

BRUNO SOUZA ABRÃO

**RETIFICAÇÃO PLANA DO AÇO SAE 52100 COM
FLUIDO DE CORTE CONTENDO GRAFENO
APLICADO PELA TÉCNICA MQL**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2018

BRUNO SOUZA ABRÃO

**RETIFICAÇÃO PLANA DO AÇO SAE 52100 COM FLUIDO DE CORTE
CONTENDO GRAFENO APLICADO PELA TÉCNICA MQL**

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

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva

UBERLÂNDIA – MG

2018

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

A163r
2018 Abrão, Bruno Souza, 1994-
Retificação plana do aço SAE 52100 com fluido de corte contendo grafeno aplicado pela técnica MQL [recurso eletrônico] / Bruno Souza Abrão. - 2018.

Orientador: Rosemar Batista da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2019.30>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

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

CDU: 621

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

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

**ATA****ATA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO****NÚMERO DE ORDEM: 517****DATA: 16/08/2018**

Às oito horas do dia dezesseis de agosto de dois mil e dezoito, no Anfiteatro A do Bloco 50, Campus Santa Mônica, reuniu-se a Banca Examinadora composta pelos Professores Dr. Rosemar Batista da Silva (orientador) e, Dr. Márcio Bacci da Silva da Universidade Federal de Uberlândia e, Dr. Leonardo Roberto da Silva do Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais para, sob a presidência do primeiro, desenvolver o processo de avaliação da dissertação intitulada **“Retificação Plana do Aço SAE 52100 com Fluido de Corte Contendo Grafeno Aplicado pela Técnica MQL”**, apresentada pelo aluno **BRUNO SOUZA ABRÃO**, matrícula número **11622EMC004**, em complementação aos requisitos determinados pelo Regimento do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção do título de Mestre. Após discorrer sobre seu trabalho, o candidato foi arguido pelos membros da Banca, em sessão privada. Em seguida, a dissertação foi avaliada pelos membros da Banca que, ao encerrar o processo, consideraram-na:

() Aprovada

(x) Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação do orientador.

() Aprovada com modificações a serem submetidas para a aprovação da banca.

() Reprovada

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

Membros:

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

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva - UFU

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva - CEFET-MG

Uberlândia, 16 de agosto de 2018



Documento assinado eletronicamente por **Rosemar Batista da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/08/2018, às 11:24, 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 **Marcio Bacci da Silva, Professor(a) do Magistério Superior**, em 16/08/2018, às 11:28, 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 **Leonardo Roberto da Silva, Usuário Externo**, em 16/08/2018, às 11:40, 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 **0644147** e o código CRC **FCBB2D6D**.

Referência: Processo nº 23117.055954/2018-85

SEI nº 0644147

DEDICATÓRIA

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

AGRADECIMENTOS

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

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

À CAPES pela concessão da bolsa de mestrado 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 mestranda Mayara Fernanda Pereira pela grande amizade e por sempre estar presente e disposta a ajudar com dedicação durante as diversas etapas de desenvolvimento deste trabalho.

Ao doutorando Antônio Vitor de Mello por ter ajudado em toda a etapa de realização dos ensaios experimentais, sempre com muita paciência, dedicação e amizade.

Ao doutorando Leonardo Rosa Ribeiro da Silva pelo auxílio nas etapas seguintes aos ensaios sempre com muita disposição, dedicação e amizade.

Ao doutorando e Prof. Raphael Lima de Paiva, que mesmo à distância, sempre se mostrou disposto a ajudar em todas as dúvidas que surgiram durante a realização desta pesquisa.

A todos os professores, técnicos e alunos do LEPU e LUC pela amizade e contribuição ao longo do desenvolvimento do trabalho, principalmente aos doutorandos Henrique Butzlaff Hübner, Leandro Carvalho e Rodrigo de Souza Ruzzi.

A empresa Saint-Gobain Abrasives da América do Sul e Winter pelo fornecimento dos rebolos e dressadores, respectivamente, utilizados nos ensaios.

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

ABRÃO, B. S. **Retificação plana do aço SAE 52100 com fluido de corte contendo grafeno aplicado pela técnica MQL**. 2018. 129 p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

RESUMO

Devido às questões ambientais, sociais e econômicas, pesquisas têm sido desenvolvidas para encontrar técnicas alternativas à convencional (em que o fluido de corte é utilizado em elevadas vazões), principalmente visando a redução do volume de fluido de corte, sem prejudicar o processo de retificação e sem comprometer a qualidade da peça. Dentre estas alternativas, a adição de partículas sólidas ao fluido de corte combinadas com a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL), principalmente como o grafeno multicamadas, por exemplo, tem se mostrado promissora em processos de retificação. A presença destas partículas tem contribuído para a melhoria das propriedades do fluido, por exemplo, a condutividade térmica foi elevada, potencializando seu efeito refrigerante e sendo uma opção para aumentar a eficiência da técnica MQL. Neste sentido, o presente trabalho visa avaliar a viabilidade da utilização de partículas de grafeno multicamadas adicionadas ao fluido de corte no processo de retificação plana tangencial do aço SAE 52100 endurecido com rebolo de óxido de alumínio sob diferentes condições de corte e observar o desempenho na redução dos danos térmicos. Foram testadas também as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL tradicional (sem grafeno) para permitir comparações. Os parâmetros de corte testados foram: granulometria do rebolo (granos mesh 46 e 60), penetração de trabalho (10 μm e 30 μm) e velocidade da peça (3 m/min e 7 m/min). Como variáveis de saída, foram investigados os parâmetros de rugosidade (R_a e R_z) e microdureza das peças, potência do processo, além da textura e qualidade das superfícies retificadas. No geral, os resultados mostraram que a presença do grafeno foi responsável pelos menores valores de rugosidade, menor variação de microdureza e potência, além de gerar as superfícies com melhor textura. Quanto aos parâmetros de corte, as variáveis rugosidade e potência do processo aumentaram com a penetração de trabalho e velocidade da peça, enquanto que a menor velocidade da peça de 3 m/min e penetração de trabalho de 30 μm resultaram nas maiores quedas de microdureza abaixo da superfície.

Palavras-chave: *retificação; aço SAE 52100; MQL; grafeno multicamadas; integridade superficial.*

ABRÃO, B. S. **Peripheral surface grinding of SAE 52100 steel with cutting fluid containing graphene applied by the MQL technique.** 2018. 129 p. Master's Dissertation, Federal University of Uberlândia, Uberlândia – MG.

ABSTRACT

Due to environmental, social and economic issues, research has been developed to find alternatives to conventional technique (where the cutting fluid is used at high flow rates), mainly to reduce the volume of cutting fluid without harming the grinding process and compromising the quality of the workpiece. Among these alternatives, the addition of solid particles to the cutting fluid combined with the minimum quantity of lubricant (MQL), especially as graphene platelets, for example, has been shown to be promising in grinding processes. The presence of these particles has contributed to the improvement of fluid properties, for example, the thermal conductivity was raised, potentiating its cooling effect and being an option to increase the efficiency of the MQL technique. In this context, the current work aims to verify the efficiency of the multilayer graphene platelets dispersed in cutting fluid in peripheral surface grinding of SAE 52100 steel with aluminum oxide grinding wheel under different cutting conditions. In addition to the different cooling-lubrication conditions tested (conventional, MQL (without graphene) and MQL + Graphene), grit size of grinding wheel (mesh 46 and 60), radial depth of cut (10 μm and 30 μm) and workpiece speed (3 m/min and 7 m/min) were varied. The output parameters monitored were: surface roughness parameters (R_a and R_z) and microhardness of the workpiece, as well as power grinding and texture/quality of the ground surfaces. The results showed that the presence of graphene generated the lowest values of roughness, the least variation in microhardness as well as the lowest power consumed in the process. This condition was also responsible for the best quality of the machined surfaces. Also, roughness and grinding power increased with the radial depth of cut and workpiece speed, whereas the highest drop in microhardness below the machined surface was observed after machining with the lowest workpiece speed of 3 m/min and radial depth of cut of 30 μm .

Keywords: *grinding; SAE 52100 steel; MQL; multilayer graphene platelets; surface integrity.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Elementos básicos do processo de retificação plana tangencial: a) sistema rebolo-peça, b) ampliação da zona de retificação de a) relação geométrica das principais grandezas físicas do processo (Fonte: próprio autor).....	6
Figura 2.2 - Esquema da formação de tensões de compressão e de tração pelo grão abrasivo durante a retificação (adaptado de MARINESCU et al., 2004).	8
Figura 2.3 - Comparação da formação de cavaco entre ferramentas com geometria definida (a) e ferramentas com ângulos não definidos (b) (adaptado de NEUGEBAUER et al., 2011).....	9
Figura 2.4 - Remoção de material durante a usinagem de: a) material dúctil; b) material frágil (adaptado de MARINESCU et al., 2007).....	10
Figura 2.5 - Forma de especificação de rebolos (adaptado de SOUZA, 2007).....	11
Figura 2.6 - Dureza dos abrasivos em função da variação da temperatura (adaptado TELLE, 2000).....	17
Figura 2.7 - a) Esquema da operação de dressagem com ferramenta de ponta única de diamante (adaptado de ROWE, 2014), b) dressador de ponta única (WINTER ABRASIVOS, 2018).....	21
Figura 2.8 – a) Dressador do tipo fliesen; b) Posicionamento do dressador (DIMAS, 2017). ..	22
Figura 2.9 - Distribuição do fluxo de calor durante o processo de retificação (adaptado de KOENIG e KLOCKE, 1996 apud MARINESCU, 2007).....	28
Figura 2.10 - Queima visível a olho nu em aço SAE 52100 após a retificação plana sem fluido de corte e com $V_w = 2,9$ m/min e $a_e = 30$ μ m (PAIVA, 2016).....	29
Figura 2.11 - Microestrutura do aço AISI 52100 com presença de martensita após a retificação com $V_w = 18$ m/min, $a_e = 20$ μ m e $V_s = 40$ m/s (MAO et al., 2011).	30
Figura 2.12 - Requisitos necessários para o fluido de corte em usinagem (adaptado de KLOCKE, 2009).....	32
Figura 2.13 - Classificação e composição dos fluidos de corte (adaptado de BRÜCHER, 1996 apud MARINESCU, 2007).	33
Figura 2.14 - Rugosidade do aço SAE 52100 após retificação de mergulho com rebolo de Al_2O_3 (89A60I11V217) (adaptado de TAWAKOLI et al., 2011).....	35
Figura 2.15 - Força normal de retificação do aço SAE 52100 utilizando rebolo de Al_2O_3 (89A60I11V217) (adaptado de TAWAKOLI et al., 2011).....	36

