferramenta e características dos fluidos de corte, além de compreender os parâmetros de corte empregados, os instrumentos de medição e procedimento na realização das medições;
- Capítulo IV: apresentação dos resultados obtidos por meio de gráficos e tabelas com discussões necessárias para a explicação dos fatos encontrados;
- Capítulo V: neste capítulo são apresentadas as principais conclusões obtidas do capítulo anterior e também as sugestões para trabalhos futuros.

Ao final da tese estão apresentadas as referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO II

Revisão bibliográfica

Neste capítulo serão apresentados os assuntos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, sendo estes o processo de retificação cilíndrica e as variáveis de corte do processo, características dos rebolos abrasivos e formação de cavaco pela ação das partículas abrasivas, considerações relativas à operação de dressagem, condições de lubri-refrigeração (tipo de fluido, técnica de aplicação, partículas sólidas adicionadas ao fluido de corte), desafios na retificação de aço endurecido, e análise e técnicas de avaliação da qualidade e integridade superficial de componentes retificados, além da potência gerada durante a retificação.

2.1 Processo de retificação cilíndrica

Dentre os processos de usinagem, a retificação destaca-se por conferir aos componentes usinados ótimo acabamento ($R_a < 1{,}6$ μm) aliado a tolerâncias dimensionais estreitas (IT6 a IT3), sendo neste sentido, frequentemente empregada ao fim da cadeia produtiva. Neste processo há o emprego de um rebolo, composto por partículas abrasivas de elevada dureza (em relação ao aço rápido) e não metálicas, com orientação irregular, diversas arestas de corte e com geometria não definida (MALKIN e GUO, 2008). Existem diversos tipos de retificação, sendo sua diferenciação feita através da forma da peça e sua interação com o rebolo (MALKIN e GUO, 2008), onde os quatro processos básicos de retificação com rebolo reto são a retificação plana, cilíndrica, plana de face e cilíndrica de face, conforme indicado na Figura 2.1.

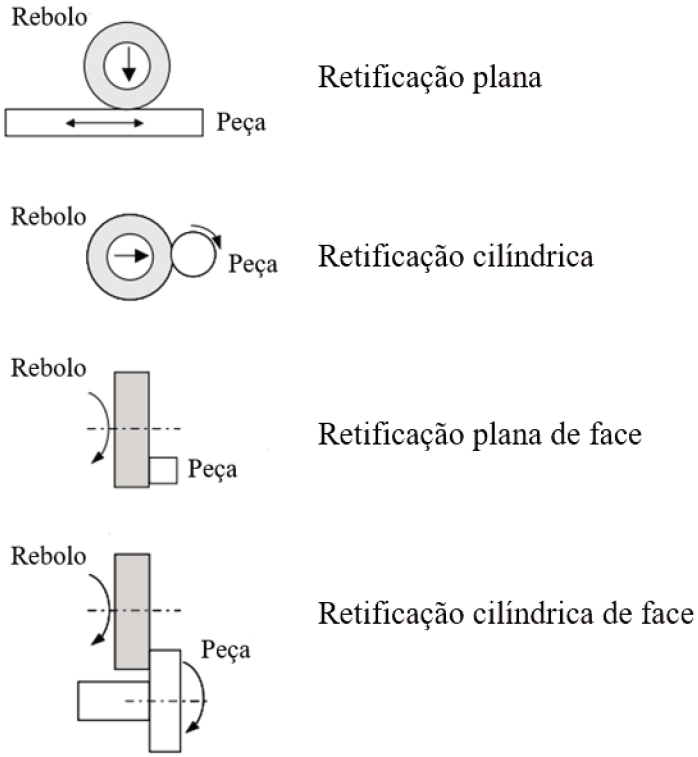


Figura 2.1 - Quatro processos básicos de retificação utilizando rebolo reto (Adaptado de MARINESCU et al., 2007).

Abordando apenas a retificação cilíndrica (foco desta pesquisa), esta pode ser dividida em interna e externa, sendo suas principais características apresentadas a seguir:

- *Retificação cilíndrica interna*: nestes processos de retificação o diâmetro interno da peça apresenta dimensão maior que o rebolo, e assim, o rebolo atuará removendo material internamente à cavidade do componente, onde tanto o rebolo e a peça rotacionam durante o processo. A precisão dos processos de retificação cilíndrica interna é composta por inúmeras tolerâncias (cilindricidade, circularidade, dentre outras), sendo influenciada diretamente pela forma de remoção nas extremidades do furo do componente usinado (ROWE, 2014). Principalmente devido ao fato do rebolo ficar com grande comprimento em balanço à medida que se distancia do início da cavidade, há oscilação das forças de corte, e consequentemente, tornando os parâmetros do processo instáveis durante toda a etapa de remoção de material, afetando negativamente a precisão da operação (ROWE, 2014; AKINTSEVA e PEREVERZEV, 2017). Ainda com relação às tolerâncias, a espessura da parede do furo a ser usinado é uma

característica importante, pois em furos com parede de pequena espessura, após a deformação elástica, os desvios de circularidade não são mais atingidos (KLOCKE, 2009). Nestes processos, muitas vezes o rebolo apresenta pequenas dimensões ou a dimensão do rebolo é próxima do furo a ser retificado, e desta forma, um dos desafios encontrados é garantir que o fluido atinja a região de corte e atue refrigerando e lubrificando o sistema, além da dificuldade na saída dos cavacos removidos da peça (NALDONY et al., 2015; KLOCKE, 2009). Sendo assim, os processos de retificação cilíndrica interna são mais recomendados para condições com baixa taxa de remoção de material, em aplicações como de furos de pequeno diâmetro, superfícies internas complexas e pistas internas de rolamentos (KLOCKE, 2009; SHAW, 1996).

- *Retificação cilíndrica externa:* neste processo em geral a peça tem geometria cinlíndrica e também rotaciona. Existem diversas variações da retificação cilíndrica externa, com destaque para a de mergulho, onde a ferramenta penetra sobre a peça com uma velocidade de avanço, e é empregado na fabricação de componentes de rolamentos e retificação de eixo virabrequim, dentre outros (KLOCKE, 2009). Devido à grande empregabilidade desse processo nos inúmeros setores industriais, principalmente no automotivo, diversos autores vêm desenvolvendo pesquisas buscando melhoria no compreendimento das variáveis que influenciam na integridade superficial e sub-superficial de componentes submetidos a esta variável da retificação cilíndrica externa, como em trabalhos realizados por PATEL, GOYAL e PABLA (2018) e BIANCHI et al. (2017). As próximas seções deste capítulo serão apresentadas pela visão da retificação cilíndrica de mergulho por ser o foco deste trabalho.

O estudo das condições de corte e de lubri-refrigeração mais favoráveis para a realização dos processos de usinagem é essencial, em especial para a retificação, que embora apresente superioridade em determinados aspectos em comparação com outros processos de usinagem convencional com ferramenta de geometria definida, principalmente no que diz respeito à qualidade superficial e dimensional proporcionado aos componentes fabricados, há elevada geração de calor na zona de corte (processo com elevada energia específica) ao usar rebolos convencionais. Além disso, devido às peculiaridades encontradas neste processo de usinagem por abrasão (associados à baixa

condutividade térmica dos abrasivos convencionais e pequenas espessuras de material removido), existem riscos de ocorrência de danos de origem térmica na peça, prejudicando assim na utilização da mesma (MALKIN e GUO, 2008). Dai a importância em desenvolver pesquisas que visem reduzir ou eliminar as possibilidades de danos de origem térmica em componentes retificados, dentre as quais incluem-se a aplicação de fluidos híbridos.

2.1.1 Formação do cavaco e ação das partículas abrasivas

Nos processos de retificação a remoção de material ocorre pela interação das partículas abrasivas do rebolo com a peça, e a quantidade total de cavaco produzido é a soma de cada parcela retirada por abrasivo. Pelo fato dos abrasivos possuírem geometria irregular e estarem dispostos não uniformente distribuídos no rebolo, a quantidade de material removido por partícula será diferente, conforme apresentado na Figura 2.2. Devido a algumas características dos rebolos empregados na retificação, múltiplas arestas de corte dos abrasivos e suas pequenas dimensões, existe certa dificuldade neste entendimento, principalmente quando comparada aos processos de usinagem com geometria definida da aresta de corte, na qual apenas uma aresta de corte atua na remoção de material. Desta forma, é indispensável o entendimento da formação de cavaco em retificação para melhoria e otimização do processo como um todo (KLOCKE, 2009; MARINESCU et al., 2016). A partir das componentes das forças normal e tangencial originadas do contato rebolo/peça, os abrasivos penetram no material da peça, iniciando assim a remoção de material. Devido a principalmente a geometria não uniforme dos abrasivos e as suas diferentes alturas em relação a superfície da peça a usinada, algumas partículas podem apenas atritar sem deformar ou remover material, resultando em apenas desgaste do rebolo, enquanto outras podem causar a deformação da peça (conhecido como "*ploughing*"), e outras além de deformar podem formar cavaco de fato. Atritar, deformar elasticamente e plasticamente e o corte do material são as três etapas necessárias para a usinagem de fato do componente pela retificação, sendo influenciadas diretamente pela profundidade de penetração do abrasivo (ROWE, 2014).

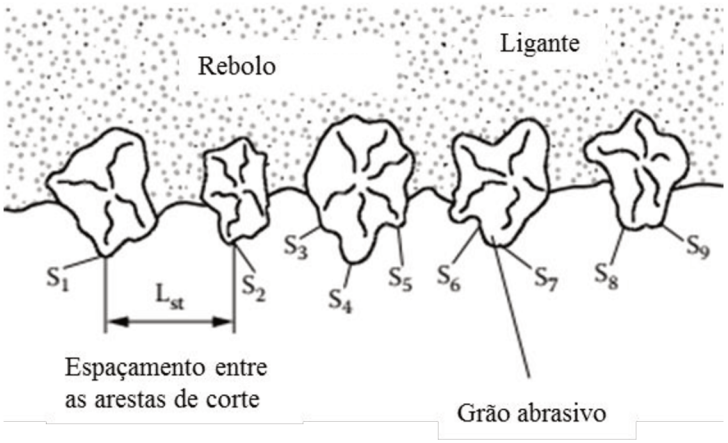


Figura 2.2 - Ação das partículas abrasivas sobre a superfície da peça (Adaptado de KOENIG e KLOCKE, 1996 apud MARINESCU et al., 2016).

Na Figura 2.3 são apresentadas as etapas (I, II e III) necessárias para formação e remoção de material sob a forma de cavaco durante os processos de retificação. Conforme pode ser observado, inicialmente (I) a partícula abrasiva incide sobre a superfície da peça, onde em decorrência da pequena penetração do abrasivo, ocorre apenas atrito deste com o material e, consequentemente, são evidenciadas somente deformações elásticas. À medida que a profundidade atingida pela partícula aumenta, as deformações elásticas se intensificam dando início às deformações plásticas no material, onde existe deslocamento de material, sendo representado na Figura 2.3 pela etapa II. Esse comportamento ocorre até o abrasivo atingir uma profundidade crítica, representado por T_{μ}, na qual se verifica o cisalhamento do material, e o mesmo é removido sob a forma de cavaco (III). Apesar da Figura 2.3 representar as etapas de remoção de material para materiais dúcteis, o comportamento encontrado durante a retificação de materiais frágeis é similar, diferenciando-se apenas quanto ao tipo de cavaco formado. Em decorrência destes materiais apresentarem baixa ductilidade, as etapas de deformação elástica e plástica são pouco evidentes, sendo formado cavacos do tipo segmentado pela fratura do material logo que as partículas atuam sobre a superfície usinada (MARINESCU et al., 2016).

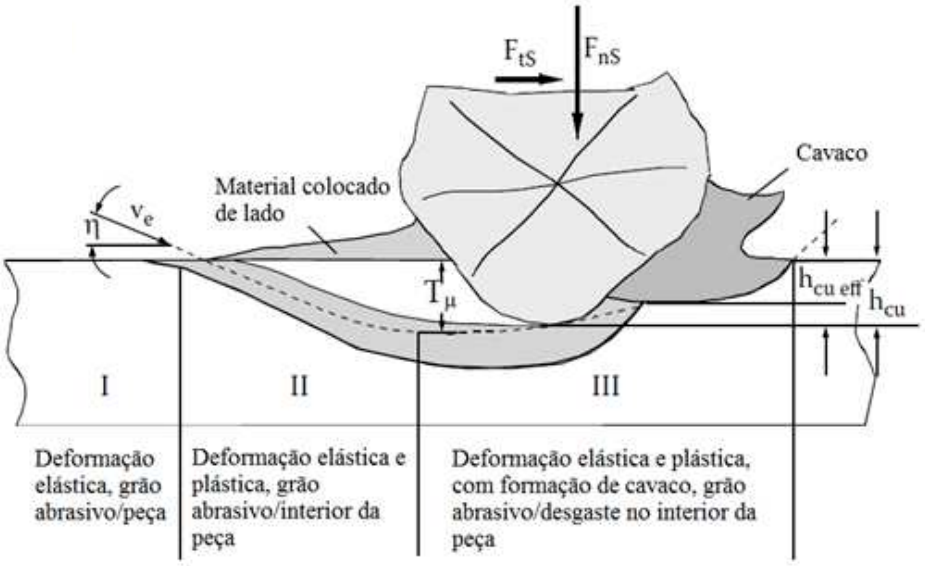


Figura 2.3 - Etapas de deformação elástica e plástica na remoção de material (Adaptado de MARINESCU et al., 2007).

2.2 Parâmetros do processo

Nesta seção serão apresentados os principais parâmetros de corte que regem o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, bem como as definições, faixa valores usualmente empregados e influência destes sobre a integridade superficial e sub-superficial de componentes retificados. Na Figura 2.4 estão indicadas alguns destes parâmetros, bem como algumas variáveis para o processo de retificação em questão.

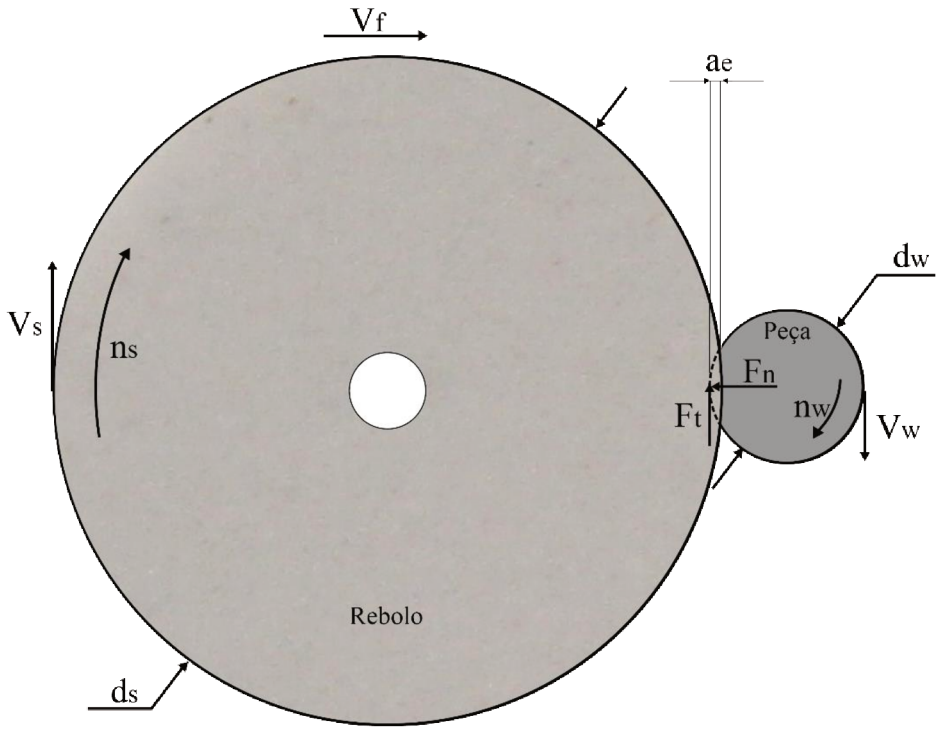


Figura 2.4 - Variáveis do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

Onde d_s, d_w, n_s, n_w, a_e, V_s, V_w, V_f, F_n e F_t são respectivamente o diâmetro do rebolo, diâmetro da peça, rotação do rebolo, rotação da peça, penetração de trabalho, velocidade tangencial do rebolo, velocidade periférica da peça, velocidade de avanço do rebolo, componentes da força normal e força tangencial.

2.2.1 Velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte (m/s), também conhecida como a velocidade periférica do rebolo abrasivo, é um parâmetro influenciado pelo diâmetro (d_s) e rotação (n_s) da ferramenta, conforme demonstrado na Equação 2.1.

$$V_s = \frac{\pi . d_s . n_s}{60000} \tag{2.1}$$

Usualmente os valores empregados de velocidade de corte se encontram entre 30 m/s e 43 m/s em processos realizados com rebolo composto por abrasivos convencionais (entretanto em determinadas condições, o limite inferior observado é de

10 m/s), sendo que para os superabrasivos (CBN e diamante) estes valores são superiores a 45 m/s (MARINESCU et al., 2016). Em comparação às outras velocidades encontradas na retificação cilíndrica externa de mergulho (V_w e V_f), a velocidade de corte é a que apresenta maior magnitude (MARINESCU et al., 2004). No geral, o aumento da velocidade de corte proporciona componentes com melhor acabamento (menores valores de rugosidade) em decorrência da redução da espessura equivalente de corte (h_{eq}), e desta forma, da tensão existente entre as partículas abrasivas atuantes no processo (MARINESCU et al., 2016; ROWE, 2014). Entretanto, elevadas velocidades de corte resultam no aumento das temperaturas desenvolvidas na zona de corte, e consequentemente, elevando os riscos de danos de origem térmica (UHLMANN et al., 2016). Huang et al. (2017) realizaram a retificação do aço endurecido para molde AISI SKD11 (62 HRc) e os valores empregados de velocidade de corte foram de 20,7 m/s, 24,5 m/s e 28,3 m/s. Neslušan et al. (2017) utilizaram 25 m/s em ensaios de retificação do aço endurecido 18NiCrMo14-6. Já Huang, Ren e Jiang et al. (2016) na retificação do aço endurecido AISI 5140 com rebolo de CBN empregaram V_s = 45 m/s. Madopothula, Nimmagadda e Lakshmanan (2017), na retificação do aço endurecido AISI 52100, utilizaram velocidade de corte de 25 m/s. Na retificação do aço endurecido AISI H13 (55 ± 2 HRc) com rebolo de óxido de alumínio, Awale et al. (2018) empregaram velocidade de corte de 39,42 m/s.

2.2.2 Velocidade da peça (V_w)

A variável V_w (m/s) representa a velocidade periférica da peça, sendo seu cálculo dado pela Equação 2.2, onde, conforme pode ser observado, esta relacionada ao diâmetro (d_w) e a rotação (n_w) da peça.

$$V_w = \frac{\pi . d_w . n_w}{60000} \tag{2.2}$$

Normalmente a velocidade da peça se encontra na faixa de 0,25 m/s a 1,25 m/s. Diferentemente do observado para a velocidade de corte, o aumento da velocidade da peça ocasiona no incremento da espessura equivalente de corte (h_{eq}), e conforme justificado por Rowe (2014), na elevação da taxa de remoção de material, espessura dos cavacos removidos, e assim, na tensão existente entre os abrasivos da ferramenta de corte

e forças de corte do processo. Awale et al. (2018) empregaram velocidade da peça de 0,17 m/s na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido AISI H13 (55 ± 2 HRc) com rebolo de óxido de alumínio. Na retificação de aço cromo-molibdênio, Hosokawa et al. (2016) empregaram dois valores de velocidade da peça: 0,37 m/s e 0,50 m/s. Ruzzi et al. (2016) utilizaram uma velocidade da peça de 0,58 m/s na retificação do aço AISI 4340 com rebolo de CBN, enquanto Jiang et al. (2013) empregaram o valor de 0,3123 m/s na retificação do aço DIN C45. Em trabalho desenvolvido por Mello et al. (2018) o valor de V_w foi de 0,67 m/s na retificação do aço SAE 4340. Thanedar, Dongre e Joshi (2019) empregaram os valores de 0,17 m/s e 0,57 m/s como velocidade da peça na retificação do aço 38MnVS6.

2.2.3 Velocidade de avanço (ou mergulho) (V_f)

A velocidade de avanço, ou também conhecida como velocidade de mergulho, é definida como sendo a velocidade na qual um rebolo incide sobre a peça. Por influenciar diretamente na taxa de remoção de material e desta forma na espessura equivalente de corte, o aumento da velocidade de avanço é responsável por prejudicar o acabamento dos componentes retificados (KLOCKE, 2009; MALKIN e GUO, 2008). No geral, os valores de velocidade de avanço estão entre 0,1 mm/min a 2,0 mm/min, sendo de 0,25 mm/min a 1 mm/min a faixa mais empregada em diversos estudos realizados (RUZZI et al., 2016; BIANCHI et al., 2017; SATO et al., 2018). Belentani et al. (2013), na retificação cilíndrica de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido empregaram velocidade de mergulho na faixa de 0,25 mm/min a 0,75 mm/min, sendo que em trabalho desenvolvido Anjos et al. (2016) os autores também utilizaram as mesmas velocidades de avanço na retificação do aço VP 50 envelhecido (40 HRc - 42 HRc). Mello et al. (2018) utilizaram a mesma faixa de 0,25 mm/min a 0,75 mm/min de velocidade de avanço na retificação do aço ABNT 4340. Em ensaios de retificação do aço AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio, Silva et al. (2018) empregaram velocidade de avanço de 0,60 mm/min. Thanedar, Dongre e Joshi (2019) empregaram velocidade de mergulho de 0,09 mm/min e 0,3 mm/min na retificação do aço 38MnVS6.

2.2.4 Penetração de trabalho (a_e)

Esta variável é definida como sendo a profundidade de penetração de um rebolo sobre o material a ser usinado mensurada no plano de trabalho, sendo que para a retificação cilíndrica corresponde a magnitude de penetração do rebolo com uma velocidade de avanço durante uma revolução da peça (MALKIN e GUO, 2008). A penetração de trabalho é influenciada pelo diâmetro (d_w) e velocidade (V_w) da peça e velocidade de avanço (V_f), conforme Equação 2.3, apresentada por Rowe (2014):

$$a_e = \frac{\pi . d_w . V_f}{V_w} \tag{2.3}$$

Segundo Malkin e Guo (2008), geralmente para a retificação cilíndrica, estes valores estão na faixa 2 μm a 20 μm, enquanto que para a retificação plana são empregadas de 10 μm a 50 μm. Marinescu et al. (2016) destacam que a penetração de trabalho real será sempre menor que a selecionada devido a deflexões da máquina ferramenta e do sistema. O aumento da penetração de trabalho influencia negativamente o acabamento superficial do componente por elevar a quantidade de partículas atuantes sobre a superfície da peça, e consequentemente, a taxa de remoção de material e espessura de cavaco gerado no processo (ROWE, 2014). Os valores de penetração de trabalho utilizados por Awale et al. (2018) na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido AISI H13 (55 ± 2 HRc) com rebolo de óxido de alumínio variaram entre 6 μm e 24 μm. Oliveira (2011) utilizou 0,1 mm como penetração de trabalho na retificação do aço SAE 4340 temperado e revenido. Lezanski e Pilacinska (2016) empregaram a_e = 0,15 mm na retificação de mergulho com rebolo de óxido de alumínio do aço endurecido 38HMJ (50 HRc). Na retificação do aço SAE 4340 com rebolo de óxido de alumínio Mello et al. (2018) também empregaram penetração de trabalho de 0,1 mm.

2.2.5 Profundidade de corte (a_p)

A profundidade de corte está relacionada à largura de penetração do rebolo sobre a superfície retificada, sendo observada perpendicularmente ao plano de trabalho (SILVA, 2016). Desta forma, em ensaios que a ferramenta apresenta largura superior à peça e o rebolo irá remover a camada de material em apenas um passe (conhecido como ensaios

"em cheio"), a profundidade de corte é dada pela largura do componente. Os valores de a_p usualmente empregados nos processos de retificação estão entre 1/4 a 4/5 da largura do rebolo (MACHADO et al., 2009).

2.2.6 Taxa de remoção de material (Q_w)

A taxa de remoção de material representa a quantidade de material que está sendo retirado da peça em função do tempo (KLOCKE, 2009). Segundo Marinescu et al. (2004) e Malkin e Guo (2008), a taxa de remoção de material (mm³/min), para o processo de retificação cilíndrica, é determinada levando-se em consideração a largura de retificação (b_w), diâmetro da peça (d_w) e a velocidade de avanço (V_f), conforme indicado na Equação 2.4.

$$Q_w = b_w \,.\, \pi \,.\, d_w \,.\, V_f \tag{2.4}$$

Malkin e Guo (2008) complementam que o aumento da taxa de remoção de material ocasiona no incremento da espessura equivalente de corte, e desta forma, influencia negativamente o acabamento da peça. Rowe (2009) ainda destaca que a elevação do parâmetro Q_w atua elevando a parcela de material removido por partícula abrasiva, e consequentemente, nas forças de corte por abrasivo, facilitando que os abrasivos se desprendam do rebolo abrasivo.

De acordo com Marinescu et al. (2016), a taxa de remoção específica (mm³) é dada pelo quociente entre a taxa de remoção de material (Q_w) e a largura de retificação (b_w). O incremento da taxa de remoção específica resulta no aumento da energia empregada na formação de cavacos.

2.2.7 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

A espessura equivalente de corte corresponde à espessura da camada de material da peça que é removida em uma volta completa pelo rebolo abrasivo (MARINESCU et al., 2016). Na retificação plana o seu cálculo considera apenas os parâmetros a_e, V_w e V_s, para a retificação cilíndrica a variável h_{eq} é influenciada pelo diâmetro da peça (d_w), velocidade de avanço (V_f) e velocidade de corte (V_s), conforme demonstrado na Equação 2.5 (GRAF, 2010 apud ANJOS, 2015):

$$h_{eq} = \frac{\pi . d_w . V_f}{V_s} = \frac{Q_w'}{V_s} \quad (2.5)$$

O aumento na taxa de remoção de material (dado pelo aumento do diâmetro da peça ou da velocidade de avanço) ou redução da velocidade de corte acarretam no aumento da espessura equivalente de corte resultando no incremento da tensão existente entre os abrasivos, elevando as forças de corte e temperatura desenvolvidas no processo, além de prejudicar o acabamento (rugosidade e textura superficial) dos componentes usinados e redução da vida do rebolo (ROWE, 2014; SOUZA, 2016). No trabalho experimental desenvolvido por Souza et al. (2004), foi observado uma espessura equivalente de corte de 0,025 μm na retificação cilíndrica do aço VC 131 temperado (60 HRc). Na retificação cilíndrica externa de mergulho do aço VP 50 envelhecido, Anjos et al. (2016) empregaram três valores de h_{eq}: 0,0327 μm, 0,0654 μm e 0,0981 μm.

2.2.8 Relação entre a velocidade do rebolo e da peça (q_s)

Este parâmetro é definido como o índice que relaciona a velocidade de corte (velocidade periférica do rebolo) com a velocidade da peça. Normalmente, esta relação se encontra de 5 a 100 para os processos de retificação cilíndrica (MALKIN e GUO, 2008). O cálculo da relação entre a velocidade do rebolo e da peça é dado pela Equação 2.6.

$$q_S = \frac{V_s}{V_w} = \frac{n_s . d_s}{n_w . d_w} \quad (2.6)$$

Lezanski e Pilacinska (2016) utilizaram três valores de q_s, sendo eles 60, 100 e 400, na retificação cilíndrica com rebolo de óxido de alumínio do aço endurecido 38HMJ (50 HRc). Em trabalho de Choi et al. (2007) estes valores situaram-se na faixa de 65 a 85 para a retificação dos aços SAE 4140 e 8620, enquanto que em estudo realizado por Kwak et al. (2005) os valores empregados foram de 126, 150 e 185, em ensaios realizados com o aço cromo-molibdênio SCM440.

2.2.9 Relação G

De acordo com Marinescu et al. (2004), a relação G representa a relação entre o volume de material removido no processo (Z_w) pelo volume de desgaste do rebolo abrasivo (Z_s), como apresentado na Equação 2.7.

$$G = \frac{Z_w}{Z_s} \tag{2.7}$$

Elevados valores da relação G (baixo desgaste do rebolo) significa que não há liberação dos grãos gastos e o rebolo perde agressividade, enquanto que baixos valores desta relação indicam que ocorre auto-afiação do rebolo e que ele permanece agressivo. Sendo assim, por exemplo, uma relação G=1 sinaliza que a partícula abrasiva não é suficientemente dura para realização da usinagem. Já elevados valores de relação G, como G = 5 000, podem sugerir que os abrasivos desgastados não estão conseguindo se desprender do rebolo ou ainda estão envoltos por cavacos alojados nos poros do rebolo, o que resulta em não remoção eficiente de material, podendo apenas causar deformação plástica na peça, implicando no aumento das forças de usinagem, vibrações no sistema e prejudicando o acabamento do componente (ROWE, 2014). Diversas são as variáveis que podem influenciar na taxa de desgaste do rebolo e, consequentemente, na relação G do processo, sendo observado por Ruzzi et al. (2016) e Alves et al. (2017) que o aumento da velocidade de mergulho proporciona aumento do desgaste diametral do rebolo, enquanto que Wang et al. (2016), Bianchi et al. (2018), Rodriguez et al. (2019) e Lopes et al. (2019) destacam a importância da correta seleção da condição de lubri-refrigeração para aumento da eficiência do processo.

2.2.10 Diâmetro equivalente (d_e)

O diâmetro equivalente (d_e) é um parâmetro relacionado à medida de conformidade entre o rebolo abrasivo e a peça, onde elevados valores de d_e indicam grande conformidade (ROWE, 2014). O cálculo do diâmetro equivalente é dado pela Equação 2.8 (MALKIN e GUO, 2008; KLOCKE, 2009; ROWE, 2014), em que d_w representa o diâmetro da peça enquanto d_s o do rebolo. O sinal positivo na equação 2.8 é empregado para a retificação externa e o negativo para a interna.

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm (\frac{d_s}{d_w})} \quad (2.8)$$

Para o caso da retificação cilíndrica externa, o valor do diâmetro equivalente é baixo devido à baixa conformidade para este processo pois em geral o diâmetro do rebolo é maior que o da peça (MORRIS, 2011; ROWE, 2014). Rowe (2014) destaca ainda que a substituição do diâmetro do rebolo pelo diâmetro equivalente reduz a quantidade de parâmetros fundamentais para entendimento de diversos processos de retificação.

2.2.11 Comprimento de contato rebolo/peça (l_c)

O comprimento de contato rebolo/peça (l_c) é definido como o arco de contato do rebolo com o componente durante a realização do processo de retificação. Negligenciando as deformações elásticas existentes entre o rebolo e a peça, Marinescu et al. (2016) apresentam o cálculo teórico deste parâmetro levando em consideração a penetração de trabalho (a_e) e o diâmetro equivalente (d_e), conforme indicado na Equação 2.9.

$$l_c = \sqrt{a_e \, . \, d_e} \quad (2.9)$$

Malkin e Guo (2008) chamam atenção para o fato de que devido às curvaturas opostas da peça e do rebolo, ou seja, à baixa conformidade sinalizada pelo pequeno diâmetro equivalente observadas para a retificação cilíndrica externa, para estes processos a grandeza l_c é pequena. De acordo com Rowe (2014), o aumento da área de contato ferramenta/peça eleva a quantidade de partículas abrasivas atuantes durante a retificação, acarretando no aumento de potência e nas temperaturas produzidas na zona de corte. Por outro lado, um pequeno comprimento de contato facilita a fratura dos abrasivos, expondo novas arestas de corte.

2.2.12 Energia específica (u)

É a energia por unidade de material removido, ou seja, a potência necessária (P) para usinagem de determinada taxa de remoção de material (Q_w), conforme apresentado na Equação 2.10 dada em J/mm^3 (Malkin e Guo (2008)),

$$u = \frac{P}{Q_w} \tag{2.10}$$

Este parâmetro é comumente utilizado para comparar a eficiência de processos de usinagem. Segundo Marinescu et al. (2004), processos que apresentam elevada taxa de remoção de material, em geral operações de desbaste como torneamento e fresamento, podem apresentar energia específica baixa, próxima a 10 J/mm^3. Em contrapartida, este valor pode exceder 100 J/mm^3 em processos de acabamento como a retificação, sendo este gasto energético compensado pela excelente qualidade (baixos valores de rugosidade e de desvios dimensionais e geométricos) dos componentes usinados.

2.2.13 Forças de corte

As interações entre as partículas abrasivas e a peça nos processos de retificação resultam em esforços de corte, que podem ser divididos em força normal (F_n) e força tangencial (F_t), sendo que as componentes F_t e F_n são, respectivamente, a tangencial e a normal ao eixo do rebolo. Em operações de retificação de perfis não simétricos ou que apresentam avanço transversal, existe uma componente de força paralela ao eixo da ferramenta de corte conhecida com força axial (F_a) (MALKIN e GUO, 2008). A força total é a soma vetorial de todas as componentes. Marinescu et al. (2016) definem uma relação para o cálculo da força tangencial dada pelo quociente da potência (P) pela velocidade de corte (V_s) (Equação 2.11).

$$F_t = \frac{P}{V_s} \tag{2.11}$$

Já a força normal é relacionada à força tangencial por meio do coeficiente de retificação (μ), obtido por meio da Equação 2.12.

$$\mu = \frac{F_t}{F_n} \tag{2.12}$$

Normalmente, baixos valores do coeficiente de retificação, próximos a 0,2, são encontrados em processos com pequena taxa de remoção de material, enquanto que em

operações com grande quantidade de material removido esse valor pode atingir 0,8. Nos processos de retificação de aços, o parâmetro μ se encontra na faixa de 0,25 a 0,50 (MARINESCU et al., 2016).

Diversos fatores do sistema influenciam na força total de usinagem, onde a utilização de fluido de corte atua reduzindo a mesma. Em relação aos parâmetros de corte, conforme discutido nas outras seções deste tópico, qualquer alteração nas variáveis de entrada do processo que influenciem elevando a espessura equivalente de corte (h_{eq}), ocasionam o aumento dos esforços de corte necessários para realização do processo de retificação (ROWE, 2014).

2.2.14 Principais parâmetros de corte empregados na retificação cilíndrica

Existem diversos parâmetros que podem ser variados durante o processo de retificação, sendo essencial a correta seleção visando a manutenção da integridade superficial e sub-superficial dos componentes usinados. Na Tabela 1 estão agrupados alguns dos principais artigos referentes ao processo de retificação cilíndrica com os respectivos parâmetros de corte selecionados durante a realização dos ensaios experimentais.

Tabela 2.1 – Parâmetros de corte selecionados em diferentes pesquisas para o processo de retificação cilíndrica.

Referência	Material	Máquina	Rebolo abrasivo	Fluido de corte	a_e (mm)	V_s (m/s)	ω_w (rpm)	V_f (mm/min)
Bianchi et al. (2012)	Cilindros de alumina comercial	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	D 107 N 115 C50	MQL: fluido de corte Accu-Lube LB-1000 sem diluição; vazão de 100 mL/h e pressão de 8 bar; Convencional: óleo solúvel ME-I, com concentração de 5% em água e vazão de 22 L/min.	0,1	30	204	0,25 e 0,50
Alves et al. (2008)	Aço ABNT D6 (62 HRc)	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	CBN: 876-L360N3	Óleo emulsionável de base vegetal (DMS 3200 F-1) com concentração de 3,5% e vazão de 22,6 L/min; Fluido sintético (AGECOOL 939/B) com concentração de 3,5% e vazão de 22,6 L/min.	0,1	30	Velocidade periférica da peça: 1,24 m/s	0,25; 0,50; 1,00; 1,50; 2,00
Oliveira et al. (2011)	ABNT 4340 temperado e revenido (54 HRc)	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	CBN: SNB151Q12VR2	Convencional: óleo solúvel semi-sintético QUIMATIC ME-I com concentração de 2,5% e vazão de $2{,}83.10^{-4}$ m³/s; MQL: vazão de $2{,}7.10^{-8}$ m³/s e pressão de 6 bar.	0,1	30	204	0,5

Souza e Catai et al. (2004)	Aço VC 131 temperado (60 HRc)	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	38A46KVS e CBN (B151K150V17 M3)	Emulsão sintética 5% e óleo integral; pressões de 4 a 5,5 bar e vazões de 14,7 a 82 L/min.	0,1	33		1,5
Silva et al. (2007)	ABNT 4340 (60 HRc)	Retificação cilíndrica de mergulho	Al_2O_3 (38A60KV)	MQL: fluido de corte LB 1000 com vazão de 40 mL/h; Convencional: emulsão sintética 5% com vazão máxima de 8,4 L/min.	0,1	30	V_w = 20 m/min	1
Monici et al. (2006)		Retificação cilíndrica de mergulho	CBN	Emulsão sintética com concentração de 5%; Vazão: 14 L/min (bocal Webster) e 84 L/min (bocal convencional) Pressão: 0,392 Mpa (bocal convencional) e 0,549 Mpa (bocal Webster).	0,1	33		1,5
Anjos et al. (2016)	Aço VP 50 envelhecido (40-42 HRc)	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	Carbureto de silício verde (SiC), carbureto de silício preto com óxido de alumínio branco (SiC+Al2O3) e óxido de alumínio branco (Al2O3), com grana 60, ligante vitrificado e densidade da estrutura 7.	Convencional: emulsão com 5% em água do óleo simisintético ROCOL 4847 Ultracut 370, com vazão de 16 L/min; MQL: óleo AccuLube LB 1000 com vazão de 120 mL/h e pressão de 6,374 bar.		30		0,25; 0,50; 0,75

Oikawa et al. (2011)	Cilindros de alumina comercial	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	D 107 C 115 C50	Convencional: emulsão de 5% em água do óleo semi sintético ROCOL 4847 Ultracut 370 com vazão de 22 L/min; MQL: com vazão de 100 mL/h e pressão de 8 bar.	0,1	30	204	0,75; 1; 1,25
Fernandes et al. (2018)	Ferro fundido nodular GGG-70 (270 HB)	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	CBN: SNB151.GS Q12 VR2 e SNB151.GL Q12 VR2	Convencional: fluido de corte semi sintético com concentração de 2,5% (QUIMATIC ME-I) com vazão de 17 L/min.	0,1	32	Velocidade periférica da peça: 0,39 (inicial) e 0,27 m/s (final)	0,5; 1,0; 1,5
Hosokawa et al. (2016)	Aço cromo-molibdênio (ISO34CrMo4)	OKUMA GPO 10-30 Retificação cilíndrica de mergulho	CBN: CB120M180VN1	Convencional: emulsão em água com vazão de 10 L/min Bocal: vazão de 0,7 L/min		45	100	6,0 µm/rev
Tawakoli et al. (2012)	Aço 100Cr6	EMAG Salach Maschinenfabrik GmbH company, model "HG 204 S" Retificação cilíndrica de mergulho	B126 C125	Convencional e a seco		60	V_w = 0,33 m/s	

Lezanski e Pilacinska (2016)	Aço endurecido 38HMJ (50 HRc)	Retificadora cilíndrica JOTES SWF-25	38A80KVBE		0,15	40		
Ruzzi et al. (2016)	Aço AISI 4340 (54 ± 2 HRc)	Retificadora cilíndrica de mergulho CNC	CBN: SNB151Q12V R2	Convencional: fluido de corte de base vegetal semi sintético com concentração de 2,5% MQL: fluido de corte 100% vegetal, com vazão de 2,7. 10^{-8} m^3/s e pressão de 6 bar.	1,2. 10^{-3}; 2,5 10^{-3}; 3,7 10^{-3} mm/rev	30	V_w = 0,58 m/s	0,25; 0,50; 0,75
Jiang et al. (2013)	Aço C45	Retificadora cilíndrica STUDER K-C33 CNC				35	V_w = 0,3123 m/s	0,33
Choi et al. (2007)	Aço 4140 e 8620	G20-50CNC	32A-60-K-VBE 94A-80-M-V18		0,012; 0,015; 0,018	28; 30,5; 33	108; 114; 127	0,007; 0,014; 0,017; 0,019; 0,027
Achyutha e Radhakrishnan (1985)	Aço EN 19 C	Retificação cilíndrica de mergulho	A 463 – L5 – V10	Convencional: emulsão (fluido de corte Tellus 27)	0,1	n_s = 850; 1050; 1250 rpm	100	3,75; 5,5; 7,5 μm/rev
Lee e Kim (2001)	Aço SCM4	Retificação cilíndrica de mergulho	WA60K7V			n_s = 1400-1700 rpm	20-50	2,5-30 μm/rev 5-30 μm/min

Silva et al. (2013)	Aço AISI 4340 (52 HRc)	Retificação cilíndrica de mergulho	FE 38A60KV	MQL: fluido de corte LB 1000 com vazões de 20, 40, 60 e 80 mL/h; velocidade do ar comprimido: 26,40 e 19,80 m/s; Convencional: solução sintética com 5% de concentração com vazão de 11 L/min		33	V_w =20 m/min	1 mm/min
Choi et al. (2002)	Aço SCM21 (58-60 HRc)	Retificação cilíndrica de mergulho	WA: 80I/J7V CBN: B80H150V3	Emulsão (4%)	5-30 µm	30 e 35	V_w = 18 m/min	0,05 mm/min
Kwak et al. (2006)	SCM440 (aço cromo-molibdênio)	Retificação cilíndrica externa	WA120KmV	Fluido de corte miscível em água	20; 25; 30; 35 µm	1800 rpm	52; 64; 76	
Oliveira et al. (2012)	ABNT 4340 temperado e revenido (54 ± 2 HRc)	Retificação cilíndrica externa de mergulho	CBN: SNB151Q12VR2	Convencional: óleo solúvel semi-sintético QUIMATIC ME-I com concentração de 2,5%; MQL: vazão de $2,7.10^{-8}$ m^3/s e pressão de 6 bar; fluido 100% vegetal, biodegradável; MQL+sistema de limpeza: velocidade de 470 m/s; vazão do ar comprimido do sistema de limpeza de $8x10^{-3}$ m^3/s; pressão do sistema de limpeza de $7x10^5$ Pa.	1.2×10^{-3}; 2.5×10^{-3}; 3.7×10^{-3} mm/rev	30	V_w = 0,58 m/s	0,25; 0,50; 0,75

Alves et al. (2007)	Aço ABNT D6 temperado e revenido com dureza de 62 HRc.	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	CBN: 876-L360N3	Emulsão de base vegetal, especificação DMS 3200 F-1, na concentração de 3,5%, com pH de 9; Fluido sintético, especificação AGECOOL 939/B, na concentração de 5%	0,1	30	V_w =1,24 m/s	0,25; 0,50; 1,0; 1,5; 2,0
Belantani et al. (2013)	ABNT 4340 temperado e revenido (54 ± 2 HRc)	RUAP 515 H Retificação cilíndrica de mergulho	CBN: SNB151Q12VR2	Convencional: óleo solúvel semi-sintético, concentração de 2,5%, vazão de $2,83x10^{-4}$ m^3/s; MQL e MQL+água: 1:1, 1:3, 1:5; pressão do ar de $6x10^5$ Pa; vazão do fluido de $2,7x10^{-8}$ m^3/s; Sistema de limpeza: vazão de $8x10^{-3}$ m^3/s e pressão de 7 bar.		30		0,25; 0,50; 0,75
Hassui e Diniz (2003)	Aço AISI 52100 temperado e revenido (58 HRc)	Retificação cilíndrica de mergulho	FE38A80KVS		0,3 mm de diâmetro por peça	30	V_w = 7,25 e 21,75 m/min	

Alves et al. (2009)	Aço SAE 52100 temperado e revenido (60 HRc)	RUAP 515 H-CNC Retificação cilíndrica de mergulho	SNB151Q12VR2	Convencional: vazão de 13 L/min; MQL: velocidade do fluido de corte de 30 m/s; vazão de ar 30 m^3/h; vazão do óleo de 48, 60 e 80 mL/h.	8 (µm)	31,4		1
Nathan et al. (1999)	Aço endurecido C60	Retificação cilíndrica de mergulho	A463–K5–V10	A seco		28,8 m/s	60 a 200	3 a 15 µm/s

2.3 Comentários Gerais sobre Rebolos

Nos processos de retificação a ferramenta de corte é conhecida como rebolo, sendo composta por milhares de partículas de geometria não definida, elevada dureza, múltiplas arestas de corte, não metálicas e que apresentam orientação irregular (MARINESCU et al., 2016). Nesta seção serão apresentadas as principais propriedades e características dos rebolos abrasivos convencionais, além de abordar o desgaste destas ferramentas, bem como a operação de dressagem.

2.3.1 Comentários sobre abrasivos para retificação cilíndrica externa

As partículas abrasivas que formam o rebolo possuem como características elevada dureza, apresentam geometria não definida e múltiplas arestas de corte, são não metálicas e possuem orientação irregular (MARINESCU et al., 2016). Os abrasivos apresentam diversas propriedades, entretanto, conforme destacado por Rowe (2014), as principais são a dureza, condutividade térmica e friabilidade. O autor salienta que a dureza apresenta maior relevância dentre as propriedades apresentadas já que a usinagem só ocorre eficientemente se a partícula possuir dureza superior ao material usinado. Além disso, é importante que o abrasivo consiga manter a dureza com o aumento de temperatura, apesar de grande parte dos abrasivos disponíveis apresentar redução de dureza com o aumento de temperatura. As propriedades térmicas, como a condutividade térmica, também merecem destaque por também desempenharem papel importante no processo já que estão diretamente relacionadas com a resistência ao desgaste e as

temperaturas desenvolvidas durante a usinagem. Quanto à frabilidade, é a capacidade das partículas fraturarem e exporem novas arestas de corte durante a usinagem, sendo assim importante para a manutenção da capacidade de corte do rebolo (ROWE, 2014).