Figura 2.16 - Aumento máximo da temperatura em relação à profundidade z na retificação de mergulho com: a) rebolo de Al_2O_3 ; b) rebolo de CBN (adaptado de HADAD et al., 2011)...	37
Figura 2.17 - Resultados de temperatura da peça sob diferentes condições de lubri-refrigeração (adaptado de ZHANG et al., 2016).	41
Figura 2.18 – Esquema do perfil da rugosidade (adaptado de ASM HANDBOOK, 2004).	45
Figura 2.19 - Textura superficial do aço 100Cr6 sob diferentes condições de lubri-refrigeração e de corte (adaptado de TAWAKOLI et al., 2009).	46
Figura 3.1 - Fluxograma com as principais informações referentes aos ensaios experimentais.	48
Figura 3.2 - Microestrutura do aço SAE 52100.	50
Figura 3.3 - Retificadora plana tangencial Mello.	51
Figura 3.4 - Foto do sistema utilizado para medição das dimensões do raio de ponta do dressador, onde: a) montagem e posicionamento do dressador na base do estéreo microscópio; b) imagem da ponta do dressador; c) ampliação da ponta de diamante.	53
Figura 3.5 - Posicionamento da peça de aço SAE 52100 em uma morsa de precisão sobre a mesa magnética da máquina-ferramenta.	54
Figura 3.6 - a) Montagem do sistema para aplicação de fluido com e sem grafeno via a técnica MQL, b) detalhes do bocal para a técnica MQL (adaptado de Mello, 2015).	56
Figura 3.7 – Sistema de controle de vazão de MQL.	57
Figura 3.8 - Montagem da peça e posicionamento do rugosímetro para a medição de rugosidade.	58
Figura 3.9 - a) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) utilizado para obtenção das imagens das superfícies; b) fixação e posicionamento da peça na morsa de precisão miniaturizada.	59
Figura 3.10 - Desenho esquemático mostrando as etapas de medição de microdureza (unidades em μm).	61
Figura 4.1 - Rugosidade média (R_a) em função da granulometria do rebolo abrasivo, penetração de trabalho (a_e) e velocidade da peça (V_w) para diferentes condições de lubri-refrigeração.	64
Figura 4.2 - Rugosidade R_z em função da granulometria do rebolo abrasivo, penetração de trabalho (a_e) e velocidade da peça (V_w) para diferentes condições de lubri-refrigeração.	65

Figura 4.3 - Efeito das variáveis de entrada sobre os parâmetros de rugosidade: a) a_e em R_a ; b) V_w em R_a ; c) grana do rebolo em R_a ; d) condição de lubri-refrigeração em R_a ; e) a_e em R_z ; f) V_w em R_z ; g) grana do rebolo em R_z ; h) condição de lubri-refrigeração em R_z	70
Figura 4.4 - Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço SAE 52100 após processo de retificação via a condição convencional com rebolo de óxido de alumínio grana mesh: a) 46; b) 60.	76
Figura 4.5 - Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço SAE 52100 após processo de retificação via a condição MQL com rebolo de óxido de alumínio grana mesh: a) 46; b) 60.	79
Figura 4.6 - Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço SAE 52100 após processo de retificação via a condição MQL+Grafeno com rebolo de óxido de alumínio grana mesh: a) 46; b) 60.	80
Figura 4.7 - Perfis de microdureza para os ensaios empregando rebolo de grana mesh 46, penetração de trabalho de 30 μm e velocidade da peça de 3 m/min para todas as condições de lubri-refrigeração.	82
Figura 4.8 - Efeito das variáveis de entrada sobre os valores de microdureza: a) a_e ; b) V_w ; c) grana do rebolo; d) condição de lubri-refrigeração.	83
Figura 4.9 - Imagens de MEV das superfícies de aço SAE 52100 endurecido obtidas após a retificação plana com diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração.	86
Figura 4.10 - Eventos identificados sobre as superfícies usinadas sob diferentes condições de lubri-refrigeração e de corte: a) e b) - condição convencional empregando rebolo de grana mesh 60 com $a_e=10\ \mu\text{m}$ e $V_w=7\ \text{m/min}$; c), d), e) e f) - condição convencional empregando rebolo de grana mesh 60 com $a_e=30\ \mu\text{m}$ e $V_w=3\ \text{m/min}$; g) - condição MQL empregando rebolo de grana mesh 46 com $a_e=10\ \mu\text{m}$ e $V_w=7\ \text{m/min}$; h) - condição convencional empregando rebolo de grana mesh 46 com $a_e=30\ \mu\text{m}$ e $V_w=7\ \text{m/min}$	89
Figura 4.11 - Resultado da análise (EDS) de material sobre a superfície da peça evidenciando a presença de partículas grafeno após a retificação.	90
Figura 4.12 - Valores de potência elétrica obtidos durante os ensaios realizados com fluido de corte aplicado via a condição convencional empregando rebolo de óxido de alumínio de grana mesh: a) 46; b) 60.	91
Figura 4.13 - Valores de potência elétrica obtidos durante os ensaios realizados com fluido de corte (apenas óleo - sem água) aplicado via a condição MQL empregando rebolo de óxido de alumínio de grana mesh: a) 46; b) 60.....	92

Figura 4.14 - Valores de potência elétrica obtidos durante os ensaios realizados com fluido de corte contendo partículas de grafeno multicamadas aplicado via a condição MQL empregando rebolo de óxido de alumínio de grana mesh: a) 46; b) 60.	93
Figura 4.15 - Picos de potência obtidos para cada ensaio realizado.	95
Figura 4.16 - Efeito das variáveis de entrada sobre os valores de potência: a) a_e ; b) V_w ; c) grana do rebolo; d) condição de lubri-refrigeração.	97

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tipos de especificação dos tamanhos de grãos abrasivos conforme segundo a FEPA e a ANSI (adaptado de ROWE, 2014).....	12
Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas dos principais tipos de carбето de silício e óxido de alumínio (adaptado de ROWE, 2010).....	16
Tabela 2.3 - Propriedades térmicas dos abrasivos convencionais (adaptado de ROWE, 2010).	16
Tabela 2.4 - Principais métodos de identificação e controle de danos térmicos (Adaptado de NETO, 2013).	31
Tabela 2.5 - Principais parâmetros de rugosidade (Norma ISO 4287) (MACHADO et al., 2009).	44
Tabela 3.1 - Composição química do aço SAE 52100 obtida por meio de um Sistema de Energia Dispersiva (EDS).	49
Tabela 3.2 - Resumo dos parâmetros de corte empregados na realização dos ensaios.	52
Tabela 4.1 - Variação percentual dos parâmetros R_a e R_z ao aumentar a penetração de trabalho.....	68
Tabela 4.2 - Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z comparando as três condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL+Grafeno).69	
Tabela 4.3 - Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL.....	72
Tabela 4.4 - Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z comparando as condições de lubri-refrigeração MQL e MQL+Grafeno.....	73
Tabela 4.5 - Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL+Grafeno.....	74
Tabela 4.6 - Análise de variância (ANOVA) para a microdureza comparando as três condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL+Grafeno).....	82
Tabela 4.7 - Análise de variância (ANOVA) para o parâmetro microdureza comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL.....	84
Tabela 4.8 - Análise de variância (ANOVA) para o parâmetro microdureza comparando as condições de lubri-refrigeração MQL e MQL+Grafeno.....	84

Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) para o parâmetro microdureza comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL+Grafeno.	84
Tabela 4.10 - Análise de variância (ANOVA) para a potência de retificação comparando as três condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL+Grafeno).	97
Tabela 4.11 - Análise de variância (ANOVA) para a potência de retificação comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL.	98
Tabela 4.12 - Análise de variância (ANOVA) para a potência de retificação comparando as condições de lubri-refrigeração MQL e MQL+Grafeno.	98
Tabela 4.13 - Análise de variância (ANOVA) para a potência de retificação comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL+Grafeno.	98

LISTA DE ABREVIATÕES E SÍMBOLOS

α	Ângulo de arrasto
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
A_c (μm)	Área de contato rebolo/peça
a_d (μm)	Profundidade de dressagem
a_e (μm)	Penetração de trabalho
AISI	American Iron and Steel Institute
Al_2O_3	Óxido de alumínio
ANSI	American National Standards Institution
a_p (μm)	Profundidade de corte
b (μm)	Largura de retificação
b_d (μm)	Largura do dressador
CBN	Nitreto Cúbico de Boro
CIMM	Centro de Informação Metal Mecânica
CNTs (Carbon nanotubes)	Nanotubos de carbono
DIN	Deutsches Institut für Normung ou Instituto Alemão para Normatização
d_s (mm)	Diâmetro do rebolo
e_c (J/mm^3)	Energia específica de corte
EDS	Sistema de Energia Dispersiva
F_a (N)	Força axial ou lateral
FEPA	Federation of European Producers of Abrasives
F_n (N)	Força normal
F_t (N)	Força tangencial
h_{cu} (μm)	Espessura de cavaco não deformado
h_{eq} (μm)	Espessura equivalente de corte
ICTE	Instituto de Ciências Tecnológicas e Exatas
ISO	International Organization for Standardization

IT	Grau de Tolerância
LAPROSOLDA	Laboratório de Soldagem
l_c (μm)	Comprimento de contato rebolo-peça
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
LMD	Laboratório de Metrologia Dimensional
LUC	Laboratório de Usinagem Convencional
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
MoS_2	Bissulfeto de molibdênio
MQL	Mínima Quantidade de Lubrificante
MWCNTs (Multi-walled carbon nanotubes)	Nanotubos de carbono de paredes múltiplas
n_s (rpm)	Rotação do rebolo
P (W)	Potência de corte em retificação
Q_w (mm^3)	Taxa de remoção de material
R_a (μm)	Desvio aritmético médio do perfil avaliado
R_q (μm)	Desvio médio quadrático do perfil avaliado
R_z (μm)	Altura máxima do perfil
SAE	Society of Automotive Engineers
s_d (μm)	Passo de dressagem
SG	Seeded Gel (Gel de semente)
SiC	Carbeto de silício
SiO_2	Dióxido de silício
T_μ (μm)	Profundidade de corte crítica
TiO_2	Dióxido de titânio
U_d	Grau de recobrimento do rebolo
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V_s (m/s)	Velocidade de corte
V_w (m/min)	Velocidade da peça

Sumário

CAPÍTULO I	1
INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II	5
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 Processo de retificação	5
2.2 Rebolos: propriedades e aplicações	10
2.3 Grandezas físicas da retificação plana	22
2.4 Calor e temperatura durante o processo de retificação	27
2.5 Fluidos de corte na retificação	31
2.6 Técnicas de aplicação do fluido de corte	34
2.7 Partículas sólidas adicionadas em fluidos de corte para retificação	38
2.8 Integridade superficial de aço SAE 52100 após a retificação	43
CAPÍTULO III	48
METODOLOGIA	48
3.1 Material da peça	49
3.2 Máquina-ferramenta	50
3.3 Rebolos abrasivos	51
3.4 Parâmetros de corte e planejamento dos ensaios	51
3.5 Fluidos de corte e técnicas de aplicação	54
3.6 Variáveis de saída analisadas	57
CAPÍTULO IV	63
RESULTADOS E DISCUSSÃO	63
4.1 Rugosidade	63
4.2 Microdureza abaixo da superfície	75
4.3 Imagens das superfícies de aço SAE 52100 obtidas via MEV	85
4.4 Potência de corte	91
CAPÍTULO V	99
CONCLUSÕES	99
Sugestões para trabalhos futuros	101
Referências Bibliográficas	102

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Geralmente, o emprego dos processos de retificação ocorre no fim da cadeia produtiva com o intuito de conferir elevada qualidade superficial, aumentar a resistência à fadiga e gerar tensões residuais de compressão ou neutras ao componente usinado. Entretanto, devido às características peculiares, o processo de retificação exige uma atenção maior no sentido de identificar condições de corte que aliem produtividade sem prejuízo do processo, já que muitos materiais durante a usinagem podem ter sua integridade da superfície afetada por causa de parâmetros de corte, por exemplo, penetração de trabalho e velocidade da peça, que não são adequadamente ajustados. Em geral, o aumento na penetração de trabalho e/ou na profundidade de corte implica em maior área de contato dos abrasivos com a peça, aumentando a geração de calor, e consequentemente, a temperatura na região de corte. E dependendo das propriedades da peça, este calor gerado poderá levar a alterações metalúrgicas, trincas, queima de retífica e tensões residuais de tração, e vir a comprometer a funcionalidade da peça (MARINESCU et al., 2004). Para muitos autores estes problemas gerados durante a retificação são conhecidos como danos térmicos.

Estes danos térmicos estão relacionados à energia específica do processo. Nos processos de retificação é empregada elevada quantidade de energia para a remoção de uma pequena porção de material. A maior parte desta energia é transformada em calor na zona de corte que é distribuído entre os elementos do sistema. A maior parte do calor, que pode variar até 85%, dependendo da combinação entre o tipo do abrasivo, peça, fluido e da técnica de aplicação de fluido de corte, como também das condições de corte empregadas, é direcionada para a peça, podendo ocasionar diversos danos térmicos, comprometendo a integridade superficial (MALKIN, 1989; BRINKSMEIER et al., 2004 apud NETO, 2013). Além disso, as

elevadas temperaturas desenvolvidas no processo podem resultar em aumento dos desvios dimensionais e geométricos, contribuindo também para a produção de componente fora das tolerâncias permitidas e, conseqüentemente, em prejuízos financeiros.

Os fluidos de corte possuem como principais funções a refrigeração (retirar o calor formado na zona de corte) e a lubrificação que auxilia na redução do coeficiente de atrito entre os grãos abrasivos e a peça (MARINESCU et al., 2004). Outra função deles é atuar na remoção dos cavacos gerados na zona de corte, o que os torna praticamente indispensável em processos de retificação. E quanto a sua forma de aplicação, a mais comum é a condição de lubri-refrigeração convencional, em que o fluido é aplicado em abundância, por exemplo, durante a retificação de componentes de rolamentos que são fabricados em aço SAE 52100. Este material é muito susceptível a queima de retifica e, quando isto ocorre, a peça é descartada, gerando prejuízos. A importância dos rolamentos para o setor automobilístico é grande. Nos dias atuais são montados cerca de dez mil automóveis diariamente no Brasil (ANFAVEA, 2018); e em cada automóvel há cerca de pelo menos 10 rolamentos.

Por outro lado, a utilização dos fluidos de corte traz alguns desafios econômicos, ambientais e sociais. Atualmente, a técnica mais comumente empregada nas empresas do setor de usinagem é a convencional, ou ainda conhecida como abundância, na qual são utilizadas grandes vazões de fluido que variam de 4 L/min a 300 L/min (240 L/h a 1 800 L/h). E um dos principais desafios para os usuários desta técnica estão relacionados com a manutenção no dia-a-dia, tratamento e descarte destes fluidos após o uso. A maioria dos fluidos de corte é composta por diversas substâncias químicas e tóxicas que, além de causar impactos negativos ao ambiente, podem contaminar os operadores do processo, ocasionando problemas de saúde, principalmente respiratórios. Mesmo que um fluido seja considerado biodegradável, durante a sua utilização ele estará em contato com a tubulação e outras partes da máquina, com outros resíduos que se acumulam no tanque da máquina, e assim se contaminar (KATNA et al., 2017). Além disso, a aplicação de elevadas vazões de fluido contribui para o aumento dos custos com o processo, por exemplo, com manutenção das bombas e filtros e energia elétrica necessária para o bombeamento. Sendo assim, diversas pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de reduzir o volume de fluidos de corte no processo de retificação, por ser um dos processos que demandam o maior volume em relação ao torneamento e fresamento, por exemplo, e assim reduzir os impactos ambientais e para a saúde do operador.

Como alternativa a condição de lubri-refrigeração convencional tem-se a mínima quantidade de lubrificante (MQL) que vem sendo empregada em processos de usinagem desde meados da década de 1990. Nesta técnica, o volume de fluido de corte é extremamente baixo comparado à convencional, em geral inferior a 250 mL/h que é conduzido a zona de corte por um fluxo de ar comprimido (WALKER, 2013). Diversas pesquisas desenvolvidas, como Tawakoli et al. (2011), mostraram as vantagens da mínima quantidade de lubrificante no que diz respeito à sua propriedade de lubrificação que sobrepõe a refrigeração. Porém, a técnica MQL não tem se mostrado tão eficiente em relação à refrigeração, conforme demonstrado por Hadad et al. (2011) e Hadad e Sadeghi (2012). Neste sentido, vários trabalhos na literatura têm relatado melhorias nas propriedades de fluidos de corte convencionais, por exemplo, o aumento da condutividade térmica que aumenta a eficiência na refrigeração, pela adição de partículas sólidas que são dispersas neles, tais como grafite, grafeno e nanotubos de carbono, dentre outros (Zhang et al., 2016; Shokoohi e Shekarian, 2015). Mello (2015) avaliou o comportamento de partículas de grafeno adicionadas ao fluido de corte aplicado via a técnica MQL na retificação da liga de titânio, Ti-6Al-4V, em diversas condições de corte. O autor relatou que a presença de grafeno influenciou positivamente no acabamento da peça, gerou menor variação dos valores de microdureza abaixo da superfície e exigiu menor potência elétrica comparado às outras condições de lubri-refrigeração testadas (convencional e MQL sem grafeno). Oliveira (2017) também analisou a influência de partículas de grafeno (concentrações em peso de 0,05% e 0,10%) dispersas ao fluido de corte de base vegetal na retificação do Inconel 718 com rebolo de carbetto de silício e, semelhante ao alcançado por Mello (2015), a autora constatou a melhor eficiência destas partículas em termos de rugosidade, microdureza e potência. E foi com base nos resultados obtidos por Mello (2015) e Oliveira (2017) que surgiu a motivação para testar o grafeno multicamadas na retificação plana de aço endurecido, já que até o momento de escrita deste trabalho, não havia trabalhos com o uso de grafeno com foco em retificação de aço.

Neste contexto, o presente trabalho visa avaliar a viabilidade da utilização de partículas de grafeno multicamadas adicionadas ao fluido de corte no processo de retificação plana tangencial do aço SAE 52100 com rebolo de óxido de alumínio sob diferentes condições de corte, principalmente para eliminar e/ou reduzir a ocorrência de danos térmicos. Além disso, os objetivos específicos são verificar a influência dos parâmetros de corte na integridade superficial do componente retificado. Conforme já citado, o aço SAE 52100 é bastante

empregado no setor automobilístico e susceptível a queima de retífica. Sendo assim, esta pesquisa visa contribuir para a futura implementação destas partículas em escala industrial.

Esta dissertação de mestrado está dividida em seis capítulos:

- Capítulo I: breve introdução com o objetivo de contextualizar acerca do tema estudado nesta pesquisa e apresentar o objetivo central do projeto;
- Capítulo II: abrange uma explicação dos principais assuntos relevantes para o desenvolvimento deste trabalho, sendo estes o processo de retificação, rebolos abrasivos, grandezas físicas do processo, calor e temperatura durante a retificação, fluidos de corte e técnicas de aplicação, partículas sólidas adicionadas ao fluido de corte, e qualidade e integridade superficial de componentes retificados, além de expor as principais pesquisas elaboradas por outros autores, mas que apresentam semelhança com este estudo;
- Capítulo III: apresenta de maneira detalhada toda a metodologia adotada, incluindo os equipamentos, material da peça, ferramenta, características do fluido e preparação do grafeno. Além disso, são apresentados os parâmetros de corte empregados, bem como os instrumentos de medição e procedimento utilizado para obtenção das variáveis de saída analisadas;
- Capítulo IV: neste capítulo são apresentados os resultados obtidos e discussão para as variáveis de saída investigadas 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 dissertação estão apresentadas as referências bibliográficas consultadas para o desenvolvimento deste trabalho.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os principais assuntos relevantes para o desenvolvimento desta pesquisa, sendo estes o processo de retificação, propriedades dos rebolos abrasivos, grandezas físicas da retificação, calor e temperatura desenvolvidas no processo, fluidos de corte e técnicas de aplicação, partículas sólidas adicionadas ao fluido de corte, e por fim a integridade superficial de componentes retificados.