Apesar dos materiais abrasivos serem naturais ou sintéticos, a grande maioria dos rebolos é fabricado com os sintéticos, sendo classificados normalmente em abrasivos convencionais (óxido de alumínio, carbeto de silício, dentre outros) e superabrasivos (CBN, diamante, dentre outros) (MARINESCU et al., 2004; MALKIN e GUO, 2008). A seguir será apresentado um estudo referente aos abrasivos óxido de alumínio convencional e seeded gel, sendo os abrasivos empregados neste estudo.

O óxido de alumínio (Al_2O_3), que apresenta alta empregabilidade na usinagem de diversos materiais ferrosos, com destaque para os aços, é produzido a partir da bauxita, onde o método de produção utilizado indicará a classificação em óxido de alumínio fundido ou sinterizado (ROWE, 2009; MARINESCU et al., 2016). Apesar de o Al_2O_3 apresentar menor condutividade térmica (35 W/m.K) e dureza (faixa que varia de 2 100 a 2 400 dureza Knoop) que o carbeto de silício, sua tenacidade é superior (ROWE, 2009; LINKE, 2016). Além disso, em suas mais diversas formas, o óxido de alumínio pode apresentar índice de friabilidade entre 5 e 75.

Existem diversas variações do óxido de alumínio dependendo de sua composição química, como por exemplo, branco, marrom, rubi, rosa, monocristalino, dentre outros (LINKE, 2016; MARINESCU et al., 2016). À medida que os meios de produção e tecnológicos foram se desenvolvendo, novos abrasivos foram surgindo, com destaque para o seeded-gel (MALKIN e GUO, 2008). Com lançamento em 1986 pela empresa Norton, o abrasivo seeded-gel é produzido a partir do MgO por um processo de precipitação química, além da etapa de compactação e sinterização, onde em sua etapa final de fabricação estão presentes abrasivos constituídos por uma estrutura monofásica de α-alumina apresentando 0,2 μm de tamanho médio do cristalito (ROWE, 2014; MARINESCU et al., 2016).

Dentre suas principais características, estas partículas apresentam elevada friabilidade em razão da fratura ocorrer no nível micrometro da estrutura cristalina, além de alta resistência (ROWE, 2014). Neste sentido, em comparação com o óxido de alumínio convencional, o seeded-gel possui partículas abrasivas que se fraturam de forma micromética, o que contribui para a realização do processo de usinagem no sentido de menor taxa de degaste e arestas afiadas por mais tempo, enquanto que no Al_2O_3 convencional existe planos de fratura maiores, e assim proporciona fratura de partículas

de maiores dimensões, portanto com maior possibilidade de desprendimento de partículas do rebolo e elevando a taxa de desgaste (KLOCKE, 2009). De acordo com Webster e Tricard (2004), os abrasivos seeded gel apresentam superior vida útil e taxa de remoção de material e redução dos esforços de corte e temperatura no processo em comparação com os rebolos abrasivos produzidos com Al_2O_3 convencional. Além disso, os autores destacam seu benefício-custo inferior ao do Nitreto Cúbico de Boro (CBN).

Na Tabela 2.1 são apresentadas algumas propriedades dos abrasivos seeded gel e Al_2O_3 convencional. Em razão da elevada resistência do abrasivo seeded-gel, normalmente eles são empregados em conjunto com o óxido de alumínio convencional nas porcentagens de 10 %, 30 % e 50 % para evitar a ocorrência de elevados esforços de corte durante a usinagem. Apesar de apresentar alto custo de produção, em determinadas condições, a aplicação do rebolo seeded gel é vantajosa por propiciar aumento da vida do rebolo (MARINESCU et al., 2016). Em geral, é recomendado o emprego dos rebolos seeded gel na retificação de materiais de difícil retificabilidade que exigem tolerâncias estreitas aliadas à ausência de danos térmicos (PATEL e MAHAJAN, 2018).

Existe uma limitação dos abrasivos seeded-gel em conjunto com ligantes vitrificados, sendo que temperaturas superiores a 1 200 °C causam a agregação dos microcristais e influenciam negativamente na eficiência destes abrasivos. Em comparação com os superabrasivos, o seeded-gel apresenta custo inferior e cabe ressaltar que em processos com alta taxa de remoção de material o seeded-gel apresenta desempenho superior à observada nos abrasivos convencionais. Essa superior vantagem do seeded-gel em relação aos abrasivos de óxido de alumínio convencional é encontrada nos processos que empregam elevadas taxas de remoção de material e elevadas velocidades de corte, sendo que em baixas velocidades essa vantagem não é tão significativa (LINKE, 2016).

Algumas pesquisas têm mostrado superior desempenho do seeded-gel em relação a outros tipos de abrasivo, inclusive até em comparação com rebolos superabrasivos. Eranki, Xiao e Malkin (1991) estudaram a retificação cilíndrica externa do aço endurecido AISI 52100 e compararam o comportamento do rebolo de óxido de alumínio monocristalino com o seeded gel. Os autores constataram que o seeded gel proporcionou menores valores de potência e maior relação G (menor desgaste do rebolo), além de observarem a maior propensão a queima nos ensaios realizados com o rebolo monocristalino. Apesar dos autores não explicarem os resultados obtidos, uma provável justificativa está relacionada a maior friabilidade das partículas abrasivas do rebolo seeded-gel. Patan e Mahajan (2018) avaliaram as propriedades de diferentes rebolos

abrasivos de óxido de alumínio (convencional, branco, rubi e seeded-gel) além de estudar seu comportamento durante a retificação cilíndrica do aço EN45 (58 HRc - 63 HRc). Dentre todos os rebolos abrasivos testados, o seeded-gel apresentou superior dureza, tenacidade à fratura e custo e menor tamanho de abrasivo. Os autores destacam que o rebolo seeded-gel proporcionou a maior taxa de produção o que foi atribuído à sua maior friabilidade em relação ao óxido de alumíno convencional, e com isso solicitando menor quantidade de operações de dressagem. Além disso, em razão de sua superior eficiência o rebolo seeded-gel apresentou o menor custo por peça dentre todos os abrasivos avaliados. Em ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço DIN 100Cr6 (equivalente ao SAE 52100), Arantes (2019) comparou os rebolos de CBN e seeded-gel e observou que em determinadas condições o emprego do rebolo seeded-gel resultou em menores desvios de circularidade e retitude da peça, maior relação G (em determinada condição apresentou relação G 4 vezes maior que o rebolo de CBN) e superior desempenho de retificação (dado pela razão entre a relação G e a energia específica) em mais da metade das condições de corte testadas. O autor justifica estes resultados pelas propriedades das partículas abrasivas seeded-gel, ou seja, pela elevada friabilidade que mantém as arestas de corte sempre afiadas. Além disso, apesar de no geral o rebolo de CBN apresentar os menores valores de rugosidade Ra, estes foram próximos aos encontrados para o rebolo seeded-gel. Magnani (2013) realizou ensaios de retificação cilíndrica do aço ABNT 1045 temperado e revenido com o intuito de testar os rebolos de óxido de alumínio convencional e seeded-gel, onde os resultados obtidos sinalizaram superior desempenho do rebolo seeded-gel nas análises de potência, desvio dimensional e rugosidade.

Tabela 2.2 - Propriedades dos abrasivos seeded gel e Al_2O_3 convencional (Adaptado de LINDSAY, 1989; MALKIN e GUO, 2008; FATHALLAH et al., 2008).

	Óxido de alumínio convencional (Al_2O_3)	Seeded-gel
Densidade: ρ (kg/m^3)	4 000	3 870
Dureza: (kg/mm^2)	1 850	2 150
Condutividade térmica: κ (20 °C) (W/m.K)	46	90-190
Tamanho do abrasivo: (μm)	> 50	< 1
Tenacidade: (Mpa. m$^{1/2}$)	2,2	3,7

2.3.2 Desgaste de rebolos e operação de dressagem

Durante os processos de retificação as partículas abrasivas que compõem o rebolo se desgastam, conforme apresentado na Figura 2.6a, influenciando negativamente no desenvolvimento do processo. Durante a retificação, por causa da própria natureza dos abrasivos, que estão aleatoriamente distribuídos no rebolo, e com diferentes alturas das arestas de corte, há abrasivos que apenas atritam, outros que atritam e riscam a superfície da peça, enquanto que pequena parte dos abrasivos atrita, risca e de fato removem material da peça. De acordo com Wegener et al. (2011), o desgaste ocorre no nível macro e micro, sendo o macro desgaste associado ao desgaste radial e desgaste de aresta do rebolo (Figura 2.6b). Já o micro desgaste está relacionado aos desgastes sofridos pelos abrasivos, como indicado na Figura 2.6c, que podem ser de quatro tipos: macrofratura, microfratura, desgaste do ligante e o arrancamento (total remoção de um abrasivo).

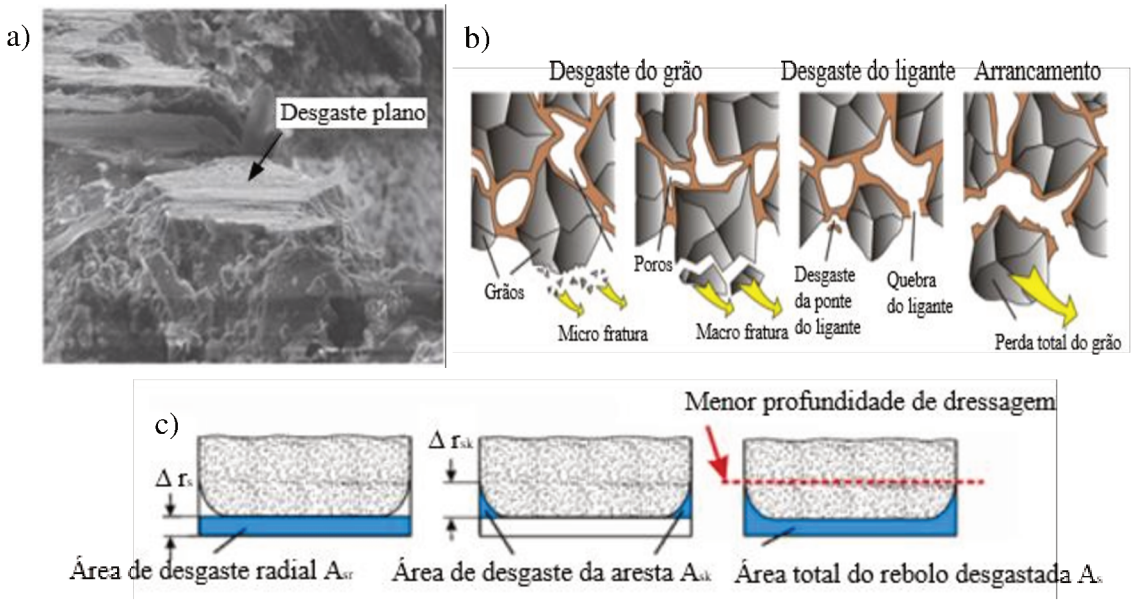


Figura 2.5 - Desgaste do rebolo abrasivo: a) Desgaste plano do abrasivo (Adaptado de ROWE, 2014); b) Micro desgaste das partículas abrasivas; c) Ilustração esquemática do macro desgaste do rebolo abrasivo principalmente nos cantos (Adaptado de WEGENER et al., 2011).

Neste sentido, é necessária a realização da operação de dressagem (afiação do rebolo) com o intuito de renovar as arestas de corte dos abrasivos, tornando-o apto

usinagem (KLOCKE, 2009). Segundo Marinescu et al. (2016), a dressagem possui alguns objetivos principais, sendo eles conferir concentricidade do rebolo abrasivo com o eixo de rotação, remover os componentes (cavacos, fluido de corte, dentre outros) que se encontrem alojados nos poros do rebolo e remover os abrasivos desgastados expondo novas arestas de corte.

Na dressagem os principais parâmetros são, o grau de recobrimento do rebolo e tipo de dressador que são comentados a seguir.

- Grau de recobrimento (U_d): de acordo com Klocke (2009) o parâmetro U_d é dado em razão da largura do dressador (b_d) e o avanço axial do dressador (f_{ad}), conforme apresentado pela equação 2.13:

$$U_d = \frac{b_d}{f_{ad}} \tag{2.13}$$

em que,

$$b_d = \sqrt{8.r_p.a_d} \tag{2.14}$$

$$f_{ad} = \frac{v_{fad}}{n_s} \tag{2.15}$$

r_p = raio da ponta do dressador

a_d = profundidade de dressagem

n_s = velocidade do rebolo

v_{fad} = velocidade de dressagem

Conforme observado na Figura 2.7, quando $U_d < 1$ o dressador não atua sobre toda a superfície do rebolo, possibilitando que alguns abrasivos desgastados continuem aderidos ao rebolo e, assim, influenciando negativamente no processo de retificação. Já $U_d = 1$ indica que a rosca produzida no rebolo apresenta largura igual ao passo de dressagem, enquanto que $U_d > 1$ produz sobre a superfície do rebolo uma rosca fina.

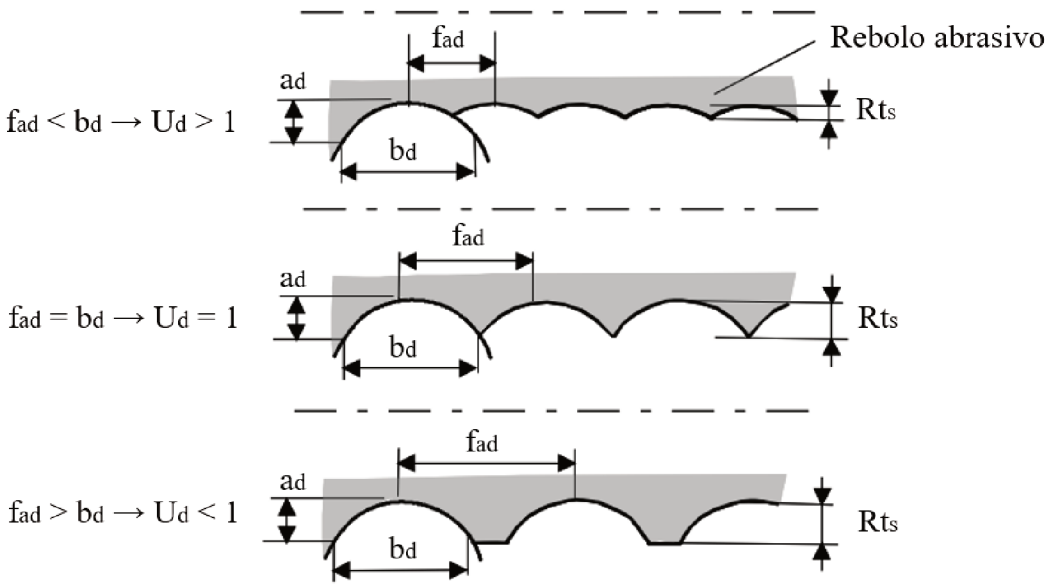


Figura 2.6 - Influência do grau de recobrimento U_d sobre a superfície do rebolo abrasivo (Adaptado de KLOCKE, 2009).

Segundo Klocke (2009) e Rowe (2014), apesar da utilização de elevados valores de U_d promover menor desgaste radial do rebolo e a geração de uma superfície do rebolo mais lisa e, consequentemente, resultando em menores valores de rugosidade na peça, ele proporciona o desenvolvimento de maiores esforços de corte, além de resultar em uma maior energia específica no processo. Já baixos valores de U_d não são desejáveis quando é necessário excelente acabamento por produzir no rebolo uma superfície que resultará em elevados valores de rugosidade durante a usinagem. Rowe (2014) ainda complementa indicando que os valores usuais de grau de recobrimento se encontram entre 2 e 20. Marinescu et al. (2016) recomenda a utilização de U_d entre 2 e 3 na preparação de rebolos abrasivos para retificação de desbaste, 3 e 4 em processo de retificação de semi acabamento e valores na faixa 6 a 8 quando é exigido elevado acabamento.

- Dressador: é a ferramenta da operação de dressagem, sendo o diamante o material mais empregado em sua fabricação em razão de sua elevada dureza. Existem diversos tipos de dressadores que podem ser divididos em dois grupos em razão do seu comportamento durante a realização da operação: estático ou rotativo. Os dressadores estáticos deslocam-se apenas axialmente durante a operação com uma velocidade de dressagem V_{fad}, não apresentando rotação em torno de seu eixo. Nesta categoria, os principais tipos de dressadores são o de ponta única, fliesen e conglomerado.

No dressador de ponta única existe apenas um diamente atuando durante toda a dressagem enquanto que o fliesen existem camadas de diamante. No dressador tipo fliesen as camadas de diamantes são distribuídas na matriz metálica do dressador, onde os diamantes atuam individualmente, de forma que à medida que uma ponta se desgasta outra entra em ação, mantendo sempre o mesmo b_d e, consequentemente U_d, em todas as operações. Já os dressadores conglomerados são constituídos por uma camada de 5 a 7 diamantes naturais, sendo expostos à medida que a ferramenta se desgasta (MARINESCU et al., 2016). Convém ressaltar que o os dressadores de ponta única e fliesen apresentam elevada empregabilidade e a utilização do dressador conglomerado é restrita a superfícies com um único plano (SOLUÇÕES INDUSTRIAIS, 2020).

2.4 Danos térmicos encontrados em peças após a retificação

Apesar de apresentar determinadas vantagens sobre os processos de usinagem com o emprego de ferramenta com geometria definida, principalmente no que diz respeito à qualidade dos componentes a serem usinados, a retificação é um processo que apresenta elevada energia específica, onde a maior parte do calor transformado na região de corte é conduzida à peça em razão dos abrasivos convencionais apresentarem baixa condutividade térmica e os cavacos gerados no processo possuírem pequenas dimensões. Desta forma, podem ocorrer diversas alterações nas propriedades dos componentes usinados em razão das elevadas temperaturas desenvolvidas no processo, conforme demonstrado na Figura 2.9.

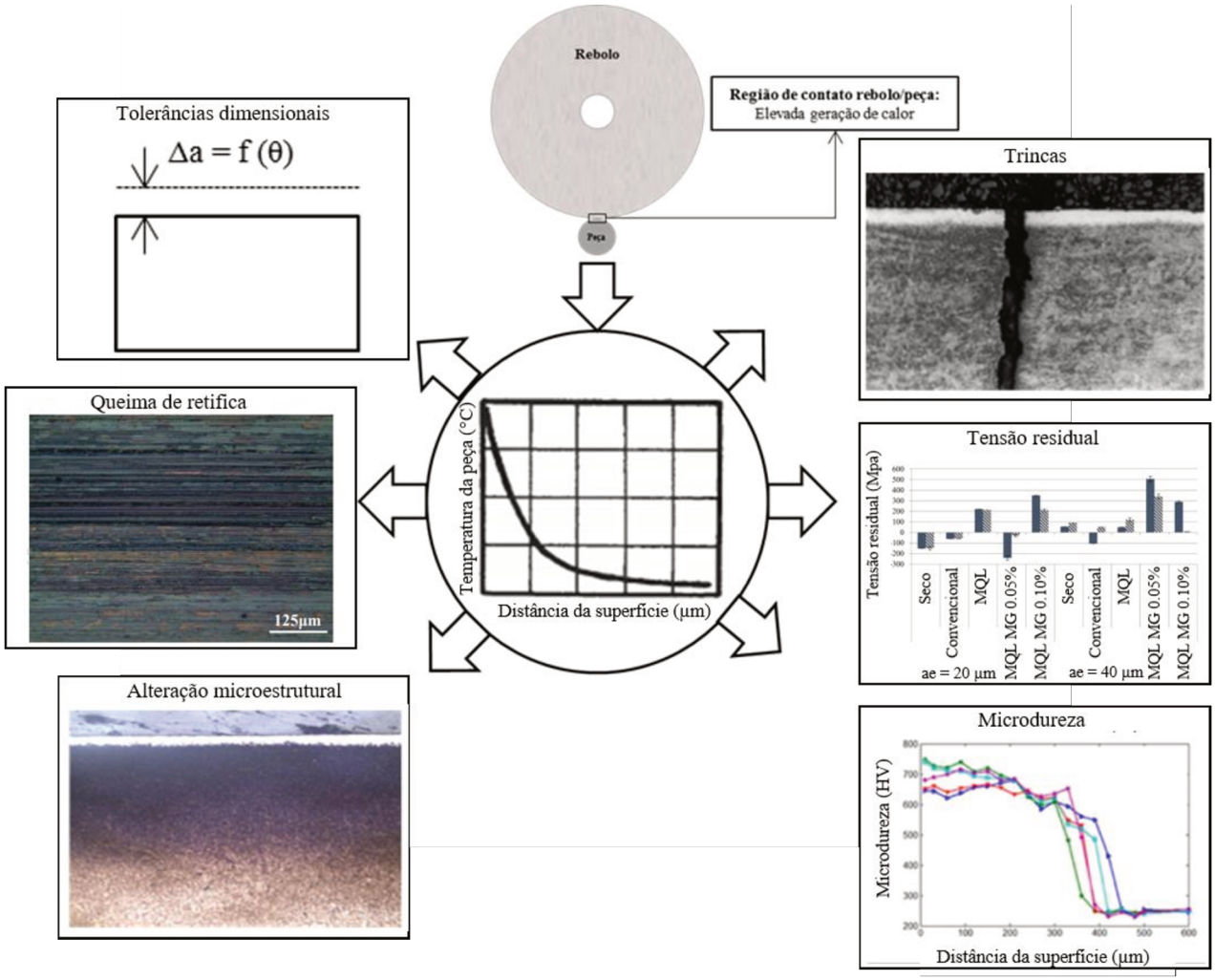


Figura 2.7 - Possíveis alterações observadas em componentes retificados em razão das elevadas temperaturas encontradas no processo (Adaptado de KONIG et al., 1977 apud BOOTHROYD e KNIGHT, 1989).
Onde: (i) Lin et al., 2018; (ii) Kirsch e Aurich, 2014; (iii) Huang, Ren e Li et al., 2016; (iv) Oliveira, Silva e Gelamo, 2019; (v) Rowe, 2014.

Além destas peculiaridades encontradas para a retificação, as condições de corte e de lubri-refrigeração são decisivas quanto a manutenção da integridade superficial e sub-superficial de componentes retificados, sendo que as condições mais favoráveis de usinagem variam de material para material dependendo de suas propriedades mecânicas, físicas e químicas. A seguir serão apresentados os principais danos térmicos encontrados em componentes submetidos aos processos de retificação (maiores detalhes são encontrados no tópico 2.6):

Queima de retifica: a grande transformação de calor na zona de corte durante a realização dos ensaios de usinagem pode ocasionar em marcas de coloração azulada deixadas sobre a superfície da peça, conforme apresentado na Figura 2.10, em razão da formação de uma camada de óxido, sendo estas marcas conhecidas como queima de retifica. Um comportamento comumente observado no início da queima é uma maior facilidade em aderência do material da peça nas partículas abrasivas que compõem o rebolo, elevando os esforços de corte do processo e proporcionando um maior desgaste do rebolo e um pior acabamento no componente usinado. Apesar de ser identificada visualmente, a queima normalmente é um indicativo de alterações abaixo da superfície usinada, como alterações microestruturais (MALKIN e GUO, 2008). Marinescu et al. (2004) ainda destacam que a intensidade da coloração destas marcas representa a severidade das condições de corte selecionadas para a realização do processo.



Figura 2.8 - Superfície retificada do aço ABNT N2711 empregando V_s = 36 m/s, V_w = 2,4 m/min, a_e=50 µm e rebolo de óxido de alumínio (SILVA et al., 2018).

Alterações microestruturais: as transformações microestruturais podem ocorrer quando as temperaturas desenvolvidas no processo atingem/superam 450 °C em razão da difusão do carbono nos aços. Nestes casos, nas camadas de material próximas à superfície usinada normalmente é observada a formação de martensita não revenida devido ao rápido resfriamento, possuindo como propriedade elevada dureza e apresentando coloração clara, conhecida assim como camada branca. Em contrapartida, nas regiões mais internas do material, pelo fato do lento resfriamento e de menores temperaturas, pode ser constatada uma região escura através da análise microestrutural, indicando revenimento, que apresenta baixa dureza (em relação à do material livre de danos térmicos) e sendo denominada camada escura (MALKIN e GUO, 2008; ROWE, 2014). As alterações microestruturais influenciam principalmente na microdureza do material, sendo que a camada branca normalmente apresenta microdureza superior ao do material usinado (livre de danos térmicos), enquanto que a camada escura microdureza inferior ao do material usinado. Na Figura 2.11 são apresentadas alterações microestruturais observadas em aço

endurecido AISI 52100 submetido à retificação com rebolo de CBN empregando $V_s = 30$ m/s, $a_e = 20$ μm e $V_w = 9$ m/min.

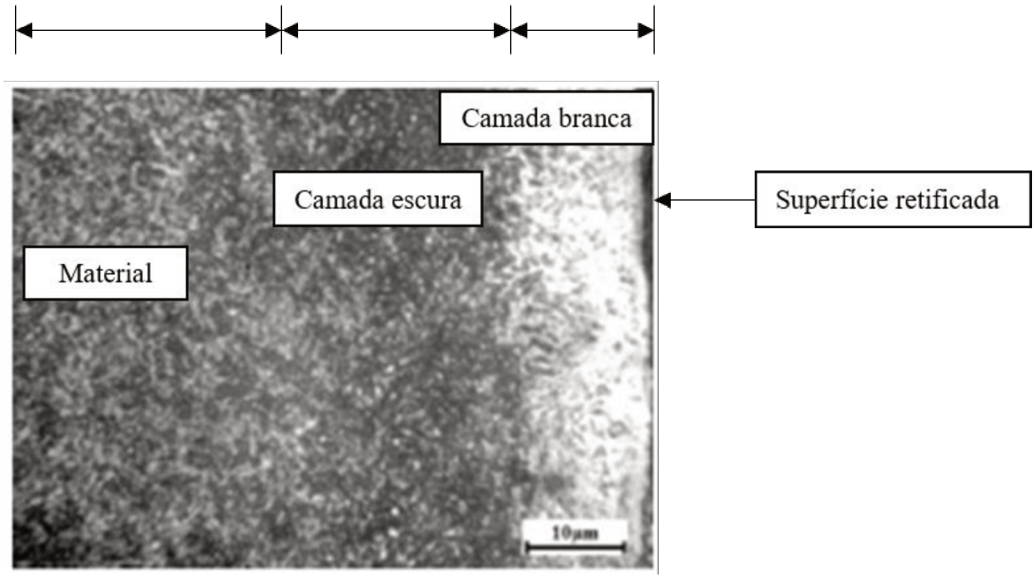


Figura 2.9 - Análise microestrutural do aço AISI 52100 após processo de retificação (Adaptado de HUANG et al. 2012).

Tensões residuais: independente das condições de corte e de lubri-refrigeração empregadas durante a realização do processo de retificação, nas camadas próximas à superfície usinada haverá tensões residuais, compressivas ou trativas, dependendo da predominância da influência da ação mecânica dos abrasivos sobre a peça ou da variação de temperatura, respectivamente (MALKIN e GUO, 2008). As tensões compressivas são benéficas para as propriedades do material enquanto as tensões trativas são indesejáveis por induzirem a propagação de tricas e, consequentemente, podendo ocasionar o dano catastrófico do componente (MARINESCU et al., 2004; ROWE, 2014).

Trincas: durante a interação das partículas abrasivas com o material há a transformação de calor que proporciona o aumento das temperaturas desenvolvidas no processo levando à expansão do componente usinado. Entretanto, após a passagem do rebolo abrasivo há o resfriamento da peça resultando na contração do material. Assim, esta alternância causada pelos efeitos térmicos pode proporcionar a formação de trincas na superfície usinada que podem se extender para dentro da peça (MARINESCU et al., 2004; ROWE, 2014).

2.5 Fluidos de corte em retificação

Conforme já comentado na seção 4.4, que diz respeito aos desafios encontrados nos processos de retificação, as elevadas temperaturas desenvolvidas durante a usinagem podem promover o aparecimento de alterações nas propriedades do material usinado, podendo torná-lo inadequado para uso. Sendo assim, é imprescindível a utilização de fluidos de corte visando a manutenção da integridade superficial do componente sob usinagem. Nesta seção serão abordadas as principais características dos fluidos de corte: funções, tipos, técnicas de aplicação e lubrificantes sólidos dispersos no fluido.

2.5.1 Funções e tipos

O emprego de fluido de corte durante os processos de usinagem apresenta diversas finalidades, sendo as principais a refrigeração e lubrificação. Além destas, existem funções secundárias com destaque para a remoção de cavacos na zona de corte. A refrigeração está relacionada com a retirada de calor na zona de corte, reduzindo desta forma a porcentagem de calor que será conduzida até a peça. Em relação à função de lubrificação, esta visa a redução do atrito existente entre a ferramenta de corte e o material usinado, ou seja, proporciona uma maior facilidade do corte do material além de atenuar a geração de calor causada pela usinagem (ROWE, 2014). Neste sentido, a correta seleção do fluido de corte mais adequado é de grande importância para maximizar a eficiência do processo, em que vários fatores devem ser levados em consideração, com destaque para viscosidade, custo, composição, sustentabilidade e velocidade de aplicação como os citados na Figura 2.12.

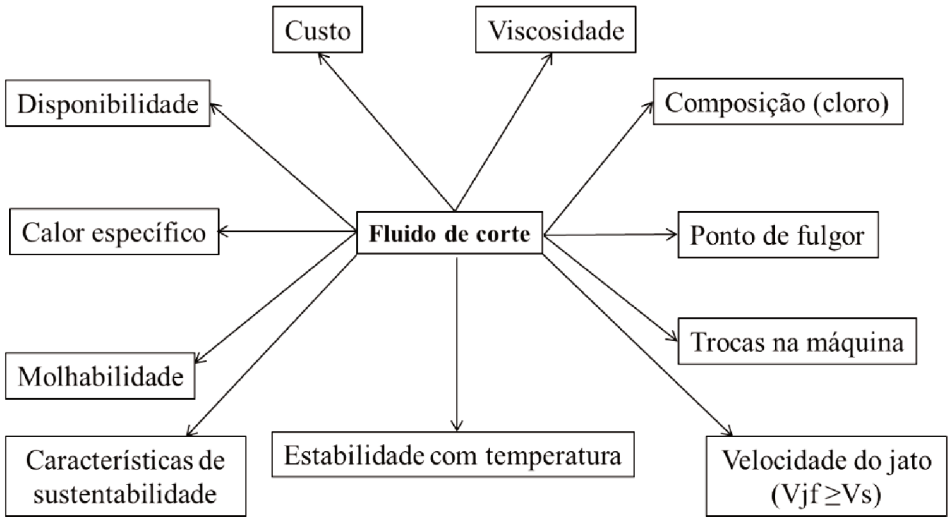


Figura 2.50 - Funções requeridas para os fluidos de corte (Fonte: próprio autor).

Os fluidos de corte são compostos por um fluido base (não miscível em água ou miscível em água) e por aditivos que tem o intuito de melhorarem as propriedades do fluido (anticorrosivo, antioxidante, de extrema pressão) para atingirem as características requeridas, principalmente da indústria, como apresentado na Figura 2.13 (ASTAKHOV e JOKSCH, 2012).

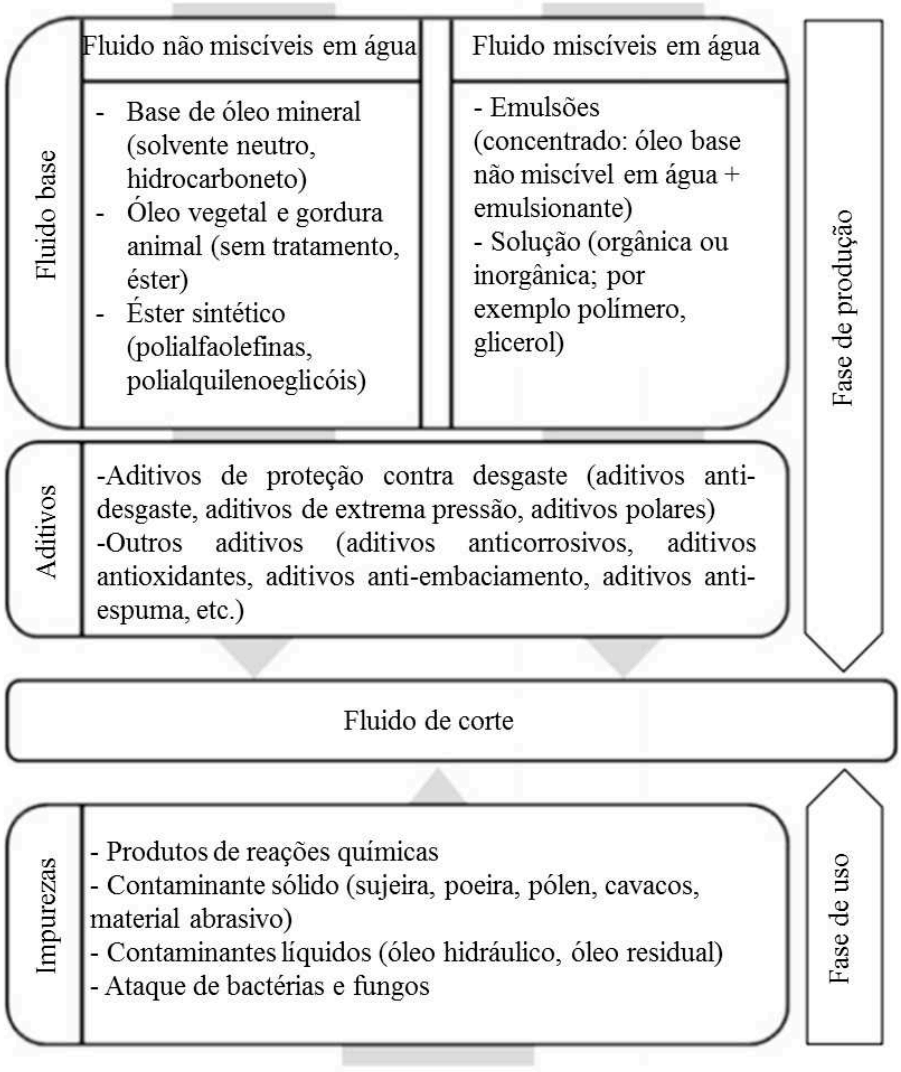


Figura 2.6 - Algumas características de fluidos de corte (Adaptado de DIN 51385, 2013 e BRINKSMEIER et al., 1999 apud WINTER, 2013).

De acordo com Marinescu et al. (2007), a norma DIN 51 385 divide os fluidos de corte em três (3) categorias, sendo eles os fluidos não miscíveis em água, fluidos miscíveis em água e fluidos compostos por água. Os fluidos não miscíveis dizem respeito aos fluidos que não precisam da adição de água para sua utilização, sendo que os principais materiais base na composição destes fluidos são os óleos minerais e vegetais (MARINESCU et al., 2007). Os fluidos miscíveis em água, como o próprio nome já indica, necessita da adição de água para ser utilizado, sendo divididos em soluções e emulsões. No geral, as soluções apresentam mais de 90 % de água e não apresentam óleo mineral em sua composição. Além disso, não é necessária a utilização de emulsificantes para realizar a mistura do fluido de corte com a água. Em comparação com as emulsões,

nas soluções não são encontrados problemas com relação às espumas e apresentam maior resistência à microorganismos, entretanto possuem inferior capacidade de lubrificação (KLOCKE, 2009). Já as emulsões necessitam de emulsificadores para que seja possível realizar a distribuição das gotas de óleo em água e normalmente são utilizadas quando é necessária considerável função de refrigeração do sistema (KLOCKE, 2009). Por fim, os fluidos compostos por água são a base de água e são comercializados pronto para uso. Um exemplo de fluido de corte nesta categoria são os fluidos integrais.

Visando uma eficiente capacidade de refrigeração do processo, normalmente os fluidos de corte utilizados nos processos de retificação são os que antes de seu uso ocorre a adição de água. Diversas pesquisas sobre retificação de aços têm empregado fluidos de corte com adição de água, como em estudo desenvolvido por Hosokowa et al. (2016), Fragoso et al. (2016) (fluido de corte QUIMATIC ME-1), Bianchi et al. (2017) (fluido de corte ME-2 Quimatic/Tapmatic), Bordin e Weingaertner (2019) (fluido de corte Ecocool AP 71), Paiva et al. (2020) (fluido de corte VASCO 7 000), dentre outros.

2.5.2 Técnicas de aplicação do fluido de corte (condições de lubri-refrigeração)

Outra questão de grande importância no que diz respeito aos fluidos de corte é sua forma de aplicação. A técnica de aplicação de maior empregabilidade nos setores industriais é a conhecida como convencional (abundância), que consiste no emprego do fluido em vazões superiores aquelas empregadas em processos de usinagem com ferramenta de geometria definida. As vazões são normalmente superiores a 8 L/min. Apesar da utilização desta técnica implicar em um alto consumo de fluido, muitas empresas optam por sua utilização visando reduzir o máximo possível os riscos de danos térmicos ao componente usinado, este que muitas vezes já apresenta alto valor agregado.

Entretanto, existe uma tendência que busca a redução do consumo de fluido de corte nos processos de usinagem. Conforme apresentado na Figura 2.13, durante a utilização do fluido de corte diversas impurezas contaminam o mesmo, ou seja, além do custo de aquisição, existem os gastos com limpeza, manutenção, tratamento, dentre outros. Além disto, os fluidos de corte convencionais, principalmente de base mineral, apresentam componentes químicos nocivos a saúde humana e ao meio ambiente. Sendo assim, a crescente preocupação com as questões econômicas, sociais e ambientais contribuiu para a ampliação das pesquisas que estudam novas formas de aplicação do fluido buscando abranger essas questões.

Outra razão ao estudo de novas formas de aplicação de fluido de corte diz respeito ao colchão de ar formado devido às elevadas rotações do rebolo que dificulta a entrada do fluido na zona de corte, sendo este empecilho observado com maior frequência para a condição convencional em razão das baixas velocidades do fluido (normalmente entre 4 m/s e 8 m/s). O destaque de novas condições de lubri-refrigeração ocorre com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) que apresenta redução de fluido de corte extremamente significativa (equivale a 0,1 % do consumo encontrado na técnica convencional em termos de reservatório na máquina) (WALKER, 2013). Contudo vale ressaltar que na técnica MQL o fluido de corte não é reaproveitado e normalmente as partículas de óleo em suspensão, ou névoa, são lançadas no ar e prejudicam o ambiente de trabalho. Este método exige coifas e sistemas de exaustão com função captar, tratar e conduzir vapores e gases para o ar e encarece o processo. Já no método tradicional, o fluido mantém-se em um reservatório e recircula durante a operação de usinagem.

Apesar de a técnica MQL apresentar alguns resultados similares, e algumas vezes melhores, aos encontrados para a técnica convencional, como por exemplo associado à rugosidade (FRAGOSO et al., 2016; ABRÃO et al., 2017; LEPPERT, 2018), em relação à remoção de calor da zona de corte (reduzindo a parcela direcionada para a peça), esta técnica não têm se mostrado eficiente para algumas situações. Outra desvantagem observada para a técnica MQL diz respeito ao empastamento do rebolo. A pequena quantidade de fluido empregada forma com os pequenos cavacos gerados uma borra que obstrui os poros do rebolo empregado.

Em ensaios de retificação cilíndrica do temperado e revenido AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio, Bianchi et al. (2018) observaram maiores valores de desgaste nos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração MQL em relação à condição convencional. Os autores justificam esse resultado em razão da condição MQL proporcionar um maior empastamento do rebolo e, consequentemente, influenciando o desgaste do rebolo. Além disso, foi constatado maiores valores de desvio de circularidade nos testes utilizando a condição MQL, sendo que os menores valores encontrados foram para a condição de lubri-refrigeração convencional. Esse comportamento é explicado pelo fato da condição convencional empregar uma maior quantidade de fluido de corte, proporcionando uma maior dissipação do calor na zona de corte e, assim, induzindo à menores valores de desvios de circularidade.

Hadad e Sharbati (2016) realizaram testes de retificação plana com rebolo de óxido de alumínio no aço baixo carbono DIN st37 e com relação ao carregamento do rebolo os

autores observaram que a condição convencional acarretou em um menor empastamento do rebolo devido ao fato desta condição empregar uma elevada quantidade de fluido que possibilita uma remoção mais eficiente do cavaco gerado durante a retificação. Os autores ainda acrescentam que as temperaturas desenvolvidas durante o processo influenciam nesse comportamento, onde temperaturas mais baixas são encontradas nos ensaios com a condição convencional por apresentar maior transferência de calor por convecção, e os cavacos provenientes da condição convencional apresentam maior dificuldade de se alojarem no rebolo. Os cavacos oriundos da condição convencional (com temperatura menor) são alongados e finos, enquanto que os cavacos obtidos nos ensaios com a condição MQL (maiores temperaturas de corte) apresentaram diferentes tipos. Huang, Ren e Jiang et al. (2016) também encontraram valor de temperatura inferior da condição convencional em comparação com a MQL durante ensaios de retificação do aço AISI 5140.

2.5.3 Lubrificantes sólidos adicionados ao fluido de corte em retificação

Apesar de a ténica MQL apresentar potencial futuro na substituição da técnica convencional de aplicação de fuido de corte por empregar uma quantidade de fluido bastante inferior, sendo assim uma técnica mais sustentável e econômica, a condição MQL possui algumas deficiências, principalmente relacionadas à capacidade de refrigeração do sistema que tem feito com as forças de retificação fiquem em patares superiores àquelas geradas pela técnica convencional em algumas situações. Estas limitações têm levado pesquisadores a estudar o aprimoramento da técnica MQL. Neste sentido, o intuito da adição das partículas sólidas é a melhoria da mínima quantidade de lubrificante (MQL) pelo aumento das capacidades de lubrificação e refrigeração dos fluidos de corte, em razão destas atuarem como lubrificantes sólidos na interface ferramenta/peça e apresentarem elevada condutividade térmica. Alguns autores já têm apresentado uma nova classificação dos tipos de fluido de corte, incluindo essa categoria como sendo “fluidos híbridos”, conforme apresentado na Figura 2.14.

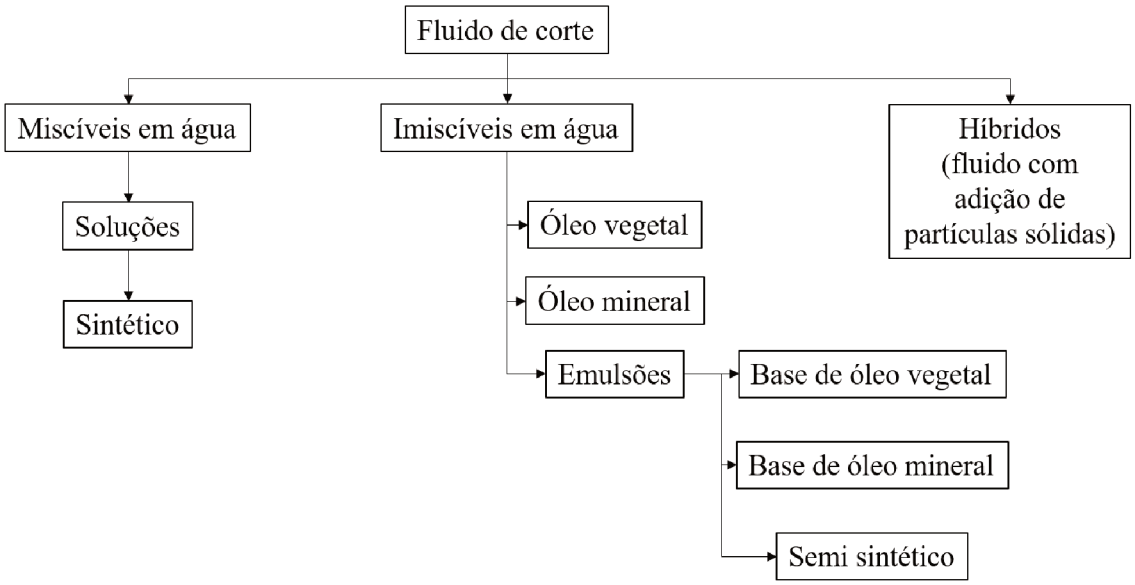


Figura 2.7 - Classificação dos fluidos de corte (Adaptado de DINIZ, MARCONDES e COPPINI, 2014; RUZZI, 2019).

As principais partículas sólidas empregadas em conjunto com o fluido de corte são Al_2O_3, MoS_2, grafeno, grafite, nanotubos de carbono, dentre outras (MAO et al., 2013; GAO et al., 2018; MOLAIE, ZAHEDI e AKBARI, 2018). Diversos autores têm desenvolvido pesquisas mostrando a influência positiva da utilização dos nanofluidos quanto à integridade superficial e sub-superficial de componentes retificados, e alguns destes estudos serão apresentados a seguir.

Huang et al. (2017) avaliaram a influência da utilização de fluido de corte com adição de nanotubos de carbono de múltiplas paredes (MWCNTs) e bissulfeto de molibdênio (MoS_2) na integridade superficial do aço endurecido para molde JIS SKD11 (62 HRc) submetido à retificação com rebolo de óxido de alumínio (5KG46H11V9B). Os resultados obtidos mostraram que as partículas de MWCNTs foram as responsáveis pelos menores esforços de corte e temperaturas desenvolvidas no processo, explicado pelos autores pela melhor capacidade de lubrificação e superior condutividade térmica, enquanto as de MoS_2 pelo melhor acabamento (menores valores de rugosidade) por apresentarem maior ductilidade.

Jaswanth et al. (2017) estudaram o comportamento de partículas de Al_2O_3 dispersas em fluido de corte vegetal em diferentes concentrações (1 %, 2 %, 3 % e 4 %) durante a retificação do aço HC-HCr (AISI 1030) com rebolo de óxido de alumínio. Os autores observaram que a maior concentração de partículas sólidas resultou nos menores valores de rugosidade pelo fato destas se depositarem sobre a superfície da ferramenta de corte

ocasionando em uma usinagem fina adicional, contribuindo para a melhoria do acabamento. Além disso, apesar do Al_2O_3 apresentar baixa condutividade térmica, o aumento de concentração foi benéfico para a melhoria das propriedades térmicas do fluido, sendo encontradas as menores temperaturas nos ensaios realizados com concentração de 4 %.

Lee et al. (2012) verificaram o efeito de nano partículas de diamante e de Al_2O_3 adicionadas ao fluido de corte nas concentrações 2 % e 4 % em volume e com diferentes dimensões (30 nm e 150 nm) na retificação do aço ferramenta SK-41C com rebolo de CBN. Os resultados obtidos mostraram redução significativa das forças de corte pelo emprego dos nanofluidos, atribuído pela melhoria das propriedades lubrificantes e refrigerantes, sendo os menores valores da força normal e tangencial encontrados com as partículas de 30 nm e concentração de 4 %. Os lubrificantes sólidos contribuem para a preservação do tribo-filme formado na interface rebolo/peça, proporcionando em melhor distribuição das cargas do processo e assim em baixa adesão entre a ferramenta e a peça. Em relação à rugosidade, foi observada a sua redução quando houve presença do fluido de corte com partículas dispersas, onde as partículas de Al_2O_3 apresentaram os menores valores, justificado pela menor dureza destas, além da menor dimensão das partículas e concentração ser a condição mais favorável para melhoria do acabamento.

Borade e Kadam (2016) realizaram ensaios de retificação com rebolo de CBN do aço endurecido EN353 (60 HRc) testando fluido de corte contendo partículas de Al_2O_3 aplicado via técnica MQL. Eles observaram que a adição dos lubrificantes sólidos contribui para a redução dos valores de rugosidade (R_a) e temperatura em comparação com os ensaios empregando fluido de corte puro (MQL sem partículas sólidas). As partículas de Al_2O_3 atuam na melhoria das propriedades do fluido de corte, contribuindo para maior eficiência em refrigeração do sistema.

Em trabalho desenvolvido por Chakule e Chaudhari (2018) foram avaliadas três condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL + Al_2O_3), quanto a rugosidade, na retificação do aço endurecido EN31 (SAE 52100) (58 HRc) com rebolo de óxido de alumínio, onde a concentração de partículas adicionadas ao fluido de corte aplicada para a condição MQL + Al_2O_3 foi de 0,15 % e 0,30 % em volume. Os resultados de rugosidade encontrados indicaram influência positiva das partículas de Al_2O_3 para redução dos valores, onde a usinagem com maior concentração (0,30 % em volume) proporcionou os componentes com os menores valores de rugosidade dentre todas as condições de lubri-refrigeração testadas. Os autores justificam este comportamento pelo

tribo-filme formado na condição MQL + Al_2O_3, responsável por reduzir o atrito entre o rebolo e a peça e manter a capacidade de corte dos grãos abrasivos, além da adição destas partículas contribuir para a melhoria das propriedades refrigerantes do fluido de corte.

Em uma recente pesquisa realizada por Gao et al. (2018), eles buscaram investigar o desempenho tribológico de fluido de corte vegetal contendo partículas de nanotubos de carbono (CNT – sigla do Inglês que significa Carbon Nano-Tubes) durante ensaios de atrito para se aproximar do processo de retificação do aço AISI304 como peça. A ferramenta foi o rebolo de óxido de alumínio (WA80H12V). Os autores constataram que a adição das partículas de CNT contribuiu para aumento da viscosidade do fluido de corte, resultando em um tribo-filme estável e assim na melhoria das propriedades lubrificantes do fluido, e consequentemente, afetando positivamente algumas variáveis empregadas para análise da integridade superficial e sub-superficial de componentes retificados, como a rugosidade.

Lee, Kim e Lee (2018) estudaram a influência de fluido contendo nanopartículas de diamante em diferentes tamanhos (35 nm e 80 nm) e concentrações (0,2 % e 0,8 % em peso) na retificação da liga Ti-6Al-4V com rebolo de CBN. Eles observaram a redução dos esforços de corte nos ensaios empregando estes nanofluidos em comparação com o fluido puro (sem adição de lubrificante sólido), o que eles atribuíram à melhor eficiência de lubrificação na região de corte com a presença do lubrificante sólido. Em relação à textura superficial dos componentes usinados, superfícies com qualidade superior foram observadas ao usar o fluido com adição das nanopartículas em comparação com as demais condições de lubri-refrigeração avaliadas. Os autores ainda destacam que nos ensaios realizados a seco foi constatada marcas devido a vibrações oriundas do processo, situação não encontrada com o emprego do fluido com nanopartículas de diamante em razão dessa condição proporcionar a formação de uma camada de óleo estável capaz de amenizar essas trepidações. Através da avaliação da rugosidade também foi constatada a superioridade da condição empregando fluido contendo lubrificantes sólidos, já que resultou nos menores valores de Ra.

Li et al. (2017) investigaram como a concentração de nanotubos de carbono (2 % e 2,5 % em volume) adicionados ao fluido de corte influencia na retificação de diferentes materiais (aço AISI 1045, liga de níquel GH4169 e ferro fundido nodular), quanto aos esforços de corte e temperatura, em ensaios realizados empregando rebolo de carbeto de silício. Eles constataram que as forças tangencial e normal encontradas para ambas as concentrações de CNT foram semelhantes, em virtude de apresentarem propriedades

lubrificantes similares. Porém para o aço AISI 1045 a concentração de 2 % foi a responsável pelos menores valores, enquanto que para o ferro fundido o contrário foi observado. Assim, os autores ressaltam que as propriedades dos materiais usinados influi nos resultados obtidos. Com respeito às temperaturas desenvolvidas no processo, os valores para a concentração de 2 % foram ligeiramente superiores aos obtidos por meio dos ensaios empregando fluido de corte com concentração de CNT de 2,5 %, sendo justificado pelas diferentes propriedades físicas, como condutividade térmica, dos nanofluidos.

Mao e Zou et al. (2012) avaliaram como diferentes condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL + Al_2O_3) interferem na retificação do aço endurecido SAE 52100 com rebolo de óxido de alumínio. Os resultados obtidos mostraram que os ensaios realizados por meio da condição MQL + Al_2O_3 conseguiram valores comparáveis de esforços de corte e rugosidade aos testes com fluido de corte (sem lubrificante sólido) aplicado em abundância. O posicionamento do bocal (além da pressão de ar comprimido e distância do bocal) também mostrou influência direta na lubrificação e refrigeração do sistema por facilitar/dificultar o acesso do fluido à zona de corte, onde o bocal localizado angularmente ao rebolo abrasivo apresentou os melhores resultados.

Em estudos realizados por Mao e Tang et al. (2012) verificaram o efeito da adição de partículas de Al_2O_3 à água aplicada através da técnica MQL durante a retificação do aço endurecido AISI 52100 (62 HRc) com rebolo de óxido de alumínio. Embora a condição convencional ser responsável pela obtenção das menores temperaturas desenvolvidas por apresentar melhor eficiência na refrigeração do sistema, foi observada melhoria da condição MQL pela dispersão de Al_2O_3 à água, justificado pelos autores pelo aumento da capacidade lubrificante e refrigerante do fluido. Comportamento semelhante foi observado pela análise das forças de corte, rugosidade, análise microestrutural e textura superficial dos componentes retificados, onde a condição convencional resultou nos melhores resultados seguido pela MQL + Al_2O_3. Apesar destes resultados, a condição MQL apresenta elevado potencial por ser uma técnica mais econômica e sustentável em comparação com a convencional.

Mao et al. (2013) estudaram como a adição de partículas de Al_2O_3 e MoS_2 ao fluido de corte influencia no processo de retificação do aço endurecido AISI 52100 com rebolo de óxido de alumínio. Os resultados de esforços de corte e rugosidade obtidos através dos ensaios realizados empregando nanofluidos foram próximos, entretanto superiores, em comparação com a condição convencional em razão da melhor capacidade de lubrificação

e retirada de cavacos quando o fluido é aplicado de maneira abundante. Na avaliação de temperatura foi observada diferença significativa entre os valores de temperatura, sendo os menores encontrados para a condição convencional, pela maior eficiência de refrigeração desta técnica, principalmente por empregar maior quantidade de fluido de corte e assim possuir maior facilidade em retirar o calor gerado na interface rebolo/peça. Os autores explicam que as nanopartículas atuam na zona de corte suportando uma parcela dos esforços de corte e separando o rebolo e a peça que estão em contato, ou seja, consequentemente há a redução do coeficiente de atrito e força caso fosse comparado a ensaios utilizando fluido puro (sem adição das nanopartículas). Além disso, a adição das partículas sólidas proporciona melhoria das propriedades lubrificantes e refrigerantes dos fluidos de corte. A partir disso, outro resultado encontrado nesta pesquisa mostrou que o aumento de concentração atuou na redução das forças de corte por maior ser a quantidade de partículas atuantes.

ManojKumar e Ghosh (2014) realizaram ensaios testando nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) adicionadas ao fluido de corte aplicado via MQL durante a retificação do aço endurecido AISI 52100 com rebolo de óxido de alumínio (A60K5V8). Dentre todas as condições de lubri-refrigeração empregadas (convencional, MQL e MQL + MWCNT), as menores forças de corte foram observadas nos ensaios utilizando fluido contendo as partículas de MWCNT, justificado pelos autores pela superior capacidade de lubrificação destes nanofluidos, além da maior eficiência em refrigeração do sistema proporcionada pela elevada condutividade térmica dos nanotubos de carbono. A condição MQL + MWCNT também foi a responsável pela maior relação G por garantir a manutenção das arestas de corte afiadas das partículas abrasivas pela excelente lubrificação do sistema. Em relação à rugosidade dos componentes retificados, a condição convencional resultou nos menores valores, seguido de perto pela condição MQL + MWCNT, possivelmente explicado pela maior eficiência em remoção de cavacos na zona de corte.

Pesquisa desenvolvida por Molaie, Zahedi e Akbari (2018) avaliaram o efeito de diferentes nanofluidos, sendo eles nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT), grafite, Al_2O_3, óxido de grafeno (do Inglês Graphene Oxide - GO) e híbrido Al_2O_3/grafite adicionados ao fluido de corte aplicado pela técnica MQL durante a retificação do aço endurecido AISI 52100. Ensaios empregando a condição convencional e MQL com fluido sem adição das partículas sólidas também foram realizados para comparação. Em relação à análise das forças normal e tangencial, embora observado que a usinagem com condição

convencional tenha resultado nos menores valores, a presença dos lubrificantes sólidos ao fluido contribuiu significativamente para melhoria da técnica MQL apenas com fluido sem partículas sólidas, onde proporcionou aumento da capacidade de lubrificação na região de interação entre as partículas abrasivas e a peça, resultando assim em redução dos esforços de corte. Dentre os nanofluidos testados, os autores destacam o GO, que por apresentar dimensões inferiores às outras nanopartículas, consegue melhor acesso à zona de corte e assim melhorando as condições tribológicas, o que reduz o coeficiente de atrito e induz à menores esforços de corte para a usinagem. Entretanto, o nanofluido híbrido foi o responsável por originar os menores valores de forças de retificação por combinar os mecanismos tribológicos do Al_2O_3 e do grafite. Comportamento semelhante foi encontrado através da avaliação de rugosidade e energia específica, onde a condição convencional originou os menores resultados em decorrência de possuir melhor eficiência em lubrificação e remoção de cavacos da região de corte, e mais uma vez a adição das nanopartículas proporcionou redução destas variáveis analisadas em comparação com os ensaios realizados empregando fluido puro por meio da condição MQL.

Paul e Ghosh (2016), em ensaios de retificação com rebolo de óxido de alumínio do aço EM 31 (61 HRc), estudaram o comportamento da adição de partículas de MoS_2 e hBN dispersos ao fluido de corte. Através de testes tribológicos foi observado que a dispersão das nanopartículas contribuiu para melhoria das propriedades lubrificantes do fluido de corte, sendo que o fluido contendo as partículas de MoS_2 apresentou poder de lubrificação levemente superior ao fluido com partículas de hBN, identificado pelo menor coeficiente de atrito mensurado. Os resultados de forças de retificação mostraram redução de 50 % da força normal obtido por meio da condição MQL em comparação com a convencional (para o mesmo fluido de corte) por proporcionar melhor penetração do fluido de corte na zona de corte, onde a adição das partículas sólidas provocou esforços de corte ainda menores. A avaliação da energia específica (variável que indica a eficiência de um processo) mostrou que dentre todas as condições de lubri-refrigeração empregadas, a condição com adição das partículas de MoS_2 resultaram nos menores valores de energia específica em função de apresentar as melhores propriedades lubrificantes, sendo este comportamento também encontrado por meio da análise da rugosidade dos componentes retificados.

Ni, Yang e Wu (2018) verificaram a influência da dispersão de grafeno ao fluido de corte quanto a relação G, forças de corte e deflexão do rebolo abrasivo encontradas para o processo de retificação do aço AISI 1045. Mediante a análise dos resultados de

relação G foi observado aumento de aproximadamente 28 % desta variável para a condição utilizando grafeno em comparação com o fluido sem a adição destas partículas, justificado pelos autores pelo tribo-filme que é formado na interface rebolo/peça que por sua vez possibilita melhor lubrificação do sistema e, consequentemente, menor desgaste do rebolo. Melhoria das propriedades do fluido de corte por meio da adição de partículas de grafeno também foram encontradas na medição dos esforços de corte e análise da deflexão do rebolo durante a realização dos ensaios de retificação.

Pesquisa desenvolvida por Mao et al. (2014) avaliou as propriedades tribológicas de nanofluidos contendo partículas de Al_2O_3 e MoS_2 por meio de ensaios tribológicos pino-disco simulando o processo de retificação além de ensaios de retificação propriamente dito. A adição de ambas nanopartículas proporcionou melhoria da capacidade de lubrificação do fluido de corte, em razão de produzirem um filme de fluido mais estável na zona de corte, apresentado pelos menores coeficientes de atrito em comparação com ensaios empregando fluido puro. Os autores ainda destacam que essas partículas, que apresentam formato esférico, presentes no fluido atuam como um terceiro corpo, ou seja, ocorre deslizamento e rolamento, que além de contribuir no suporte da carga normal, separa as superfícies em contato, induzindo assim melhor lubrificação do sistema. Outra justificativa apontada para superior eficiência lubrificante dos nanofluidos diz respeito ao aumento da viscosidade do fluido pela adição das nanopartículas, ocasionando em um tribo-filme mais durável. Através da medição dos esforços de corte e temperatura foi possível observar redução dos valores pela aplicação dos fluidos contendo partículas de Al_2O_3 e MoS_2, além da análise das superfícies retificadas indicar superioridade destes ensaios quanto à qualidade dos componentes por apresentarem superfícies mais uniformes.

Prabhu, Uma e Vinayagam (2014) analisaram o efeito da adição de nanotubos de carbono (CNT) ao fluido de corte aplicado via técnica MQL na retificação do aço ferramenta AISI D3 (62 HRc) com rebolo de óxido de alumínio. Eles constataram redução dos valores de rugosidade após a usinagem com utilização dos nanofluidos quando comparados aos ensaios realizados empregando fluido sem partículas sólidas, mostrando assim melhor eficiência em lubrificação desta condição de lubri-refrigeração. Além disso, um dos objetivos desta pesquisa foi elaborar equações empíricas de rugosidade, onde o modelo desenvolvido, levando em consideração ensaios utilizando os nanofluidos, apresentou valores mais próximos aos resultados experimentais que o modelo formulado para o emprego de fluido puro (sem adição de nanopartículas).

Rabiei, Rahimi e Hadad (2017) buscaram avaliar a eficiência da condição MQL com diferentes nanofluidos, sendo nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT), Al_2O_3 e híbrido MWCNT/Al_2O_3, durante o processo de retificação cilíndrica de mergulho do aço endurecido DIN 100Cr6 (62 HRc) empregando rebolo de óxido de alumínio. Os resultados de força de retificação mostraram melhor capacidade de lubrificação das partículas de Al_2O_3 em relação aos nanotubos de carbono, representado pelos menores esforços de corte, devido ao fato destas partículas apresentarem formato esférico, ou seja, assim o atrito por deslizamento dá lugar ao atrito por rolamento, proporcionando maior suporte das cargas do processo e, desta forma, melhor lubrificação da região de corte. A usinagem com nanofluido híbrido resultou em menores valores de força de corte por combinar as propriedades das duas nanopartículas. Além disso, superior eficiência de lubrificação proporciona a formação de uma camada de fluido capaz de reduzir a resistência ao cisalhamento e então as forças tangenciais, diminuindo a geração de calor, e conforme a pesquisa indicou, menores temperaturas desenvolvidas durante a realização do processo.

Seyedzavvar, Shabgard e Mohammadpourfard (2019), em ensaios de retificação do aço endurecido AISI 1045 com rebolo de óxido de alumínio (WA46K5V), avaliaram diferentes condições de lubri-refrigeração: a seco, convencional, MQL convencional (com apenas óleo) e MQL + grafite (em concentrações de 0,15 %, 0,25 % e 0,35 % em volume). Por meio da avaliação de forças de corte os autores observaram que a usinagem com a condição MQL resultou nos menores valores que a convencional, e a adição das partículas de grafite contribuiu para a melhoria das propriedades do fluido, reduzindo ainda mais os esforços de corte necessários para a realização da usinagem. Os autores justificam este resultado pela formação de um tribo-filme entre o rebolo e a peça que possibilita melhor lubrificação da região. As partículas de grafite possuem estrutura em camadas, sendo que cargas de cisalhamento provocam deslizamento de umas sobre as outras, resultando em redução do coeficiente de atrito. O aumento da concentração de grafite ao fluido de corte possibilita que mais partículas atuem na zona de corte, e assim, assegura uma maior eficiência em lubrificação. Apesar dos ensaios empregando a condição convencional apresentarem menores temperaturas, devido à maior capacidade de transferência de calor, a utilização do MQL + grafite, principalmente em maior concentração (0,35 % em volume), proporcionou resultados próximos, explicado pelo aumento da condutividade térmica do fluido de corte pela adição dessas nanopartículas. Em relação à qualidade dos componentes retificados, os ensaios realizados empregando

a condição MQL + grafite foi a responsável pela obtenção dos menores valores de rugosidade (R_a) e melhor textura superficial.

Wang et al. (2014) investigaram o comportamento da adição de partículas de MoS_2 ao fluido de corte aplicado via técnica MQL durante a retificação do aço endurecido AISI 1045 45 HRc com rebolo de óxido de alumínio (WA80MV12P)) e também com ensaios utilizado simulação tentando prever os resultados encontrados por meio dos testes experimentais. Os autores comprovaram a melhoria das propriedades refrigerantes e lubrificantes do fluido de corte através da adição das partículas de MoS_2, sendo observado valores de temperatura similares aqueles obtidos após os ensaios realizados por meio da técnica convencional, mesmo a condição MQL empregar uma quantidade de fluido bastante inferior em comparação com a técnica convencional.

Em estudo realizado por Sridharan e Malkin (2009), nanotubos de carbono (CNT) e MoS_2 foram dispersas ao fluido de corte e este empregado via mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação do aço endurecido AISI 52100 com rebolo de óxido de alumínio (32A80J8VBE). No geral, através da análise de energia específica, foi possível observar melhor capacidade de lubrificação dos nanofluidos, com destaque para o fluido contendo partículas de MoS_2, indicado pelos menores valores de energia específica. Os resultados de relação G e rugosidade reafirmaram a superior eficiência em lubrificação dos fluidos contendo CNT e MoS_2, sendo observado os maiores valores de relação G (menor desgaste do rebolo) e os menores para o parâmetro de rugosidade R_a. Embora as menores distorções térmicas estarem associadas aos componentes usinados empregando a condição convencional, em razão da melhor capacidade de refrigeração, menores distorções foram verificadas com a utilização dos nanofluidos em comparação com apenas óleo aplicado por meio da técnica MQL. Este é um indicativo que a adição das nanopartículas contribuí para a melhoria das propriedades refrigerantes do fluido de corte.

Zhang, Li e Zhang et al. (2015) analisaram o efeito da dispersão de diversas partículas sólidas ao fluido de corte (CNT, MoS_2 e ZrO_2) durante a retificação do aço endurecido AISI 1045 empregando rebolo de Al_2O_3. A melhoria das propriedades lubrificantes e refrigerantes do fluido de corte pela adição das nanopartículas foi observada por meio da análise das temperaturas desenvolvidas no processo, onde a utilização dos nanofluidos proporcionou menores valores que os ensaios realizados empregando apenas óleo, considerando ambos aplicados via técnica MQL, além de apresentar resultados próximos aos encontrados para a condição convencional.

Comportamento semelhante foi obtido por meio da avaliação de energia específica e da porcentagem de calor que é direcionada para a peça. Dentre as três nanopartículas estudadas, a menor quantidade de calor conduzida para o componente usinado foi identificada com a utilização do fluido contendo os nanotubos de carbono (CNT), justificada pela maior condutividade térmica destas partículas, enquanto que a menor energia específica foi atingida com as partículas de MoS_2, sinalizando melhor propriedade lubrificante.

Shabgard et al. (2017) estudaram como as propriedades de fluidos contendo partículas sólidas dispersas (grafite e CuO) influenciam na distribuição de temperatura e integridade superficial do aço endurecido AISI 1045 (48 HRc) submetido ao processo de retificação com rebolo de óxido de alumínio (WA46K5V). Embora os menores valores de temperatura estarem relacionados aos ensaios empregando fluido em abundância, os resultados mostraram que a adição de grafite e CuO contribui para a melhoria das propriedades refrigerantes e lubrificantes do fluido de corte, onde o aumento da concentração dessas partículas proporcionou a redução de temperatura pelo incremento da condutividade térmica. Através da avaliação de rugosidade e textura superficial foi possível verificar a superioridade dos nanofluidos em relação à condição convencional, justificado pela melhor capacidade de lubrificação. Comparando as duas nanopartículas estudadas os autores observaram melhor eficiência das partículas de CuO quanto à qualidade dos componentes usinados em razão do mecanismo tribológico realizado por elas, ou seja, enquanto estas partículas executam movimento de rolamento as partículas de grafite sofrem deslizamento, e este comportamento foi utilizado para esclarecer a melhoria das superfícies retificadas.

Em ensaios de retificação de três classes de materiais diferentes, aço AISI 1045, inconel 718 e ferro fundido nodular, com rebolo de carbeto de silício, Wang et al. (2018) investigaram o comportamento da dispersão de partículas de MoS_2 e Al_2O_3 em óleo de palma. Os resultados obtidos mostraram melhoria das propriedades lubrificantes do fluido de corte pela adição das nanopartículas, proporcionando a formação de um tribo-filme estável na zona de corte e facilitando a remoção de material sob a forma de cavaco. A utilização dos nanofluidos contribuiu para menores valores de rugosidade, esforços de corte e de energia específica, como também de maior relação G.

Zhang, Li e Jia et al. (2015) verificaram o efeito da utilização de nanofluidos contendo partículas de MoS_2, nanotubos de carbono (CNT) e ZrO_2 durante a retificação do aço endurecido AISI 1045 com rebolo de óxido de alumínio (WA80MV12P). A adição

das partículas sólidas ao fluido de corte possibilitou a melhoria da condição MQL em razão da redução do coeficiente de atrito na interface ferramenta/peça pelo aumento da eficiência de lubrificação. Os resultados de rugosidade e textura superficial dos ensaios empregando a condição convencional e os nanofluidos foram similares. Dentre as três nanopartículas testadas, a menor energia específica e rugosidade e melhor textura superficial foram encontradas ao empregar o fluido contendo MoS_2, explicado pelos autores pelo fato deste nanofluido proporcionar menor coeficiente de atrito.

2.6 Integridade da superfície e sub-superfície de peças retificadas

A certificação que os componentes usinados estão de acordo com as especificações de projeto e, além disso, a verificação se os mesmos não apresentam danos que possam comprometer sua funcionalidade, ocorre por meio da avaliação de parâmetros associados à integridade superficial e sub-superficial. Nesta seção serão apresentadas, além de serem discutidas a influência das condições de corte e de lubri-refrigeração, algumas das principais variáveis de saída empregadas para avaliação da integridade superficial e sub-superficial dos componentes retificados, sendo elas a rugosidade, textura superficial, tolerâncias dimensionais e geométricas, análise microestrutural, microdureza, tensões residuais e potência de retificação.

2.6.1 Rugosidade

A rugosidade é um desvio de forma micro-geométrico definida por Filho (2011) como composta por reentrâncias e saliências, ou seja, picos e vales, que compõe as superfícies. Geralmente, a rugosidade é um dos principais parâmetros especificados em projeto por indicar como será o contato e, desta forma, a vida dos componentes retificados quando em funcionamento, e sendo assim é necessária a correta seleção do processo de usinagem a ser empregado, com o intuito de atingir estes requisitos (MALKIN e GUO, 2008). A retificação é um processo que merece destaque por conseguir a obtenção de componentes com valores de rugosidade, para o parâmetro R_a, inferiores a 1,6 μm, considerado como valor limite de referência para retificação de semi-acabamento. Os principais parâmetros de rugosidade são apresentados na Tabela 2.2.

Tabela 2.3 - Principais parâmetros de rugosidade (Norma ISO 4287) (MACHADO et al., 2009).

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

A obtenção dos parâmetros de rugosidade pode ocorrer por meio da utilização de diferentes equipamentos, sendo o de maior empregabilidade o rugosímetro. Na medição, o apalpador com a ponta de diamante é posicionado sobre a superfície a ser avaliada e percorre a mesma verificando as dimensões dos picos e vales existentes, e a partir destes valores calculados os diversos parâmetros de rugosidade. E conforme apresentado na Figura 2.15, devido às dimensões do raio de ponta do apalpador, o perfil mensurado é aproximado ao perfil real da superfície, indicando que as características do aparelho interferem nas medições.

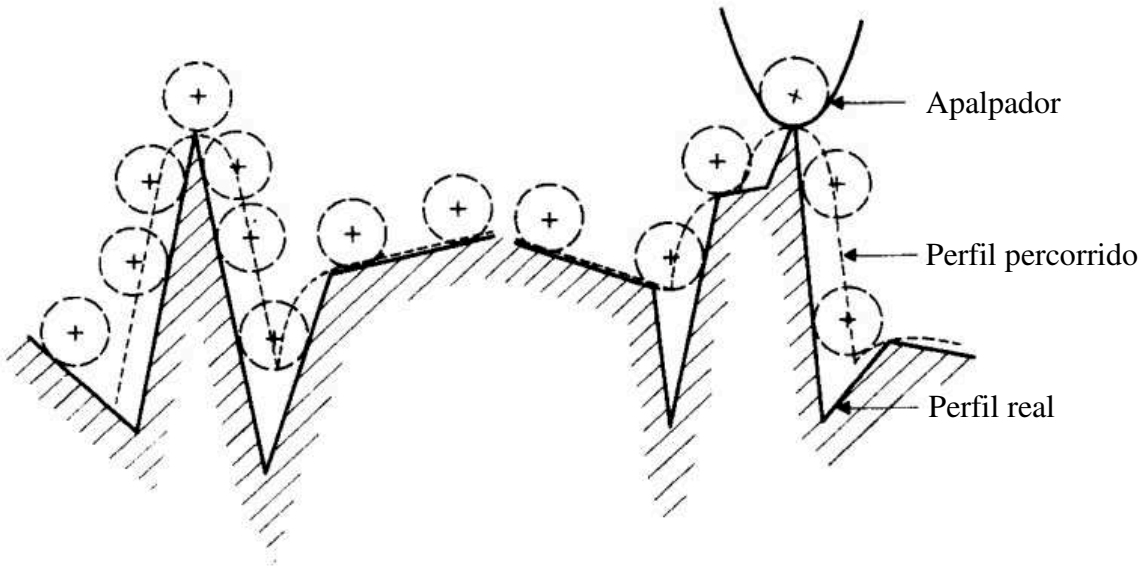


Figura 2.8 - Distorção do perfil devido às dimensões do apalpador (Adaptado de BHUSHAN, 2013).

Os parâmetros de rugosidade são diretamente influenciados pelas diversas variáveis de entrada do processo, como as propriedades do material, características do rebolo (propriedades e operação de dressagem), condições de corte e de lubri-refrigeração, dentre outros (MALKIN e GUO, 2008). Em relação aos parâmetros de corte, qualquer alteração que resulte na elevação da espessura equivalente de corte (h_{eq}), eleva a tensão existente entre as partículas abrasivas da ferramenta de corte, prejudicando o acabamento (aumento de rugosidade) (ROWE, 2014). Quanto às condições de lubri-refrigeração, a capacidade de lubrificação da zona de corte é essencial no que diz respeito a rugosidade dos componentes retificados. Huang et al. (2015) verificaram redução dos valores de rugosidade (R_a) com o aumento da velocidade do rebolo (V_s) durante a retificação do aço endurecido AISI 52100, justificado pela redução da espessura equivalente de corte, e os valores encontrados se encontravam na faixa de 0,46 μm a 0,52 μm. Hadad e Hadi (2013) empregaram diferentes penetrações de trabalho (5 μm, 15 μm, 25 μm, 35 μm, 45 μm, 55 μm e 65 μm) na retificação de aço inoxidável endurecido UNS S34700 (60 ± 2 HRc), sendo que os resultados obtidos mostraram que o aumento de a_e promoveu incremento da espessura de material removido, contribuindo negativamente para a qualidade superficial, observado pelo aumento dos valores de rugosidade. Os autores também verificaram a importância das condições de lubri-refrigeração quanto ao acabamento, onde a condição MQL propiciou os menores resultados de rugosidade em razão da melhor eficiência em lubrificação da interface

rebolo/peça. Jaswanth et al. (2017) também observaram aumento dos valores de rugosidade com a penetração de trabalho e velocidade do rebolo na retificação com rebolo de óxido de alumínio do aço HC-HCr, além dos resultados indicarem melhoria do acabamento através da adição de partículas de Al_2O_3 ao fluido de corte pela melhoria da capacidade de lubrificação. Kantharaj et al. (2018) constataram comportamento semelhante da rugosidade com a penetração de trabalho, enquanto Rudrapati, Pal e Bandyopadhyay (2015) constataram aumento da rugosidade com a velocidade de avanço em razão do aumento do parâmetro h_{eq}. Em ensaios de retificação cilíndrica de mergulho do aço endurecido AISI 52100 (62 HRc) com rebolo de óxido de alumínio, Mao e Zou et al. (2012) verificaram que o posicionamento e a distância do bocal, além da pressão de aplicação do fluido de forte, exercem influência sobre os valores de rugosidade, sendo que os valores de rugosidade não ultrapassaram 1,0 μm. Uhlmann et al. (2016) estudaram o comportamento de diferentes parâmetros de corte no processo de retificação cilíndrica e constataram aumento da rugosidade com a velocidade de avanço e penetração de trabalho, mas com a redução da velocidade de corte, justificado pelos autores pelo aumento da espessura equivalente de corte.

Em relação à granulometria mesh do rebolo, Zhou, Peng e Pettersson (2015) observaram que a superfície do aço inoxidável duplex 2304 retificada com rebolo de grana 400 apresentou menores valores de rugosidade em comparação com os ensaios realizados com o rebolo de grana 60 devido ao rebolo com maior granulometria mesh (maior grana) possuir grãos menores, e com isso irá resultar em menor área de contato entre as arestas dos abrasivos e a peça e, consequentemente, uma menor quantidade de material é removida por abrasivo, além das marcas deixadas pelos abrasivos serem menores e mais estreitas, contribuindo positivamente para o acabamento do componente.

2.6.2 Textura superficial

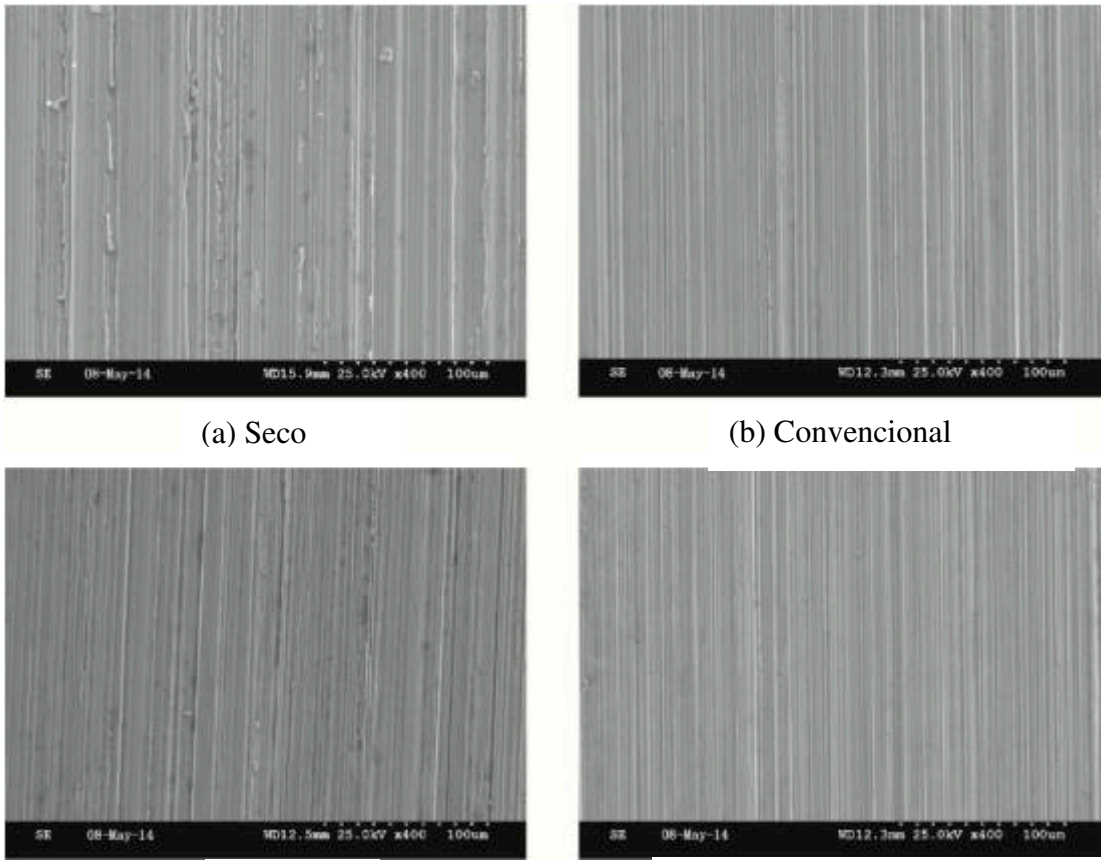
Além da rugosidade, outra variável de saída usualmente utilizada para avaliação da qualidade superficial de componentes retificados é a textura. Enquanto a rugosidade esta relacionada às dimensões (valores numéricos) dos picos e vales deixados sobre a superfície da peça após passagem do rebolo e ação das partículas abrasivas, a textura superficial diz respeito a 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. A avaliação das superfícies usinadas ocorre pode ser realizada por

microscópiso óticos, dependendo da ampliação disponível, e ainda por um Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) que é o mais comum para este tipo de avaliação.

Zhou et al. (2015) observaram que as superfícies retificadas com rebolo de maior tamanho de abrasivo apresentaram sulcos mais profundos, maior quantidade de regiões com deformações plásticas e cavacos aderidos, além de destacar a importância da utilização de fluido de corte, para a qualidade superficial, durante o processo de retificação. Shabgard et al. (2017) encontraram melhor qualidade superficial nas condições de corte mais brandas (V_w = 5 m/min e a_e = 10 μm) em comparação com os ensaios realizados empregando V_w = 15 m/min e a_e = 40 μm, durante a retificação com rebolo de óxido de alumínio do aço endurecido AISI 1045 sob diferentes condições de lubri-refrigeração (a seco, convencional, MQL + grafite e MQL + CuO). Além disso, a utilização dos nanofluidos proporcionou melhoria das superfícies retificadas justificada por superior propriedades lubrificantes e maior eficiência em penetrar na zona de corte. Seyedzavvar, Shabgard e Mohammadpourfard (2019) encontraram resultados semelhantes do comportamento das superfícies com a alteração da penetração de trabalho e velocidade da peça pelo fato do emprego destas condições de corte mais críticas resultarem no aumento da quantidade de partículas abrasivas atuantes no processo, elevando a taxa de deformação plástica das superfícies usinadas e, então, prejudicando o acabamento. Os autores também verificaram que o aumento da concentração de partículas sólidas adicionadas ao fluido de corte contribuiu para melhoria da qualidade superficial dos componentes, explicado por um número maior de partículas estarem presentes e atuantes na interface ferramenta/peça exercendo a função de lubrificação.

Em outro trabalho, Hadad e Hadi (2013) e Chakule, Chaudhari e Talmale (2017) mostraram superioridade da técnica MQL através da análise das superfícies retificadas, justificado pela maior eficiência do fluido de corte em atingir a região de corte devido ao auxílio do ar comprimido e maior capacidade de lubrificação do óleo que chega a interface rebolo peça. Mas a eficiência da técnica MQL convencional vai depender também das condições operacionais, par rebolo-peça e operação, por exemplo, o que levou vários pesquisadores a buscar aprimorar esta técnica e assim procurando ampliar a utilização da técnica MQL. Assim, diversos autores (LEE et al., 2012; MAO et al., 2012; SETTI et al., 2014; WANG et al., 2018; ZHANG, LI e JIA et al., 2015) tem demonstrado melhoria da condição MQL pela adição de partículas sólidas ao fluido de corte. Um exemplo é o trabalho desenvolvido por Zhang, Li e Jia et al. (2015) (Figura 2.16) durante a retificação do aço endurecido AISI 1045 empregando diferentes condições de lubri-

refrigeração, sendo uma destas o fluido de corte contendo MoS_2. Conforme pode ser observado, a utilização do fluido de corte contendo as partículas sólidas apresentou textura superficial similar à encontrada pela condição convencional e bastante superior em comparação com o componente obtido pela condição MQL. Os autores destacam que a adição de partículas sólidas contribui para a melhoria da capacidade de lubrificação do fluido de corte e, assim, influencia positivamente no acabamento do componente usinado.



(a) Seco (b) Convencional

(c) MQL (d) MQL + nanopartículas

Figura 2.9 - Textura superficial do aço endurecido AISI 1045 submetido à retificação com diferentes condições de lubri-refrigeração (ZHANG, LI e JIA et al., 2015).

2.6.3 Desvio de circularidade

Além das tolerâncias microgeométricas, representada pela rugosidade, é necessário a medição de outros desvios geométricos visando verificar se essas tolerâncias estão de acordo com as especificações de projeto, e dentre estas a circularidade merece destaque, principalmente necessária em componentes submetidos à retificação cilíndrica externa. O desvio de circularidade representa a diferença entre o perfil da superfície mensurada em

comparação com um círculo teórico ideal, sendo esta tolerância dada pela distância radial entre dois círculos concêntricos onde o perfil da seção avaliada se encontra entre estes (ABNT NBR 6409, 1997).

Fragoso et al. (2016) verificaram a influência dos parâmetros de corte durante a retificação cilíndrica do aço VP50 com rebolo de carbeto de sílicio verde com fluido de corte aplicado por meio da técnica convencional MQL. Além do aumento dos desvios de circularidade com a velocidade de avanço, justificado pelo maior coeficiente de atrito na interface rebolo/peça e consequente elevação das temperaturas desenvolvidas no processo, foi observado que a condição de lubri-refrigeração MQL resultou em valores inferiores de desvio de circularidade, indicando assim superior eficiência na penetração do fluido de corte na zona de corte em comparação com a condição convencional.

Em outro trabalho desenvolvido por Alves et al. (2017), os autores também encontraram comportamento semelhante dos desvios de circularidade quanto às condições de lubri-refrigeração e velocidade de avanço no processo de retificação cilíndrica do aço N2711. Anjos et al. (2016) ainda destaca a importância da seleção mais apropriada do rebolo abrasivo, onde a utilização do rebolo misto de SiC preto com Al_2O_3 proporcionou os menores valores de desvios de circularidade em razão da alta resistência ao desgaste do carbeto de silício preto.

A influência das condições de lubri-refrigeração sobre os desvios de circularidade durante a retificação cilíndrica do aço AISI 4340 (60 HRc) foi estudada em trabalhos desenvolvidos por Bianchi et al. (2017) e Bianchi et al. (2018). Os autores constataram que a utilização de um sistema auxiliar de limpeza do rebolo em conjunto com a técnica MQL possibilitou a obtenção de valores de desvios de circularidade similares aos da condição convencional, indicando eficiência em remoção de calor da zona de corte, responsável direto das alterações das tolerâncias dimensionais e geométricas dos componentes usinados. Em relação ao posicionamento do bocal e vazão da técnica MQL, estas variáveis influenciam diretamente na quantidade de fluido de corte que atingirá a região de contato ferramenta/peça e, consequentemente, no fluxo de calor retirado do sistema, onde o bocal posicionado a 30° e o aumento da vazão de fluido de corte proporcionaram os menores valores de desvios de circularidade (OLIVEIRA et al., 2012; RODRIGUEZ et al., 2017; FRANCELIN et al., 2018). Ruzzi et al. (2016) e Sato et al. (2018) salientam que a adição de água ao fluido de corte aplicado via técnica MQL é uma alternativa para redução dos desvios de circularidade de componentes retificados pelo fato de aumentar a dissipação de calor oriundos do processo de usinagem. Os resultados

obtidos por Ruzzi et al. (2016) também indicaram redução dos valores de desvios de circularidade com o emprego de um bocal auxiliar de ar comprimido para limpeza da rebolo, como apresentado na Figura 2.17.

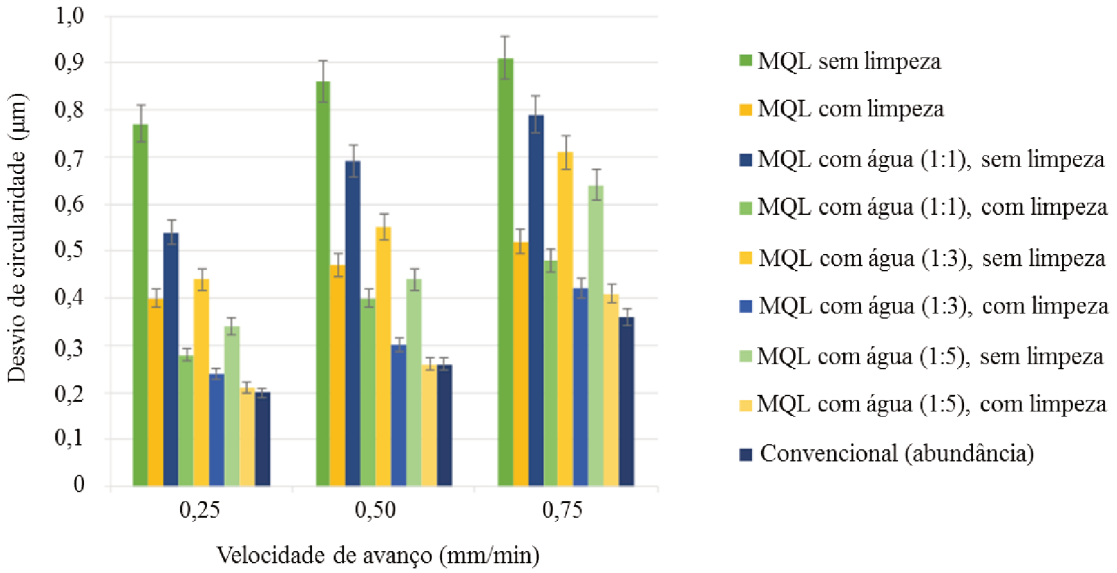


Figura 2.10 - Desvio de circularidade dos componentes retificados sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração (Adaptado de RUZZI et al., 2016).

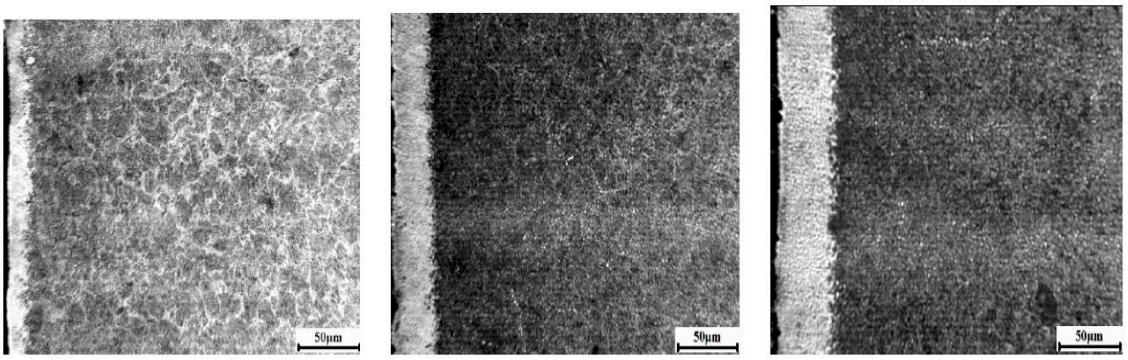
2.6.4 Análise microestrutural

Conforme discutido anteriormente na secção 2.4, no processo de retificação há o emprego de uma elevada quantidade de energia que é transformada em calor na interface rebolo/peça, possibilitando assim a remoção de material sob a forma de cavaco. Contudo, em razão dos materiais abrasivos convencionais (a base óxido de alumínio e carbeto de silício) apresentarem baixa condutividade térmica e os cavacos oriundos do processo possuírem dimensões bastante reduzidas pelo fato das penetrações de trabalho selecionadas serem de 10 µm a 100 µm, o que é bem inferior aquelas normalmente empregadas me processos de usinagem com ferrametnas de geometria definida, como o torneamento por exemplo, o que faz com que os cavacos tenham dimensões bem reduzidas, e assim direcionando a maior parte do calor para a peça. Desta forma, este calor pode ser suficiente para que ocorra um "tratamento térmico" indesejável, resultando na alteração microestrutural do material usinado. As principais alterações microestruturais observadas através da avaliação de componentes retificados é a formação de uma camada de matensita próxima à superfície, conhecida como camada

branca, e uma região de revenimento, indicada por uma camada escura. A martensita é oriunda do rápido aquecimento e resfriamento das camadas próximas à superfície usinada, enquanto que o revenimento é decorrente das baixas taxas de resfriamento das camadas mais distantes da superfície usinada (MALKIN e GUO, 2008).