2.1 Processo de retificação

A retificação é um processo de usinagem cuja remoção de material ocorre por meio de uma ferramenta conhecida como rebolo, que contém milhares de partículas abrasivas duras, não metálicas e que estão dispostas com orientação irregular e geometria não definida (MALKIN e GUO, 2008). Na Figura 2.1 são apresentados os principais elementos de um processo de retificação plana, que foi selecionado por ser o processo foco deste trabalho. No geral, a retificação é empregada no fim da cadeia de produção com o propósito de conferir à peça a combinação entre desvios dimensionais mais estreitos (qualidade IT6 a IT3) e melhor acabamento, ou seja, atuando na correção de erros provenientes de operações anteriores (MALKIN e GUO, 2008). Outra aplicação do processo de retificação é na usinagem de materiais de elevada dureza, sendo uma alternativa ao torneamento duro (KLOCKE et al., 2005 apud ROWE, 2014).

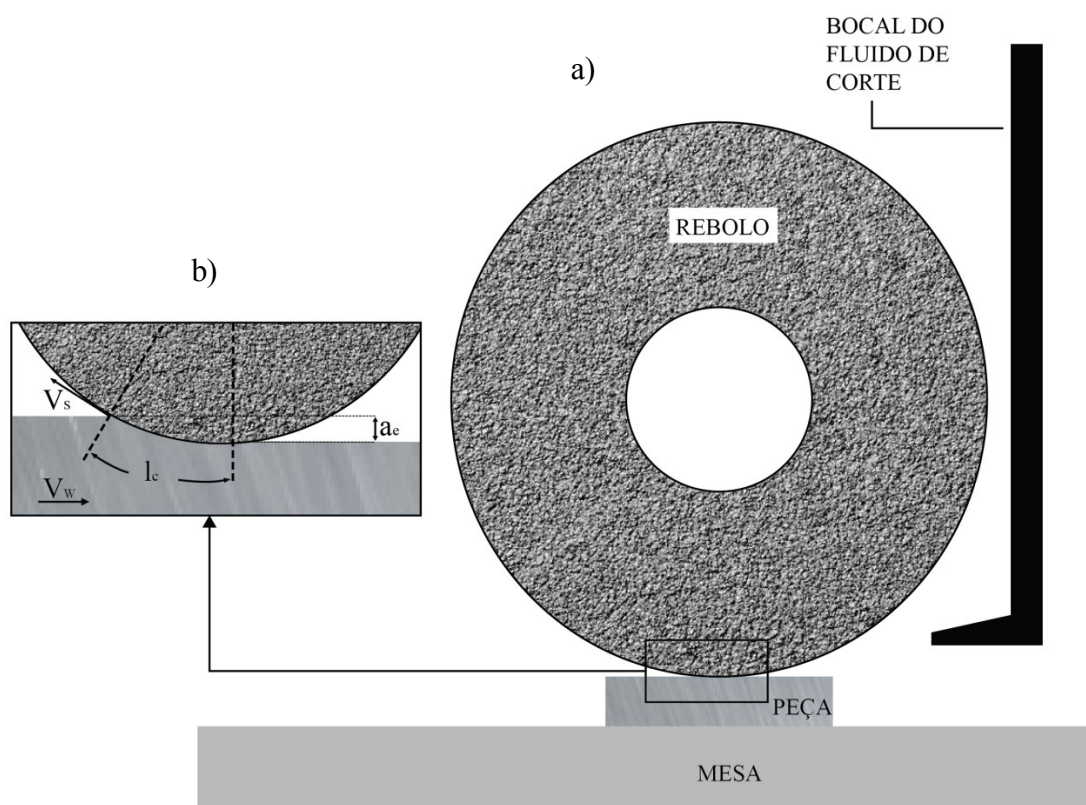


Figura 2.1 - Elementos básicos do processo de retificação plana tangencial: a) sistema rebolo-peça, b) ampliação da zona de retificação de a) relação geométrica das principais grandezas físicas do processo (Fonte: próprio autor).

Onde: V_s , V_w , l_c e a_e são, respectivamente, velocidade de corte, velocidade da peça, comprimento de contato rebolo-peça e penetração de trabalho.

No processo de retificação plana normalmente é a peça que se desloca enquanto o rebolo apenas rotaciona em velocidades bem superiores aquelas dos processos convencionais com ferramenta de geometria definida, em geral acima de 30 m/s. Porém, há operações nas quais a peça também realiza movimentos de rotação. Sendo assim, podem-se classificar os processos de retificação segundo o movimento relativo existente entre o rebolo e a peça, e em relação à superfície que será usinada.

Apesar das vantagens do emprego da retificação ao invés de outros processos em algumas situações, esta operação possui alguns inconvenientes. Segundo Machado et al. (2009), a retificação pode ser considerada uma operação pouco eficiente em relação a outros processos de usinagem convencional, como é o caso do fresamento, baseado

no fato de ser necessária grande quantidade de energia para remover pouco material. Malkin e Guo (2008) também citam esta desvantagem e complementam que há um elevado gasto de energia mecânica que é transformado em calor na zona de retificação e, consequentemente, fazendo que altas temperaturas sejam desenvolvidas na região de contato entre abrasivos e peça. Aliado a isso, os abrasivos convencionais utilizados no processo são normalmente pobres condutores de calor, as penetrações de trabalho são muito pequenas e com isso os cavacos formados são de pequenas dimensões, todos estes fatores dificultam a dissipação do calor gerado e contribuem assim para que grande parcela seja transferida para a peça. E este calor é responsável pela ocorrência danos térmicos na peça, com destaque para queima da peça (também chamada de queima de retífica), além de transformação de fase, tensões residuais de tração, trincas e redução da resistência à fadiga do material. Desta forma, é necessário o emprego de meio lubri-refrigerante de maneira eficiente que evite o comprometimento da peça e prejuízos. Evitar que o calor gerado seja transferido para a peça tem sido um grande desafio para os usuários de usinagem, por isso será um tópico a ser abordado mais adiante, na seção 2.4.

2.1.1 Mecanismo da formação do cavaco e ação do grão abrasivo

O entendimento relativo às principais características de um processo de usinagem é de grande importância para a total exploração de seu potencial. Entretanto, os princípios referentes ao mecanismo de remoção de material nos processos onde há o emprego de ferramentas com geometria não definida, possuem diversas dificuldades. Como no processo de retificação há a interação de vários grãos com a peça, a remoção de material é composta pela soma da quantidade de material que cada abrasivo consegue retirar (KLOCKE, 2009). A dificuldade de compreender o mecanismo de formação do cavaco na retificação vem do fato do processo envolver altas velocidades de corte, dimensões bastante reduzidas (cavaco e grão abrasivo) e grãos com geometria irregular.

Para auxiliar na compreensão do mecanismo de remoção de material nos processos de retificação, Neugebauer et al. (2011) propuseram analisar o comportamento de apenas um grão em comparação com o de uma ferramenta de usinagem com geometria definida durante a retirada de material. De maneira geral, um aspecto que deve ser levado em consideração diz respeito ao ângulo de saída do grão abrasivo, pois durante a operação de usinagem ele pode assumir valor positivo ou negativo. Normalmente o ângulo de saída do abrasivo possui valor negativo, o que implica na formação de uma região plástica compressiva à frente e sobre o

abrasivo, além de uma região plástica de tração na parte anterior do mesmo. Como consequência, é formada tensão residual compressiva relacionada ao grão abrasivo (MARINESCU et al., 2004). À medida que a temperatura na zona da peça aumenta, devido às restrições impostas pela superfície à dilatação e contração do material durante a operação, surgem tensões residuais de tração, as quais podem afetar o comportamento mecânico da peça retificada. Ressalta-se ainda que a expansão térmica da peça durante a retificação pode acarretar elevação dos erros dimensionais e de forma no estado final da peça (FUSSE, 2005). Na Figura 2.2 é ilustrado de forma esquemática este fenômeno. Segundo Neto (2013), o ângulo de saída negativo que predomina durante a retificação restringe a saída do cavaco da região de corte, além de implicar em maior área dele com a superfície da peça, o que contribui para maior geração de calor.

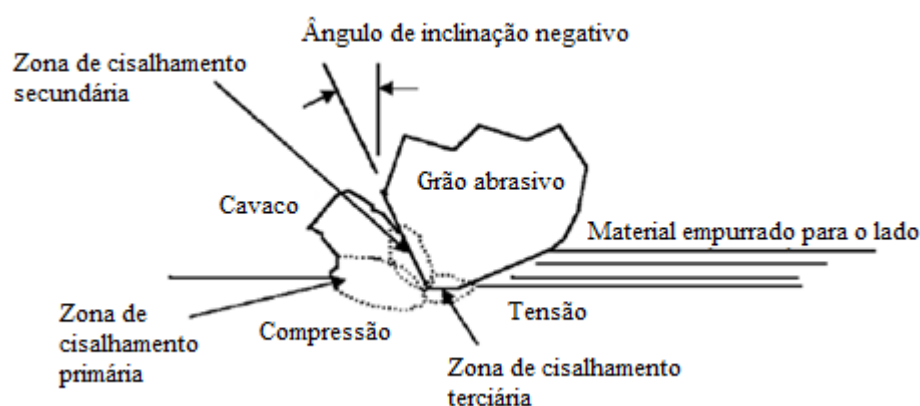


Figura 2.2 - Esquema da formação de tensões de compressão e de tração pelo grão abrasivo durante a retificação (adaptado de MARINESCU et al., 2004).

Conforme mostrado na Figura 2.3, as duas situações (a) ferramenta com geometria definida e b) ferramentas com ângulos não definidos) possuem regiões com o mesmo comportamento, mesmo o grão possuindo dimensões bem inferiores aquelas de uma ferramenta de corte com geometria definida (Figura 2.3a). Contudo, a área em que cada aresta das duas ferramentas penetra na peça é significativamente diferente, sendo que a área de contato da ponta de um abrasivo é em média 99% menor que aquela de uma ferramenta de corte para o processo de fresamento, por exemplo (NEUGEBAUER et al., 2011).