Huang et al. (2012) estudaram a retificabilidade de diferentes aços endurecidos (AISI 5140, AISI 1045, 7CrSiMnMoV e AISI 52100) com o emprego de diferentes condições de corte. Os resultados obtidos mostraram que o aumento da velocidade do rebolo e penetração de trabalho ocasionaram em aumento da espessura da camada branca, justificado pelo aumento de partículas abrasivas atuantes na região de corte, proporcionando maiores temperaturas desenvolvidas no processo e, consequentemente, maiores os riscos de ocorrência de transformação microestrutural. Em relação à velocidade da peça, os autores observaram aumento da camada branca com o aumento de V_w, sendo que este comportamento foi encontrado de 3 m/min a 9 m/min. O aumento de 9 m/min para 12 m/min ocasionou redução da espessura da camada branca em razão da redução do tempo de contato da ferramenta com a peça e, assim, nas temperaturas de retificação. Além disso, as propriedades do material também influenciam na magnitude das alterações microestruturais, onde o aumento da quantidade de carbono induz a maiores espessuras de camada branca pelo fato dos átomos de carbono propiciarem o fortalecimento da formação de martensita.

Uhlmann et al. (2016) também constataram aumento da camada branca com o aumento de V_s e a_e e redução de V_f, enquanto Kirsch e Aurich (2014) verificaram comportamento semelhante com a variação da penetração de trabalho e velocidade de avanço. Apesar do aumento de V_f resultar em aumento da espessura de cavaco removido, menor é o tempo que a ferramenta fica em contato com a peça e o tempo de calor ser conduzido para o material usinado, contribuindo assim para redução da espessura da camada de martensita. Através da análise microestrutural Huang et al. (2015) observaram aumento das dimensões da região termicamente afetada com o aumento da velocidade de corte durante a retificação do aço endurecido AISI 52100 (Figura 2.18).



(a) V_s = 60 m/s (b) V_s = 75 m/s (c) V_s = 90 m/s

Figura 2.11 - Análise microestrutural do aço AISI 52100 submetido à retificação em diferentes velocidades de corte (Adaptado de HUANG et al., 2015).

Com relação às condições de lubri-refrigeração, Silva et al. (2013) e Anjos et al. (2016) evidenciaram desempenho semelhante das condições convencional e MQL, comprovando eficiência em refrigeração e lubrificação da mínima quantidade de lubrificante mesmo empregando no processo uma quantidade de fluido bastante inferior. Mao et al. (2012) observaram melhoria da condição MQL pela adição de partículas de Al_2O_3, onde melhor espessura da camada branca e camada escura (região de revenimento) foram encontradas pela utilização do nanofluido durante a retificação do aço endurecido AISI 52100. Os autores justificaram este comportamento em razão do aumento da capacidade de lubrificação e refrigeração do fluido de corte pela adição das partículas sólidas.

2.6.5 Microdureza

As alterações microestruturais, motivadas pela elevada parcela de calor que é direcionada para a peça, promovem a alteração das propriedades dos materiais, com destaque para a dureza. Segundo Marinescu et al. (2004) a variação dos valores de microdureza, vinculado a extensão das alterações microestruturais, pode ocorrer desde a superfície retificada até camadas com magnitude de aproximadamente 100 µm mas há evidências que elas podem chegar a 200 µm. Neste sentido a medição de microdureza está associada também à integridade sub-superficial e mensurada perpendicularmente à superfície usinada, ou ainda pode ser medida na própria superfície retificada (RUZZI, 2019). Caso o valor de microdureza seja superior à referência (microdureza obtida por meio da medição do material antes da realização dos ensaios experimentais, ou seja, o

material estando livre de danos térmicos), este é um indicativo da formação de camada de matensita, enquanto que uma microdureza inferior à inicial do material está relacionada ao revenimento (MALKIN e GUO, 2008).

Huang et al. (2012) verificaram aumento da magnitude da camada branca com a velocidade de corte, velocidade da peça e penetração de trabalho, indicando assim aumento dos valores de microdureza próximos à superfície retificada, sendo justificado em razão do aumento das temperaturas de retificação com o aumento destes parâmetros de corte. Em ensaios de retificação do aço endurecido AISI 52100, Mao et al. (2012) constataram melhoria da condição MQL pela dispersão de Al_2O_3 ao fluido de corte, sendo observadas menores temperaturas desenvolvidas, menor magnitude da região termicamente afetada, sinalizando, desta forma, menor variação dos valores de microdureza. Silva et al. (2013) estudaram a influência de diferentes condições de lubri-refrigeração sobre os perfis de microdureza do aço endurecido AISI 4340 (52 HRc) submetido à retificação cilíndrica externa com rebolo de óxido de alumínio. Os resultados obtidos mostraram que a condição convencional proporcionou a menor variação dos valores de microdureza devido esta condição empregar uma maior quantidade de fluido de corte e, assim, possuir maior eficiência em reduzir as temperaturas desenvolvidas no processo e os riscos de alterações microestruturais que alterem as propriedades mecânicas do material usinado. O comportamento das características da condição MQL também foram investigadas, onde a combinação de vazão de 40 mL/h e velocidade do ar comprimido de 26,4 m/s foi a responsável pela obtenção de microdureza similar à encontrada nos ensaios realizados empregando a condição convencional.

Huang, Ren e Li et al. (2016) também demonstraram a importância da correta seleção das características das condições de lubri-refrigeração por meio da análise dos perfis de microdureza de componente submetido à retificação, sendo encontradas menor magnitude da camada termicamente afetada com o aumento da vazão do MQL. Shabgard et al. (2017) observaram maiores quedas de microdureza com o aumento da penetração de trabalho durante a retificação do aço endurecido AISI 1045, segundo apresentado na Figura 2.19, pelo fato de haver maior quantidade de partículas abrasivas atuantes no processo e maior calor. Além disso, os autores verificaram que a adição de partículas sólidas de Cuo e grafite ao fluido de corte proporcionou melhoria de suas propriedades refrigerantes e lubrificantes, resultando em menores temperaturas desenvolvidas na retificação e, consequentemente, em menor risco de ocorrência de alterações microestruturais que alterem a microdureza do material.

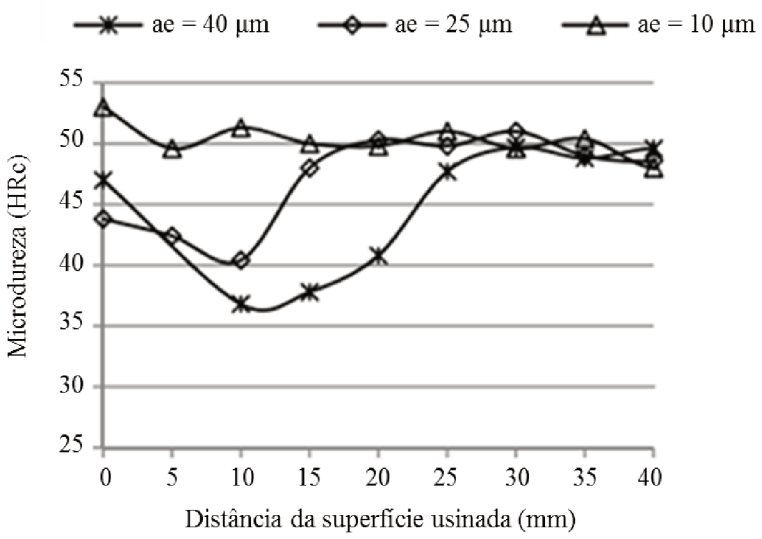


Figura 2.12 - Perfis de microdureza durante a retificação do aço endurecido 1045 sob diferentes condições de corte (SHABGARD et al., 2017).

2.6.6 Potência de corte na retificação

A avaliação da potência de corte na retificação é fundamental para entendimento da eficiência do processo pois está diretamente relacionada à energia específica, ou seja, a quantidade de energia necessária para a realização da operação de usinagem. De acordo com Rowe (2014) qualquer variação dos parâmetros de entrada que influenciem na taxa de remoção de material e, consequentemente, na espessura equivalente de corte (h_{eq}), ocasiona aumento dos esforços de corte e, então, da potência do processo. A potência está diretamente relacionada à velocidade de corte (V_s) e força tangencial (F_t), como demonstrado na Equação 2.16.

$$P = V_s \,.\, F_t \tag{2.16}$$

Em relação aos parâmetros de corte, Yao et al. (2014) verificaram aumento dos esforços de corte através do incremento da penetração de trabalho ou da velocidade da peça durante processo de retificação devido ao fato do aumento destes parâmetros proporcionarem maior área de contato rebolo/peça, elevando a taxa de remoção de material e, assim, maior é a espessura de material removido na usinagem. Já para a velocidade de corte, os autores encontraram comportamento oposto em razão de existirem uma maior quantidade de partículas abrasivas atuantes na zona de corte, reduzindo a

espessura de cavaco removido por grão e, consequentemente, a força de retificação. Batako e Tsiakoumis (2014) e Rabiei et al. (2017) também observaram tendência semelhante da força tangencial com o aumento da taxa de remoção de material, indicado pela elevação da penetração de trabalho e velocidade da peça, em processo de retificação de aço endurecido com rebolo de óxido de alumínio.

Além dos parâmetros de corte, a condição de lubri-refrigeração também influencia diretamente na magnitude das forças de corte no processo de retificação. Hadad et al. (2013) encontraram menores esforços de corte em ensaios realizados com a condição MQL em comparação aquela convencional na retificação cilíndrica de mergulho do aço inoxidável endurecido UNS S34700 (60 ± 2 HRc), atribuído à superior capacidade de lubrificação desta técnica, favorecendo menor atrito na região de corte e melhor eficiência em remoção dos cavacos gerados. Mao et al. (2012), ManojKumar e Ghosh (2014) e Huang, Ren e Li et al. (2016) ainda destacam que a vazão do fluido de corte e o posicionamento do bocal, ambos para a técnica MQL, interferem claramente nos esforços de corte oriundos do processo por indicarem superior/inferior eficácia em lubricar a zona de corte. Apesar de alguns estudos apresentarem resultados similares da condição MQL em relação à convencional quanto a força de retificação, outras pesquisas mostram justamente o contrário (CHAKULE, CHAUDHARI e TALMALE, 2017) e, então, a adição de partículas sólidas, como Al_2O_3, nanodiamante, MoS_2, grafite e nanotubos de carbono, ao fluido de corte têm apresentado melhoria da capacidade de lubrificação da mínima quantidade de lubrificante (MQL) representado pela redução dos esforços de corte (MAO e TANG, 2012; LEE et al., 2012; MAO et al., 2013; MOLAIE, ZAHEDI e AKBARI, 2018).

CAPÍTULO III

Metodologia

Neste capítulo serão apresentadas todas as informações relativas aos procedimentos adotados para realização dos ensaios experimentais bem como a lista dos equipamentos e materiais utilizados. Neste sentido, esta seção abrangerá desde o material usinado e condições de corte e de lubri-refrigeração até a forma de mensuração das variáveis de saída selecionadas. Na Figura 3.1 é apresentado o fluxograma contendo um resumo das informações relativas à metodologia adotada nesta pesquisa.

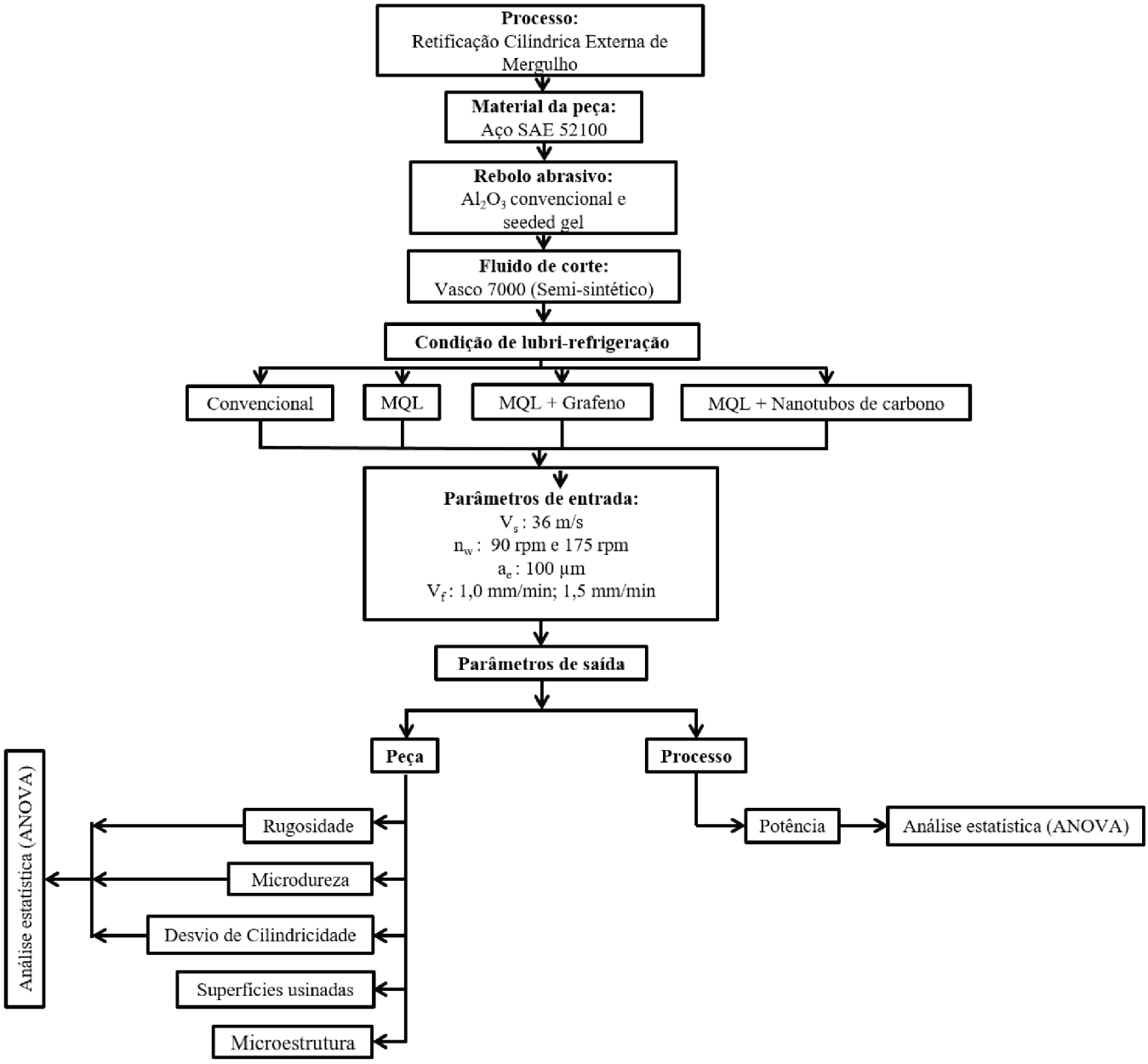


Figura 3.1 - Fluxograma contendo as principais informações relacionadas aos ensaios experimentais de retificação.

3.1 Equipamento

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios experimentais foi a retificadora cilíndrica externa de mergulho, modelo UA61, da empresa fabricante Ferdimat, conforme apresentado na Figura 3.2. Este equipamento apresenta potência total instalada de 5,6 kW (7,51 hp), eixo de rotação do rebolo constante e igual a 1 650 rpm e avanço mínimo

(menor penetração de trabalho) de 0,005 mm, e se encontra no Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) da Faculdade de Engenharia Mecância da UFU.

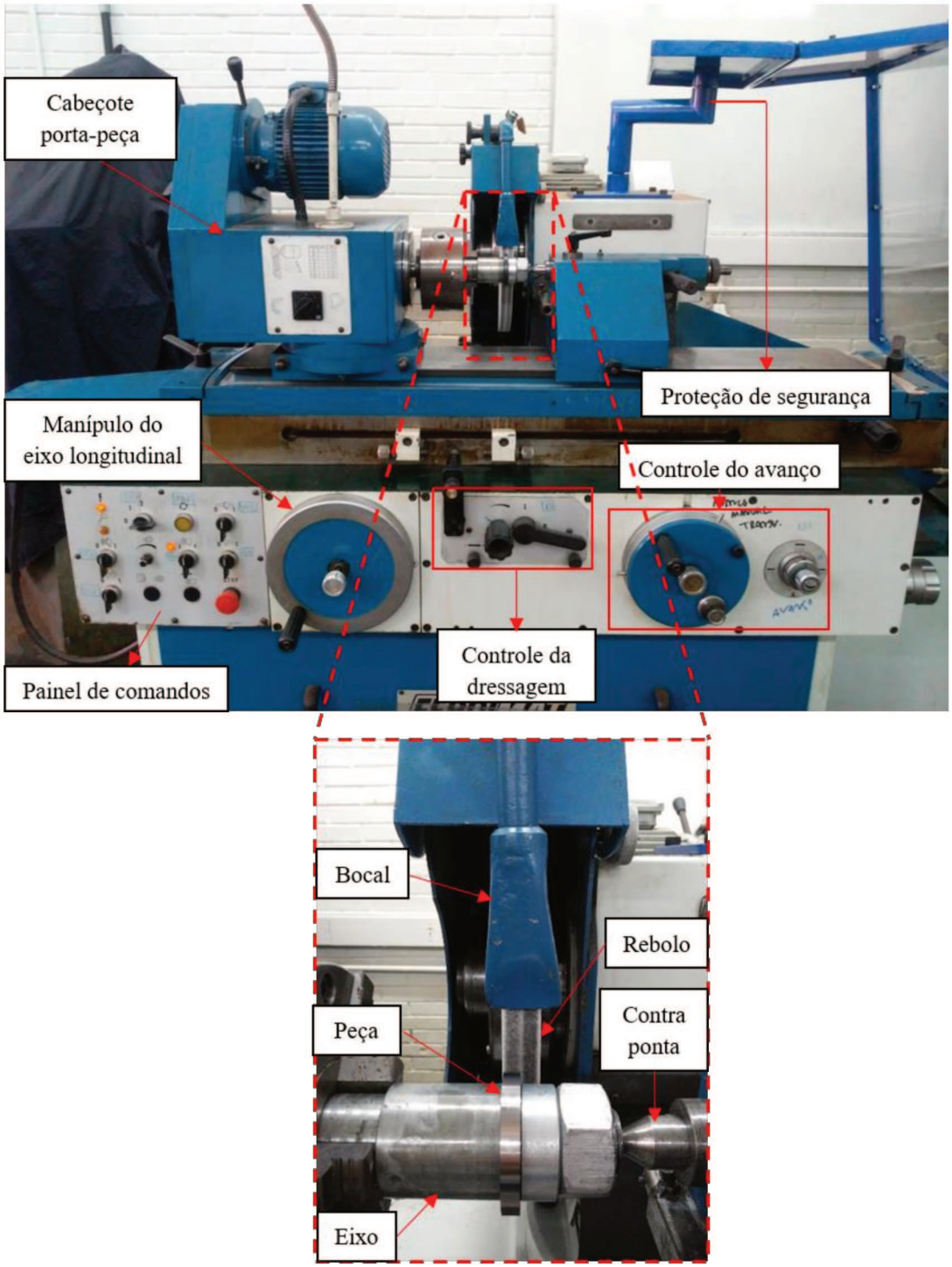


Figura 3.2 – Retificadora cilíndrica externa Ferdimat, modelo UA61.

3.2 Material de trabalho

O material utilizado para os ensaios foi o aço endurecido SAE 52100, que é amplamente empregado na fabricação de rolamentos. Este material passou por tratamento térmico de têmpera e revenimento e apresentou a dureza igual a (60 ± 2) HRc. Foram confeccionados corpos de prova no formato de anel, com as seguintes dimensões: 62 mm de diâmetro externo x 30 mm de diâmetro interno x 8 mm de largura (Figura 3.3). Estas dimensões relativas aos diâmetros foram selecionadas com base na geometria de um rolamento rígido de esferas de uma carreira (62 mm de diâmetro externo x 30 mm de diâmetro interno x 16 mm de largura).

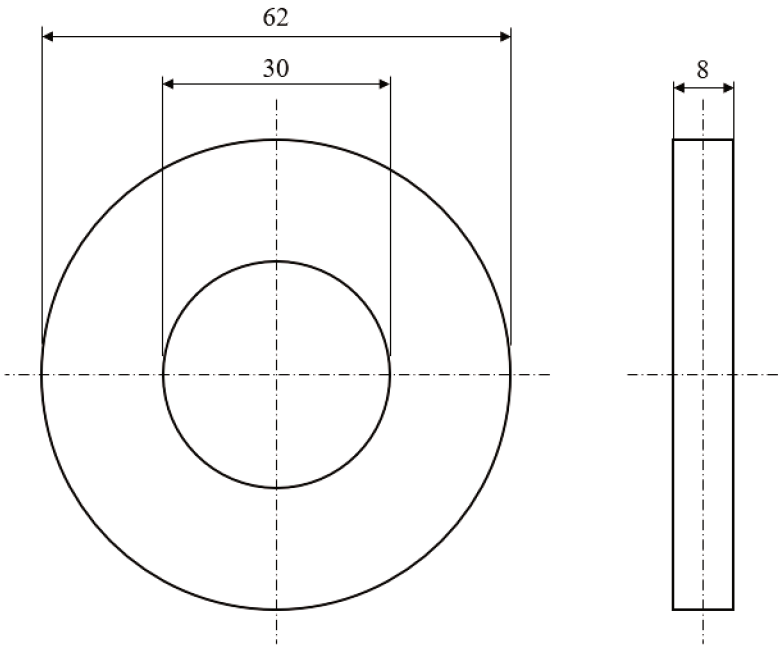


Figura 3.3 - Dimensões do corpo de prova do aço endurecido SAE 52100 empregado nos ensaios experimentais de retificação.

3.3 Rebolo abrasivo

Os rebolos abrasivos empregados no desenvolvimento dos testes de retificação foram de óxido de alumínio branco convencional (AA46K5V1) e seeded gel (2SA46K5V1C) sendo ambos com dimensões 405 mm (diâmetro externo) x 127 mm (diâmetro interno) x 25,4 mm (largura) do fabricante Alcar Abrasivos.

Com o intuito de garantir que a superfície do rebolo apresentasse topografia similar em todas as condições avaliadas, antes da realização de cada ensaio experimental, o rebolo foi submetido à operação de dressagem. O dressador utilizado foi do tipo fliesen e as condições de dressagem definidas foram: profundidade de dressagem (a_d) de 40 µm por passada, largura do dressador b_d = 0,8 mm, grau de recobrimento do rebolo, U_d = 3 e tempo de dressagem t_d = 3,3 s. Cabe ressaltar que a cada duas operações de dressagem o dressador era analisado em um estereomicroscópio visando o acompanhamento de seu desgaste e agindo de forma para que isso não alterasse o valor de U_d utilizado. Nas Figuras 3.4a a 3.4c são apresentadas imagens de sua montagem na máquina-ferramenta e detalhes do dressador, respectivamente.

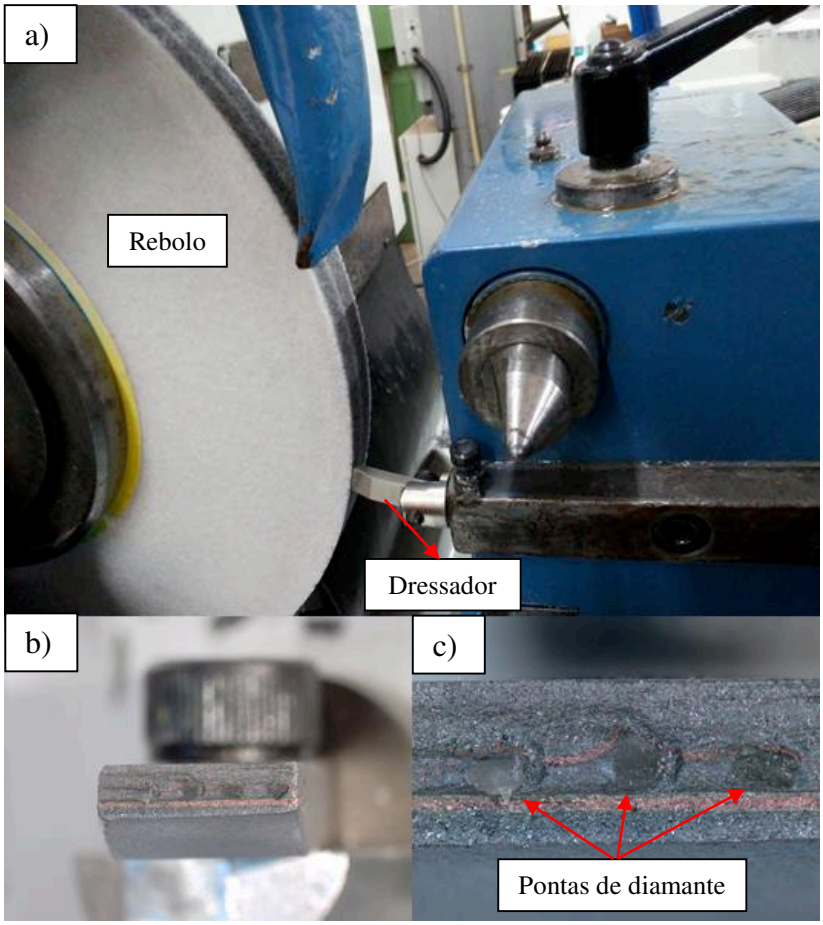


Figura 3.4 - a) Montagem do dressador, b) e c) imagens do dressador fliesen empregado durante as operações de dressagem obtida em um microscópio óptico.

3.4 Condições de usinagem na retificação

Os parâmetros de entrada selecionados para os ensaios de retificação externa de mergulho estão apresentados na Tabela 3.1. Os ensaios foram realizados no sentido de corte discordante. A velocidade da peça (0,29 m/s e 0,57 m/s), a velocidade de avanço (1,0 mm/min e 1,5 mm/min), o tipo de rebolo (Al_2O_3 convencional e seeded gel) e condição de lubri-refrigeração (convencional, MQL (óleo), MQL (óleo + grafeno) e MQL (óleo + nanotubos de carbono) foram os parâmetros variados nos ensaios experimentais. Ressalta-se que a escolha dos parâmetros de corte foi baseada em ensaios preliminares; e ao todo foram realizados sessenta e quatro (64) ensaios de retificação (ensaio principal e 1 réplica). A concentração tanto do grafeno quanto dos nanotubos foi a mesma e igual a 0,05 % em peso e a razão da seleção deste valor será comentada mais adiante ainda nesta seção.

Tabela 3.1 – Parâmetros de entrada dos ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho.

Parâmetro de entrada	**Condição adotada**
Rotação do rebolo (rpm)	1650
Velocidade de corte (V_s) [m/s]	36
Rotação da peça (n_w) (rpm)	90 ; 175
Velocidade da peça (V_w) (m/s)	0,29 ; 0,57
Velocidade de avanço (V_f) [mm/min]	1,0 ; 1,5
Penetração de trabalho (a_e) [μm]	100
Rebolo abrasivo	Al_2O_3 convencional e seeded gel
Material	Aço endurecido SAE 52100
Condição de lubri-refrigeração	Convencional MQL (óleo) MQL (óleo + grafeno) MQL (óleo + nanotubos de carbono)
Variáveis de saída	
Parâmetros Rugosidade (R_a, R_t e R_z)	Desvio de cilindricidade
Imagens da superfície retificada	Microdureza
Análise microestrutural	Potência

Antes dos ensaios definitivos, todas as amostras foram devidamente preparadas com condições brandas de retificação. Em seguida, as amostras foram levadas à máquina de medir por coordenadas do Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia para medição

dos desvios de cilindricidade. Este mesmo procedimento foi feito nas amostras após a retificação a fim de permitir comparações.

3.5 Condições de lubri-refrigeração

Para os ensaios foram selecionadas quatro condições de lubri-refrigeração, sendo elas: a convencional, MQL (óleo), MQL+Grafeno (óleo + grafeno) e MQL+NC (óleo + nanotubos de carbono). O fluido de corte utilizado para todas as condições de lubri-refrigeração foi o Vasco 7 000, do tipo semi-sintético à base de óleo éster vegetal e miscível em água, do fabricante Blaser Swisslube. Este fluido possui como características principais uma massa específica igual a 0,98 g/cm³ e ponto de fulgor de 134 °C. Na Tabela 3.2 são apresentadas algumas propriedades referentes às diversas condições de lubri-refrigeração utilizadas.

Tabela 3.2 – Propriedades dos fluidos de corte a 25 °C empregados nos ensaios experimentais.

Condição de lubri-refrigeração	**Condutividade térmica (W/mk)**	**Viscosidade cinemática ($mm^2.s^{-1}$)**	**Viscosidade dinâmica (mPa.s)**	**Massa específica (g/cm^3)**
Convencional (sem partículas sólidas – Emulsão na diluição 1:19)	0,602 ± 0,001	1,084 ± 0,002	1,080 ± 0,002	0,997 ± 0,000
MQL (óleo sem adição de água e sem partículas sólidas)	0,314 ± 0,000	151,367 ± 0,148	148,542 ± 0,144	0,981 ± 0,000
MQL+Grafeno	0,321 ± 0,001	166,692 ± 2,472	163,407 ± 2,392	0,980 ± 0,001
MQL+NC	0,264 ± 0,001	157,235 ± 1,040	154,288 ± 1,013	0,981 ± 0,000

O procedimento de caracterização dos fluidos de corte foi realizado no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia (LEST-NANO), da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia. A medição dos valores de viscosidade foi feita com o auxílio de um viscosímetro Anton Paar, Stabinger, modelo SVM 3000, sendo realizadas três medições (medição + duas réplicas) para cada amostra de fluido avaliada. Na Figura 3.5 está apresentado o sistema de medição utilizado para estas análises. Para a medição da condutividade térmica, o equipamento utilizado foi o

condutivímetro Linseis THB-1, também presente no LEST-NANO. Na Figura 3.6 é apresentado o equipamento empregado para a medição de condutividade.

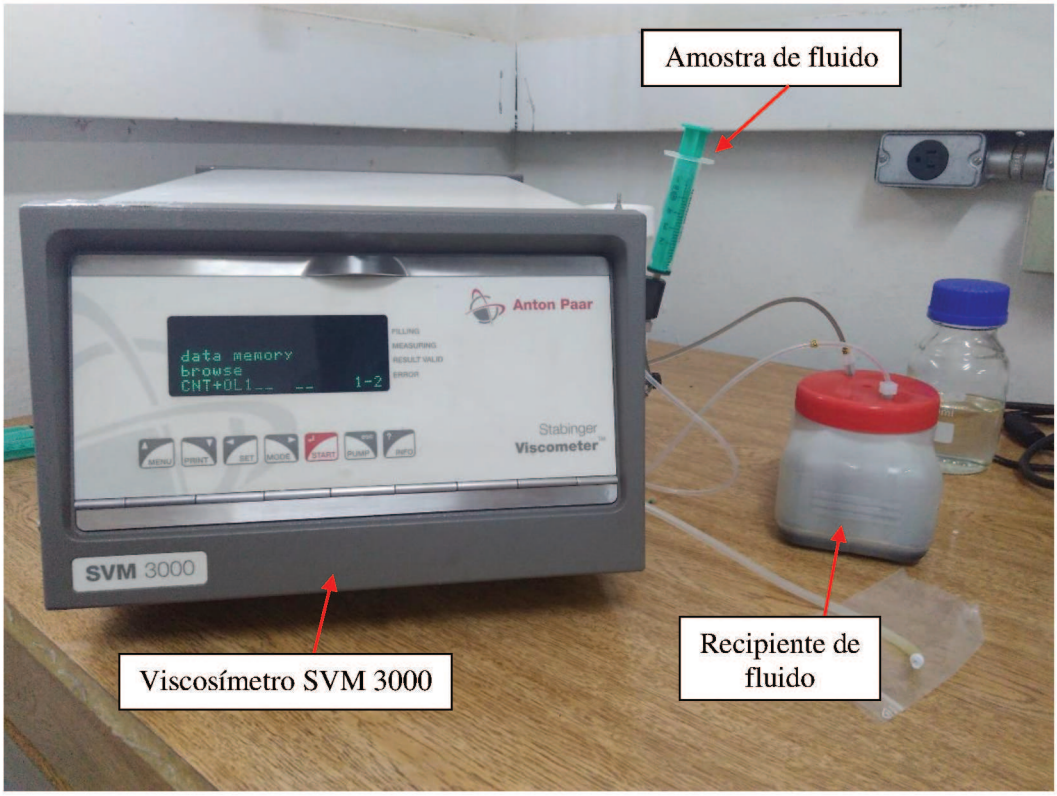


Figura 3.5 - Sistema de medição de viscosidade (dinâmica e cinemática) e massa específica.

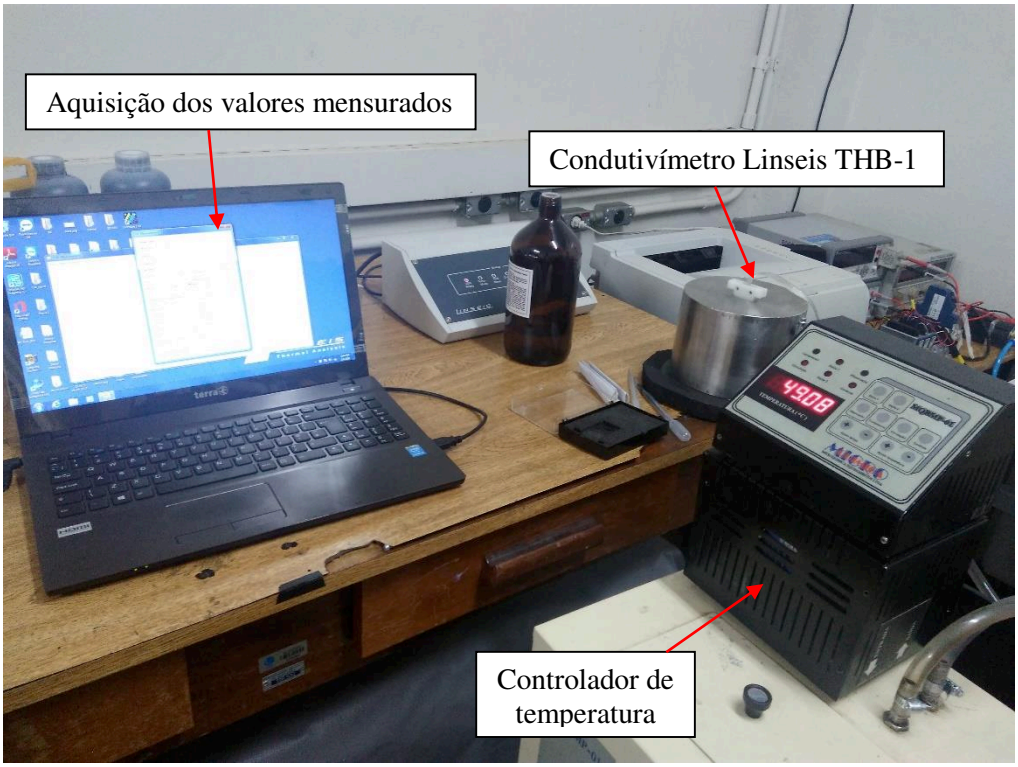


Figura 3.6 – Sistema de medição de condutividade térmica.

3.5.1 Condição de lubri-refrigeração convencional (abundância)

Nos ensaios realizados utilizando a condição de lubri-refrigeração convencional, o fluido de corte foi empregado em uma diluição na proporção 1:19 (BRIX ≈ 3 %, conferido e ajustado sempre antes que um novo ensaio de retificação era iniciado por meio de um refratômetro N1, ATAGO), e à vazão de 11 L/min. Na Figura 3.7 é apresentada a configuração do sistema de aplicação de fluido de corte por meio da condição convencional.



Figura 3.7 - Sistema de aplicação de fluido de corte pela condição convencional.

3.5.2 Condição de lubri-refrigeração MQL (óleo)

Nesta condição de lubri-refrigeração, o fluido de corte foi empregado sem adição de água por meio do sistema da mínima quantidade de lubrificação (MQL) à vazão de 150 mL/h. Como recipiente para o fluido foi utilizada uma seringa que, a partir de uma placa de arduíno programada, ela tem seu êmbolo colocado em movimento e assim a vazão do fluido é bombeada até o bocal, que é selecionada por um potenciômetro. Em conjunto com o fluido de corte é utilizado o ar comprimido que impulsiona as gotículas de fluido para a zona de corte, que neste trabalho foi empregado a pressão aproximada de 0,3 MPa. Devido ao fato ser necessário que o bocal para esta condição apresente duas entradas (fluido e ar comprido), o bocal empregado em todos os ensaios de MQL (MQL, MQL+Grafeno e MQL+Nanotubos de carbono) é diferente do bocal da condição de lubri-refrigeração convencional, sendo que ambos os bocais apresentam distância de aproximadamente 60 mm da zona de retificação. Nas Figuras 3.8a e 3.8b estão

apresentados o tipo de bocal empregado para a técnica MQL e o sistema bomba de fluido-seringa, respectivamente.

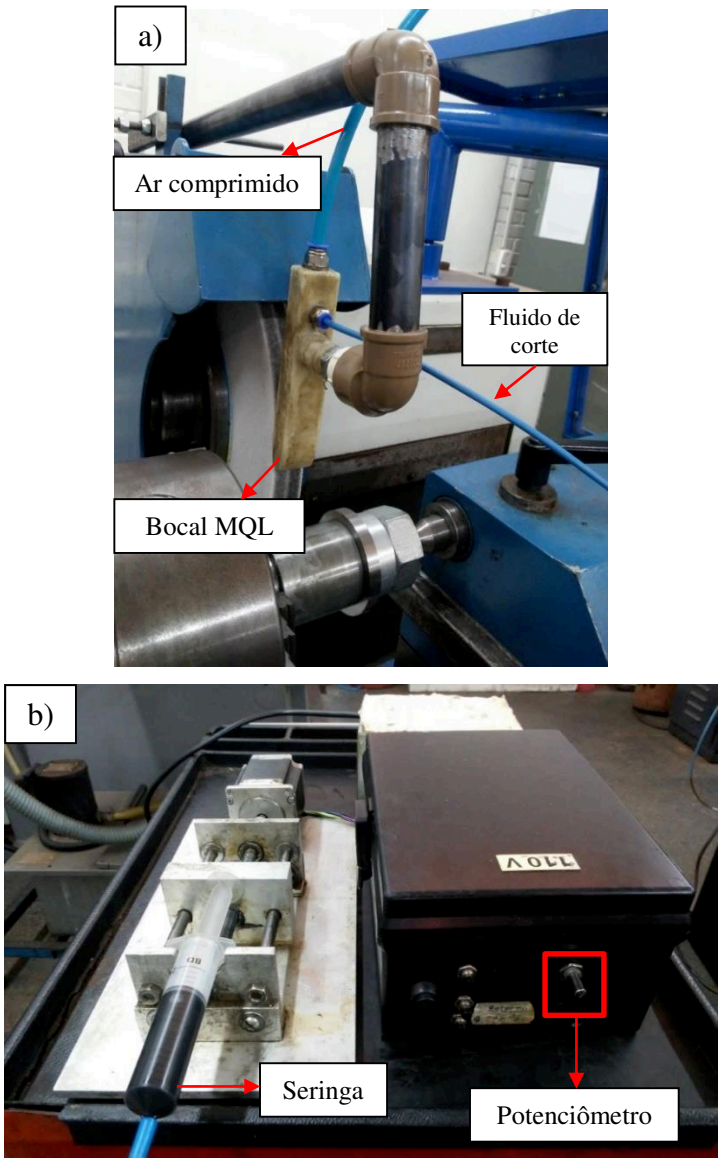


Figura 3.8 - Sistema de aplicação de fluido de corte pela técnica MQL: a) Bocal MQL; b) sistema bomba-seringa.

3.5.3 Condição de lubri-refrigeração MQL+Grafeno

Com relação às partículas sólidas, no caso as multicamadas de grafeno, elas foram produzidas e preparadas no Laboratório de Filmes Finos e Processos de Plasma do Departamento de Física Aplicada do ICTE, Universidade Federal do Triângulo Mineiro, Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas, pelo Prof. Dr. Rogério Valentim Gelamo. Em seguida, elas foram dispersas no fluido de corte a uma concentração de 0,05 % em

peso. A escolha desta concentração é em razão deste valor ser considerado o mais adequado com base em estudos realizados na retificação de superligas de titânio, de níquel e de aço endurecido SAE 52100 realizados por Mello (2015), Oliveira et al. (2019) e Paiva et al. (2020), respectivamente. Outra razão da escolha de utilizar somente a técnica MQL para aplicação das partículas sólidas neste trabalho baseia-se no fato de que a técnica de aplicação de fluido convencional demandaria uma quantidade muito elevada de partículas sólidas a serem adicionadas ao fluido de corte, uma vez que o reservatório da retificadora possui 60 L. Nos ensaios de retificação, o fluido contendo grafeno foi aplicado pela técnica MQL à vazão de 150 mL/h e pressão média do ar comprimido de 0,3 MPa. A vazão do fluido de corte foi selecionada com base no trabalho desenvolvido por Cleudes (2016), no qual foram avaliadas diferentes vazões durante a retificação de aços para moldes e matrizes, sendo que a vazão de 150 mL/h foi a que apresentou os melhores resultados de integridade superficial e sub-superficial dos componentes usinados.

Previamente à adição do fluido com o grafeno na seringa, o mesmo foi colocado em um copo béquer e em seguida em um ultrassom visando a dispersão das partículas sólidas. Na Figura 3.9 é apresentada a aparência do fluido (óleo apenas) e após a dispersão das partículas de grafeno. A configuração dos ensaios realizados utilizando esta condição de lubri-refrigeração e a MQL+NC é a mesma empregada para a condição MQL, ou seja, apresentam o mesmo bocal e sistema bomba-seringa para controle da vazão do fluido.

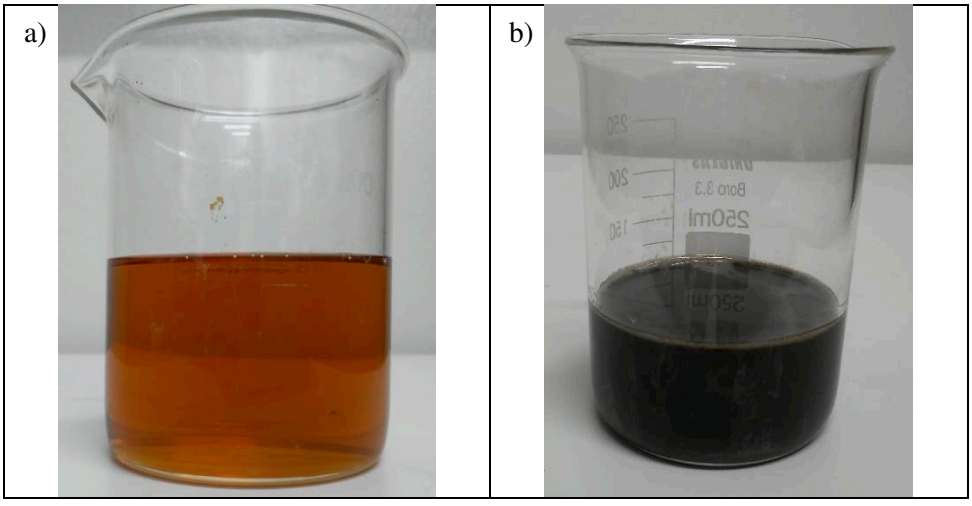


Figura 3.9 - Fluido de corte semissintético: a) sem água e sem grafeno; b) com partículas de grafeno dispersas.

3.5.4 Condição de lubri-refrigeração MQL+NC

Nos ensaios desenvolvidos empregando fluido de corte contendo nanotubos de carbono, foram utilizados os mesmos parâmetros da condição MQL e MQL+Grafeno, ou seja, concentração de 0,05 % em peso, vazão de 150 mL/h e pressão do ar comprimido de 0,3 MPa. Os nanotubos de carbono, comercializados pela empresa Nanostructured & Amorphous Materials Inc., possuem diâmetro externo variando de 50 nm - 100 nm, diâmetro interno na faixa de 5 nm -10 nm e comprimento entre 5 nm -10 nm. Para que fosse possível quantificar os nanotubos de carbono a serem adicionados ao fluido de corte foi necessária a utilização de uma balança de precisão do fabricante SHIMADZU, modelo AY220, com resolução de 0,0001g. Nas Figuras 3.10a e 3.10b são apresentadas as aparências do fluido de corte sem e com nanotubos de carbono, respectivamente.

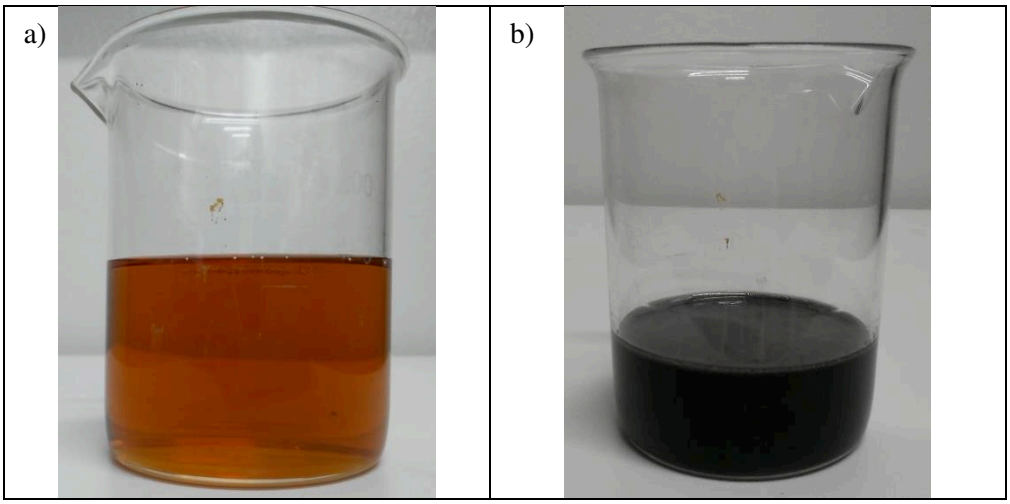


Figura 3.10 - Fluido de corte semissintético: a) sem água e sem nanotubos de carbono e b) com partículas de nanotubos de carbono dispersas.

3.6 Variáveis de saída

Nesta secção serão apresentadas as variáveis de saída mensuradas após os ensaios de retificação, ou seja, serão descritos os planejamentos elaborados para avaliação destas variáveis bem como listados todos os equipamentos necessários no desenvolvimento desta etapa.

3.6.1 Rugosidade

A medição dos valores dos parâmetros de rugosidade R_a (desvio aritmético médio do perfil avaliado), R_t (altura total do perfil) e R_z (altura máxima do perfil) ocorreu por meio de um rugosímetro portátil modelo Surtronic S-100, do fabricante Taylor Robson, com resolução de 0,01 µm, sendo utilizado um comprimento de amostragem (cut-off) de 0,8 mm. Com o propósito de remoção de impurezas ou resíduos de fluido que se encontrassem aderidos sobre a superfície usinada, antes da realização das medições de rugosidade as peças passaram por um procedimento de limpeza utilizando acetona pura.

Devido às dimensões da peça, todas as amostras foram presas a uma base magnética de forma a deixar a superfície a ser medida paralela com o apalpador do rugosímetro. Foram realizadas cinco medições em regiões distintas em cada uma das superfícies retificadas, com distância angular em torno de 72º entre as medições, sempre perpendicular à direção de corte do rebolo (Figura 3.11).

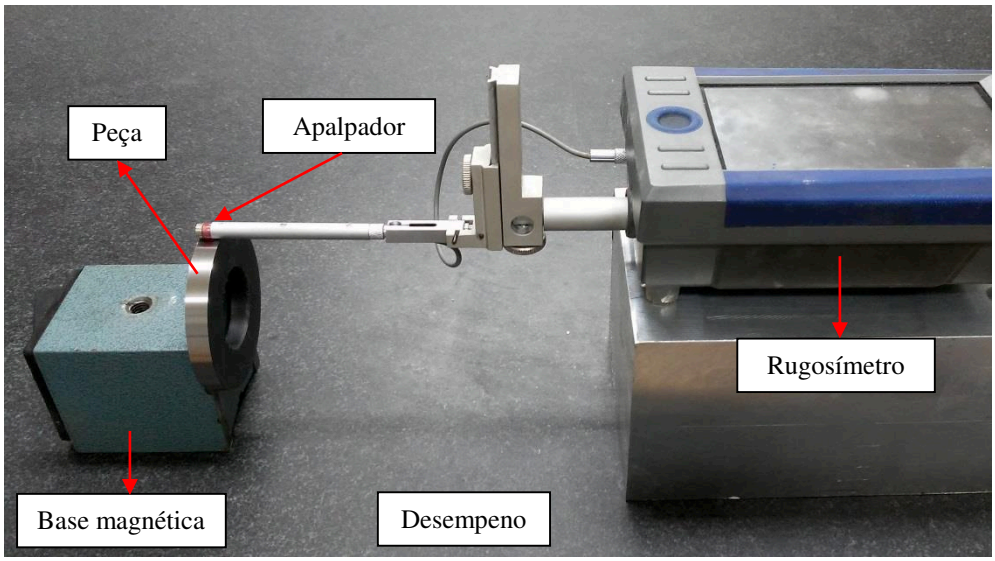


Figura 3.11 - Metodologia adotada para medição da rugosidade.

3.6.2 Microdureza

Anteriormente à medição dos valores de microdureza, as peças passaram pelas etapas de lixamento e polimento. No lixamento foram empregadas lixas de carbeto de silício na seguinte ordem: granulometrias *mesh* de 220, 400, 600, 800, 1 000 e 1 200. Para o polimento foi utilizada uma máquina politriz com rotação de 300 rpm com aplicação de

pasta de alumina com granulometria de 0,1 µm. Para a medição da microdureza as amostras passaram por prévia limpeza, de forma semelhante para a medição de rugosidade.

Nas medições dos valores de microdureza foi utilizado um microdurômetro da marca SHIMADZU HMV-2 series com penetrador Vickers e 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 usinada com intervalos de 40 µm (Figura 3.12). É importante destacar que foi realizada uma medição em uma região distante da superfície retificada (cerca de 3000 µm (3,0 mm) abaixo da superfície retificada) com o intuito da obtenção de um valor de referência do material em região que considera não haver influência do processo de retificação, região considerada sem presença de danos térmicos. Além disso, em cada componente foram realizadas três medições (uma medição e mais duas réplicas), com a mesma profundidade a partir da superfície retificada, visando a obtenção da média e desvio padrão.

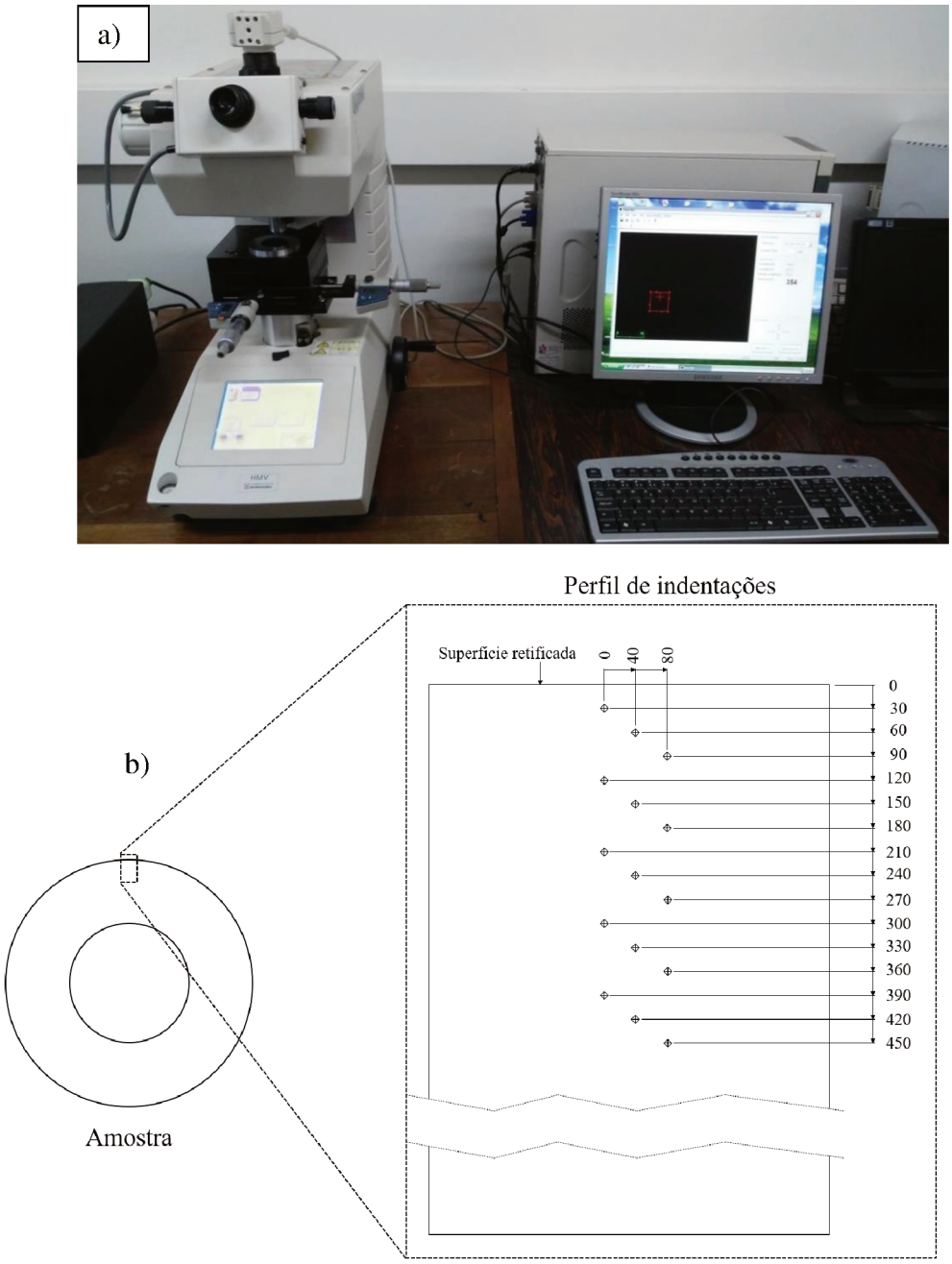


Figura 3.12 - Procedimento de medição de microdureza: a) equipamento; b) esquema para seleção das indentações.

3.6.3 Análise das superfícies retificadas

A análise das superfícies retificadas foi realizada através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo TM3000 que pertence ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC-UFU. Previamente à análise, todas as amostras passaram por um procedimento de limpeza utilizando acetona pura e uma cuba

ultrassônica. Um suporte foi confeccionado para apoiar a amostra e facilitar a avaliação (Figura 3.13).

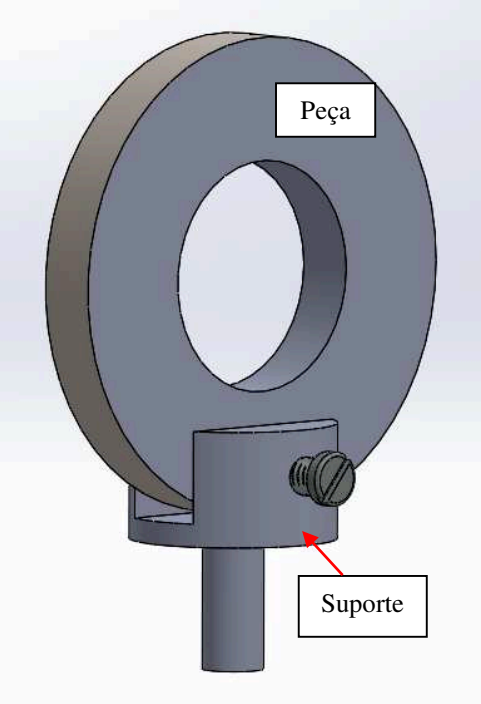


Figura 3.13 - Peça presa ao suporte utilizado para análise via MEV.

3.6.4 Análise microestrutural

Para a avaliação da microestrutura dos componentes foi necessário realizar as operações de lixamento e polimento, seguida de ataque químico. Os processos de lixamento e polimento seguiram o mesmo procedimento adotado na etapa de mensuração dos valores de microdureza. Em relação ao ataque químico, empregou-se como reagente o Nital 5% por um tempo de 20 segundos. Após o ataque químico as peças foram limpas com acetona pura e por meio de um microscópio óptico Olympus BX51M foi possível observar a presença ou não de camada branca e/ou camada escura próxima à superfície retificada.

3.6.5 Desvio de cilindricidade

Os desvios de cilindricidade foram obtidos com o auxílio de uma máquina de medir a três coordenadas, modelo BR-M443, do fabricante Mitutoyo (Figura 3.14). Este equipamento é do tipo ponte móvel, manual e apresenta resolução de 0,001 mm e faixa

de trabalho de 400 mm x 400 mm x 300 mm (respectivamente relacionado aos eixos X, Y e Z). O apalpador empregado nas medições possui uma esfera de rubi de 2 mm de diâmetro. A medição do desvio de cilindricidade ocorreu considerando três secções da peça e apalpando 15 pontos por secção e para cada medição duas réplicas foram feitas. Antes da realização das medições as peças foram limpas utilizando acetona pura e um secador. Importante ressaltar que antes do ínicio de cada medição ocorreu o referenciamento da peça no equipamento de medição.

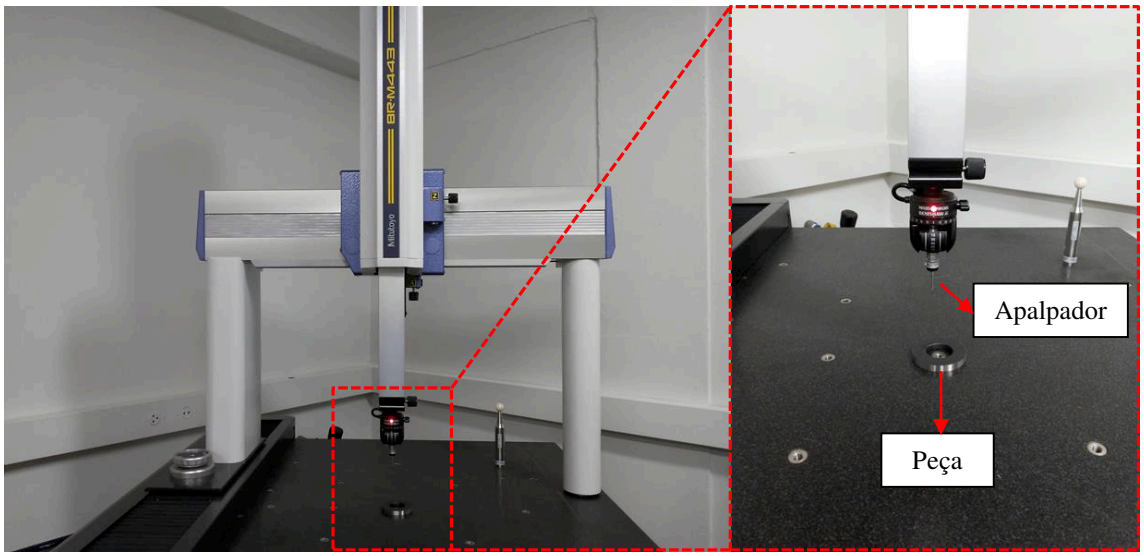


Figura 3.14 - Máquina de medir a três coordenadas Mitutoyo, modelo BR-M443.

3.6.6 Potência de corte

A potência elétrica foi mensurada durante a realização dos ensaios experimentais de retificação através de um sistema desenvolvida por Rosa (2013). Esse sistema consiste na obtenção do valor de tensão e corrente por meio de sensores de tensão (modelo LV25-P e faixa nominal de 500 V) e corrente de efeito Hall (LA50-P e faixa nominal de 50 A). A disposição dos sensores no sistema ocorre estando os de corrente em série à linha de alimentação do motor elétrico (cabeçote do rebolo) e os de tensão em paralelo às fases e ao neutro. Os valores de potência encontrados dizem respeito à potência elétrica do motor de acionamento do eixo árvore do rebolo.

O sistema de medição de potência possui uma placa de aquisição NI-USB-6216, do fabricante NATIONAL INSTRUMENTS, e o tratamento dos sinais ocorreu por meio do *software* LabView. Cabe ressaltar que os sinais encontrados pelo módulo de tensão e

corrente foram obtidos à taxa de mil amostras por segundo (1 kS/s) em cada um dos canais, ou seja, obedeceram ao critério de Nyquist. Em cada ensaio realizado, o *software* gerava um arquivo em formato de texto apresentando os sinais no domínio do tempo. Além disto, a análise dos arquivos ocorreu no software Excel. Na Figura 3.15 está apresentado o sistema utilizado para a obtenção dos valores de potência elétrica durante os ensaios de retificação cilíndrica.

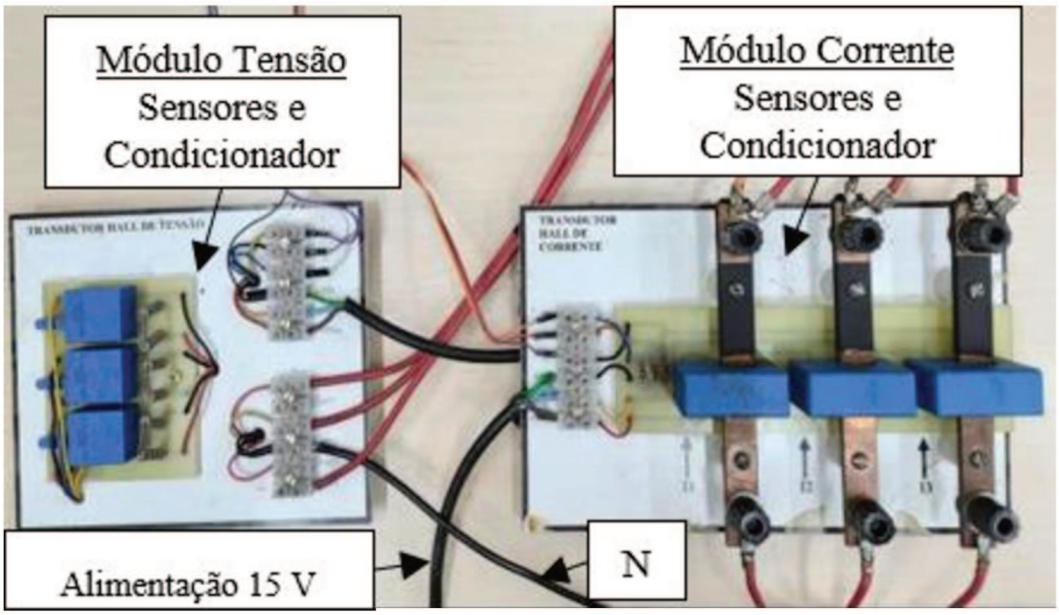


Figura 3.15 - Sistema utilizado na obtenção dos valores de potência elétrica nos ensaios de retificação cilíndrica (Adaptado de RESENDE, 2021).

CAPÍTULO IV

Resultados e Discussão

4.1 Rugosidade

Na Figura 4.1 são apresentados os resultados de rugosidade R_a obtidos através da realização de ensaios de retificação sob diferentes condições de corte (velocidade da peça e velocidade de avanço) e de lubri-refrigeração (convencional, MQL, MQL+Grafeno e MQL+NC).

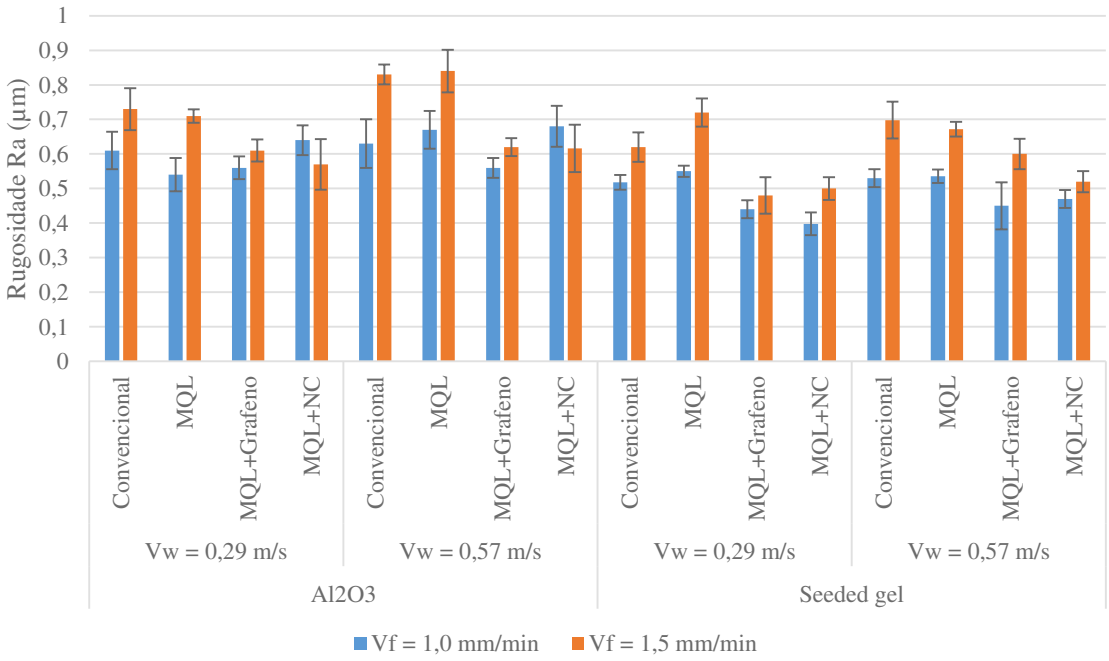


Figura 4.1 – Valores de rugosidade R_a do aço endurecido SAE 52100 após os ensaios de retificação em função da velocidade de avanço, velocidade da peça, tipo de rebolo abrasivo e condição de lubri-refrigeração.

De acordo com os resultados obtidos, no geral, o aumento da velocidade da peça (V_w) de 0,29 m/s para 0,57 m/s resultou na elevação dos valores de rugosidade R_a. Segundo Rowe (2014) e Marinescu et al. (2016), o aumento da velocidade da peça (Eq. 2.5) implica em maior taxa de remoção de material e espessura equivalente de corte (h_{eq}), proporcionando elevação dos valores de rugosidade dos componentes usinados. A partir da Figura 4.1 também é possível constatar aumento de R_a com a velocidade de avanço (V_f), sendo este comportamento explicado de maneira semelhante à elevação de V_w. Como indicado na Eq. 2.4 (secção 2.2.6), o aumento de V_f induz a elevação do parâmetro h_{eq} ocasionando no aumento da tensão entre as partículas abrasivas, comprometendo, assim, o acabamento da peça.

O aumento da velocidade de avanço se mostrou mais influente com relação à elevação dos valores de rugosidade R_a que o parâmetro V_w. A variação de V_f resultou em um aumento médio de R_a de 10,3 %, enquanto que para a velocidade da peça essa porcentagem foi de 7,5 %. Com relação à influência da variação da velocidade de avanço e velocidade da peça de acordo com o tipo de rebolo empregado, observa-se que o incremento de V_f apresentou maior influência nos valores de rugosidade R_a dos componentes retificados com o rebolo seeded gel (19 %) em comparação com o óxido de alumínio convencional (11,5 %), enquanto que o aumento de V_w exerceu maior influência para os resultados encontrados com o rebolo de óxido de alumínio convencional (8,7 %) em comparação com o seeded gel (5,7 %). Dentre as condições de lubri-refrigeração, a combinação do aumento de V_f e V_w apresentou maior influência para a condição MQL (22 %) e convencional (7,81 %), respectivamente.

O aumento da rugosidade R_a com a velocidade de avanço e velocidade da peça também foram encontrados em ensaios de retificação do aço endurecido AISI 1050 (64 HRc) por Saglam, Unsacar e Yaldiz (2005). A justificativa apresentada pelos autores se refere à taxa de remoção de material que é aumentada com estes parâmetros. O aumento de V_f e V_w proporcionam elevação da espessura equivalente de corte e taxa de remoção de material (Eq. 2.4), resultando na deteriorização do acabamento da peça, indicado pelo aumento da rugosidade. Singh, Kumar e Goyal (2014) também encontraram, no geral, aumento da rugosidade com o incremento da rotação da peça em ensaios de retificação do aço AISI 4140. Comportamento semelhante relativo à influência da rotação da peça sobre os valores de rugosidade foi encontrado em estudo desenvolvido por Kumar, Singh e Goyal (2015), no qual foram realizados ensaios de retificação cilíndrica do aço EN 47 no estado endurecido (AISI 6150), bastante empregado na

indústria automobística para fabricação de eixos e engrenagens. Em outro trabalho com rebolo de óxido de alumínio do aço R 260, Uhlmann et al. (2016) constataram que a elevação da variável de entrada V_f induziu o aumento dos parâmetros de rugosidade R_a e R_z, o que eles justificaram devido ao aumento da espessura equivalente de corte (h_{eq}) com a elevação de V_f. À medida que ocorre a elevação do parâmetro h_{eq}, maior é a taxa de remoção entre as partículas atuantes no processo, influenciando negativamente no acabamento dos componentes retificados. Patel, Goyal e Pabla (2018) realizaram ensaios de retificação do aço EN8 (AISI 1040) com rebolo de óxido de alumínio e foi possível inferir que o aumento da rotação da peça influenciou negativamente no que diz respeito ao acabamento da peça, ou seja, maiores valores de rugosidade. Lopes, Garcia e Valentim et al. (2019) desenvolveram ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido e revenido AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio e verificaram aumento dos valores de rugosidade com a velocidade de avanço, resultado que eles explicaram com base no aumento também espessura equivalente de corte (h_{eq}), com o incremento de V_f e isso leva ao aumento da temperatura do processo e deformações do material usinado, influenciando negativamente o acabamento da peça. Lopes, Fernandes e Domingues et al. (2019) também observaram comportamento semelhante da rugosidade com a velocidade de avanço durante a retificação do aço AISI 4340. Outros trabalhos que também apresentaram aumento de rugosidade com a velocidade de avanço foram desenvolvidos por Talon et al. (2019) e Talon et al. (2020) quem realizaram o processo de retificação cilíndrica do aço AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio. Na pesquisa experimental desenvolvida por Silva et al. (2020) os autores relataram que resultados de rugosidade de R_a e R_z, medidos no aço endurecido AISI 4340 após a retificação com rebolo de óxido de alumínio, aumentaram com a velocidade de avanço (V_f) em razão do aumento da espessura equivalente de corte.

Em relação aos rebolos abrasivos empregados nos testes de retificação, destaca-se que componentes com os menores valores de rugosidade foram obtidos com ensaios utilizando o rebolo seeded gel em comparação com o rebolo de óxido de alumínio convencional. Os componentes usinados utilizando o rebolo seeded gel apresentaram valor médio de rugosidade R_a 21,66 % inferior ao observado para os testes empregando o rebolo de óxido de alumínio convencional. Esse resultado é justificado principalmente pela maior friabilidade destes abrasivos, ou seja, os abrasivos seeded gel apresentam microfratura fazendo com que suas arestas de corte permaneçam sempre afiadas. Então, a formação de cavaco é favorecida pois menor é o coeficiente de atrito gerado,

contribuindo para melhores condições tribológicas e, consequentemente, de forma positiva para o acabamento do componente (ROWE, 2014). Em ensaios de retificação de aço rolamento, Jusko (2012) observou que os componentes usinados com o rebolo SG apresentaram resultados de rugosidade R_a, R_z e R_t inferiores aos encontrados a partir da retificação com rebolo de Al_2O_3 e CBN. O autor destaca que os abrasivos seeded gel (SG) apresentam maior friabilidade em relação aos outros abrasivos avaliados, ou seja, os abrasivos são capazes de manter suas arestas afiadas por maior tempo, facilitando assim o corte do material e proporcionando um acabamento superior, indicado neste caso pela redução dos parâmetros de rugosidade. Pesquisa desenvolvida por Manimaran e Kumar (2013) buscou testar diferentes rebolos abrasivos (Al_2O_3 e SG) durante testes de retificação do aço EN 31 (AISI 52100). Os menores valores de rugosidade foram encontrados com o emprego do rebolo seeded gel, sendo este resultado justificado pela maior friabilidade destes abrasivos, o que favorece a usinagem do material e contribuiu para a melhoria do acabamento do componente retificado. Zhang et al. (2012) também encontraram os menores valores de rugosidade durante ensaios de retificação da liga de níquel GH2132 (Permalloy 45, com boas propriedades magnéticas e com aplicações na indústria automobilística) empregando rebolo abrasivo seeded gel em comparação com rebolo SiC de diferentes designações. Holešovsky et al. (2017) realizaram testes de retificação do aço endurecido DIN 100Cr6 (equivalente ao ABNT 52100) e observaram menores valores de rugosidade do rebolo seeded gel em relação ao rebolo abrasivo Al_2O_3 convencional devido ao fato dos abrasivos seeded gel apresentaram maior friabilidade.

Dentre as condições de lubri-refrigeração, no geral, a utilização das partículas de grafeno e nanotubos de carbono em conjunto com o fluido de corte (MQL + Grafeno e MQL + Nanotubos de carbono) resultou em valores de rugosidade inferiores, em comparação com os ensaios realizados com a condição convencional e MQL. O menor valor de rugosidade R_a encontrado foi para a condição MQL+Grafeno (0,54 µm), sendo que a condição convencional resultou em valor 19,63 % superior (0,646 µm); enquanto que a condição MQL gerou 8,7 % superior (0,587 µm), mas inferior a anterior, e a condição MQL+Nanotubos de carbono 1,7 % superior (0,549 µm). Além de contribuírem melhorando as propriedades do fluido de corte, como condutividade térmica e viscosidade, as partículas sólidas atuam durante a retificação como lubrificantes na interface rebolo/peça, reduzindo o coeficiente atrito gerado, melhorando as condições tribológicas, e consequentemente beneficiando o acabamento do componente usinado (reduzindo os valores de rugosidade). A usinagem com condição MQL+Grafeno foi a

responsável pela obtenção dos componentes com os menores valores de rugosidade, sendo este resultado justificado em razão desta condição possuir a maior viscosidade, conforme apresentado na Tabela 3.3.

Em pesquisa desenvolvida por Seyedzavvar, Shabgard e Mohammadpourfard (2019) foram realizados ensaios de retificação do aço AISI 1045 no estado endurecido (48 HRc) sob diferentes condições de lubri-refrigeração. Os autores verificaram que a condição empregando partículas de grafeno no fluido de corte, aplicado via mínima quantidade de lubrificante (MQL), proporcionou valores de rugosidade inferiores aos encontrados para a condição convencional (abundância). Conforme mencionado na literatura, as partículas de grafeno formam um tribo-filme na interface rebolo/peça, contribuindo para melhoria da lubrificação do sistema e redução da rugosidade. Chakule, Chaudhari e Talmale (2019) avaliaram a influência da adição de partículas de Al_2O_3 sobre a rugosidade de aço endurecido retificado empregando rebolo de óxido de alumínio e registraram menores valores de rugosidade quando foram empregadas partículas sólidas no fluido de corte pela técnica MQL em comparação com a condição convencional e MQL (sem partículas sólidas). A redução de rugosidade é devida as propriedades do fluido que são melhoradas por causa da mistura de fluido + partículas sólidas que apresentam maior condutividade térmica e porque elas atuam normalmente como lubrificantes sólidos na zona de corte. Em estudo realizado por Tusar (2019) testes de retificação do aço AISI 1060 foram desenvolvidos, onde a adição de nanotubos de carbono ao fluido de corte, aplicados via condição MQL, contribuiu para a redução dos valores de rugosidade, em comparação com a condição MQL empregando óleo sem partículas sólidas. A adição das partículas sólidas aumenta a capacidade lubrificante do fluido de corte e, consequentemente, favorece a melhoria do acabamento do componente usinado. Singh, Sharma e Dogra (2019) desenvolveram ensaios de retificação da liga Ti-6Al-4V e constataram que a adição de partículas de grafeno contribuiu para redução dos valores de rugosidade. Estudo desenvolvido por Virdi et al. (2019) indicaram redução dos valores de rugosidade do Inconel 718 após a retificação com a adição de partículas de Al_2O_3 ao fluido de corte em comparação com a condição convencional durante ensaios de retificação com rebolo de óxido de alumínio, o que eles atribuíram à maior viscosidade do nanofluido, fluido de corte + Al_2O_3, que melhorou a lubrificação do sistema e as condições tribológicas, resultando em diminuição da rugosidade. Outros trabalhos indicando a influência positiva da dispersão de partículas sólidas no que diz respeito à rugosidade dos componentes retificados foram mencionados na secção 2.5.3.

Nas Figuras 4.2 e 4.3 são mostrados os valores de rugosidade R_z e R_t das amostras do aço endurecido SAE 52100 após os testes de retificação em diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração. Como pode ser observado, o comportamento das rugosidades R_z e R_t apresentaram tendência semelhante ao encontrado para a rugosidade R_a, ou seja, aumento dos valores com a elevação da velocidade da peça e da velocidade de avanço, além das partículas sólidas (MQL + Grafeno e MQL + Nanotubos de carbono) terem apresentado melhor eficiência dentre as condições de lubri-refrigeração no que diz respeito a redução da rugosidade e o rebolo seeded gel ser o responsável pelos menores valores de rugosidade obtidos.

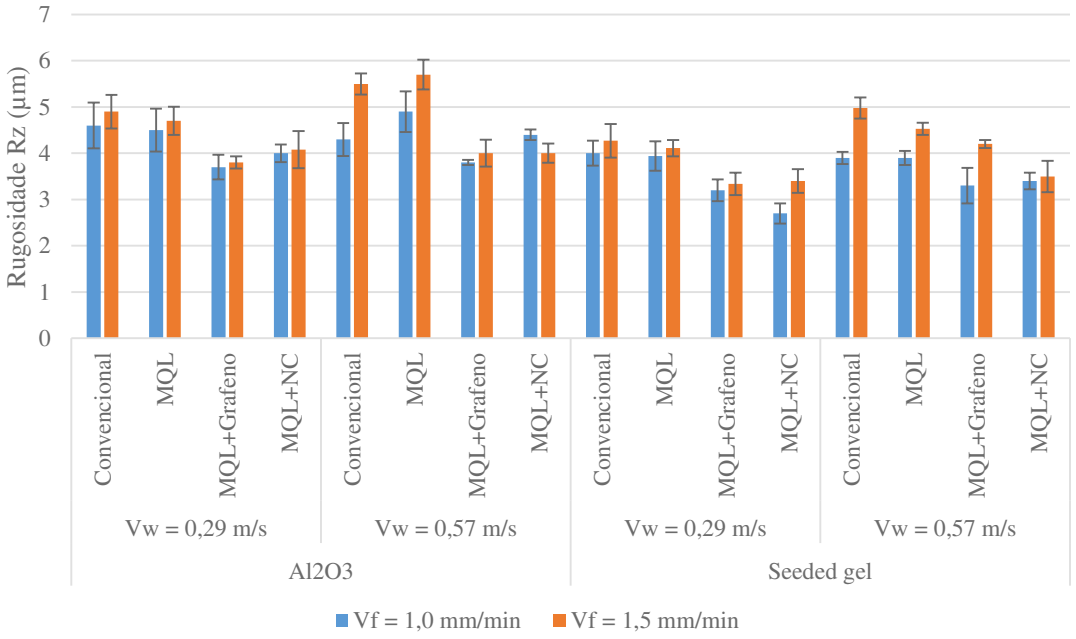


Figura 4.2 – Valores de rugosidade R_z do aço endurecido SAE 52100 após os ensaios de retificação em função da velocidade de avanço, velocidade da peça, tipo de rebolo abrasivo e condição de lubri-refrigeração.

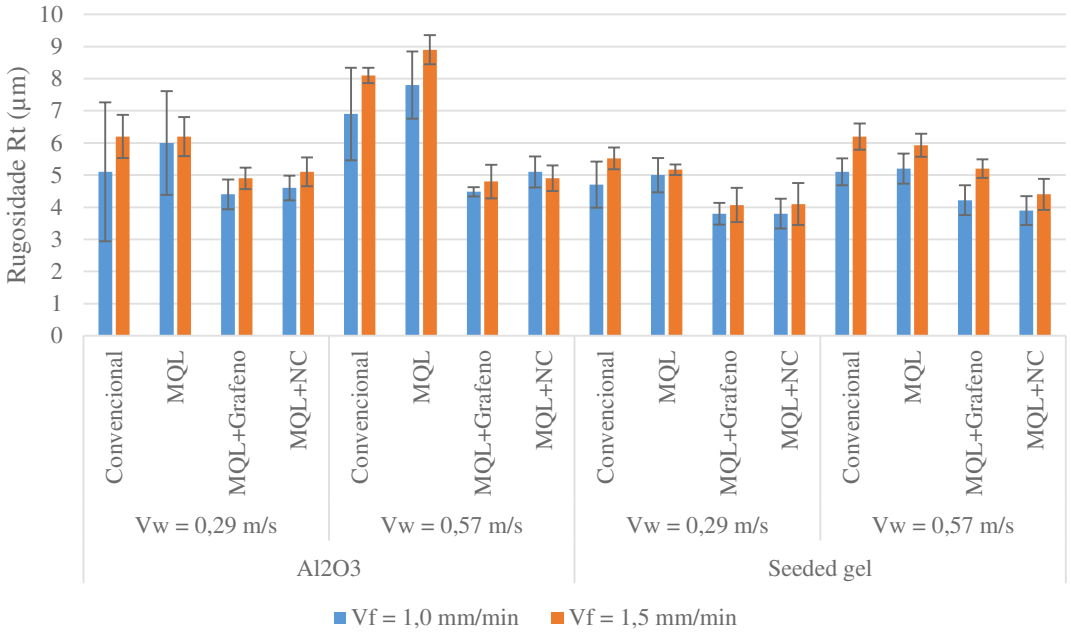


Figura 4.3 – Valores de rugosidade R_t do aço endurecido SAE 52100 após os ensaios de retificação em função da velocidade de avanço, velocidade da peça, tipo de rebolo abrasivo e condição de lubri-refrigeração.

Visando um melhor compreendimento de como as diversas variáveis de entrada influenciam nos valores de rugosidade, foi realizada uma análise de variância (ANOVA) por meio do software Excel 2016, onde o p-valor inferior a 0,05 indica que a variável de entrada avaliada é significativa para a variável de saída mensurada, considerando uma confiabilidade estatística de 95 %. Nas Tabela 4.1, 4.2 e 4.3 são apresentados os p-valores dos resultados de rugosidade R_a, R_z e R_t, respectivamente. Como é possível observar através da Tabela 4.1, o tipo do rebolo abrasivo foi a única variável de entrada que foi significativa para o parâmetro de rugosidade R_a. Já para os parâmetros de rugosidade R_z e R_t (Tabelas 4.2 e 4.3), tanto o tipo do rebolo abrasivo quanto a condição de lubri-refrigeração apresentaram significância, indicado pelo p-valor inferior a 0,05.

Tabela 4.1 – Análise de variância (ANOVA) referente aos parâmetros de rugosidade R_a.

Rugosidade R_a	
Fator	p-valor
Velocidade da peça (V_w)	0,2523
Velocidade de avanço (V_f)	0,1057
Tipo do rebolo abrasivo	$5{,}7630.10^{-5}$
Condição de lubri-refrigeração	0,2104
V_w x V_f	0,7658
V_w x Tipo do rebolo	0,5201
V_w x Condição de lubri-refrigeração	0,9983
V_f x Tipo do rebolo	0,3897
V_f x Condição de lubri-refrigeração	0,1979
Tipo do rebolo x Condição de lubri-refrigeração	0,7699

Tabela 4.2 – Análise de variância (ANOVA) referente aos parâmetros de rugosidade R_z.

Rugosidade R_z	
Fator	p-valor
Velocidade da peça (V_w)	0,1786
Velocidade de avanço (V_f)	0,0830
Tipo do rebolo abrasivo	0,0043
Condição de lubri-refrigeração	0,0007
V_w x V_f	0,4818
V_w x Tipo do rebolo	0,8968
V_w x Condição de lubri-refrigeração	0,9791
V_f x Tipo do rebolo	0,6390
V_f x Condição de lubri-refrigeração	0,6823
Tipo do rebolo x Condição de lubri-refrigeração	0,4724

Tabela 4.3 – Análise de variância (ANOVA) referente aos parâmetros de rugosidade R_t.

Rugosidade R_t	
Fator	p-valor
Velocidade da peça (V_w)	0,0745
Velocidade de avanço (V_f)	0,1750
Tipo do rebolo abrasivo	0,0117
Condição de lubri-refrigeração	0,0005
V_w x V_f	0,7834
V_w x Tipo do rebolo	0,4698
V_w x Condição de lubri-refrigeração	0,4618
V_f x Tipo do rebolo	0,9814
V_f x Condição de lubri-refrigeração	0,8728
Tipo do rebolo x Condição de lubri-refrigeração	0,2391

Além da análise de variância, foram elaborados gráficos para apresentar o comportamento médio da rugosidade com a variação dos parâmetros de entrada, sendo as Figura 4.4, 4.5 e 4.6 referentes aos valores registrados para parâmetros de rugosidade R_a,

R_z e R_t, respectivamente. As barras de dispersão nessas figuras indicam um intervalo de confiança de 95 %. A rugosidade R_a apresentou aumento médio de seu valor com o aumento da velocidade da peça e velocidade de avanço, além da condição de lubri-refrigeração MQL+Grafeno e o rebolo de seeded gel serem os responsáveis por apresentarem os menores valores médios de rugosidade R_a. Apesar da condição MQL+Grafeno apresentar o menor valor médio, a condição MQL+NC apresentou resultado similar. Os valores médios de rugosidade R_z e R_t também demonstraram comportamento similar ao identificado para o parâmetro R_a, ou seja, elevação do valor com V_w e V_f e os menores resultados obtidos pela condição de lubri-refrigeração MQL+Grafeno e o rebolo de seeded gel.

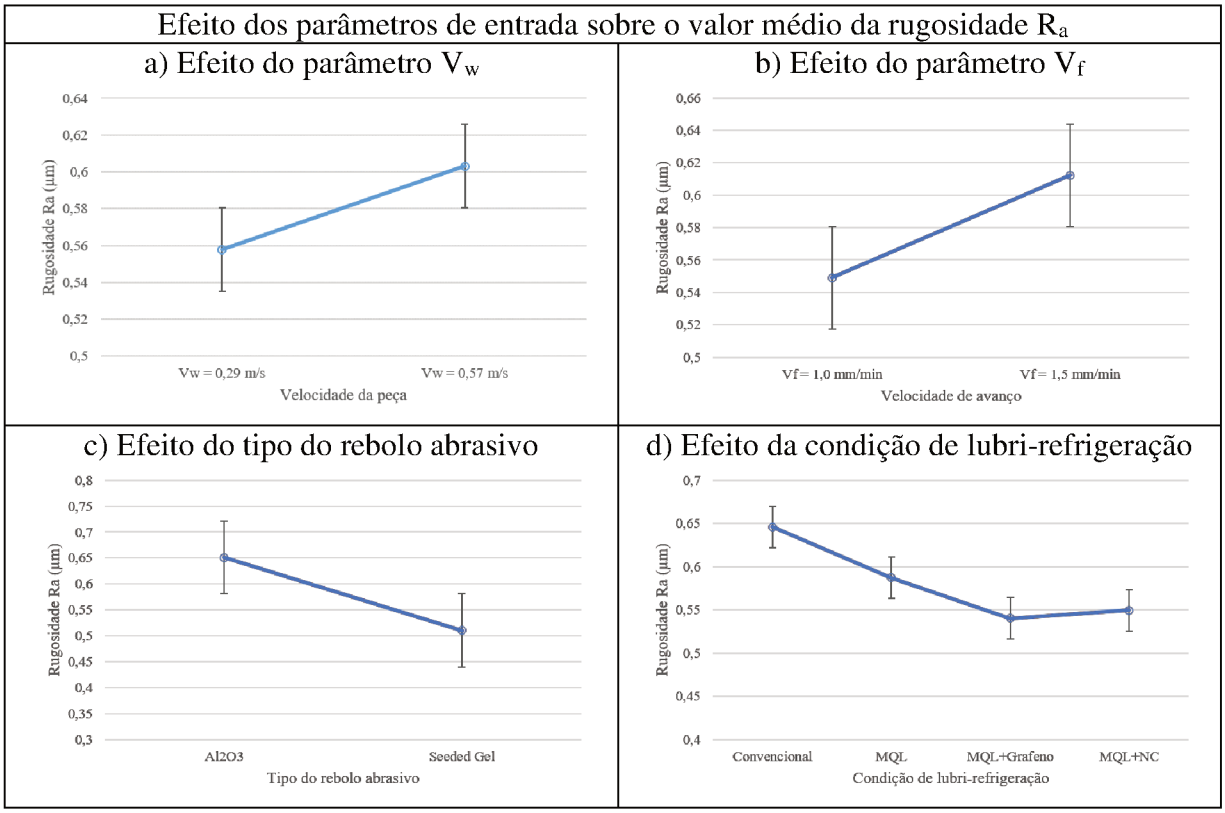


Figura 4.4 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio da rugosidade R_a: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração.