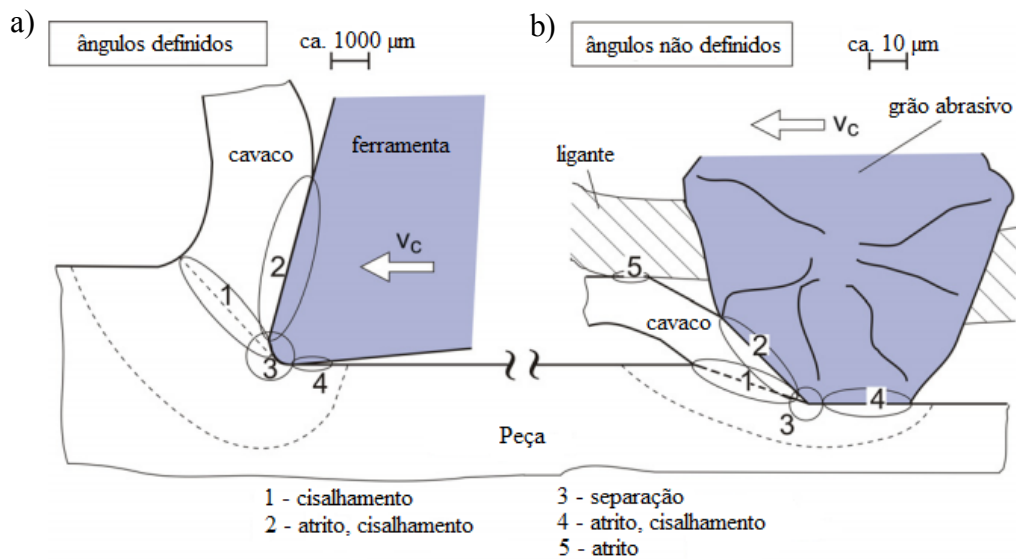


Figura 2.3 - Comparação da formação de cavaco entre ferramentas com geometria definida (a) e ferramentas com ângulos não definidos (b) (adaptado de NEUGEBAUER et al., 2011).

Segundo Salmon (1992), durante a retificação a interação dos grãos abrasivos com a peça pode resultar nos seguintes mecanismos: atrito, riscamento e corte (Figura 2.4). Contudo, a formação do cavaco será resultado da interação do grão abrasivo com o tipo de material da peça. Ou seja, há certas diferenças no caso da retificação de materiais dúcteis e frágeis no que diz respeito à remoção de material.

Na Figura 2.4a é ilustrada a ação do grão abrasivo na retirada de material para o caso de materiais dúcteis. Como pode ser observado nesta figura, a remoção de material ocorre em três etapas. Na região I ocorre apenas a deformação elástica do material com a entrada do grão sobre a superfície da peça, região em que a profundidade de penetração do abrasivo é pequena, não sendo suficiente para cisalhar o material. Na região II, pelo fato de o grão continuar penetrando na peça, inicia-se a fase de deformação plástica do material, e assim o grão desloca material da peça tanto para a frente quanto para as laterais do grão abrasivo. Porém, nesta fase não há a remoção do material. Já a última etapa, região III da Figura 2.4, ocorre quando a profundidade de penetração do grão abrasivo aumentou até certo ponto, profundidade de corte crítica (T_μ), e que representa a espessura de cavaco não deformado (h_{cu}), já suficiente para garantir a formação do cavaco. Ou seja, a região III é aquela em que ocorre a remoção de material.

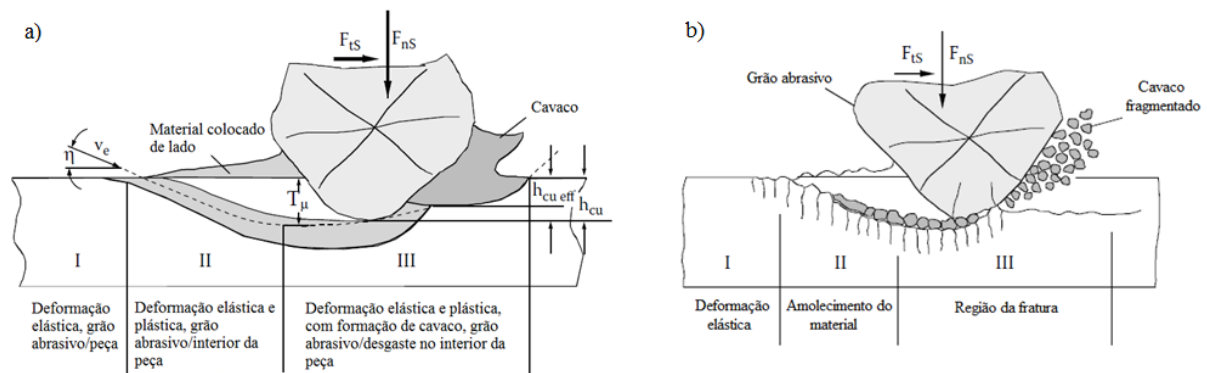


Figura 2.4 - Remoção de material durante a usinagem de: a) material dúctil; b) material frágil (adaptado de MARINESCU et al., 2007).

Na situação na qual ocorre a retificação de materiais frágeis, conforme mostrado na Figura 2.4b, a remoção de material acontece de maneira semelhante à observada nos materiais dúcteis, mas com a diferença para a forma de fratura do cavaco. De acordo com Marinescu et al. (2007), devido à baixa ductilidade destes materiais, a região de deformação das fases elástica e plástica é bastante reduzida. Desta forma, os materiais frágeis fraturam ao invés de se deformarem à medida que a aresta de corte incide sobre a peça, ocasionando lascamento do material da peça e formando de cavacos segmentados.

2.2 Rebolos: propriedades e aplicações

No processo de retificação há o emprego de uma ferramenta abrasiva que rotaciona em elevadas velocidades retirando material de um material menos duro. Esta ferramenta é conhecida como rebolo. Os rebolos são compostos por partículas não metálicas (cerâmicos), de elevada dureza, com diversas arestas de corte, e com orientação irregular (MARINESCU et al., 2007). Estas partículas abrasivas são unidas através dos ligantes, dando assim forma à ferramenta.

2.2.1 Especificação de rebolos

Há uma forma de realizar a especificação do rebolo levando em consideração suas características, como é mostrado na Figura 2.5. Segundo Malkin e Guo (2008), os parâmetros

utilizados para esta finalidade são: tipo do abrasivo; tamanho do grão, a dureza do rebolo, a estrutura do rebolo, tipo do ligante e outros códigos de identificação do fabricante.

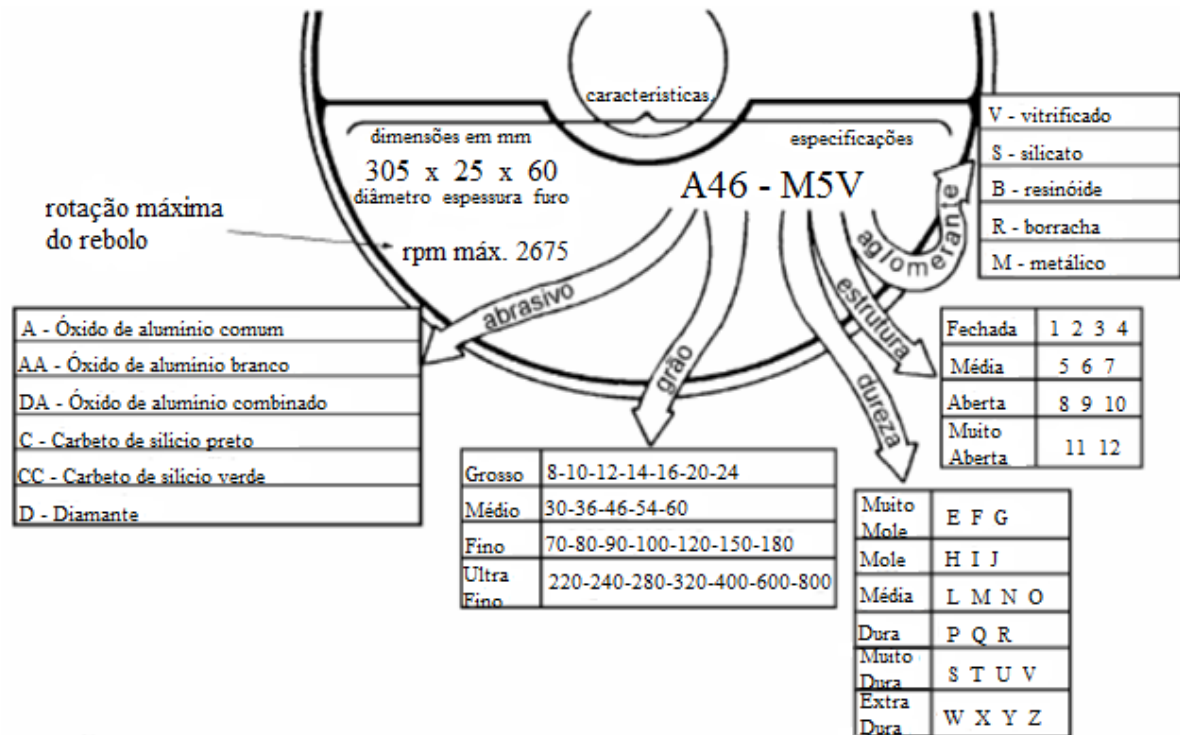


Figura 2.5 - Forma de especificação de rebolos (adaptado de SOUZA, 2007).

Em relação ao tamanho do grão, grãos maiores são empregados em rebolos para remover grandes quantidades de material, condição de desbaste, enquanto que grãos menores são recomendados quando se empregam pequenas penetrações de trabalho, ou seja, condição de acabamento. Normalmente, os rebolos são especificados de acordo com a grana (mesh), sendo que a grana de um rebolo possui relação inversa com o tamanho do abrasivo, ou seja, quanto maior a grana, menor será a dimensão do grão abrasivo. Como mostrado na Tabela 2.1, há dois sistemas de especificação dos grãos abrasivos: *American National Standards Institution* (ANSI) padrão US e *Federation of European Producers of Abrasives* (FEPA) padrão ISO (ROWE, 2014).

Tabela 2.1 - Tipos de especificação dos tamanhos de grãos abrasivos conforme segundo a FEPA e a ANSI (adaptado de ROWE, 2014).

Tamanho dos grãos abrasivos	
Designação FEPA	Designação ANSI
1181	16-18
1001	18-20
851	20-25
711	25-30
601	30-35
501	35-40
426	40-45
356	45-50
301	50-60
251	60-70
213	70-80
181	80-100
151	100-120
126	120-140
107	140-170
91	170-200
76	200-230
64	230-270
54	270-325
46	325-400

A dureza do rebolo está associada principalmente com a capacidade do ligante de reter os grãos abrasivos durante a usinagem. O grau de dureza do rebolo é classificado de A a Z, sendo que quanto mais próximo de A menor dureza o rebolo possuirá, e vice-versa. Este é um parâmetro que pode ser utilizado para estimar o desgaste do rebolo. Assim, uma maior dureza do rebolo implica em geral na prolongação de sua vida já que há menor chance de o grão se desprender do rebolo. Por outro lado, um rebolo que não perde grãos abrasivos terá dificuldade em renovação das arestas de corte, o que pode comprometer o seu desempenho, surgindo, portanto, a necessidade de dressagem. Um fator que afeta a dureza do rebolo é a quantidade de ligante empregado, onde uma maior concentração de ligante resultará em um rebolo mais duro (ROWE, 2014). Normalmente empregam-se os rebolos mais duros na retificação de materiais moles, e os rebolos de menor dureza para os materiais com dureza elevada.