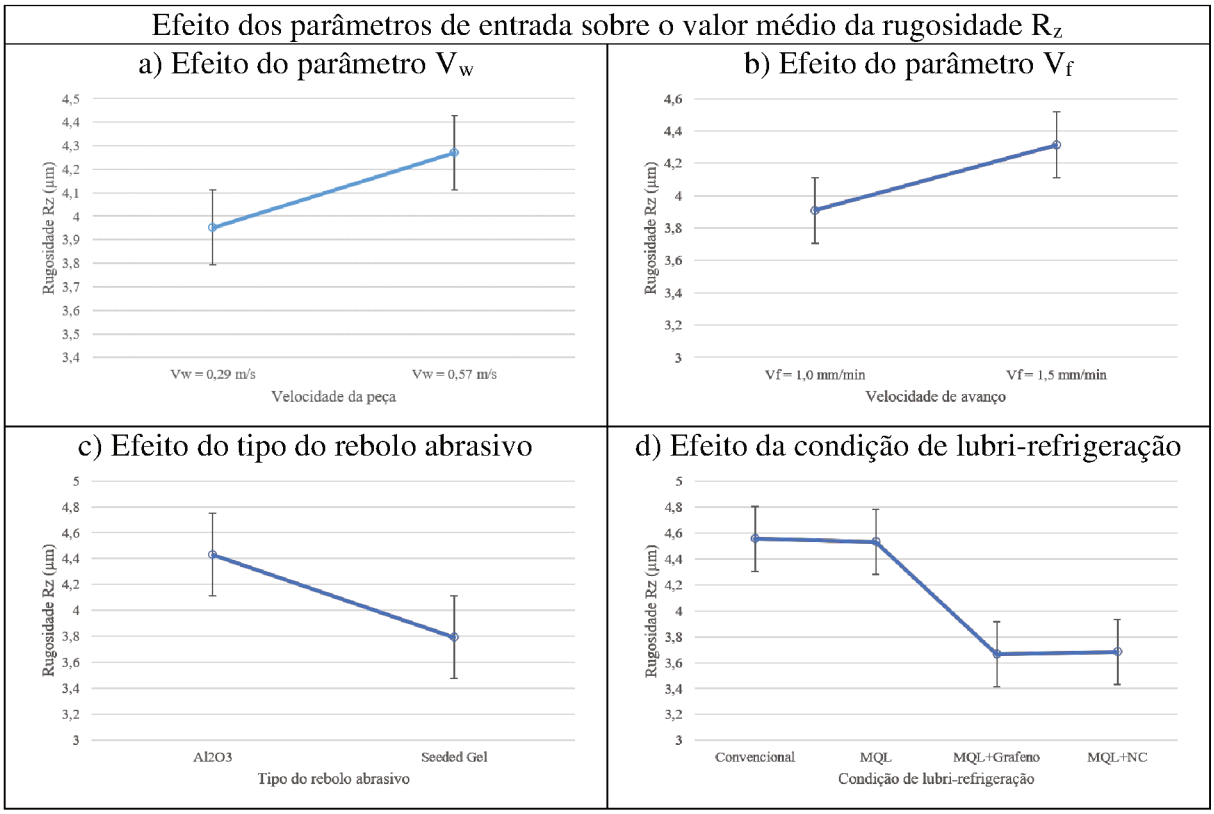


Figura 4.5 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio da rugosidade R_z: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração.

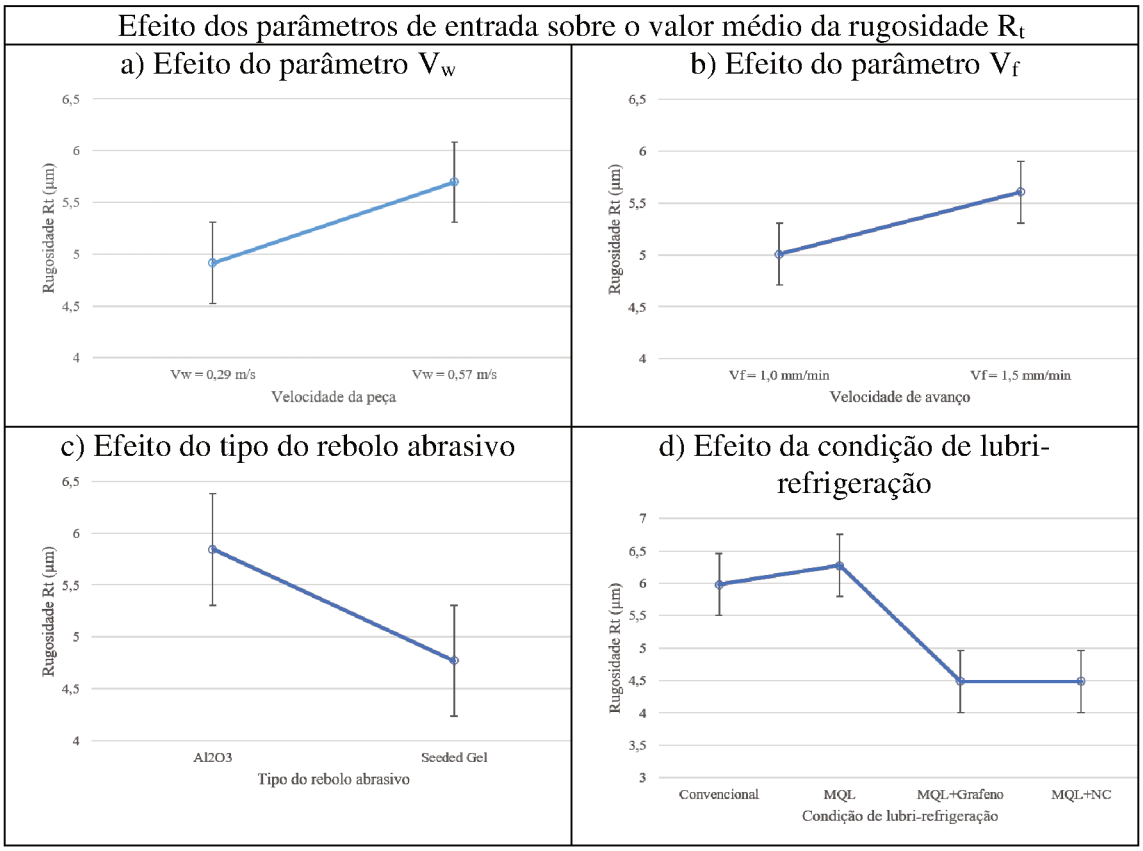
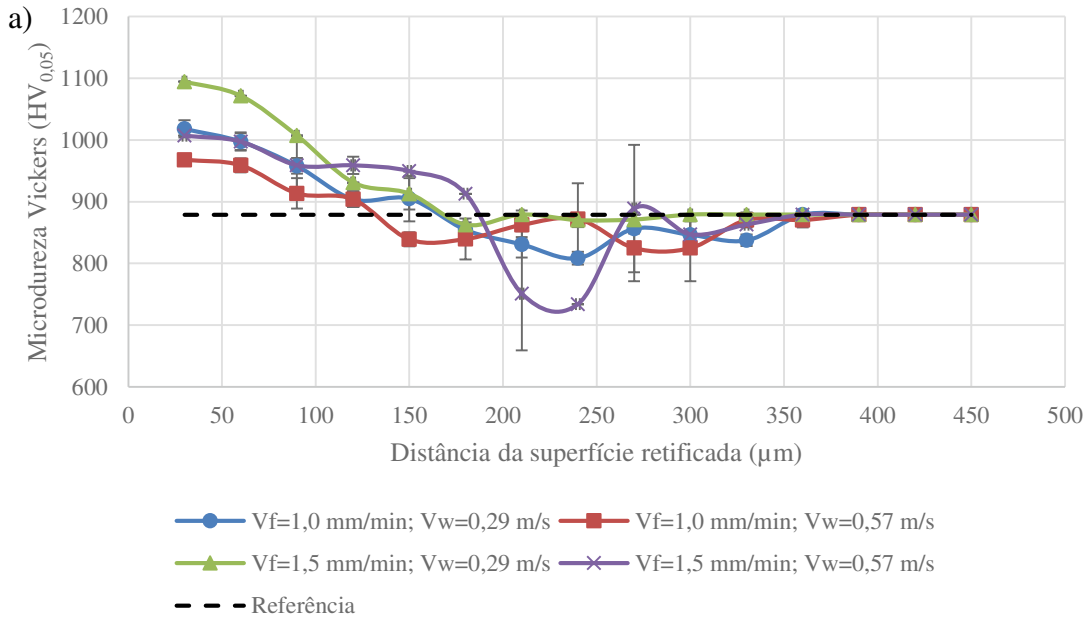


Figura 4.6 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio da rugosidade R_t: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração.

4.2 Microdureza

Após a mensuração dos valores de microdureza dos componentes de aço endurecido SAE 52100 submetidos a retificação cilíndrica de mergulho sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração, foram elaborados gráficos que são apresentados nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10, que são referentes aos resultados obtidos após a usinagem nas condições de lubri-refrigeração convencional, MQL, MQL+Grafeno e MQL+Nanotubos de carbono, respectivamente. Em cada figura constam quatro (4) curvas referentes a variação da velocidade da peça (0,29 m/s e 0,57 m/s) e velocidade de avanço (1,0 mm/min e 1,5 mm/min). Além disso, para cada condição de lubri-refrigeração foram elaboradas duas figuras, sendo um deles referente aos ensaios empregando o rebolo de óxido de alumínio convencional e o outro referente ao rebolo seeded gel. A linha tracejada presente em todos os gráficos diz respeito ao valor médio de microdureza do aço endurecido SAE 52100 livre de danos térmicos, sendo este valor igual a 879 HV.



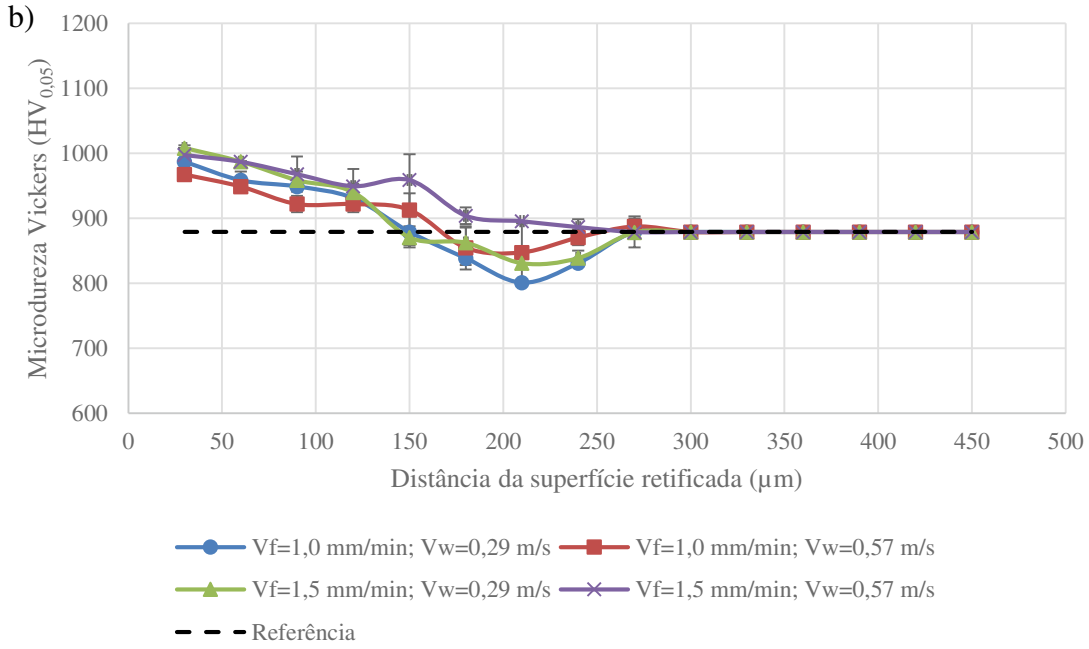


Figura 4.7 – Perfis de microdureza referentes aos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração convencional: a) rebolo de óxido de alumínio convencional; b) rebolo seeded gel.

De acordo com a Figura 4.7, os ensaios realizados empregando a velocidade da peça (V_w) igual a 0,29 m/s indicou maior variação dos valores de microdureza em comparação com o maior valor de V_w (0,57 m/s). A explicação para este comportamento está associada à energia gerada durante o desenvolvimento da usinagem. Com a utilização de baixos valores de velocidade da peça a energia produzida se concentra na zona de corte por um período de tempo maior, ocasionando, assim, na alteração microestrutural da peça e, consequentemente, influenciando nos valores de microdureza (MALKIN e GUO, 2008; ROWE, 2014).

Constata-se também por meio da avaliação das curvas presentes na Figura 4.7 que o aumento da velocidade de avanço (V_f) proporcionou maiores variações de microdureza em relação à microdureza média do material, onde considera-se que não há influência das condições de usinagem. Segundo Rowe (2009) e Marinescu et al. (2016) a elevação do parâmetro V_f provoca o aumento da taxa de remoção de material (Q_w) e da espessura equivalente de corte (h_{eq}). Neste sentido, existe uma maior tensão entre as partículas abrasivas do rebolo e maior atrito, apresentando como efeito o aumento de temperatura da retificação e contribuindo para maiores riscos de ocorrência de danos térmicos.

Em estudo desenvolvido por Uhlmann et al. (2016), os autores observaram uma maior variação dos valores de microdureza com o aumento da velocidade de avanço em ensaios de retificação do aço R 260 utilizando rebolo de óxido de alumínio. Este comportamento está relacionado ao fato do incremento de V_f aumentar a espessura equivalente de corte originando maiores temperaturas no processo. Lopes, Garcia e Volpato et al. (2019) também constataram maior variação dos valores de microdureza com o aumento da velocidade de avanço em ensaios de retificação do aço endurecido AISI 4340. Em outro trabalho desenvolvido por Lopes, Garcia e Valentim et al. (2019) foi possível verificar maior variação dos valores de microdureza com aumento de V_f em relação à média do material (antes da retificação) durante a retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido e revenido AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio. Lopes, Fernandes e Domingues et al. (2019) também constataram comportamento semelhante da microdureza com a velocidade de avanço durante a retificação do aço AISI 4340. Talon et al. (2019) e Talon et al. (2020) também constataram uma maior variação de microdureza com o aumento da velocidade de avanço. Conforme já discutido previamente, o aumento de V_f induz o aumento de temperatura que contribui para maiores riscos de alterações microestruturais e, consequentemente, variação dos valores de microdureza. Sato et al. (2019) realizaram ensaios de retificação do aço endurecido e revenido AISI D6 (697 HV) e constataram redução da microdureza do material com o aumento da espessura equivalente de corte (h_{eq}). Shi e Xiu (2020) verificaram aumento da microdureza do material com a velocidade da peça (V_w) em ensaios de retificação do aço AISI 1045. Segundo os autores, com o aumento de V_w, a quantidade de material removido por unidade de tempo aumenta, ocasionando uma maior deformação plástica e consequente aumento de temperatura, indicando maiores variações de microdureza do componente usinado.

Com relação aos rebolos abrasivos avaliados nesta pesquisa, o rebolo Al_2O_3 convencional apresentou maior variação dos valores de microdureza em comparação com o rebolo seeded gel. Em média, a utilização do rebolo seeded gel proporcionou uma redução de 3,12 % em comparação com o rebolo de óxido de alumínio convencional no que diz respeito à microdureza mais próxima à superfície retificada. A justificativa para este resultado está no fato dos abrasivos seeded gel apresentarem maior friabilidade e condutividade térmica que os abrasivos de óxido de alumínio convencional. A superior condutividade térmica dos abrasivos seeded gel faz com que uma menor parcela de calor seja direcionada para a peça enquanto uma maior friabilidade proporciona a auto-afiação

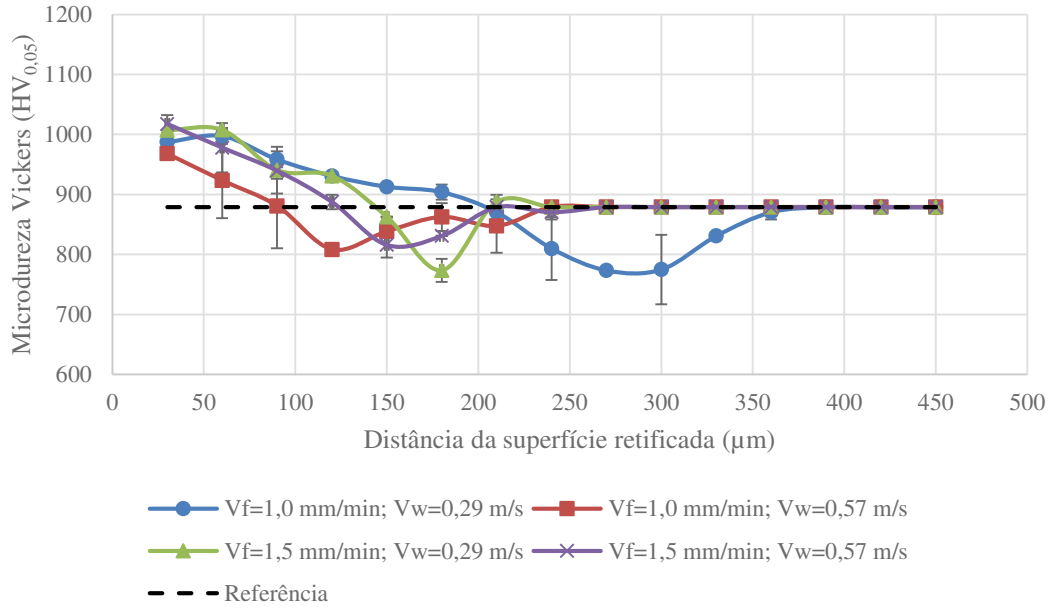
dos abrasivos e maior exposição deles. Com isso, há menor área plana dos abrasivos em contato com a peça, com isso eles proporcionam um menor coeficiente de atrito na interface rebolo/peça, sendo que essas duas propriedades colaboram para a redução da temperatura gerada e, consequentemente, reduz a probabilidade de ocorrência de danos de origem térmica (KLOCKE, 2009). Fathallah et al. (2008) desenvolveram ensaios de retificação cilíndrica de mergulho do aço ferramenta AISI D2 empregando os rebolos abrasivos sedded gel (SG) e Al_2O_3, sendo que os resultados obtidos indicaram menor variação de microdureza com a utilização dos abrasivos SG. Os abrasivos SG apresentam maior condutividade térmica e menor calor específico que os abrasivos de Al_2O_3 convencional (conforme apresentado na Tabela 2.1), o que faz com que menores temperaturas sejam desenvolvidas no processo. Neste sentido, existe um menor fluxo de calor para a peça, diminuindo a probabilidade de ocorrência de danos térmicos. Outra vantagem dos abrasivos seeded gel destacada pelos autores está em sua capacidade de auto-afiação e menor número de arestas grãos com superfícies planas em contato com a peça, o que reduz o atrito gerado na interface rebolo/peça e diminui os danos térmicos.

Na Figura 4.8 estão apresentados os resultados de microdureza relacionados aos ensaios desenvolvidos com a condição MQL. As curvas presentes na Figura 4.8 apresentaram comportamento semelhante ao observado para os ensaios com a condição convencional, ou seja, o aumento da velocidade de avanço e redução da rotação da peça ocasionaram maiores variações de microdureza. O aumento da velocidade de avanço exerceu maior influência que a velocidade da peça, sendo que o incremento de V_f proporcionou, em média, um aumento de 3,1% do valor de microdureza, enquanto que para a influência de V_w esse aumento foi de 0,5%, valor este que pode até ser negligenciado. Em relação ao rebolo abrasivo, é possível observar que os valores de microdureza foram similares utilizando os dois tipos de rebolo abrasivo (Al_2O_3 convencional e seeded gel), diferentemente do observado para a condição convencional na qual o rebolo abrasivo seeded gel apresentou valores de microdureza menores aos encontrados para o rebolo Al_2O_3 convencional. Entretanto, as extensões dos danos térmicos (região na qual é observada variação dos valores de microdureza em relação à microdureza média do material) para os ensaios realizados com o rebolo seeded gel (aproximadamente 250 µm) foram menores quando comparado ao rebolo Al_2O_3 convencional (aproximadamente 360 µm).

A partir da avaliação da condição de lubri-refrigeração a condição MQL demonstrou maior eficiência em remoção de calor da zona de corte e redução do atrito na

interface rebolo/peça em comparação com a condição convencional, constatado pelas menores quedas de microdureza em relação à microdureza média do material antes da realização dos ensaios de retificação.

a)



b)

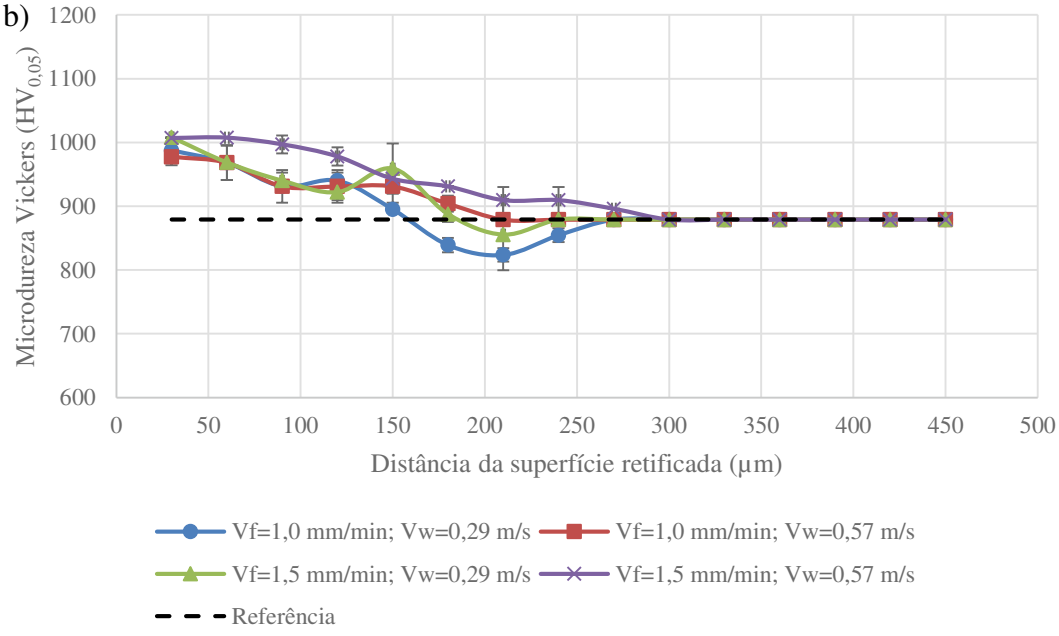
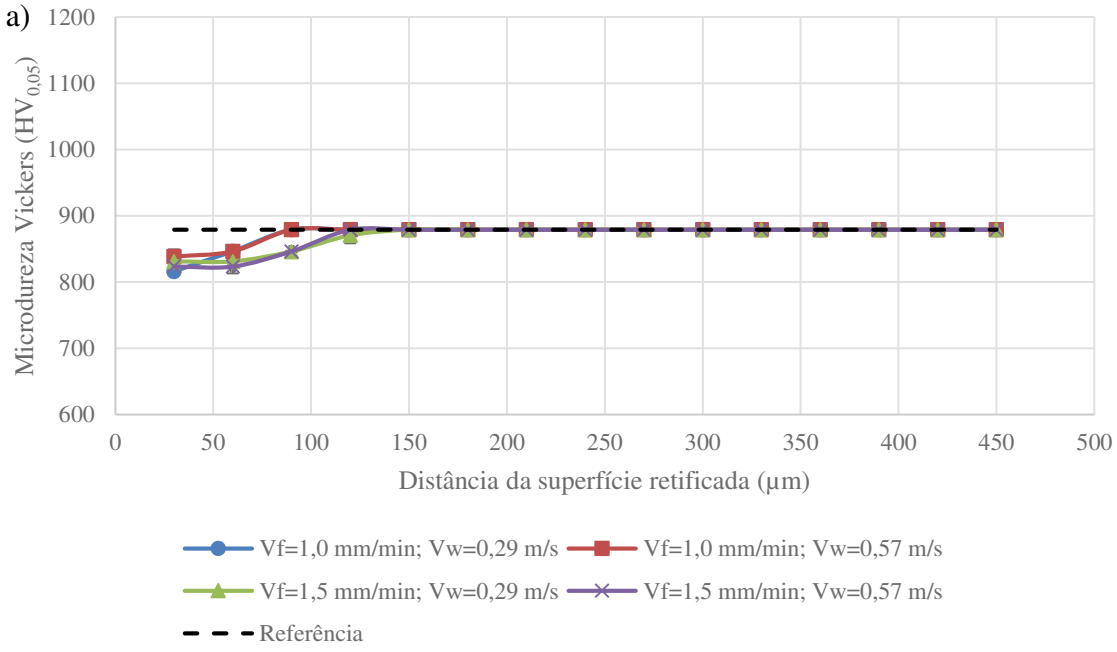


Figura 4.8 – Perfis de microdureza referentes aos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração MQL: a) rebolo de óxido de alumínio convencional; b) rebolo seeded gel.

Os resultados de microdureza das amostras obtidos após os ensaios realizados com a condição MQL+Grafeno estão apresentados na Figura 4.9. A partir da análise dos perfis de microdureza presentes na Figura 4.9 é possível identificar maior variação dos valores com o aumento da velocidade de avanço e redução do parâmetro V_w, entretanto essas quedas foram inferiores às indicadas nos ensaios com a condição convencional e MQL. Além disso, é observado que o rebolo Al_2O_3 convencional proporcionou uma maior variação de microdureza (aproximadamente 6%) em comparação com o rebolo seeded gel (0,16%), comportamento semelhante ao encontrado para as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL. Além disso, para ambos os rebolos utilizados, a variação dos valores de microdureza ocorreu até aproximadamente 100 µm.



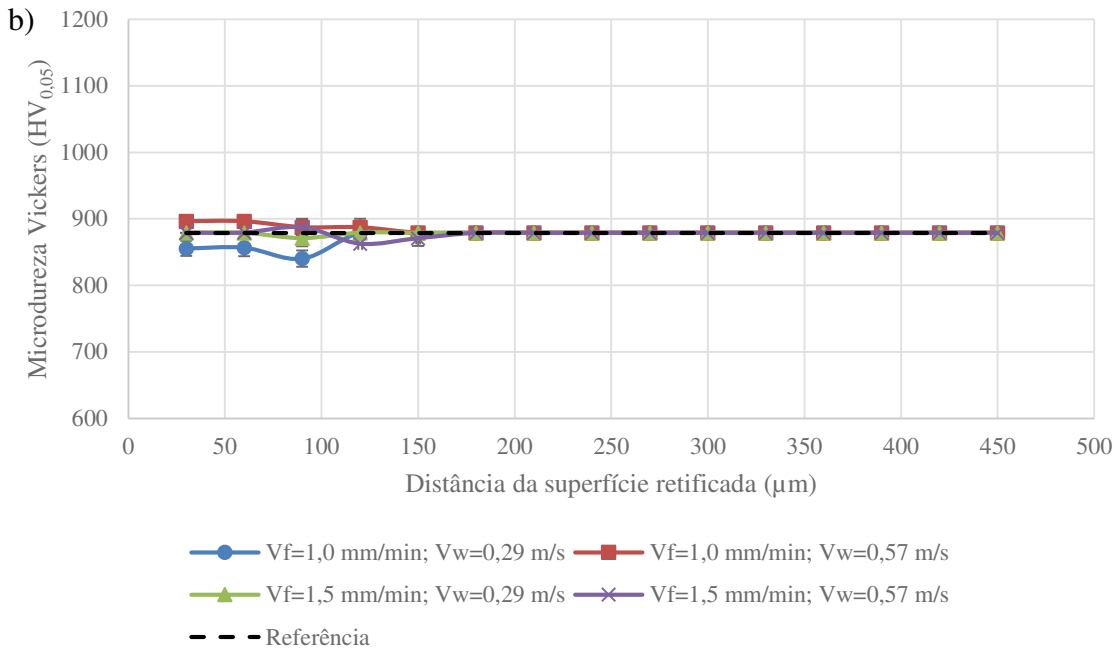


Figura 4.9 – Perfis de microdureza referentes aos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração MQL+Grafeno: a) rebolo de óxido de alumínio convencional; b) rebolo seeded gel.

Na Figura 4.10 são mostrados os valores de microdureza das amostras de aço SAE 52100 após os ensaios com a condição MQL+NC. Como pode ser observado, o comportamento da variação dos parâmetros de entrada (velocidade de avanço, velocidade da peça e tipo de rebolo abrasivo) foi similar ao encontrado para a condição MQL+Grafeno. Contudo, dentre todas as condições de lubri-refrigeração avaliadas constata-se que a condição MQL+Grafeno resultou nas menores quedas de microdureza em todas as condições de corte empregadas. Conforme indicado na Tabela 3.3, o fluido com partículas de grafeno dispersas foi o que apresentou a maior viscosidade e dentre as condições que utilizaram MQL (MQL, MQL+Grafeno e MQL+NC) foi a condição que apresentou maior condutividade térmica, apresentando, portanto, a maior eficiência em redução do atrito gerado (menores temperaturas do processo) e em remoção de calor do sistema, que faz com que menos calor seja direcionado a peça, e com isso reduzindo a ocorrência de danos de origem térmica, neste caso aqui pelo parâmetro microdureza.

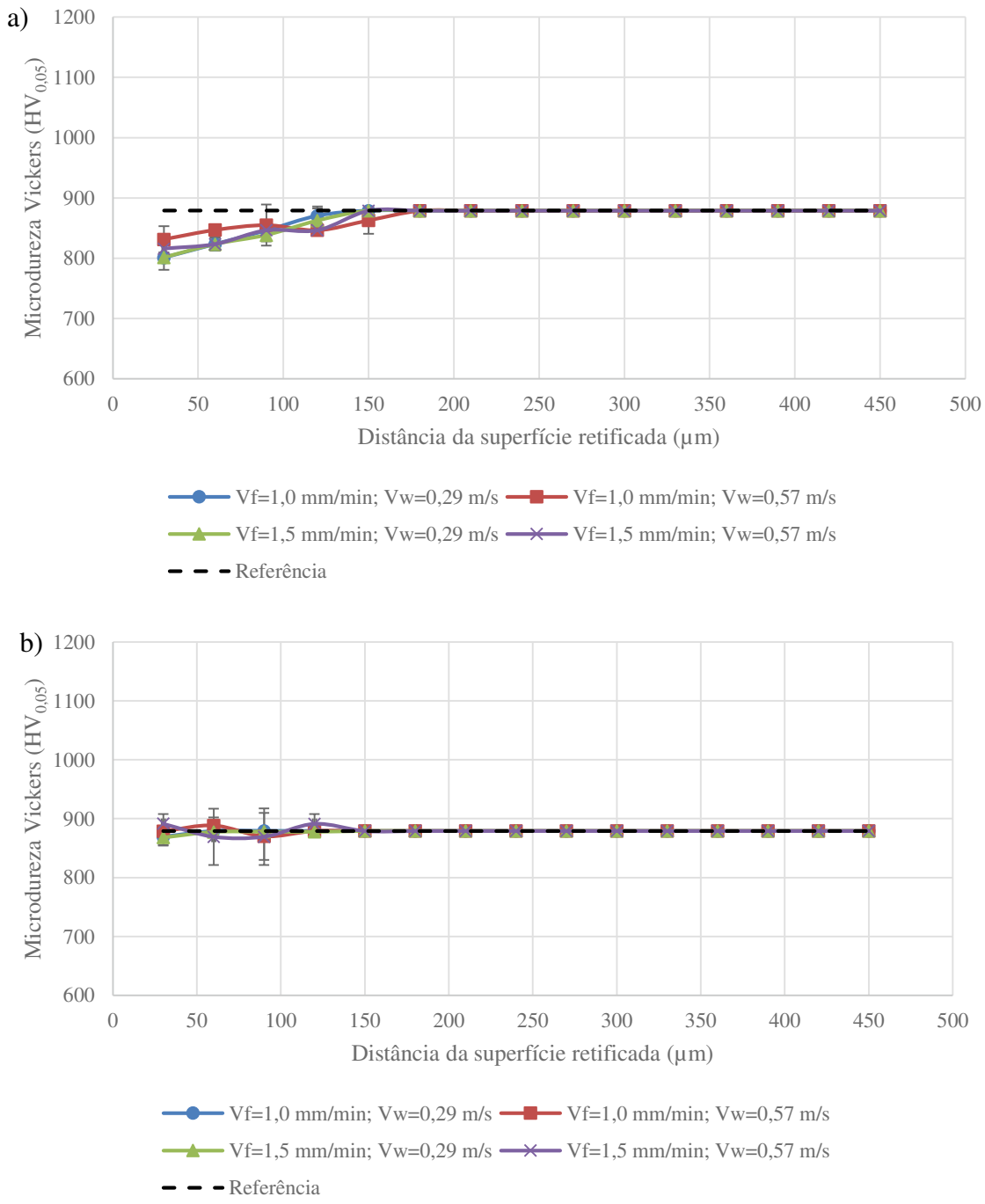


Figura 4.10 – Perfis de microdureza referentes aos ensaios realizados empregando a condição de lubri-refrigeração MQL+Nanotubos de carbono: a) rebolo de óxido de alumínio convencional; b) rebolo seeded gel.

Dentre as condições de lubri-refrigeração estudadas, inicialmente, cabe ressaltar que a a usinagem com a presença das partículas de grafeno e de nanotubos de carbono apresentou resultados positivos no que diz respeito a geração de danos térmicos, ou seja, as condições MQL+Grafeno e MQL+NC foram as responsáveis pelas menores variações

de microdureza em comparação com as condições convencional e MQL. Para facilitar esta relação, é apresentada na Figura 4.11 que agrupa as curvas de microdureza das quatro condições de lubri-refrigeração empregadas, considerando a condição de corte mais crítica (V_f = 1,5 mm/min; V_w = 0,29 m/s; rebolo de óxido de alumínio convencional). A adição das partículas de grafeno e nanotubos de carbono auxilia no aperfeiçoamento das propriedades do fluido de corte, como a condutividade térmica, por exemplo, reduzindo a parcela de calor que é direcionada para a peça, diminuindo, desta forma, a possibilidade de ocorrência de danos térmicos e alterações microestruturais na peça e, consequentemente, variação de microdureza.

Outro benefício das partículas sólidas é sua atuação na região de contato rebolo/peça como lubrificantes sólidos que reduz o atrito existente entre os abrasivos e o material usinado, diminuindo a geração de calor durante a usinagem. A utilização da condição convencional ocasionou um aumento em relação à microdureza média do material (879 HV) de 24,5 %, a condição MQL um aumento de 14,6 %, a condição MQL+Grafeno uma queda de 5,5 % e a condição MQL+NC uma queda de 8,8 %. Desta forma, observa-se que a condição MQL+Grafeno foi a que apresentou maior eficiência em redução dos danos térmicos dos componentes retificados de aço SAE 52100, em termos de microdureza da peça, principalmente por ser a condição de maior condutividade térmica. Além disso, a extensão de danos térmicos (região na qual é constatada variação de microdureza em relação à microdureza média) para a condição convencional foi superior às observadas para as outras condições de lubri-refrigeração (próximo à 270 µm), sendo que para a condição MQL essa variação dos valores de microdureza ocorreu até 240 µm, para a condição MQL+Grafeno foi de 120 µm e para a condição MQL+NC foi de 120 µm.

Durante testes de retificação do aço AISI 1060, Tusar (2019) encontraram redução da temperatura do processo ao empregarem nanotubos de carbono dispersos em fluido de corte, aplicados via mínima quantidade de lubrificante (MQL), em comparação com a condição MQL empregando apenas óleo (sem partículas sólidas). A justificativa apontada está relacionada ao fato destas partículas aumentarem a condutividade do fluido, removendo assim maior quantidade de calor da zona de corte. Neste sentido, menores são os riscos de danos térmicos, como variação de microdureza. Mao e Tang et al. (2012) (retificação do aço endurecido AISI 52100 empregando partículas de Al_2O_3 dispersas ao fluido de corte), Borade e Kadam (2016) (retificação do aço endurecido EN353 empregando partículas de Al_2O_3 dispersas ao fluido de corte), Huang et al. (2017)

(retificação do aço endurecido para molde SKD11 empregando partículas de MWCNTs e MoS_2 dispersas ao fluido de corte) e Jaswanth et al. (2017) (retificação do aço AISI 1030 empregando partículas de Al_2O_3 dispersas ao fluido de corte) também observaram redução dos valores de temperatura do processo pela adição de partículas sólidas ao fluido de corte. Todos os autores justificam estes resultados em razão da melhoria da capacidade de refrigeração do fluido de corte contendo tais partículas sólidas. Outros trabalhos indicando a influência positiva da dispersão de partículas sólidas em fluido de corte no que diz respeito à redução de variação de microdureza estão apresentados na secção 2.5.3.

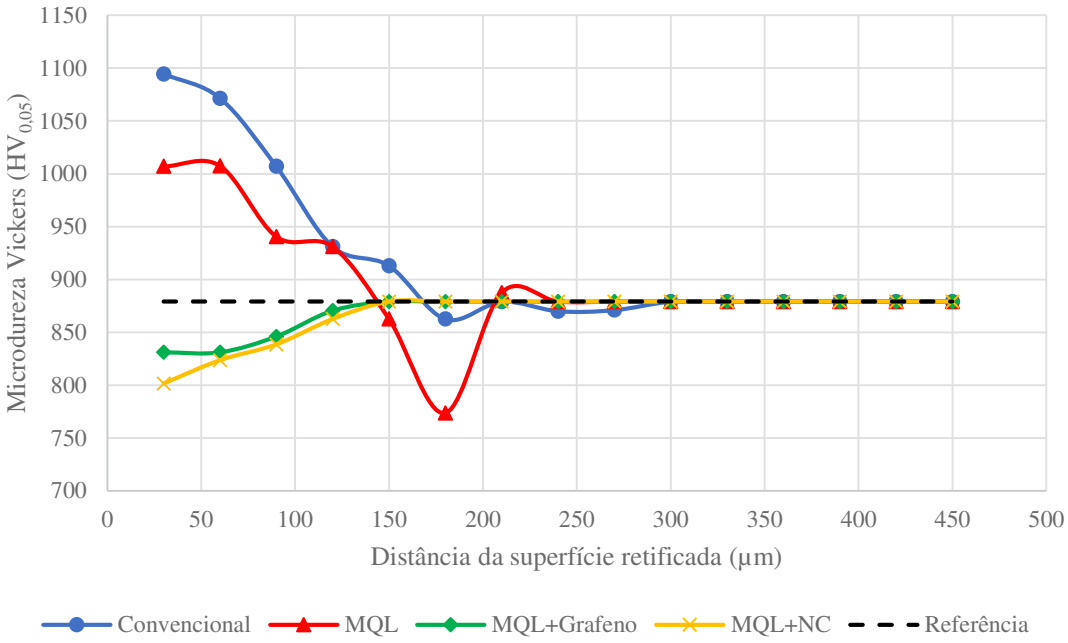


Figura 4.11 – Perfis de microdureza do aço SAE 52100 após a retificação com rebolo de óxido de alumínio convencional, velocidade da peça de 0,29 m/s e velocidade de avanço de 1,5 mm/min, para todas as condições de lubri-refrigeração.

Na Figura 4.12 estão apresentados os valores de microdureza mais próximos da superfície retificada, para todas as condições de corte e de lubri-refrigeração avaliadas. Como pode ser observado, a usinagem após o emprego das condições convencional e MQL proporcionaram em todas as condições de corte testadas, microdureza próxima à superfície superior à microdureza média do material (879 HV). Além disso, para os ensaios realizados nas condições MQL+Grafeno e MQL+NC, os valores encontrados apresentaram uma pequena queda quando comparados à microdureza média do aço endurecido SAE 52100.

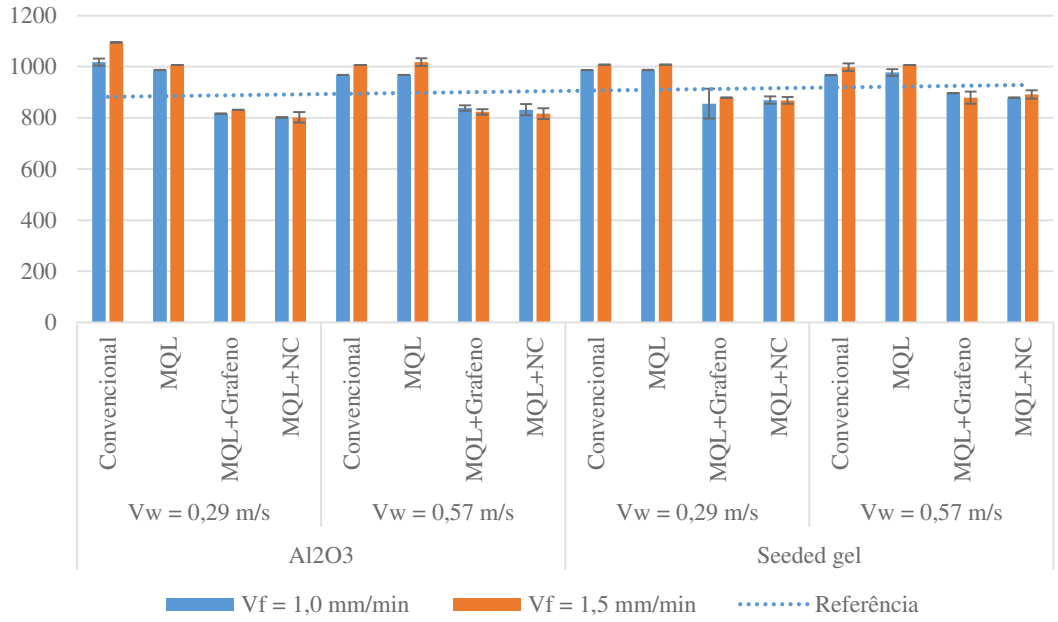


Figura 4.12 – Microdureza na região mais próxima à superfície retificada para todas as condições de corte e de lubri-refrigeração avaliadas.

Na Tabela 4.4 estão mostrados os p-valores dos valores de microdureza, obtidos por meio de uma análise de variância (ANOVA). Dentre as variáveis de entrada e suas interações, a velocidade de avanço, o tipo de rebolo abrasivo e a condição de lubri-refrigeração foram significativas para os valores de microdureza.

Tabela 1.4 – Análise de variância (ANOVA) referente aos resultados de microdureza.

Fator	p-valor
Velocidade da peça (V_w)	0,7585
Velocidade de avanço (V_f)	0,0458
Tipo do rebolo abrasivo	0,0065
Condição de lubri-refrigeração	$2{,}01.10^{-8}$
V_w x V_f	0,9097
V_w x Tipo do rebolo	0,0726
V_w x Condição de lubri-refrigeração	0,8805
V_f x Tipo do rebolo	0,9744
V_f x Condição de lubri-refrigeração	0,1109
Tipo do rebolo x Condição de lubri-refrigeração	0,4398

Na Figura 4.13 estão apresentadas as microestruturas dos componentes submetidos ao processo de retificação nas condições de corte mais críticas (V_f = 1,5 mm/min; V_w = 0,29 m/s; rebolo de Al_2O_3 convencional) e empregando as diferentes

condições de lubri-refrigeração. Conforme pode ser constatado, para a condição convencional é observado alterações microestruturais, representadas pela camada escura presente próximo à superfície retificada. A justificativa para este comportamento baseia-se na dificuldade do fluido de corte aplicado por esta condição em atingir a zona de corte em razão das baixas velocidade do jato de fluido de corte (que para este trabalho é inferior a 10 m/s - cerca de 3 vezes inferior aquela da velocidade de corte - e do colchão de ar que é formado em torno do rebolo abrasivo durante a usinagem). Além disso é possível observar essa mesma região afetada termicamente, só que em menor magnitude, para o ensaio realizado empregando a condição MQL.

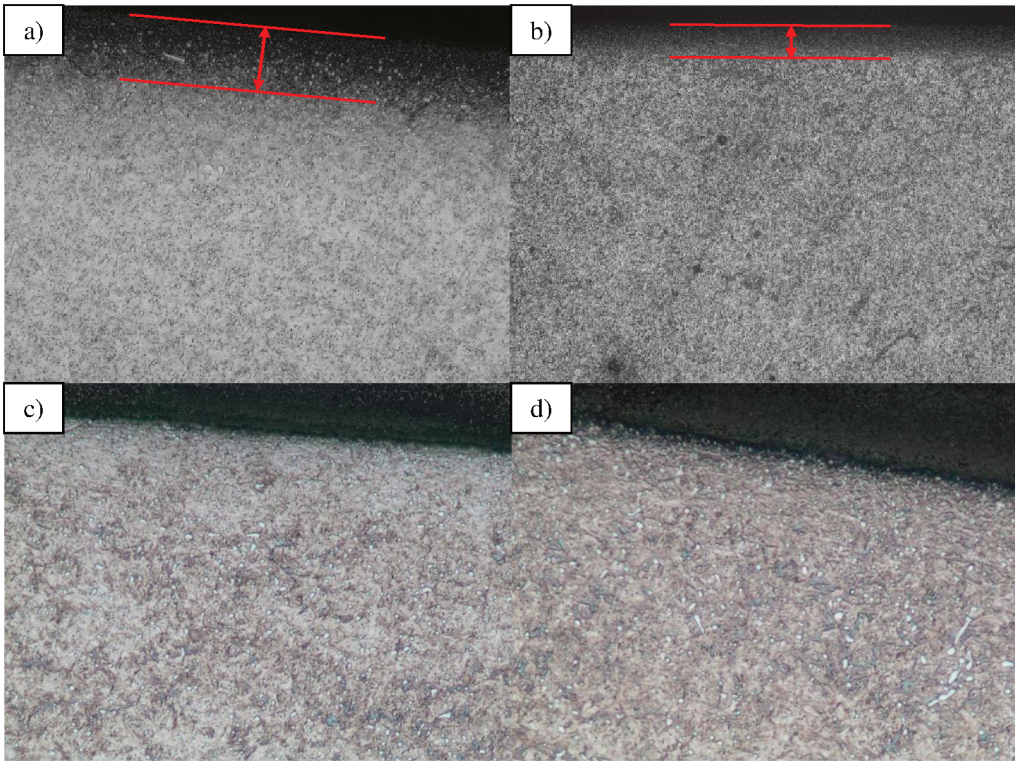


Figura 4.13 – Microestrutura do aço endurecido SAE 52100 submetido a ensaios de retificação utilizando $V_w = 0{,}29$ m/s e $V_f = 1{,}5$ mm/min em diferentes condições de lubri-refrigeração: a) convencional; b) MQL; c) MQL+Grafeno; d) MQL+NC.

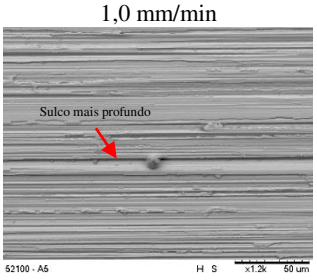
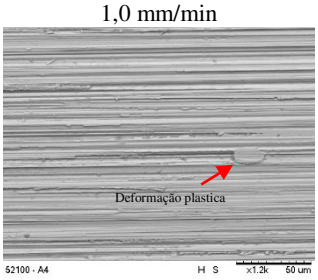
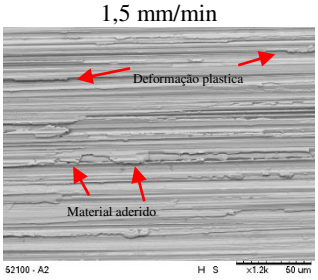
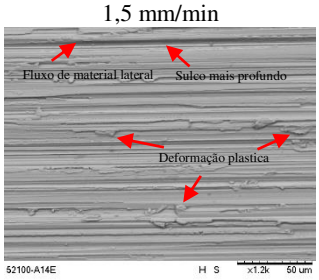
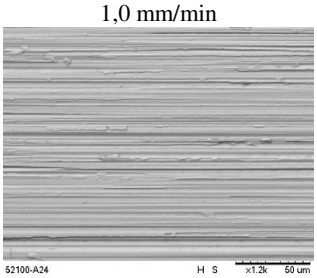
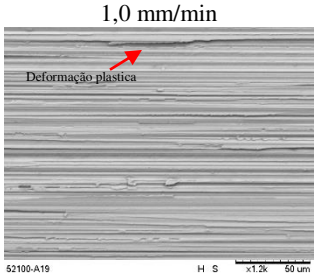
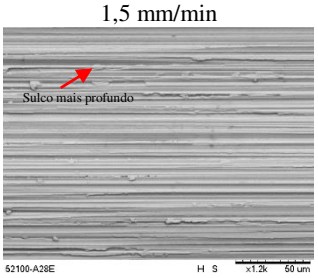
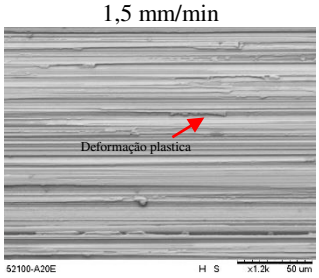
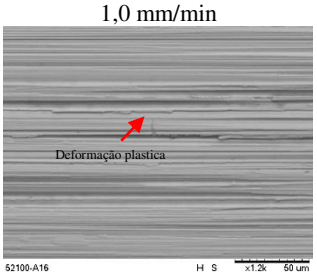
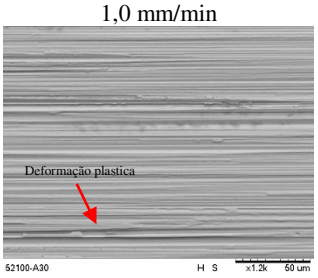
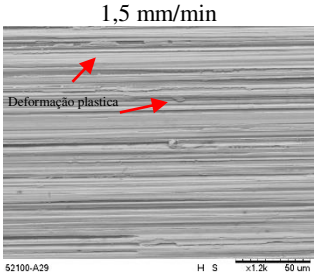
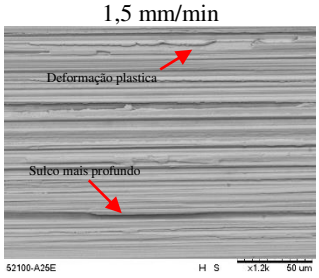
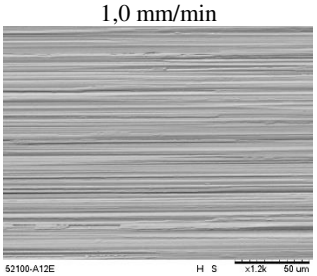
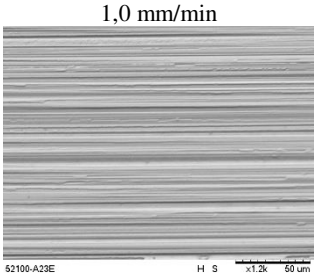
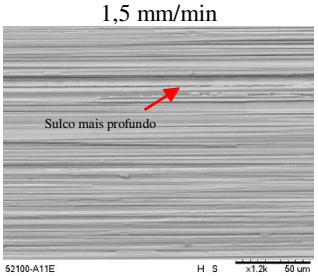
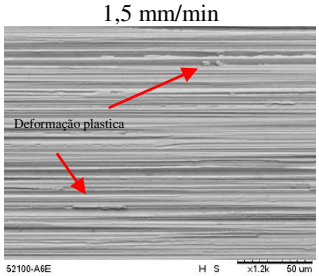
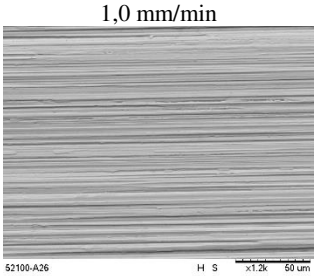
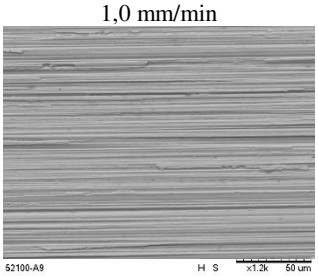
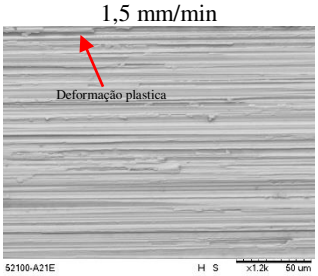
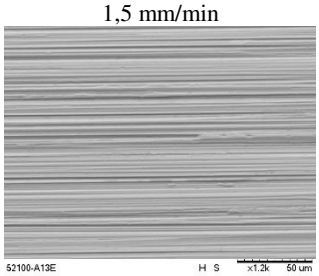
Dentre todas as condições de lubri-refrigeração avaliadas, observa-se que as condições que empregaram partículas sólidas diluídas em fluido de corte apresentaram maior eficiência em redução da geração dos danos térmicos. A principal vantagem da utilização das partículas de grafeno e nanotubos, quando avaliada as alterações microestruturais causadas pelo processo de retificação, está relacionada à melhoria da

capacidade do fluido de corte em remover calor da zona de corte, reduzindo a quantidade que é direcionada para a peça e capaz de alterar a microestrutura da peça.

Em pesquisa desenvolvida por Tusar (2019) foram realizados ensaios de retificação do aço AISI 1060, sendo observada redução da temperatura do processo com a dispersão de nanotubos de carbono ao fluido de corte, aplicados via condição MQL, em comparação com a condição MQL empregando óleo sem partículas sólidas. Estes resultados são explicados em razão destas partículas aumentarem a condutividade do fluido, removendo assim maior quantidade de calor da zona de corte. Assim, menores são os riscos de danos térmicos, como alterações microestruturais. Estudos desenvolvidos por Mao e Tang et al. (2012) (retificação do aço endurecido AISI 52100 empregando partículas de Al_2O_3 dispersas ao fluido de corte), Wang et al. (2014) (retificação do aço endurecido 1045 empregando partículas de MoS_2 dispersas ao fluido de corte) e Zhang, Li e Zhang et al. (2015) (retificação do aço endurecido AISI 1045 empregando partículas de CNT, MoS_2 e ZrO_2 dispersas ao fluido de corte) também observaram redução dos valores de temperatura da peça pela adição de partículas sólidas ao fluido de corte. A dispersão de partículas sólidas ao fluido de corte contribuiu para a melhoria das propriedades do fluido, com destaque para a capacidade de refrigeração, reduzindo os riscos de danos térmicos nos componentes retificados. Resultados de outros trabalhos indicando a influência positiva da dispersão de partículas sólidas no que diz respeito à redução dos riscos de alterações microestruturais em peças submetidas a retificação principalmente com rebolos abrasivos convencionais podem ser encontrados na secção 2.5.3.

4.3 Análise das Superfícies Retificadas

Na Figura 4.14 estão apresentadas as imagens das superfícies retificadas sob diferentes condições de corte (velocidade de avanço, velocidade da peça e tipo do rebolo abrasivo) e de lubri-refrigeração (convencional, MQL, MQL+Grafeno e MQL+NC).

Convencional	i) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	ii) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	iii) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,5 mm/min 	iv) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,5 mm/min 
	v) Rebolo Seeded gel V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	vi) Rebolo Seeded gel V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	vii) Rebolo Seeded gel V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,5 mm/min 	viii) Rebolo Seeded gel V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,5 mm/min 
MQL	ix) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	x) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	xi) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,5 mm/min 	xii) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,5 mm/min 
	xiii) Rebolo Seeded gel V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	xiv) Rebolo Seeded gel V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	xv) Rebolo Seeded gel V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,5 mm/min 	xvi) Rebolo Seeded gel V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,5 mm/min 
MQL+Grafeno	xvii) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	xviii) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,0 mm/min 	xix) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,5 mm/min 	xx) Rebolo Al_2O_3 V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,5 mm/min 
	xxi) Rebolo Seeded gel V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,0 mm/min	xxii) Rebolo Seeded gel V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,0 mm/min	xxiii) Rebolo Seeded gel V_w = 0,29 m/s e V_f = 1,5 mm/min	xxiv) Rebolo Seeded gel V_w = 0,57 m/s e V_f = 1,5 mm/min

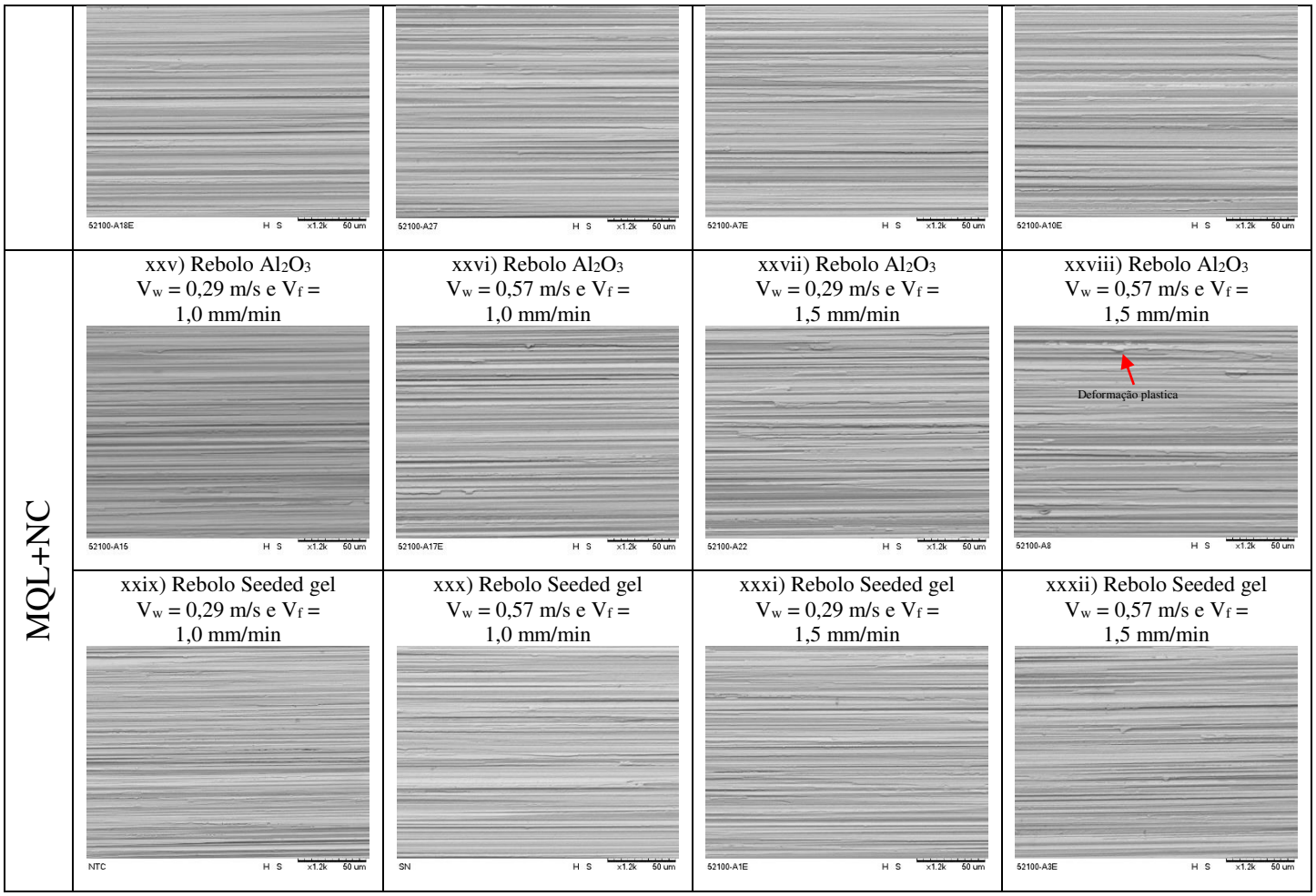


Figura 4.14 – Imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) referentes aos ensaios de retificação do aço endurecido SAE 52100 submetido à diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração.

A partir da análise das superfícies que estão indicadas na Figura 4.14 é possível, no geral, detectar os mesmos elementos em todas elas, ou seja, regiões com deformação plástica, material aderido e sulcos no mesmo sentido de atuação do rebolo. Além disso, foram observados fluxos de material lateral, encontrados ao lado dos sulcos mais profundos. Ressalta-se que nenhuma condição de corte e de lubri-refrigeração conseguiu produzir trincas nos componentes retificados.

Para todas as condições de lubri-refrigeração avaliadas, o comportamento dos parâmetros de entrada foi semelhante. O aumento da velocidade de avanço foi a responsável por deteriorar o acabamento das superfícies retificadas, indicado por um aumento da quantidade de áreas contendo deformação plástica e material aderido, além dos sulcos apresentarem maiores irregularidades (alguns com direção diferente da de corte) e profundidade (Figuras 4.14 iii), iv), vii), viii), xi), xii), xv), xvi), xix), xx) xxiii),

xxiv), xxvii), xxviii), xxxi) e xxxii)). Este resultado é justificado pelo fato do aumento de V_f atuar elevando a espessura equivalente de corte (h_{eq}), ou seja, há a geração de cavacos com maiores dimensões afetando negativamente a textura superficial (KLOCKE, 2009).

Apesar do aumento da velocidade da peça indicar elevação da taxa de remoção de material e h_{eq}, elevando os valores de rugosidade conforme encontrado na secção 4.1, com relação à textura superficial observa-se que a redução da rotação da peça, em geral, contribuiu para a deterioração do acabamento. A redução de V_w indica que ao fluxo de calor devido à maior temperatura oriunda da usinagem nesta condição irá ficar concentrado por mais tempo na zona de corte e haverá maior atrito entre as partículas abrasivas, sendo assim desfavorável no que diz respeito ao acabamento dos componentes retificados (ROWE, 2014).

Talon et al. (2019) e Talon et al. (2020) constataram deterioração da textura superficial com o aumento da velocidade de avanço durante ensaios de retificação do aço AISI 4340 empregando rebolo de óxido de alumínio. Segundo os autores, o aumento de V_f contribuiu para a geração de superfícies com maiores irregularidades e maior quantidade de áreas com material deformado plasticamente. Além disso, o incremento da velocidade de avanço favorece o surgimento do fenômeno conhecido como “ploughing”, isto é, influenciando negativamente no que diz respeito ao acabamento da peça. Seyedzavvar, Shabgard e Mohammadpourfard (2019) desenvolveram ensaios de retificação do aço endurecido AISI 1045 (48 HRc) e observaram que o incremento da velocidade da peça influenciou negativamente a textura superficial do componente retificado, sendo este comportamento justificado pelo aumento da espessura equivalente de corte. Além disso, os autores verificaram que a dispersão de partículas de grafeno no fluido de corte proporcionou condições tribológicas mais favoráveis e assim resultando em superfícies com melhor acabamento, como foi o caso destas observadas nesta atual pesquisa. Estas partículas atuam na melhoria da capacidade lubrificante do fluido, reduzindo o atrito gerado da interação entre os abrasivos e a peça e, assim, proporcionando a produção de superfícies com melhor textura superficial.

Com relação à atuação dos tipos de rebolo abrasivo estudados, percebe-se que os ensaios realizados empregando o rebolo seeded gel resultaram em superfícies com menor quantidade de deformações plásticas e sulcos mais uniformes e rasos (Figuras 4.14 v) até viii), xiii) até xvi), xxi) até xxiv) e xxix) até xxxii)). Em razão do rebolo seeded gel apresentar maior friabilidade que os abrasivos de Al_2O_3 convencional, ocorre a microfratura dos abrasivos expondo novas arestas de corte durante toda a usinagem,

favorecendo a geração de superfícies com melhor textura superficial. Além disso, é possível observar que devido a este comportamento, os sulcos gerados pelo rebolo seeded gel apresentaram menor espessura em comparação com as superfícies obtidas por meio da utilização do rebolo de óxido de alumínio convencional. Jusko (2012) observou que os componentes obtidos após a retificação com rebolo seeded gel apresentaram melhor acabamento em comparação com os ensaios realizados utilizando rebolo Al_2O_3 convencional e CBN. Manimaran e Kumar (2013) também constataram melhoria do acabamento das peças usinadas com rebolo seeded gel em relação ao Al_2O_3 convencional. Os autores justificam esses resultados em razão da maior friabilidade dos abrasivos seeded gel. Essa maior friabilidade favorece a fratura do grão e exposição de arestas afiadas aos abrasivos, auxiliando assim no cisalhamento do material e geração de cavacos, melhoria das condições tribológicas, que por sua vez induz a geração de componentes com melhor acabamento.

As superfícies que apresentaram melhor textura superficial foram obtidas através dos ensaios utilizando as condições de lubri-refrigeração MQL+Grafeno e MQL+NC. As partículas de grafeno e nanotubos de carbono atuaram como lubrificantes sólidos na interface rebolo/peça, reduzindo o coeficiente de atrito gerado e facilitando o corte do material, que por sua vez reflete positivamente a textura superficial e no acabamento. Desta forma, a melhor textura da peça e o acabamento gerados ocorreram nos componentes retificados com as condições que empregaram estas partículas que em comparação com as condições convencional e MQL. Esses resultados coincidem com os menores valores de rugosidade, conforme indicado nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Além disso, a condição MQL+Grafeno foi a que gerou as superfícies com melhor acabamento. Esse comportamento é explicado em razão desta condição apresentar a maior viscosidade, ou seja, existe uma maior facilidade na usinagem, proporcionando assim a geração de componentes com melhor textura superficial.

Virdi et al. (2019) verificaram melhoria da textura superficial de Inconel 718 retificado com rebolo de óxido de alumínio com a adição de partículas de Al_2O_3 ao fluido de corte em comparação com o óleo sem partículas sólidas empregado via condição MQL tradicional (sem partículas sólidas). De acordo com os autores, as nanopartículas contribuem para a melhoria da lubrificação, reduzindo a adesão entre os abrasivos/peça, melhorando as condições tribológicas, que por sua vez melhoram o acabamento. Em ensaios de retificação com rebolo de óxido de alumínio convencional de Inconel 718 desenvolvidos por Virdi et al. (2020), a influência positiva da adição das partículas sólidas

de Al_2O_3 dispersas ao fluido de corte quanto à melhoria da textura superficial dos componentes usinados também foi observada em comparação com a técnica MQL tradicional. Singh, Sharma e Dogra (2019) realizaram ensaios de retificação da liga Ti-6Al-4V e observaram que a adição de partículas de grafeno melhorou da textura superficial do componente usinado por causa desta partículas garantirem melhor lubrificação da interface rebolo/peça.

Cui et al. (2019) simularam o processo de retificação da liga Ti-6Al-4V por meio de um teste pino-disco avaliando a influência de diferentes partículas sólidas (grafeno, MoS_2, MoO_3 e HBN) adicionadas ao fluido de corte sobre o acabamento. Os autores observaram que, além da dispersão das partículas aumentarem a viscosidade do fluido em comparação com o fluido sem partículas sólidas, indicando melhor lubrificação do sistema, o grafeno auxiliou na obtenção de superfícies com melhor textura superficial dentre todas as condições de lubri-refrigeração testadas. As partículas de grafeno produziram superfícies com sulcos mais rasos, com 37,3 % inferior às superfícies relativas ao óleo sem partículas sólidas, e com menor área, cerca de71,2 % inferior às superfícies relativas ao óleo sem partículas sólidas ao serem usinadas nas mesmas condições de corte. Segundo os autores, as características apresentadas pelo grafeno facilitam o seu acesso à interface rebolo/peça, formando uma camada entre os componentes e, assim, reduzindo o coeficiente de atrito existente, que por sua vez refletem positivamente no acabamento e na textura da superfície. Outros estudos indicando a influência positiva da dispersão de partículas sólidas no que diz respeito à qualidade da textura superficial de componentes retificados estão apresentados na secção 2.5.3.

Com o intuito de melhorar o entendimento relativo à influência das condições de lubri-refrigeração sobre a qualidade das superfícies retificadas, na Figura 4.15 estão apresentados os principais eventos observados gerados durante a usinagem. Neste sentido, por meio da avaliação da Figura 4.15, constata-se que o emprego da condição convencional resultou na obtenção de uma maior quantidade de eventos que são prejudiciais ao acabamento do componente.

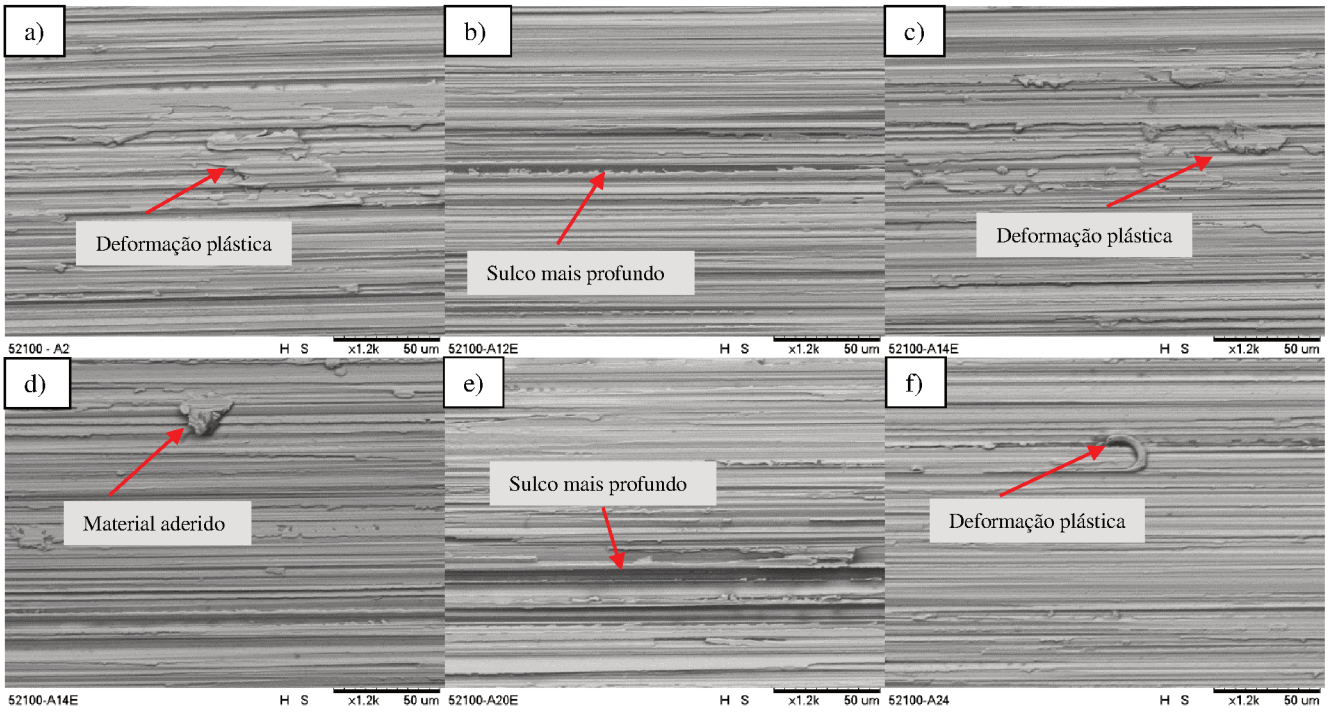


Figura 4.15 – Principais eventos observados sobre as superfícies retificadas de aço endurecido SAE 52100: a) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo Al_2O_3, V_f = 1,5 mm/min e V_w = 0,29 m/s; b) condição de lubri-refrigeração MQL, rebolo seeded gel, V_f = 1,0 mm/min e V_w = 0,29 m/s; c) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo Al_2O_3, V_f = 1,5 mm/min e V_w = 0,57 m/s; d) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo Al_2O_3, V_f = 1,5 mm/min e V_w = 0,57 m/s; e) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo seeded gel, V_f = 1,5 mm/min e V_w =0,57 m/s; f) condição de lubri-refrigeração convencional, rebolo seeded gel, V_f = 1,0 mm/min e V_w = 0,29 m/s.

4.4 Desvio de Cilindricidade

Na Figura 4.16 estão apresentados os desvios de cilindricidade obtidos após a realização de testes de retificação de amostras cilíndricas do aço endurecido SAE 52100.

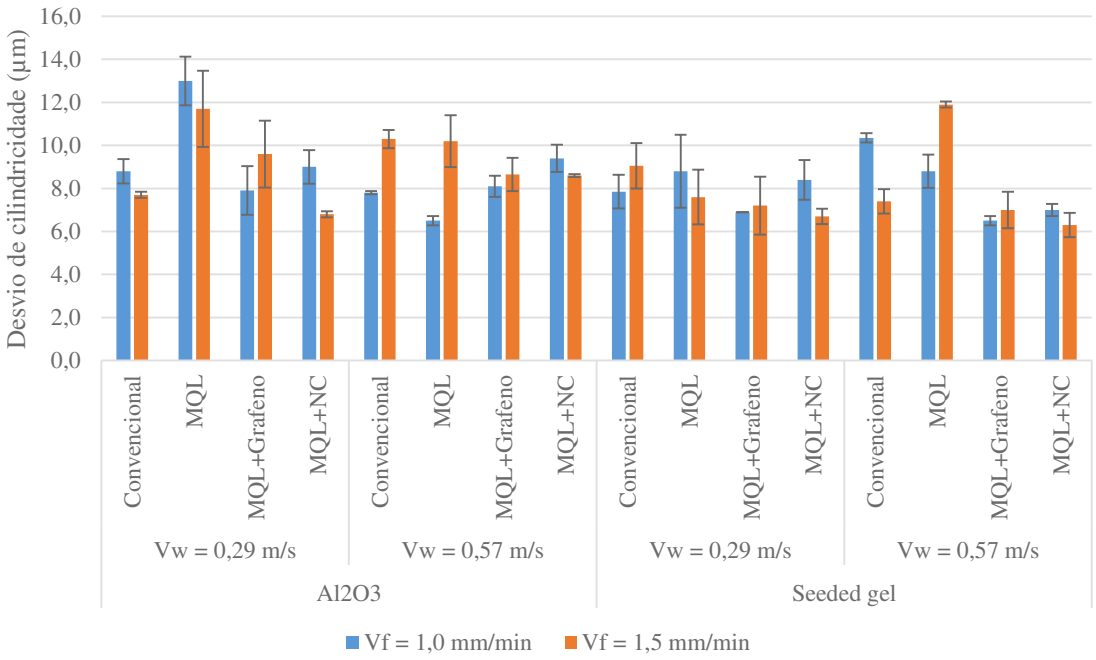


Figura 4.16 – Desvios de cilindricidade dos componentes de aço endurecido SAE 52100 submetidos à retificação cilíndrica externa de mergulho sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração.

Conforme pode ser observado por meio da análise dos resultados da Figura 4.16, em média, o aumento da velocidade de avanço provocou a elevação dos desvios de cilindricidade. Como já discutido nas secções 4.2 e 4.4, o parâmetro V_f influencia diretamente na espessura equivalente de corte (Eq. 2.4) que faz com que haja maior atrito entre o rebolo e a peça. Sendo assim, maiores são as temperaturas desenvolvidas durante a retificação que afetam negativamente tanto as tolerâncias geométricas quanto dimensionais dos componentes usinados (MARINESCU et al., 2016), como foi o caso deste trabalho em que foi afetado o desvio macrogeométrico de cilindricidade.

Já com relação ao parâmetro V_w, no geral, ocorreu justamente o contrário, isto é, sua redução induziu maiores valores de desvio de cilindricidade, justificado em razão do do tempo prolongado de contato do rebolo com a peça, fazendo com que o calor permanecesse por mais tempo interface rebolo/peça e assim gerando deformações de origem térmica na peça e variações dos desvios de cilindricidade em relação a condição em que se emprega uma velocidade da peça (MALKIN e GUO, 2008).

Em ensaios de retificação do aço endurecido AISI 1050, Saglam, Unsacar e Yaldiz (2005) constataram aumento dos desvios de circularidade com o incremento da velocidade de avanço. Com o aumento de V_f, maior é a taxa de remoção de material e a

geração de calor no processo. Sendo assim, maiores serão as distorções nas peças como consequência da elevação do calor, são chamadas também de distorções ou deformações térmicas, ocasionando aumento dos desvios geométricos e dimensionais do componente retificado. Em estudo desenvolvido por Lopes, Garcia e Valentim et al. (2019) foram realizados ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido e revenido AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio (55 ± 2 HRc). Os autores verificaram aumento dos desvios de circularidade com a velocidade de avanço, sendo este resultado justificado pelo aumento da temperatura do processo que resulta em maiores deformações térmicas, e, consequentemente, alterações nos desvios geométricos e dimensionais (distorções e empenamentos, por exemplo) do componente retificado. Lopes, Fernandes e Domingues et al. (2019) também observaram comportamento semelhante dos desvios de circularidade com a velocidade de avanço durante a retificação do aço AISI 4340. Talon et al. (2019) e Talon et al. (2020) verificaram aumento dos desvios de circularidade com a velocidade de avanço durante a realização da retificação do aço AISI 4340 utilizando rebolo de óxido de alumínio. A justificativa apontada pelos autores está no aumento da temperatura gerada durante a usinagem. Com maiores picos de temperatura na zona de corte, maiores são as distorções térmicas causadas na peça, indicando, assim, aumento dos desvios de circularidade do componente.

Em relação à influência do tipo de rebolo abrasivo, constata-se que a retificação empregando o rebolo abrasivo Al_2O_3 convencional contribuiu para a geração de componentes com maiores desvios de cilindricidade. O rebolo seeded gel tem maior friabilidade que o rebolo Al_2O_3 convencional, e isso faz com que, durante o processo de usinagem, as arestas de corte permanecem afiadas por tempo mais prolongado, reduzindo o coeficiente atrito do processo e as temperaturas desenvolvidas, minimizando os desvios geométricos no componente usinado em relação ao rebolo de alumina convencional. Outra característica do rebolo de seeded gel é contribuir para a redução da temperatura do processo é sua maior condutividade térmica em comparação com o Al_2O_3 convencional (como apresentado na Tabela 2.1) (MALKIN e GUO, 2008; KLOCKE, 2009). Em estudo desenvolvido por Arantes (2019) foram realizados ensaios de retificação do aço DIN 100Cr6 empregando diferentes rebolos abrasivos (seeded gel e CBN), sendo que os resultados obtidos demonstraram desvios de circularidade similares e, em determinadas condições inferiores, para o rebolo SG em relação ao CBN. O autor justifica esse comportamento em função das características dos grãos abrasivos seeded gel.

Por meio da comparação das diferentes condições de lubri-refrigeração é possível observar que as condições MQL+Grafeno e MQL+Nanotubos de carbono influenciaram positivamente no sentido de garantir a menor a variação dos desvios de cilindricidade. A justificativa para este comportamento, como discutido previamente, está no aumento da condutividade térmica dos fluidos de corte com a adição das partículas sólidas. À medida que a condição de lubri-refrigeração apresenta maior capacidade em remoção de calor do processo, menor é o gradiente de temperatura experimentado pela peça, resultando assim em menores desvios geométricos, neste caso, representado pelo desvio de cilindricidade. É importante ressaltar que esses resultados coincidiram com a redução dos desvios microgeométricos, representados pelos parâmetros de rugosidade nas Figuras 4.1, 4.2 e 4.3. Além disso, a adição destas partículas sólidas contribui para o aumento da viscosidade do fluido de corte e, consequentemente, reduz o coeficiente de atrito existente entre o rebolo e peça e também o calor gerado. Dentre as partículas sólidas avaliadas, os ensaios de retificação contendo grafeno geraram menores desvios de cilindricidade que os ensaios utilizando nanotubos de carbono em razão das superiores propriedades lubrificantes e refrigerantes destas nanopartículas (Tabela 3.3).

Lopes, Garcia e Volpato et al. (2019) desenvolveram ensaios de retificação cilíndrica do aço endurecido AISI 4340 sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração e eles observaram que houve aumento dos desvios de circularidade com a velocidade de avanço. O aumento de V_f ocasiona elevação das temperaturas desenvolvidas no processo, afetando a ductilidade do material e causando deformações térmicas, prejudicando assim nos desvios geométricos do componente retificado. Eles ainda destacaram que a utilização de partículas de TiO_2 em conjunto com o fluido de corte, aplicados pela condição MQL, contribuíram para a redução dos desvios de circularidade em comparação com a condição MQL tradicional (óleo sem partículas sólidas). Outros trabalhos indicando a influência positiva da dispersão de partículas sólidas no que diz respeito redução dos desvios geométricos estão apresentados na secção 2.5.3.

Através de uma análise de variância (ANOVA) foi possível a obtenção dos p-valores para os resultados de desvio de cilindricidade, como apresentado na Tabela 4.5. A partir da análise dos valores encontrados, destaca-se que a condição de lubri-refrigeração apresentou significância. Importante ressaltar que após a condição de lubri-

refrigeração, a variável de entrada que mais influenciou nos valores de desvio de cilindricidade foi o tipo do rebolo abrasivo.

Tabela 4.5 – Análise de variância (ANOVA) referente aos resultados de desvio de cilindricidade.

Fator	p-valor
Velocidade da peça (V_w)	0,8200
Velocidade de avanço (V_f)	0,8686
Tipo do rebolo abrasivo	0,0840
Condição de lubri-refrigeração	0,0323
V_w x V_f	0,3034
V_w x Tipo do rebolo	0,4156
V_w x Condição de lubri-refrigeração	0,7985
V_f x Tipo do rebolo	0,6358
V_f x Condição de lubri-refrigeração	0,4085
Tipo do rebolo x Condição de lubri-refrigeração	0,6923

Na Figura 4.17 são apresentados os comportamentos médios dos desvios de cilindricidade com a variação dos parâmetros velocidade de avanço (V_f), velocidade da peça (V_w), tipo de rebolo abrasivo e condição de lubri-refrigeração. Os resultados mostraram que o aumento de V_f e a redução de V_w ocasionaram aumento médio dos desvios de cilindricidade o que está de acordo com o que é normalmente relatado na literatura de Usinagem por Abrasão, enquanto que os menores valores médios ocorreram após a retificação com a utilização do rebolo seeded gel e a condição de lubri-refrigeração MQL+Grafeno.

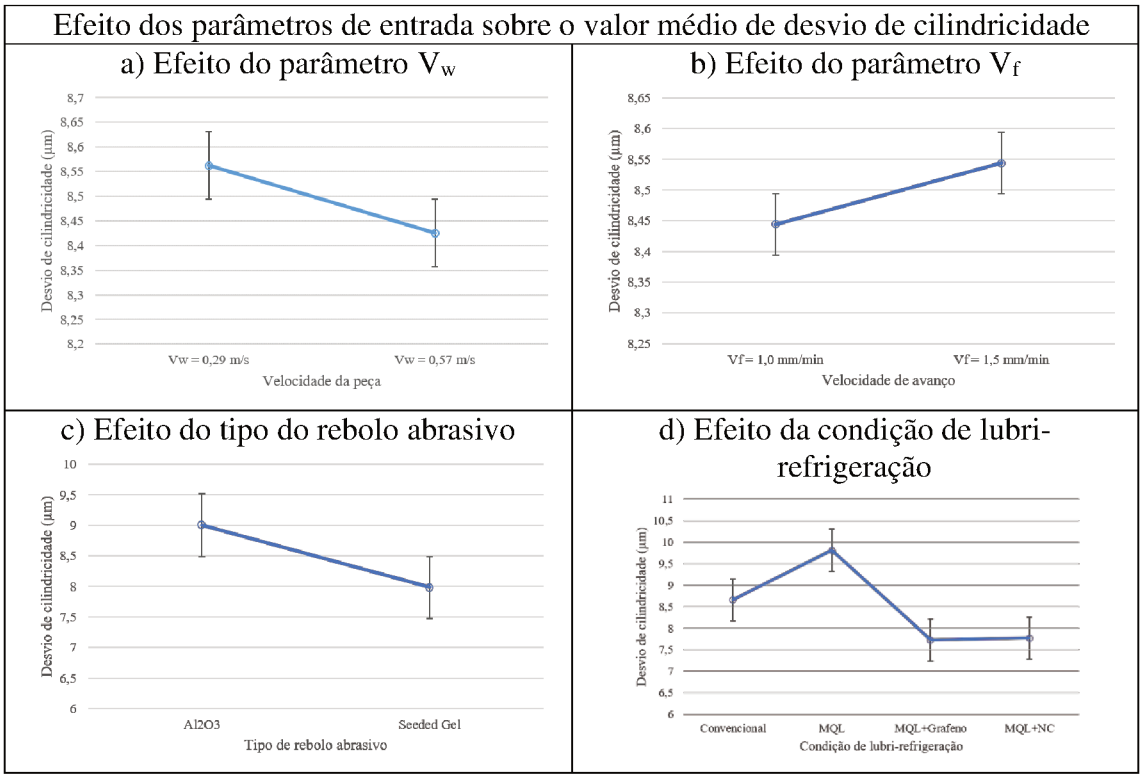


Figura 4.17 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio do desvio de cilindricidade: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração.

4.5 Potência de Retificação

Na Figura 4.18 são apresentados os resultados dos picos de potência elétrica encontrados durante ensaios de retificação cilíndrica de mergulho do aço endurecido SAE 52100 submetidos à diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração.

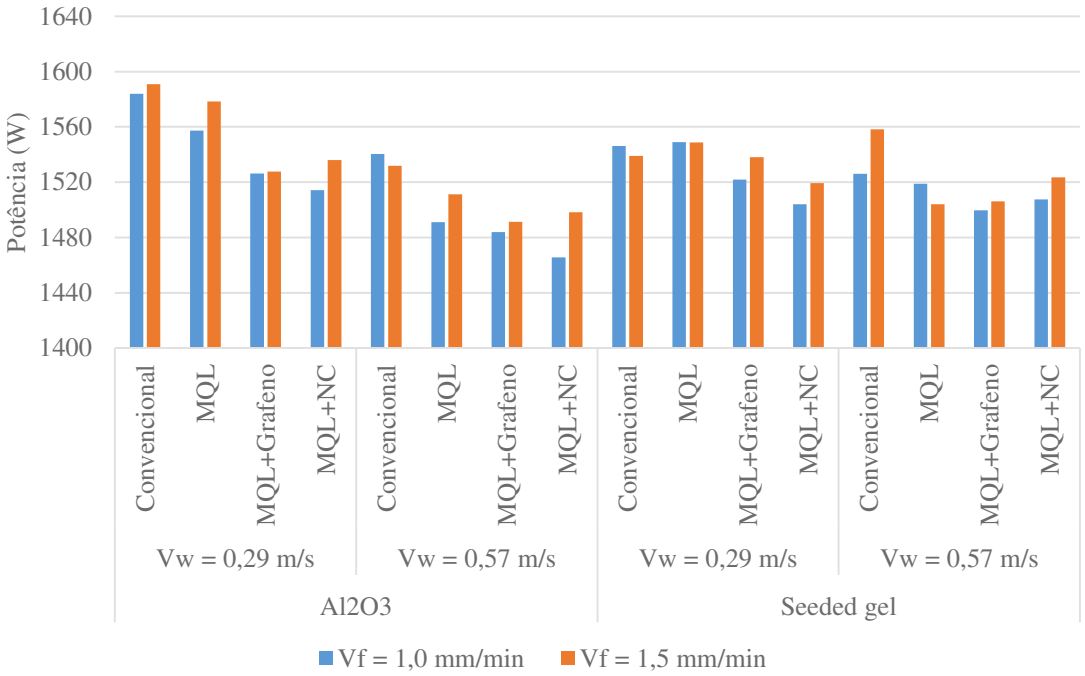


Figura 4.18 – Picos de potência elétrica obtidos durante ensaios de retificação do aço endurecido SAE 52100 sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração.

Em todas as condições de lubri-refrigeração observa-se comportamento semelhante do parâmetro de corte velocidade de avanço, sendo que o aumento de V_f, no geral, proporcionaram elevação dos valores de potência do processo de retificação. O comportamento da potência com a velocidade de avanço é justificado em razão deste parâmetro de entrada influenciar diretamente na taxa de remoção de material, ou seja, na parcela de material que é removido por partícula abrasiva. Desta forma, maiores são os esforços de corte necessários para realização da usinagem, ocasionando aumento da potência elétrica (MALKIN e GUO, 2008; ROWE, 2009).

Nathan, Vijayaraghavan e Krishnamurthy (1999) desenvolveram testes de retificação cilíndrica com rebolo de óxido de alumínio do aço DIN C60 e observaram aumento da potência de retificação com a velocidade de avanço que por sua vez implica no incremento da espessura equivalente de corte (h_{eq}). Ao elevar a velocidade de avanço, maior será a taxa de remoção de material, resultando no aumento da potência necessária para realização do corte do material. Saglam, Unsacar e Yaldiz (2005) constataram aumento das forças de corte com a velocidade de avanço durante a retificação do aço AISI 1050, relação que foi justificada pelo fato do aumento de V_f ocasionar a elevação da taxa de remoção de material (Q_w), semelhante à justificativa apresentada por Nathan et. al

(1999). Assim, à medida que ocorre o aumento Q_w, maiores serão os esforços de corte necessários para a realização da usinagem. Esta mesma explicação também foi utilizada para justificar os resultados obtidos na pesquisa experimental realizada por Heinzel e Kolkwitz (2019), ensaios de retificação do aço AISI 4240 (46 ± 2 HRc), onde houve aumento da potência do processo com a elevação da taxa de remoção de material. Durante ensaios de retificação do aço endurecido e revenido AISI 1040, Bordin e Weingaertner (2019) também encontraram aumento dos esforços de corte com a elevação da taxa de remoção de material. Lopes, Garcia e Valentim et al. (2019) encontraram aumento de potência com o incremento da velocidade de avanço durante ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido e revenido AISI 4340 com rebolo de óxido de alumínio. Este resultado é justificado pelo fato do aumento de V_f influenciar diretamente no aumento da taxa de remoção de material, sendo necessários maiores esforços de corte para a realização da usinagem.

Com relação à velocidade da peça, normalmente é relatado na literatura que o aumento de V_w indica uma elevação da potência do processo por influenciar na espessura equivalente de corte e na taxa de remoção de material. Entretanto, nos ensaios realizados nesta pesquisa, não foi observada esta relação, ou seja, uma menor velocidade da peça proporcionou, no geral, maiores valores de potência. Uma possível explicação para esse comportamento é o fato de menores velocidades da peça indicarem um maior tempo de contato entre a ferramenta e a peça. Neste sentido, o calor gerado fica um tempo mais longo concentrado na zona de corte fazendo com que o fluxo de calor seja direcionado mais para o interior da peça e propiciando a ocorrência de danos térmicos no componente (conforme indicado pelo aumento de microdureza em relação à microdureza média do material nas Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10) e, em razão da elevada dureza, são necessários maiores esforços para usinar o material.

Ao analisar a influência do tipo do rebolo sobre a potência de retificação é possível constatar que a retificação com o rebolo abrasivo Al_2O_3 convencional resultou em maiores valores em comparação com o rebolo seeded gel. No geral, este comportamento foi encontrado em todas as condições de lubri-refrigeração. Em razão do rebolo seeded gel apresentar maior friabilidade, esta característica facilitou a remoção de material pela manutenção das arestas de corte afiadas o que implicou na redução dos esforços de corte do processo. Manimaran e Kumar (2013) desenvolveram ensaios de retificação do aço EN 31 (AISI 52100) empregando os rebolos abrasivos sedded gel e Al_2O_3, sendo que os resultados obtidos indicaram redução dos esforços de corte com a utilização dos abrasivos

SG. Este comportamento devido às partículas abrasivas mais afiadas e suas melhores propriedades mecânicas em relação ao rebolo de Al_2O_3 que induzem a menores forças de retificação. Os autores ainda destacam que essa capacidade de auto-afiação dos abrasivos seeded gel contribuem para uma menor carga sobre os cavacos gerados na usinagem e assim melhoram as condições tribológricas existentes entre o rebolo e a peça. Durante ensaios de retificação cilíndrica de mergulho do aço ferramenta AISI D2, Fathallah et al. (2008) observaram menores forças de corte com a utilização do rebolo seeded gel em comparação com o rebolo de Al_2O_3 convencional. A justificativa apontada pelos autores para este resultado está no fato destes abrasivos apresentarem maior auto-afiação e, desta forma, necessitarem de menores esforços para a realização do corte do material. Zhang et al. (2012) desenvolveram ensaios de retificação da liga de níquel GH2132 empregando diferentes tipos de rebolos abrasivos (SiC de diferentes designações e SG) e também observaram que os abrasivos seeded gel proporcionaram os menores esforços de corte.