Quanto à estrutura dos rebolos, a mesma é indicada por números de 1 a 12, e se refere ao espaçamento existente entre os grãos no rebolo. Segundo Malkin e Guo (2008), recomenda-se o uso de rebolos de estrutura aberta (mais próximo da indicação 12) para

operações de desbaste, pois estes em geral possuem mais poros, que proporcionam alojamento de cavacos que são gerados além de permitir melhor acesso do fluido de corte na região de contato em relação aos rebolos com estrutura mais fechada. O rebole de estrutura mais fechada significa que o rebole possui mais grãos, menos poros, e consequentemente menos ligante. Sendo assim, o rebole deve ser relativamente poroso permitindo assim o alojamento de cavacos e fluido de corte, especialmente nos casos onde o comprimento de contato rebole-peça é mais prolongado.

2.2.2 *Material abrasivo*

Nos processos de retificação, a remoção de material ocorre devido à interação existente entre os grãos abrasivos e o material a ser usinado. Desta forma, Klocke (2009) apresenta alguns requisitos que o grão deve possuir para desempenhar de maneira correta sua função:

- Possuir elevada dureza e conseguir manter as arestas de corte afiadas durante um longo período de tempo;
- Como nos processos normalmente ocorrem variações de temperatura, o grão deve possuir alta resistência térmica, e assim ser capaz de resistir a elevadas temperaturas e mudanças bruscas da mesma;
- Apresentar resistência química a fim de prevenir reações químicas que prejudiquem as propriedades do grão.

Como ainda não se conhece nenhum material abrasivo que consiga atender a todos estes requisitos da mesma maneira, existe uma enorme quantidade de materiais naturais e sintéticos que são empregados como abrasivos para a fabricação dos rebolos. Segundo Nussbaum (1988), podem-se classificar os abrasivos em: abrasivos naturais não siliciosos, abrasivos naturais siliciosos, abrasivos moles, e abrasivos sintéticos ou artificiais. Porém, atualmente a indústria costuma classificar os abrasivos em abrasivos convencionais e superabrasivos, onde os principais materiais aplicados de cada categoria são respectivamente: carbetos de silício e óxido de alumínio; diamante e CBN (MALKIN e GUO, 2008). Como nesta pesquisa só haverá o emprego dos abrasivos convencionais, será dado enfoque nestes e nas suas derivações.

Dentre os abrasivos convencionais, o carbetos de silício (SiC) é o que possui dureza mais elevada. De acordo com Marinescu et al. (2007), este material possui uma dureza Vickers variando de 2500 a 2800 e possui elevada friabilidade. Entretanto, em comparação com o óxido de alumínio, este apresenta resistência ao impacto inferior, além de maior taxa de

desgaste no caso de retificação de aços. O desgaste deste material ocorre em proporções maiores quando há o emprego na retificação de materiais que possuem afinidade com o carbono. Devido a isto, costuma-se utilizar o carbeto de silício na retificação de materiais não ferrosos (ROWE, 2014). A produção do carbeto de silício é realizada através da fundição da areia de quartzo em um forno de arco de resistência. Variações desta técnica permitem a fabricação de carbeto de silício com propriedades distintas, como pureza, tenacidade e cor. Em relação à cor, pode-se classificar este material entre carbeto de silício verde e carbeto de silício preto (KLOCKE, 2009). Segundo Marinescu et al. (2004), o carbeto de silício verde possui 99% de pureza enquanto o preto 97% de pureza, sendo o verde mais difícil e caro de produzir, além de possuir dureza superior. O carbeto de silício verde é utilizado na retificação de materiais de menor ductilidade, como carbonetos por exemplo. Já o carbeto de silício preto é empregado nos processos de retificação de materiais não ferrosos dúcteis e ferros fundidos com maior teor de carbono (ROWE, 2014).

O óxido de alumínio convencional (Al_2O_3) também conhecido como corundum é empregado na retificação de uma extensa quantidade de materiais ferrosos, abrangendo os aços. A variação de sua pureza e preparação dos abrasivos pode resultar em grãos com boa tenacidade ou em grãos altamente friáveis. Grãos que sofrem microfratura possuem maior vida útil devido ao fato destes se manterem afiados, ocasionando em redução das forças sobre os grãos e minimizando a perda de grãos em decorrência da fratura (ROWE, 2014). Existem diversas variações do óxido de alumínio, os quais serão descritos a seguir segundo Marinescu et al. (2007).

- Óxido de alumínio marrom ou apenas óxido de alumínio: este material possui aproximadamente 3% de dióxido de titânio (TiO_2) em sua composição. Entre suas características, tem-se a dureza Vickers que é próxima a 2040 e a friabilidade considerada média. Pode-se alterar as propriedades do óxido de alumínio marrom modificando a porcentagem de TiO_2 presente. O incremento do TiO_2 resulta no aumento da tenacidade, porém reduzindo a dureza. Apesar de possuir tonalidade marrom, a elevadas temperaturas no forno o TiO_2 pode oxidar transformando a coloração destes grãos em azul-acinzentado;
- Óxido de alumínio branco: é o abrasivo que apresenta maior pureza. Este é um dos grãos mais duros e mais friáveis dentro da classe de óxido de alumínio. É recomendado, quando fabricado com ligante vitrificado, para a retificação de precisão.

Por causa do baixo teor de sódio em sua composição ao ser utilizado o ligante resinóide, ele sofre menos ataque do fluido de corte;

- Óxido de alumínio rosa: este material é formado por óxido de alumínio branco mistura de óxido de cromo. A porcentagem do óxido de cromo não deve ultrapassar 0,5% e é este componente o responsável por trazer a coloração rosa para este tipo de óxido de alumínio. Entre suas características, sua dureza é superior ao do óxido de alumínio branco, e assim como o óxido de alumínio marrom, a adição de TiO_2 resulta na elevação do valor da tenacidade;
- Óxido de alumínio rubi: comparando com o óxido de alumínio rosa, este possui teor de óxido de cromo superior (próximo a 3%), além de possuir maior friabilidade. Exemplo de aplicação deste material é na retificação de aços a seco. Um aditivo que vem sendo empregado é o óxido de vanádio, conferindo assim coloração verde ao material;
- Alumina-zircônia: possui grão refinado e que configura elevada resistência mecânica ao abrasivo, fazendo dele o preferido em situações que exigem altas taxas de remoção de material, como na retificação de tarugos em indústria de fundição;
- Alumina branca monocristalina: é um abrasivo sintético em que há controle do crescimento do grão através de uma matriz de sulfureto. É também chamado de alumina calcinada. O grão resultante deste processo possui forma nodular facilitando a retenção do ligante;
- Seeded Gel (SG): também conhecido como Sol-gel, este tipo de abrasivo foi desenvolvido pela Norton Company (2018) em meados da década de 1980, é considerado mais puro e tem maior dureza que os demais abrasivos de Al_2O_3 . Devido a sua alta resistência, este material costuma ser empregado em conjunto com abrasivos fundidos regulares reduzindo as forças de retificação, são indicados para a retificação de materiais de difícil retificabilidade. Apesar do custo de fabricação deste material ser mais elevado, este abrasivo pode representar um aumento até 10 vezes na vida do rebolo em comparação aos materiais cerâmicos fundidos convencionais.

Na Tabela 2.2 são apresentadas as principais propriedades mecânicas dos abrasivos convencionais e suas variações, enquanto na Tabela 2.3 são mostradas algumas das propriedades térmicas do carbetto de silício e óxido de alumínio. Como pode ser observado na

Tabela 2.3, o carbeto de silício possui condutividade térmica bastante superior ao óxido de alumínio, sendo empregado normalmente em processos de desbaste de materiais de elevada dureza. Porém, observa-se que em temperaturas superiores a 750°C, nos processos de retificação de materiais ferrosos e a base de níquel, pode ocorrer reação química do abrasivo (carbeto de silício) com estes materiais (MARINESCU et al., 2007).

Tabela 2.2 - Propriedades mecânicas dos principais tipos de carbeto de silício e óxido de alumínio (adaptado de ROWE, 2010).

Abrasivo	Dureza Vickers Kg/cm ²	Dureza Relativa	Aplicação
SiC verde	2840	1,6	Carbetos, cerâmicas
SiC preto	2680	1,75	Ferro fundido, cerâmicas, não ferrosos dúcteis
Al ₂ O ₃ rubi	2260	1,55	Aços ferramentas e aços de alta liga
Al ₂ O ₃ branco	2120	1,75	Aços em geral
Al ₂ O ₃ marrom	2040	2,8	Fins gerais
Al ₂ O ₃ /10%ZrO	1960	9,15	Retificação pesada
Al ₂ O ₃ /40%ZrO	1460	12,65	Retificação pesada

Tabela 2.3 - Propriedades térmicas dos abrasivos convencionais (adaptado de ROWE, 2010).

Abrasivo	Condutividade térmica W/mK	Densidade Kg/m ³	Calor específico J/kgK	Difusividade Mm ² /s
Óxido de alumínio	35	3980	765	11,5
Carbeto de silício	100	3210	710	44

Nos processos de usinagem com ferramentas abrasivas é necessário que o grão abrasivo seja mais duro que o material a ser usinado durante a interação. Ou seja, durante o processo a região de contato atinge elevadas temperaturas e a partícula tem que ser capaz de manter sua dureza acima da peça. Caso isto não ocorra, será o grão que sofrerá desgaste e não o contrário (MARINESCU et al., 2004). Desta forma, características de grande importância que devem ser levadas em consideração no momento da escolha do rebolo são a dureza do grão abrasivo

e suas propriedades térmicas. Na Figura 2.6 são ilustrados exemplos de como a dureza de alguns abrasivos se comporta de acordo com a variação de temperatura. Dentre todos estes abrasivos apresentados na Figura 2.6, o diamante é o que possui maior dureza à temperatura ambiente enquanto que o óxido de alumínio apresenta uma das menores durezas. Porém, como pode ser observado, a dureza dos abrasivos reduz drasticamente com o aumento da temperatura, principalmente para o caso do diamante. Assim, a variação de temperatura durante o processo se mostra mais significativa, com relação à dureza, dependendo do abrasivo empregado.

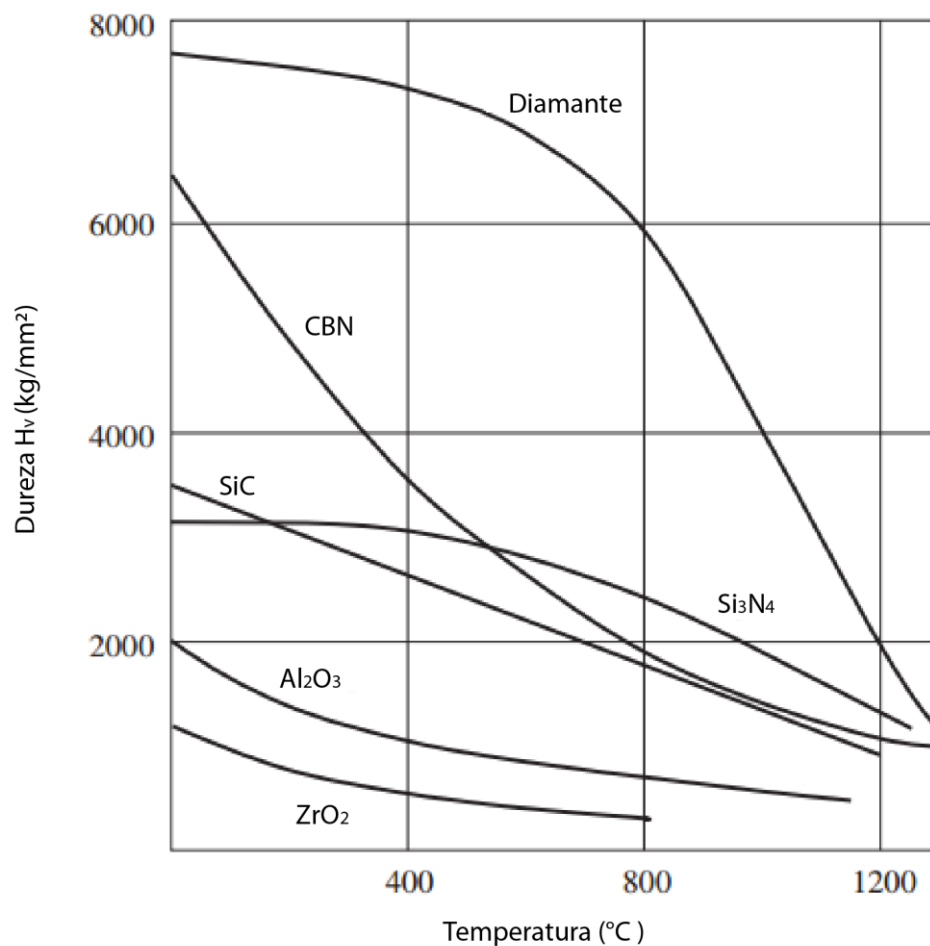


Figura 2.6 - Dureza dos abrasivos em função da variação da temperatura (adaptado TELLE, 2000).

Durante o processo de retificação, os grãos se desgastam perdendo sua eficiência relacionada ao corte. Desta forma, há o aumento das forças de retificação, podendo resultar na fratura do abrasivo e até mesmo seu arrancamento completo. A friabilidade do grão abrasivo é

a capacidade do mesmo de fraturar de maneira frágil, produzindo novas arestas de corte afiadas. Sendo assim, o grão abrasivo deve ter como características uma elevada friabilidade, elevada dureza, para que consiga deformar e cisalhar o material da peça, além de possuir razoável tenacidade para resistir às variações de temperatura e tensões do processo (MACHADO et al., 2009).

2.2.3 *Ligante do rebolo*

A função do ligante vai além de unir os grãos abrasivos e conferir a geometria do rebolo (MARINESCU et al., 2004), ele visa ainda,

- Garantir a retenção apropriada dos grãos abrasivos durante a usinagem em função do tipo de operação;
- Proporcionar a erosão da ligação de forma controlada e promover a exposição gradativa de novos pontos de corte;
- Garantir uma eficiente transferência das forças de retificação do eixo para a peça;
- Possibilitar a dissipação de calor adequadamente.

De acordo com Rowe (2014), os ligantes são classificados em três grupos: orgânico ou resinóide, vitrificado e metálico. A seguir são apresentadas as principais características e propriedades de cada um destes.

- Resinóide: ligantes que abrangem uma enorme quantidade de ligações orgânicas produzidas por prensagem a quente, mas em temperaturas relativamente baixas. Os rebolos com ligante resinóide são fabricados com combinação entre grãos abrasivos com resinas termofixas fenólicas e plastificantes (MALKIN e GUO, 2008). Os ligantes deste tipo conferem um corte de natureza macia, com resistência a baixas temperaturas e conformidade estrutural. Este ligante faz com que o rebolo adquira natureza mais elástica do que os rebolos que utilizam os outros tipos de ligantes. A elasticidade normalmente é um fator a ser avaliado na escolha do ligante orgânico. Esta propriedade útil é importante no que se refere à segurança dos usuários, principalmente quando se empregam elevadas velocidades de corte e também quando se deseja obter uma superfície com um melhor acabamento. No geral, este tipo de ligante é utilizado em abrasivos convencionais, porém pode-se utilizar também em conjunto com superabrasivos. É importante destacar que os rebolos que utilizam este tipo de ligante possuem um tempo de vida limitado, inferior ao dos rebolos com

ligante vitrificados (ROWE, 2014). Este ligante está muito propenso ao ataque químico de fluidos de corte alcalinos, o que promove o enfraquecimento das ligações existentes entre o ligante e os grãos abrasivos, consequentemente resultando na deterioração precoce do rebolo. Por isso, eles recebem um carimbo com data e os cuidados necessários para o uso. Rebolos contendo ligante resinoide são recomendados para usinagem de desbaste e de peças com superfícies interrompidas devido à sua resistência maior a impactos. O ligante resinóide é ainda o mais empregado na confecção de rebolos superabrasivos (MALKIN e GUO, 2008);

- Vitrificado: é um ligante composto por uma mistura de materiais contendo argila, quartzo, caolim e feldspato, cujas razões estequiométricas da mistura são definidas de acordo com as propriedades desejadas (KLOCKE, 2009). Estas misturas garantem a este tipo de ligante elevada rigidez mas com natureza frágil contra impactos e elevadas pressões de trabalho o que limitam o seu uso nestas condições (SAINT GOBAIN ABRASIVES, 2016). Embora grande parte dos rebolos com abrasivos convencionais utilizam o ligante vitrificado, devido ao emprego de velocidades de corte cada vez maiores nos dias atuais, a preferência tem sido pelos rebolos com ligante resinóide. Os rebolos vitrificados podem ser utilizados com velocidades de corte que variam desde 30 m/s (mais comuns) até 120 m/s graças aos avanços tecnológicos com as técnicas de reforço dos rebolos (MALKIN e GUO, 2008). Um rebolo com ligante vitrificado possui ligações mais fortes do que o rebolo com ligante resinoide, mas por outro lado ele é mais fraco em comparação com o ligante metálico que será comentando a seguir (ROWE, 2014);
- Metálico: este tipo de ligante em geral faz a união dos grãos abrasivos por meio da técnica de galvanoplastia ou são depositados galvanicamente sobre um suporte ou introduzidos em uma matriz com abrasivos mais aberta. Os metais mais utilizados para este tipo de ligante são o ferro, bronze sinterizado e o níquel. Além da galvanoplastia, o ligante metálico pode garantir a união por meio da brasagem, porém este processo emprega temperaturas acima da galvanoplastia, resultando desta forma em um perfil de menor exatidão e riscos de danos aos grãos (SAINT GOBAIN ABRASIVES, 2016). Segundo Klocke (2009), algumas propriedades deste tipo de ligante são alta resistência ao desgaste e alta condutividade térmica. A união dos grãos de diamante ou de CBN por este ligante pode ser realizada em apenas uma camada sobre um disco metálico ou podem ser colocadas várias camadas de abrasivo através

de uma ligação de cobre/estanho modificado, bronze cobalto ou através de uma liga de ferro fundido sinterizado. Rebolos com apenas uma camada de abrasivo possuem custo mais elevado em decorrência do tempo necessário para definição dos grãos com precisão sobre a superfície (MEYER et al., 2000 apud ROWE, 2014). Apesar das dificuldades encontradas e dos custos envolvidos, os rebolos de CBN com ligante metálico (também chamados de CBN galvanizados) permitem atingir elevada exatidão nas peças aliada a altas taxas de remoção de material e maior vida útil, comparados aos rebolos abrasivos convencionais (ROWE, 2014).

2.2.4 Dressagem

Dressagem é o nome dado ao processo para restabelecer a forma e o desempenho do rebolo no processo de retificação (ROWE, 2010). Ela é destinada à afiação dos rebolos, resultando assim no aparecimento de novas arestas de corte. Souza (2007) complementa que as funções da dressagem são:

- Reestabelecer o formato original ou conferir outra forma definida ao rebolo;
- Remover do rebolo os grãos desgastados e os cavacos que se alojaram nos poros, devolvendo ao rebolo sua capacidade de corte;
- Servir como referência para identificar o posicionamento do diâmetro do rebolo na retificadora.

De acordo com Klocke (2009), os parâmetros que devem ser considerados para a escolha do método e ferramenta de dressagem são o material abrasivo, o tipo do ligante e a forma do rebolo. Segundo Machado et al. (2009), um dos principais parâmetros de forma a simplificar a escolha de um dressador em função da sua agressividade através é o grau de recobrimento do rebolo (U_d). Como pode ser observado na Equação 2.1, este parâmetro é dado pela razão entre a largura do dressador (b_d) e o passo de dressagem (s_d):

$$U_d = \frac{b_d}{s_d} \quad (2.1)$$

A aplicação de $U_d = 1$ resulta em uma rosca no rebolo com largura igual ao passo de dressagem sobre a superfície de trabalho do rebolo. Quando $U_d < 1$ é empregado, o dressador permite que grãos abrasivos gastos permaneçam no rebolo. Isso ocorre pois o dressador, nessa situação, não age sobre toda a superfície de corte do rebolo. Quando se emprega $U_d > 1$, há a

geração de uma “rosca fina”. Com valores do grau de recobrimento superiores a 1 o número de grãos abrasivos do rebolo com capacidade de corte é maior, fato que implica em maior agressividade do rebolo, porém com prejuízos para o acabamento da peça. Desta forma, normalmente, os valores de U_d recomendados são de 2 e 3 para operações de desbaste, 3 e 4 para operações de semi-acabamento e 6 a 8 para operações de acabamento (MARINESCU et al., 2007).