Com relação às condições de lubri-refrigeração avaliadas, verifica-se que a utilização das partículas sólidas em conjunto com o fluido de corte (MQL+Grafeno e MQL+Nanotubos de carbono) atuou na redução dos esforços de corte necessários para a usinagem. A justificativa para este resultado diz respeito a dois comportamentos gerados pela utilização destas partículas. Além de promover a melhoria das propriedades do fluido, neste caso o destaque é a capacidade de lubrificação, elas também atuam como lubrificantes sólidos na interface rebolo/peça. Todas estas características viabilizam a realização do processo de retificação pela melhoria das condições tribológicas, com relação à facilidade de remoção de material, pela redução do coeficiente de atrito (Tabela 3.2). A condição MQL+Grafeno foi a responsável pelos menores esforços de corte gerados durante a retificação devido ao fato desta condição apresentar a maior viscosidade dentre todas as condições de lubri-refrigeração avaliadas.

Chakule, Chaudhari e Talmale (2019) verificaram a influência da adição de partículas de Al_2O_3 ao fluido sobre os esforços de corte de aço endurecido retificado empregando rebolo de óxido de alumínio e os resultados indicaram menor força de retificação dos ensaios com a condição empregando fluido de corte + Al_2O_3. Eles atribuíram esta melhoria à função lubrificação que se sobressaiu à refrigeração, o que promoveu a redução do atrito na interface rebolo/peça e facilitou o corte do material. Em estudo desenvolvido por Seyedzavvar, Shabgard e Mohammadpourfard (2019) foram realizados ensaios de retificação do aço endurecido AISI 1045 (48 HRc) sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração. Os autores constataram aumento dos esforços

de corte com a velocidade da peça como resultado da elevação da taxa de remoção de material. Além disso, a adição de grafeno ao fluido de corte autou na redução das forças de retificação em comparação com a condição convencional em razão destas partículas sólidas melhorarem a propriedade lubrificante do fluido além de atuarem na zona de corte como lubrificantes sólidos.

Lopes, Garcia e Volpato et al. (2019) desenvolveram ensaios de retificação cilíndrica do aço endurecido AISI 4340 e, além de observarem aumento de potência com a velocidade de avanço, constataram que a retificação empregando partículas de TiO_2 em conjunto com o fluido de corte (MQL+Nano) exigiu menores esforços de corte que a condição MQL empregando óleo sem partículas sólidas (sem adição de partículas sólidas). Singh, Sharma e Dogra (2019) realizaram ensaios de retificação da liga Ti-6Al-4V e observaram que a adição de partículas de grafeno contribuiu para redução das forças de retificação. Virdi et al. (2020) desenvolveram ensaios de retificação do Inconel 718 com rebolo de óxido de alumínio e verificaram que a adição de partículas de Al_2O_3 resultaram em esforços de corte similares, e em determinadas condições inferiores, em comparação com a condição convencional, sendo este comportamento justificado pela superior capacidade de lubrificação das partículas sólidas em conjunto com o fluido de corte. Outros trabalhos indicando a influência positiva da dispersão de partículas sólidas no que diz respeito redução da potência de retificação estão apresentados na secção 2.5.3.

Os p-valores referentes aos valores de potência, obtidos por meio da análise de variância (ANOVA), estão apresentados na Tabela 4.6. É possível constatar que apenas as variáveis velocidade da peça e condição de lubri-refrigeração e a interação entre a velocidade da peça (V_w) e o tipo do rebolo foram significativas para o processo em razão do p-valor ser inferior a 0,05. Na Figura 4.19 estão apresentados os comportamentos médios de potência com a variação dos parâmetros de entrada sendo observado incremento do valor com o aumento de V_f e a redução de V_w. Outra informação retirada da Figura 4.19 é que a retificação utilizando o rebolo seeded gel exigiu o menor valor médio de potência, além dos ensaios em condições de lubri-refrigeração MQL+Grafeno e MQL+NC resultaram nos menores valores de potência média dentre todas as condições empregadas.

Tabela 4.6 – Análise de variância (ANOVA) referente aos valores de potência de retificação.

Fator	p-valor
Velocidade da peça (V_w)	0,0006
Velocidade de avanço (V_f)	0,3145
Tipo do rebolo abrasivo	0,9165
Condição de lubri-refrigeração	0,0037
V_w x V_f	0,9056
V_w x Tipo do rebolo	0,0419
V_w x Condição de lubri-refrigeração	0,2442
V_f x Tipo do rebolo	0,8226
V_f x Condição de lubri-refrigeração	0,9119
Tipo do rebolo x Condição de lubri-refrigeração	0,6133

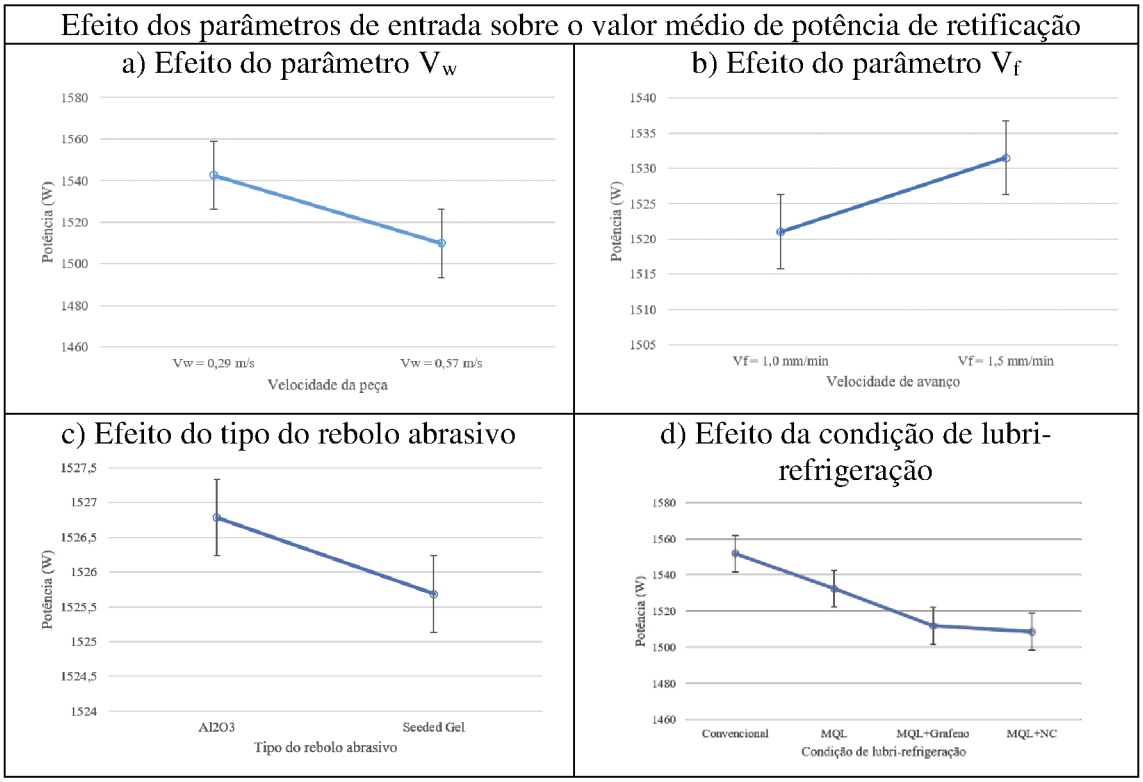


Figura 4.19 – Efeito das condições de corte e de lubri-refrigeração sobre o valor médio de potência: a) V_w; b) V_f; c) Tipo do rebolo abrasivo; d) Condição de lubri-refrigeração.

CAPÍTULO V

Conclusões

A partir dos resultados encontrados durante ensaios de retificação cilíndrica externa de mergulho do aço endurecido SAE 52100 sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração, as seguintes conclusões foram obtidas:

- O aumento da velocidade de avanço (V_f) e velocidade da peça (V_w) proporcionou elevação dos valores de rugosidade R_a, R_z e R_t, conforme esperado segundo a literatura. A variação de V_f resultou em um aumento médio de R_a de 10,3 %, enquanto que para o parâmetro V_w essa porcentagem foi de 7,5 %. Dentre os rebolos abrasivos avaliados, constata-se menores valores de rugosidades nos componentes retificados empregando o rebolo seeded gel em razão de sua maior friabilidade. Os componentes usinados utilizando o rebolo seeded gel apresentaram valor médio de rugosidade R_a 21,66 % inferior ao observado para as amostras usinadas com rebolo de óxido de alumínio convencional;
- Com relação às condições de lubri-refrigeração estudadas, a adição de partículas sólidas ao fluido de corte contribuiu para a redução dos parâmetros de rugosidade R_a, R_t e R_z. As partículas de grafeno e nanotubos de carbono além de atuarem na melhoria das propriedades do fluido, também exercem função de lubrificantes sólidos na interface rebolo/peça, melhorando o acabamento superficial e, consequentemente, reduzindo os valores de rugosidade. A retificação com a condição MQL+Grafeno resultou nos menores valores de rugosidade, sendo que a condição MQL+NC apresentou resultados similares. O menor valor de rugosidade R_a encontrado foi para a condição MQL+Grafeno (0,54 µm), sendo que a condição convencional resultou em valor 19,63 % superior (0,646 µm);

enquanto que a condição MQL gerou 8,7 % superior (0,587 µm), mas inferior a anterior, e a condição MQL+Nanotubos de carbono 1,7 % superior (0,549 µm);

- A partir da análise dos valores de microdureza, observa-se que o incremento da velocidade de avanço e redução da velocidade da peça indicaram aumento da variação de microdureza em relação à média do material (livre de danos térmicos). Além disso, verifica-se que os componentes retificados com o rebolo seeded gel apresentaram menores variações de microdureza em comparação com o rebolo de Al_2O_3 convencional. Os ensaios utilizando o rebolo seeded gel com a condição de lubri-refrigeração convencional, em média, proporcionaram uma redução de 3,12 % na microdureza em relação à superfície retificada em comparação com o rebolo de óxido de alumínio convencional;
- Em relação às condições de lubri-refrigeração, observa-se que a dispersão de partículas sólidas ao fluido (MQL+Grafeno e MQL+NC) indicou menores quedas de microdureza em comparação com os componentes obtidos dos ensaios empregando as condições convencional e MQL, sendo a condição MQL+Grafeno a que apresentou as menores variações. Os ensaios com a condição convencional proporcionaram um aumento na microdureza em relação à microdureza média do material (879 HV) de 24,5 %, já a condição MQL um aumento de 14,6 %, diferentemente das condições MQL+Grafeno e MQL+NC que geraram quedas de 5,5 % e de 8,8 % respectivamente;
- Por meio da avaliação das superfícies retificadas foi possível constatar que o aumento de V_f e redução de V_w produziram superfícies com maior quantidade de áreas contendo deformação plástica e material aderido, além dos sulcos apresentarem maiores irregularidades. A utilização do rebolo seeded gel gerou superfícies com acabamento superior ao encontrado para o rebolo de Al_2O_3 convencional;
- Dentre as condições de lubri-refrigeração avaliadas, a MQL+Grafeno, seguida de perto pela MQL+NC, proporcionou a obtenção dos componentes com melhor textura superficial, apresentando menor quantidade de deformações plásticas e sulcos mais uniformes e rasos;
- Por atuarem na melhoria das propriedades lubrificantes e refrigerantes do fluido de corte, a adição das partículas de grafeno e nanotubos de carbono influenciaram

positivamente diminuindo as alterações microestruturais dos componentes retificados;

- Com o aumento da velocidade de avanço e redução da velocidade da peça ocorreu a elevação dos desvios de cilindricidade. Além disso, o rebolo seeded gel proporcionou os menores valores para este desvio mensurado, apresentando desvio de cilindricidade 11,3% inferior ao observado para o rebolo de óxido de alumínio convencional. Cabe ressaltar que a utilização das partículas de grafeno e nanotubos de carbono melhoraram as propriedades refrigerantes do fluido de corte, favorecendo a geração de componentes com menores desvios de cilindricidade;
- Por meio da análise da potência de retificação constatou-se o aumento dos esforços de corte com a velocidade de avanço e a redução da velocidade da peça. O rebolo seeded gel, por apresentar maior friabilidade, que gera partículas mais afiadas, facilita o corte do material diminuindo a potência do processo em relação ao rebolo de Al_2O_3 convencional;
- O emprego das partículas sólidas possibilitou a usinagem do material empregando menores esforços de corte em comparação com as condições convencional e MQL, sendo esse comportamento justificado pela sua superior capacidade de lubrificação da interface rebolo/peça;
- Ao avaliar a influência das condições de lubri-refrigeração, com base nos parâmetros rugosidade, microdureza, imagens da superfície, alterações microestruturais, desvio de cilindricidade e potência, a ordem de desempenho destas condições com relação aos parâmetros de corte empregados foi: 1º MQL+Grafeno, 2º MQL+Nanotubos de carbono, 3º MQL e 4º Convencional. Além disso, o rebolo seeded gel apresentou os melhores resultados em todas as variáveis de saída mensuradas.

Sugestões para trabalhos futuros

A partir dos resultados obtidos durante o desenvolvimento desta pesquisa as seguintes propostas de trabalhos futuros surgiram visando a continuidade deste estudo:

- Avaliar da influência da dispersão de partículas sólidas quanto à integridade superficial e sub-superficial durante a retificação cilíndrica externa de mergulho de ligas de níquel e titânio (Inconel 718 e Ti-6Al-4V);
- Estudar do comportamento da adição de outros tipos de partículas sólidas (MoS_2, diamante, Al_2O_3) dispersas ao fluido de corte e em combinação com diferentes dressadores na integridade do aço endurecido SAE 52100, além de analisar comportamento das tensões residuais;
- Testar diferentes tipos de fluido de corte e de posicionamentos de bocais durante a retificação de aço endurecido e empregando as mesmas partículas sólidas empregadas neste trabalho

Referências Bibliográficas

ABNT NBR 6409, 1997. Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho.

ABRÃO, B. S., PEREIRA, M. F., GUIMARÃES, C., SILVA, L. S. V., RUZZI, R. S., SILVA, R. B. Surface finish evaluation of AISI VP 100 steel after grinding with MQL technique with different flow rates. 24th ABCM International Congresso of Mechanical Engineering, 2017. https://doi.org/10.26678/ABCM.COBEM2017.COB17-2173

AKINTSEVA, A. V., PEREVERZEV, P. P. Modeling the Influence of the Circle Overtravel on the Stability of Internal Grinding Process. International Conference on Industrial Engineering, v.206, 2017, p. 1179-1183. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.10.614

ALVES, L. O. B. S., RUZZI, R. S., SILVA, R. B., JACKSON, M. J., TARRENTO, G. E., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Performance evaluation of the MQL technique with auxiliary cleaning of the grinding wheel in cylindrical grinding of N2711 steel. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, v.139, 2017. https://doi.org/10.1115/1.4037041

ANJOS, M. A. Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubri-refrigeração. 2015. 117p. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Bauru-SP. https://doi.org/10.1590/S1517-707620160001.0015

ANJOS, M. A., BIANCHI, E. C., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., ESTAMBASSE, E. C., HILDEBRANDT, R. A. Estudo experimental do uso de rebolos convencionais na usinagem do aço VP-50 utilizado na retificação cilíndrica, por meio de diferentes métodos de lubrirrefrigeração. Matéria (Rio de Janeiro), v.21, 2016, p. 169-184. https://doi.org/10.1590/S1517-707620160001.0015

ARANTES, L. O. Desempenho de rebolos seeded-gel e CBN na retificação cilíndrica externa de mergulho em altas velocidades periféricas no aço 100Cr6. 2019. 113p. Dissertação de mestrado, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba-PR.

ASTAKHOV, V. P., JOKSCH, S. Metalworking fluids (MWFs) for cutting and grinding. Woodhead Publishing Limited, 2012. 434p. https://doi.org/10.1533/9780857095305

AWALE, A. S., SRIVASTAVA, A., VASHISTA, M., YUSUFZAI, M. Z. K. Influence of minimum quantity lubrication on surface integrity of ground hardened H13 hot die steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.100, 2018, p. 983-997. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2777-0

BATAKO, A. D. L., TSIAKOUMES, V. An experimental investigation into resonance dry grinding of hardened steel and nickel alloys with element of MQL. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.77, 2014, p. 27-41. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6380-8

BELENTANI, R. M., JÚNIOR, H. F., CANARIM, R. C., DINIZ, A. E., HASSUI, A., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. Materials Research, v.17, 2013. https://doi.org/10.1590/S1516-14392013005000165

BHUSHAN, B. Introduction to Tribology. John Wiley & Sons, 2013. https://doi.org/10.1002/9781118403259

BIANCHI, E. C., RODRIGUEZ, R. L., HILDEBRANDT, R. A., LOPES, J. C., MELLO, H. J., SILVA, R. B., AGUIAR, P. R. Plunge cylindrical grinding with the minimum quantity lubrication coolant technique assisted with wheel cleaning system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.95, 2017, p. 2907- 2916. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1396-5

BIANCHI, E. C., RODRIGUEZ, R. L., HILDEBRANDT, R. A., LOPES, J. C., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., SILVA, R. B., JACKSON, M. J. Application of the auxiliary wheel cleaning jet in the plunge cylindrical grinding with Minimum Quantity Lubrication technique under various flow rates. Journal of Engineering Manufacturing, 2018. https://doi.org/10.1177/0954405418774599

BOOTHROYD, G., KNIGHT, W. A. Fundamentals of Machining and Machine Tools. Marcel Dekker, Inc, 1989. 578p.

BORADE, S., KADAM, M. S. Comparison of main effect of vegetable oil and Al_2O_3 nanofluids used with MQL on surface roughness and temperature. International Journal of Mechanical Engineering and Technology, v.7, 2016, p. 203-213.

BORDIN, F. M., WEINGAERTNER, W. L. Steel subsurface damage on plunge cylindrical grinding with sol-gel aluminum oxide grinding wheels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.105, 2019, p. 2907-2917. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04518-z

CHAKULE, R. R., CHAUDHARI, S. S. Experimental study of hardness effects on surface roughness for nanofluid minimum quantity lubrication (NanoMQL) technique using Jaya algorithm. International Journal of Data and Network Science, v.2, 2018, p. 71-78. https://doi.org/10.5267/j.ijdns.2018.8.002

CHAKULE, R. R., CHAUDHARI, S. S., TALMALE, P. S. Evaluation of the effects of machining parameters on MQL based surface grinding process using response surface methodology. Journal of Mechanical Science and Technology, v.31, 2017, p. 3907-3916. https://doi.org/10.1007/s12206-017-0736-6

CHAKULE, R. R., CHAUDHARI, S. S., TALMALE, P. S. Optimization of Nanofluid Minimum Quantity Lubrication (NanoMQL) Technique for Grinding Performance Using Jaya Algorithm. Advanced Engineering Optimization Through Intelligent Techniques, 2019, p. 211-221. https://doi.org/10.1007/978-981-13-8196-6_20

CHOI, T. J., SUBRAHMANYA, N., LI, H., SHIN, Y. C. Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.48, 2007, p. 61-72. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2007.07.010

CUI, X., LI, C., ZHANG, Y., JIA, D., ZHAO, Y., LI, R., CAO, H. Tribological properties under the grinding wheel and workpiece interface by using graphene nanofluid lubricant. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.104, 2019, p. 3943-3958. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04129-8

ERANKI, J., XIAO, G., MALKIN, S. Evaluating the performance of "seeded gel" grinding wheels. Journal of Materials Processing Technology, v.32, 1991, p. 609-625. https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90257-S

FATHALLAH, B. B., FREDJ, N. B., SIDHOM, H., BRAHAM, C., ICHIDA, Y. Effects of abrasive type cooling mode and peripheral grinding wheel speed on the AISI D2 steel ground surface integrity. International Journal of Machine tools & Manufacture, v.49, 2008, p. 261-272. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2008.10.005

FILHO, A. P. Rugosidade Superficial. 3° Seminário de Metrologia, 2011.

FRAGOSO, K. M., UMBERTO, D. R., BARILI, I. C., BIANCHI, E. C., SILVA, R. B., AGUIAR, P. R., MELLO, H. J. Retificação cilíndrica do aço VP50 utilizando o rebolo de carbeto de silício verde com a técnica de MQL. Matéria (Rio de Janeiro), v.21, 2016. https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0071

FRANCELIN, R. P., COSTA, W. B., LOPES, J. C., FRANCELIN, A. P., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Evaluation of the oil flow using the MQL technique applied in the cylindrical plunge grinding of AISI 4340 steel with cbn grinding wheel. Mechanic and Energy, 2018. https://doi.org/10.1590/0370-44672017710139

GAO, T., LI, C., ZHANG, Y., YANG, M., JIA, D., JIN, T., HOU, Y., LI, R. Dispersing mechanism and tribological performance of vegetable oil-based CNT nanofluids with different surfactants. Tribology International, v.131, 2018, p. 51-63. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.10.025

GARCIA, M. V., LOPES, J. C., DINIZ, A. E., RODRIGUES, A. R., VOLPATO, R. S., SANCHEZ, L. E. A., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Grinding performance of bearing steel using MQL under different dilutions and wheel cleaning for green manufacture. Journal of Cleaner Production, v.257, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120376

HADAD, M., HADI, M. An investigation on surface grinding of hardened stainless steel S34700 and aluminum alloy AA6061 using minimum quantity lubrication (MQL) technique. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.68, 2013, p. 2145-2158. https://doi.org/10.1007/s00170-013-4830-3

HADAD, M., SHARBATI, A. Analysis of the effects of dressing and wheel topography on grinding process under different coolant-lubrificant conditions. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.90, 2016, p. 3727-3738. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9703-0

HADAD, M., SHARBATI, A. Thermal Aspects of Environmentally Friendly-MQL grinding Process. 13th Global Conference on Sustainable Manufacturing - Decoupling Growth from Resource Use, v.40, 2016, p. 509-515. https://doi.org/10.1016/j.procir.2016.01.125

HEINZEL, C., KOLKWITZ, B. The Impact of fluid supply on energy efficiency and process performance in grinding. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.68, 2019, p. 337-340. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2019.03.023

HOLEŠOVSKY, F., BARTOS, M., DIAN, M., REHOR, J. Application of New Abrasives and their Quality Parameters. Solid State Phenomena, v. 261, 2017, p. 181-188. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/SSP.261.181

HOSOKAWA, A., TOKUNAGA, K., UEDA, T., KIWATA, T., KOYANO, T. Drastic reduction of grinding fluid flow in cylindrical plunge grinding by means of contact-type flexible brush-nozzle. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.65, 2016, p. 317-320. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2016.04.092

HUANG, W. T., LIU, W. S., TSAI, J. T., CHOU, J. H. Multiple Quality Characteristics of Nanofluid/Ultrasonic Atomization Minimum Quality Lubrication for Grinding Hardened Mold Steel. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering, v.15, 2017, p. 1065-1077. https://doi.org/10.1109/TASE.2017.2726000

HUANG, X., REN, Y., JIANG, W., HE, Z., DENG, Z. Investigation on grind-hardening annealed AISI5140 steel with minimal quantity lubrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.89, 2016, p. 1069-1077. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9142-y

HUANG, X., REN, Y., LI, T., ZHOU, Z., ZHANG, G. Influence of minimum quantity lubrication parameters on grind-hardening process. Journal Materials and Manufacturing Processes, v.33, 2016, p. 69-76. https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1269916

HUANG, X., REN, Y., ZHOU, Z., XIAO, H. Experimental study on white layers in high-speed grinding of AISI52100 hardened steel. Journal of Mechanical Science and technology, v.29, 2015, p. 1257-1263. https://doi.org/10.1007/s12206-015-0240-9

HUANG, X., ZHOU, Z., REN, Y., MAO, C., LI, W. Experimental research material characteristics effect on white layers formation in grinding of hardened steel. The

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.66, 2012, p. 1555-1561. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4439-y

JASWANTH, C. N. V., RAO, M. R., RAO, C. V. S. P., RAO, S. S. N. M. Experimental Investigation of Surface Roughness and Temperature on a Surface Grinding of HC-HCr Steel using Dry and MQL Techniques. Global Journal of Researches in Engineering: A Mechanical and Mechanics Engineering, v.17, 2017.

JIANG, C., LI, H., MAI, Y., CHI, Y. Estimation of the Time Constant of Plunge Grinding of C45 in Infeed Period with Properties of Mechanical Materials Based on Acoustic Emission Measurement, v.648, 2013, p. 182-185. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.648.182

JUSKO, O. New Abrasive Materials and Their Influence on the Surface Quality of Bearing Steel After Grinding. Acta Polytechnica, v.52, 2012. https://doi.org/10.14311/1598

KANTHARAJ, I., SEKAR, M., VASANTH, A., MOHANASUNDARAM, S. Comparative Study of Cutting Fluid Application Methods to Improve Machining Conditions During Surface Grinding on AISI 1040 Steel. Advances in Manufacturing Processes, 2018, p. 71-79. https://doi.org/10.1007/978-981-13-1724-8_7

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. https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.04.002

KLOCKE, F. Manufacturing process 2: grinding, honing, lapping. Ed Springer, 2009. 433p. https://doi.org/10.1007/978-3-540-92259-9

KUMAR, M., SINGH, S., GOYAL, K. To study the effect of grinding parameters on surface roughness and material removal rate of cylindrical grinding of hate treated EN 47 steel. Journal of Mechanical Engineering, v.45, 2015, p. 81-88. https://doi.org/10.3329/jme.v45i2.28189

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. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2005.05.019

LEE, P. H., KIM, J. W., LEE, S. W. Experimental characterization on eco-friendly micro-grinding process of titanium alloy using air flow assisted electrospray lubrication with nanofluid. Journal of Cleaner Production, v.201, 2018, p. 452-462. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.07.307

LEE, P. H., NAM, J. S., LI, C., LEE, S. W. An Experimental Study on Micro-Grinding Process with Nanofluid Minimum Quantity Lubrication (MQL). International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v.13, 2012, p. 331-338. https://doi.org/10.1007/s12541-012-0042-2

LEPPERT, T. Experimental investigation of cooling and lubrication effects in plane grinding of AISI 304 steel. 24th International Conference Engineering Mechanics, 2018.

LEZANSKI, P., PILACINSKA, M. The dominance-based rough set approach to cylindrical plunge grinding process diagnosis. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016. https://doi.org/10.1007/s10845-016-1230-1

LI, B., LI, C., ZHANG, Y., WANG, Y., YANG, M., JIA, D., ZHANG, N., WU, Q., DING, W. Numerical and experimental research on the grinding temperature of minimum quantity lubrication cooling of different workpiece materials using vegetable oil-based nanofluids. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.93, 2017, p. 1971-1988. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0643-0

LIN, B., ZHOU, K., GUO, J., LIU, Q. Y., WANG, W. J. Influence of grinding parameters on surface temperature and burn behaviors of grinding rail. Tribology International, v.122, 2018, p. 151-162. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2018.02.017

LINDSAY, R. The Performance of Seeded Gel Abrasives in the Laboratory and at Customer Test Sites. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, v.61, 1989, p. 20-26. https://doi.org/10.1108/eb036854

LINKE, B. Life Cycle and Sustainability of Abrasive Tools. Springer, 2016. 276p. https://doi.org/10.1007/978-3-319-28346-3

LOPES, J. C., FERNANDES, L. M., DOMINGUES, B. B., CANARIM, R. C., FONSECA, M. P. C., SANCHEZ, L. E. A., OLIVEIRA, R. F. M., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Effect of CBN grain friability in hardened steel plunge

grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.103, 2019, p. 1567-1577. https://doi.org/10.1007/s00170-019-03654-w

LOPES, J. C., GARCIA, M. V., VALENTIM, M., JAVARONI, R. L., RIBEIRO, F. S. F., SANCHEZ, L. E. A., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Grinding performance using variants of the MQL technique: MQL with cooled air and MQL simultaneous to the wheel cleaning jet. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.105, 2019, p. 4429-4442. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04574-5

LOPES, J. C., GARCIA, M. V., VOLPATO, R. S., MELLO, H. J., RIBEIRO, F. S. F., SANCHEZ, L. E. A., ROCHA, K. O., NETO, L. D., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Application of MQL technique using TiO_2 nanoparticles compared to MQL simultaneous to the grinding wheel cleaning jet. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.106, 2019, p. 2205-2218. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04760-5

LOPES, J. C., VENTURA, C. E. H., FERNANDES, L. M., TAVARES, A. B., SANCHEZ, L. E. A., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Application of a wheel cleaning system during grinding of alumina with minimum quantity lubrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.102, 2019, p. 333-341. https://doi.org/10.1007/s00170-018-3174-4

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

MADOPOTHULA, U., NIMMAGADDA, R. B., LAKSHMANAN, V. Assessment of White layer in hardened AISI 52100 steel and its prediction using grinding power. Machining Science and Technology, v.22, 2017, p. 1-21. https://doi.org/10.1080/10910344.2017.1365891

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

MANIMARAN, G., KUMAR, M. P. Investigation of Cooling Environments in Grinding EN 31 Steel. Materials and Manufacturing Processes, v.28, 2013, p. 424-429. https://doi.org/10.1080/10426914.2013.763957

MANOJKUMAR, K., GHOSH, A. Synthesis of MWCNT nanofluid and evaluation of its potential besides soluble oil as micro cooling-lubrication médium in SQL grinding. International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.77, 2014, p. 1955-1964. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6587-8

MAO, C., HUANG, Y., ZHOU, X., GAN, H., ZHANG, J., ZHOU, Z. The tribological properties of nanofluid used in minimum quantity lubrication grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.71, 2014, p. 1221-1228. https://doi.org/10.1007/s00170-013-5576-7

MAO, C., TANG, X., ZOU, H., HUANG, X., ZHOU, Z. Investigation of Grinding Characteristic using Nanofluid Minimum Quantity Lubrication. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v.13, 2012, p. 1745-1752. https://doi.org/10.1007/s12541-012-0229-6

MAO, C., ZHANG, J., HUANG, Y., ZOU, H., HUANG, X., ZHOU, Z. Investigation on the Effect of Nanofluid Parameters on MQL Grinding. Materials and Manufacturing Processes, v.28, 2013, p. 436-442. https://doi.org/10.1080/10426914.2013.763970

MAO, C., ZOU, H., HUANG, X., ZHANG, J., ZHOU, Z. The influence of spraying parameters on grinding performance for nanofluid minimum quantity lubrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.64, 2012, p. 1791-1799. https://doi.org/10.1007/s00170-012-4143-y

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W.B., INASAKI, I. Handbook of machining with grinding wheels. CRC Press, 2016. 723p.

MARINESCU, I. D., HITCHINER, M., UHLMANN, E., ROWE, W.B., INASAKI, I. Handbook of machining with grinding wheels. Nova Iorque : CRC Press, 2007. 596p. https://doi.org/10.1201/9781420017649

MARINESCU, I. D., ROWE, W.B., DIMITROV, B., INASAKI, I. Tribology of abrasive machining processes. 1.ed. Norwich, William Andrew Inc, 2004. https://doi.org/10.1016/B978-081551490-9.50002-5

MELLO, H. J., MELLO, D. R., RODRIGUEZ, R. L., LOPES, J. C., SILVA, 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 médium grit wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.95, 2018, p. 4049-4057. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1552-y

MOLAIE, M. M., ZAHEDI, A., AKBARI, J. Effect of Water-Based Nanolubricants in Ultrasonic Vibration Assisted Grinding. Journal of Manufacturing and Materials Processing, 2018. https://doi.org/10.3390/jmmp2040080

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

NALDONY, K., WOJTEWICZ, M., SIENICKI, W., HERMAN, D. An analysis of centrifugal MQL supply system potential in the internal cylindrical grinding process. Archives of Civil and Mechanical Engineering, v.15, 2015, p. 639-649. https://doi.org/10.1016/j.acme.2014.08.009

NATHAN, R. D., VIJAYARAGHAVAN, L., KRISHNAMURTHY, R. In-process monitoring of grinding burn in the cylindrical grinding of steel. Journal of Materials Processing Technology, v.91, 1999, p. 37-42. https://doi.org/10.1016/S0924-0136(98)00408-7

NESLUŠAN, M., ČIŽEK, J., KOLAŘIK, K., MINÁRIK, P., ČILLIKOVÁ, M., MELIKHOVA, O. Monitoring of grinding burn via Barkhausen noise emission in case-hardened steel in large-bearing production. Journal of Materials Processing Technology, v.240, 2017, p. 104-117. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.015

NI, J., YANG, Y., WU, C. Assessment of water-based fluids with additives in grinding disc cutting process. Journal of Cleaner Production, v.212, 2018, p. 593-601. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.12.066

OLIVEIRA, D. J. Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos. 2011. 97p. Dissertação de mestrado, Universidade Estadual Paulista, Bauru-SP.

OLIVEIRA, D. J., GUERMANDI, L. G., BIANCHI, E. C., DINIZ, A. E., AGUIAR, P. R., CANARIM, R. C. Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using

compressed air wheel cleaning. Journal of Materials Processing Technology, v.212, 2012, p. 2559-2568. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2012.05.019

OLIVEIRA, D., SILVA, R. B., ARENCÍBIA, R. V. Avaliação do desvio dimensional em Inconel 718 após a retificação em diferentes técnicas de lubri-refrigeração. Matéria (Rio de Janeiro), v.24, 2019. https://doi.org/10.1590/s1517-707620190004.0806

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

PATEL, D. K., GOYAL, D., PABLA, B. S. Optimization of parameters in cylindrical and surface grinding for improved surface finish. Royal Society Open Science, 2018.

PATEL, J., MAHAJAN, M. D. Economic Analysis of Grinding Wheel: A Case Study. Industrial Engineering Journal, v.11, 2018. https://doi.org/10.26488/IEJ.11.11.1149

PAUL, S., GHOSH, A. An experimental evaluation of solid lubricant based nanofluids in small quantity cooling and lubrication during grinding. 5th International Conference on Material Science & Engineering Technology, 2016. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.890.98

PRABHU, S., UMA, M., VINAYAGAM, B. K. Surface roughness prediction using Taguchi-fuzzy logic-neural network analysis for CNT nanofluids based grinding process. Neural Computing and Applications, v. 26, 2014, p. 41-55. https://doi.org/10.1007/s00521-014-1696-8

RABIEI, F., RAHIMI, A. R., HADAD, M. J. Performance improvement of eco-friendly MQL technique by using hybrid nanofluid and ultrasonic-assisted grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.93, 2017, p. 1001-1015. https://doi.org/10.1007/s00170-017-0521-9

RESENDE, P. V. S. Análise da integridade da superfície e do desvio dimensional de aço rolamento pela técnica da impedância eletromecânica após retificação ciíndrica de mergulho. 2021. 114f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RODRIGUEZ, R. L., HILDEBRANDT, R. A., LOPES, J. C., MELLO, H. J., SILVA, R. B., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Application viability evaluation of the Minimum Quantity Lubrication coolant technique under different flow rates in Plunge Cylindrical Grinding of the ABNT 4340 steel with aluminum oxide wheel. Mechanic and Energy, 2017. https://doi.org/10.1590/0370-44672016700195

RODRIGUEZ, R. L., LOPES, J. C., HILDEBRANDT, R. A., PEREZ, R. R. V., DINIZ, A. E., SANCHEZ, L. E. A, RODRIGUES, A. R., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Evaluation of grinding process using simultaneously MQL technique and cleaning jet on grinding wheel surface. Journal of Materials Processing Technology, v.271, 2019, p. 357-367. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2019.03.019

ROWE, W. B. Modern Grinding Techniques. Scrivener Publishing LLC, 2009. https://doi.org/10.1002/9780470882313

ROWE, W. B. Principles of Modern Grinding Technology. 2ª ed. Elsevier Inc., 2014. 444p. https://doi.org/10.1016/B978-0-323-24271-4.00016-6

RUDRAPATI, R., PAL, P. K., BANDYOPADHYAY, A. Modeling and optimization of machining parameters in cylindrical grinding process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.82, 2015, p. 2167-2182. https://doi.org/10.1007/s00170-015-7500-9

RUZZI, R. S. Retificabilidade das ligas de níquel Inconel 625 e Inconel 718. 2019. 160f. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RUZZI, R. S., BELENTANI, R. M., MELLO, H. J., CANARIM, R. C., D'ADDONA, D. M., DINIZ, A. E., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. MQL with water in cylindrical plunge grinding of hardened steels using CBN wheels, with and without wheel cleaning by compressed air. The International Journal of Advanced Manufacturing and Technology, v.90, 2016, p. 329-338. https://doi.org/10.1007/s00170-016-9396-4

SAGLAM, H., UNSACAR, F., YALDIZ, S. An experimental investigation as to the effect of cutting parameters on roundness error and surface roughness in cylindrical grinding. International Journal of Production Research, v.43, 2005, p. 2309-2322. https://doi.org/10.1080/00207540412331330110

SATO, B. K., RODRIGUEZ, R. L., TALON, A. G., LOPES, J. C., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Grinding performance of AISI D6 steel using CBN wheel vitrified and resinoid bonded. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.105, 2019, p. 2167-2182. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04407-5

SATO, B. K., SALES, A. R., LOPES, J. C., SANCHEZ, L. E. A., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Influence of water in the MQL technique in the grinding of steel AISI 4340 using CBN wheels. Mechanic and Energy, 2018. https://doi.org/10.1590/0370-44672017710152

SETTI, D., SINHA, M. K., GHOSH, S., RAO, P. V. Performance evaluation of Ti-6Al-4V grinding using chip formation and coefficient of friction under the influence of nanofluids. International Journal of Machine Tools & Manufacture, v.88, 2014, p. 237-248. https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2014.10.005

SEYEDZAVVAR, M., SHABGARD, M., MOHAMMADPOURFARD, M. Investigation into the performance of eco-friendly graphite nanofluid as lubricant in MQL grinding. Journal of Machining Science and Technology, 2019, p. 569-594. https://doi.org/10.1080/10910344.2019.1575403

SHABGARD, M., SEYEDZAVVAR, M., MOHAMMADPOURFARD, M., MAHBOUBKHAH, M. Finite different simulation and experimental investigation: effects of physical synergetic properties of nanoparticles on temperature distribution and surface integrity of workpiece in nanofluid MQL grinding process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.95, 2017, p. 2661-2679. https://doi.org/10.1007/s00170-017-1237-6

SHAW, M. C. Principles of Abrasive Processing. Clarendon Press•Oxford, 1996. 610p.

SHI, X., XIU, S. Study on the hardness model of grinding for structural steel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.106, 2020, p. 3563-3573. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04787-8

SILVA, L. R., COUTO, D. A., SANTO, F. V., DUARTE, F. J., MAZZARO, R. S., VELOSO, G. V. Evaluation of machined surface of the hardened AISI 4340 steel through roughness and residual stress parameters in turning and grinding. The International

Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.107, 2020, p. 791-803. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05046-x

SILVA, L. R., CORRÊA, E. C. S., BRANDÃO, J. R., ÁVILA, R. F. Environmentally friendly manufacturing: Behavior analysis of minimum quantity of lubricant - MQL in grinding process. Journal of Cleaner Production, v.256, 2013. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.033

SILVA, L. R., SILVA, D. A., SANTOS, F. V., DUARTE, F. J. Study of 3D parameters and residual stress in grinding of AISI 4340 steel hardened using diferente cutting fluids. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.100, 2018, p. 895-905. https://doi.org/10.1007/s00170-018-2763-6

SILVA, R. B. Grandezas e parâmetros de corte em retificação. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia - MG, 2016. 45p. Notas de aula.

SINGH, K., KUMAR, P., GOYAL, K. To Study the Effect of Input Parameters on Surface Roughness of Cylindrical Grinding of Heat Treated AISI 4140 Steel. American Journal of Mechanical Engineering, v.2, 2014, p. 58-64. https://doi.org/10.12691/ajme-2-3-2

SINGH, H., SHARMA, V. S., DOGRA, M. Exploration of graphene assisted vegetables oil based minimum quantity lubrication for surface grinding of TI-6AL-4V-ELI. Tribology International, v.144, 2019. https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.106113

SOUZA, A. J. Processos de fabricação por usinagem. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre - RS, 2016. 285p. Apostila.

SOUZA, C. N., CATAI, R. E., AGUIAR, P. R., SALGADO, M. H., BIANCHI, E. C. Analysis of diametrical wear of grinding wheel and roundness errors in the machining of steel VC 131. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, v.26, 2004. https://doi.org/10.1590/S1678-58782004000200013

SRIDHARAN, U., MALKIN, S. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) with nanofluids on grinding behavior and thermal distortion. Trans NAMRI/SME, v.37, 2009, p. 629-636.

TALON, A. G., LOPES, J. C., TAVARES, A. B., SATO, B. K., RODRIGUES, A. R., GENOVEZ, M. C., PINTO, T. A. D., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Effect of hardened steel grinding using aluminum oxide wheel under application of cutting fluid with corrosion inhibitors. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.104, 2019, p. 1437-1448. https://doi.org/10.1007/s00170-019-04005-5

TALON, A. G., LOPES, J. C., SATO, B. K., TAVARES, A. B., RIBEIRO, F. S. F., GENOVEZ, M. C., PINTO, T. A. D., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Grinding performance of hardened steel: a study about the application of different cutting fluids with corrosion inhibitor. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.108, 2020, p. 2741-2754. https://doi.org/10.1007/s00170-020-05598-y

THANEDAR, A., DONGRE, G. G., JOSHI, S. S. Analytical Modelling of Temperature in Cylindrical Grinding to Predict Grinding Burns. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, v.20, 2019, p. 13-25. https://doi.org/10.1007/s12541-019-00037-9

TUSAR, I. H. Investigations on surface grinding of hardened steels with pulse jet mql nanofluid under compressed air wheel cleaning. 2019. 93p. Dissertação de Mestrado, Bangladesh University of Engineering & Technology, Bangladesh.

UHLMANN, E., LYPOVKA, P., HOCHSCHILD, L., SCHRÖER, N. Influence of rail grinding process parameters on rail surface roughness and surface layer hardness. Wear, v.366-367, 2016, p. 287-293. https://doi.org/10.1016/j.wear.2016.03.023

VIRDI, R. L., CHATHA, S. S., SINGH, H. Experiment evaluation of grinding properties under Al_2O_3 nanofluids in minimum quantity lubrication. Materials Research Express, v.6, 2019. https://doi.org/10.1088/2053-1591/ab301f

VIRDI, R. L., CHATHA, S. S., SINGH, H. Performance Evaluation of Inconel 718 under vegetable oils based nanofluids using Minimum Quantity Lubrication Grinding. Materials Today: Proceedings, 2020. https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.09.056

WALKER, T. The mql handbook - a guide to machining with minimum quantity lubrication. [s.l.] Unist Inc, 2013.

WANG, S., LI, C., ZHANG, D., JIA, D., ZHANG, Y. Modeling the operation of a commom grinding wheel with nanoparticle jet flow minimal quantity lubrication. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.74, 2014, p. 835-850. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6032-z

WANG, Y., LI, C., ZHANG, Y., YANG, M., LI, B., DONG, L., WANG, J. Processing Characteristics of Vegetable Oil-based Nanofluid MQL for Grinding Different Workpiece Materials. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, v.5, 2018, p. 327-339. https://doi.org/10.1007/s40684-018-0035-4

WANG, Y., LI, C., ZHANG, Y., YANG, M., LI, B., JIA, D., HOU, Y., MAO, C. Experimental evaluation of the lubrication properties of the wheel/workpiece interface in MQL grinding using different types of vegetable oils. Journal of Cleaner Production, v.127, 2016, p. 487-499. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.03.121

WEBSTER, J., TRICARD, M. Innovations in Abrasive Products for Precision Grinding. CIRP Annals, v.53, 2004, p. 597-617. https://doi.org/10.1016/S0007-8506(07)60031-6

WEGENER, K., HOFFMEISTER, H. W., KARPUSCHEWSKI, B., KUSTER, F., HAHMANN, W. C., RABIEY, M. Conditioning and monitoring of grinding wheels. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v.60, 2011, p. 757-777. https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.003

WINTER, M. Eco-efficiency of Grinding Processes and Systems. Springer, 2013. 248p.

YAO, C. F., WANG, T., REN, J. X., XIAO, W. A comparative study of residual stress and affected layer in Aermet100 steel grinding with alumina and cBN wheels. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.74, 2014, p. 125-137. https://doi.org/10.1007/s00170-014-5955-8

ZHANG, D., LI, C., JIA, D., ZHANG Y., ZHANG, X. Specific grinding energy and surface roughness of nanoparticle jet minimum quantity lubrication in grinding. Chinese Journal of Aeronautics, v.28, 2015, p. 570-581. https://doi.org/10.1016/j.cja.2014.12.035

ZHANG, D., LI, C., ZHANG, Y., JIA, D., ZHANG, X. Experimental research on the energy ratio coefficient and specific grinding energy in nanoparticle jet MQL grinding. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.78, 2015, p. 1275-1288. https://doi.org/10.1007/s00170-014-6722-6

ZHANG, H. X., CHEN, W. Y., FU, X. Z., HUANG, L. X. Grinding characteristics and Mechanism of Ceramic Alumina Wheels on Aeronautical Alloys. Advanced Materials Research, v.591-593, 2012, p. 373-376. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.591-593.373

ZHOU, N., PENG, R. L., PETTERSSON, R. Surface integrity of 2304 duplex stainless steel after different grinding operations. Journal of Materials Processing Technology, v.229, 2015, p. 294-304. https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.09.031