Os dressadores têm em geral suas pontas de diamante, por ser o abrasivo de maior dureza. De acordo com Marinescu et al. (2007), os dressadores podem ser classificados em dois grandes grupos: estáticos e os rotativos, sendo que os estáticos apenas realizam movimento de translação. Klocke (2009) compara o procedimento de dressagem com ferramenta estática com o torneamento, ou seja, o rebolo seria equivalente à peça e o dressador realizaria a função da ferramenta de corte. Assim, o rebolo se encontra em rotação enquanto o dressador, que na maior parte das vezes é fixado à mesa, se desloca em direção ao mesmo com velocidade constante. Segundo Marinescu et al. (2007), os dressadores estáticos englobam os que possuem ponta única ou são compostos por um aglomerado de diamantes. O dressador de ponta única é o mais comumente empregado, por causa da sua geometria (apenas com uma ponta) o que implica em menor custo. Na Figura 2.7 são ilustradas de forma esquemática as grandezas físicas da operação de dressagem com dressador de ponta única de diamante (a) e uma foto de um dressador de ponta única (b).

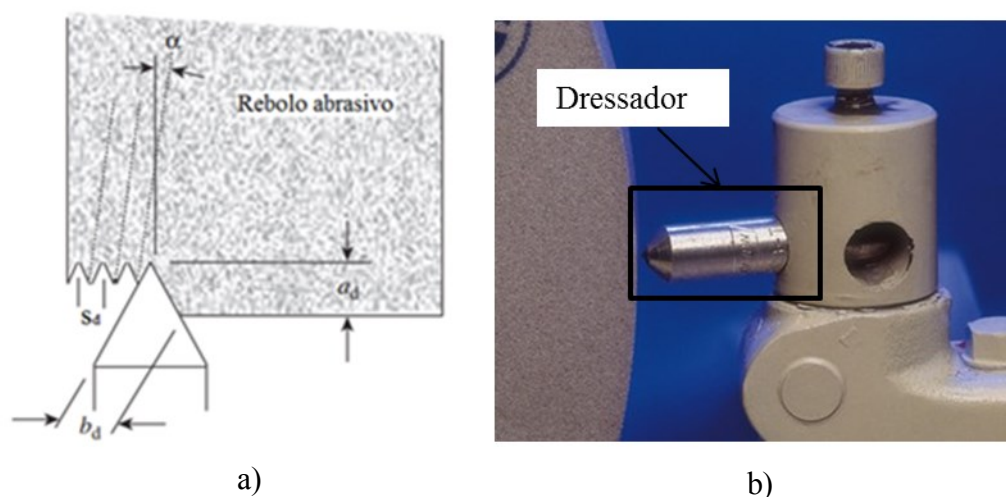


Figura 2.7 - a) Esquema da operação de dressagem com ferramenta de ponta única de diamante (adaptado de ROWE, 2014), b) dressador de ponta única (WINTER ABRASIVOS, 2018).

Em que: s_d , a_d , b_d e α são, respectivamente, passo de dressagem, profundidade de dressagem, largura do dressador e ângulo de arrasto.

Dentre as ferramentas compostas por múltiplos diamantes, uma que vem sendo bastante empregada é a conhecida como fliesen (Figura 2.8). Este tipo de dressador apresenta como principal vantagem a maior largura de atuação do dressador (b_d) possibilitando assim o emprego de valores de avanço de dressagem superiores e mantendo o mesmo grau de recobrimento (RUZZI, 2017).

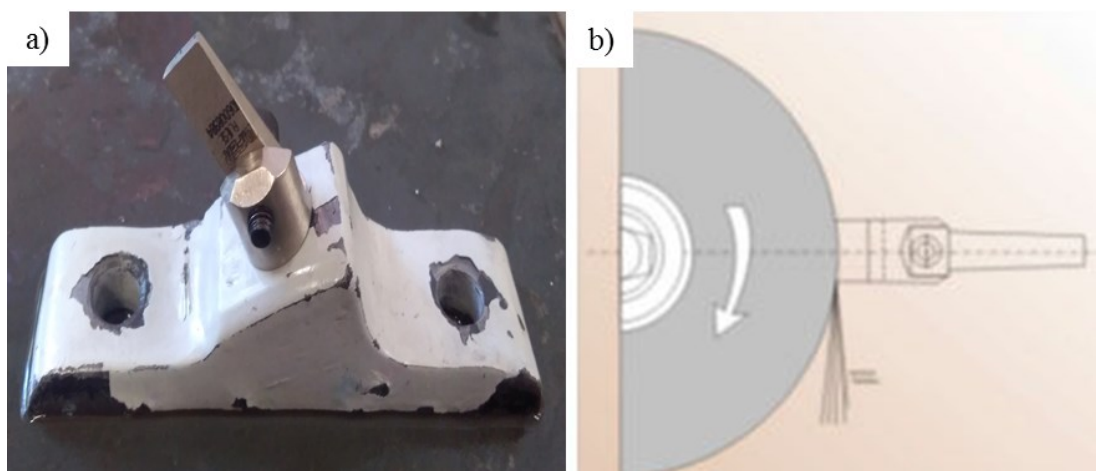


Figura 2.8 – a) Dressador do tipo fliesen; b) Posicionamento do dressador (DIMAS, 2017).

2.3 Grandezas físicas da retificação plana

Há diversas variáveis que influenciam no desempenho do processo de retificação, de forma que se torna imprescindível o conhecimento delas, principalmente da faixa de utilização em função do material a ser usinado e das tolerâncias dimensionais e geométricas especificadas para a peça. Os principais parâmetros da retificação plana, segundo Marinescu et al. (2007), são:

2.3.1 Velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte (m/s) representa a velocidade periférica do rebolo que pode calculada pela Equação 2.2:

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (2.2)$$

O valor da velocidade de corte em geral varia entre 10 m/s e 45 m/s nas operações que empregam rebolos com abrasivos convencionais, mas o mais comum é empregar valores entre 30 e 38 m/s. Contudo, nas situações onde são utilizados rebolos superabrasivos, as velocidades de corte são superiores a 45 m/s para que o seu uso tenha que ser justificado, inclusive com relatos na literatura de que elas podem atingir 120 m/s (MACHADO et al., 2009).

Conforme Bianchi et al. (1997), a velocidade de corte é um parâmetro que exige especial atenção porque está intimamente ligado com outras variáveis do processo tais como acabamento da peça, desgaste do rebolo, forças de corte e potência, entre outros. O aumento da velocidade de corte implica em aumento do número de vezes que o grão abrasivo toca a peça, e a quantidade de material removido por ciclo é menor. Desta forma, um número maior de grãos abrasivos passa a atuar no processo. Em decorrência do fato de haver uma menor solicitação em cada grão abrasivo, a espessura dos cavacos é menor, consequentemente implicando na redução das forças de corte, menor taxa de desgaste do rebolo e melhoria do acabamento da peça. Uma maior quantidade de abrasivos em contato com a peça causa a elevação de temperatura do processo, consequentemente da peça, e podendo levar aos danos térmicos na peça, principalmente da queima da peça.

2.3.2 Velocidade da peça (V_w)

De acordo com Bianchi (1997), a velocidade da peça (V_w) é igual à velocidade da mesa da retificadora no caso do processo de retificação plana, e este parâmetro está associado aos impactos dos abrasivos do rebolo sobre a peça. Este é um parâmetro que deve ser selecionado com cautela e em combinação com a penetração de trabalho (a_e), pois também podem causar danos térmicos, e depende do material a ser usinado. Pequenos valores de velocidade da peça com alta penetração de trabalho promove a geração de cavacos alongados e implica em menor impacto dos abrasivos sobre a peça. Devido à maior quantidade de grãos atuantes no processo e tempo mais prolongado de contato do rebolo com a peça, a força por abrasivo se torna menor. Por outro lado, com a progressão da usinagem, ocorre um maior desgaste dos abrasivos, perda das arestas cortantes e aumenta a área de contato dos grãos com a superfície da peça, que por sua vez eleva as forças de corte do processo. Desta forma, como os abrasivos tendem a se manter uma maior quantidade de tempo ao ligante, o desgaste do rebolo é menor.

Em situações onde se emprega altas velocidades da peça com pequena penetração de trabalho ocorre o contrário ao apresentado para baixos valores de V_w e elevados de a_e . Assim, os abrasivos tem maior facilidade para se fraturarem e, conseqüentemente, se desprendem do rebolo, resultando na estabilização das forças de corte, e neste caso o desgaste do rebolo é maior (BIANCHI et al., 1997). Ao analisar a velocidade da peça (V_w) com relação à espessura de corte equivalente (h_{eq}), o aumento de V_w ocasiona a elevação de h_{eq} e por conseqüência a espessura do cavaco. Com isso, há elevação dos esforços de corte, temperatura do processo e dos valores de rugosidade (MARINESCU et al., 2004). Os valores típicos de V_w para os processos de retificação plana se encontram normalmente entre 2 m/min e 10 m/min, podendo atingir 15 m/min dependendo do equipamento empregado (SHAJI e RADHAKRISHNAN, 2003; TAWAKOLI et al., 2009; BARCZAK; BATOKO; MORGAN, 2010).

2.3.3 Profundidade de corte (a_p)

A profundidade de corte corresponde à profundidade axial do rebolo sobre a peça ou à largura de penetração da ferramenta na peça (SILVA, 2016) e é medida perpendicularmente ao plano de trabalho. Segundo Machado et al. (2009), o valor da profundidade de corte é escolhido dependendo da largura do rebolo empregado, sendo que a faixa de valores normalmente se situa entre 1/4 a 4/5 da largura do rebolo, mas valores menores também podem ser empregados em função do material da peça e do rebolo.

2.3.4 Penetração de trabalho (a_e)

A penetração de trabalho refere-se à profundidade que o rebolo penetra na peça no plano de trabalho e é medida perpendicularmente à direção de avanço do rebolo ou da peça. Segundo Marinescu et al. (2004), o valor de a_e selecionado no equipamento sempre será maior do que a penetração de trabalho desejada de projeto. Isto ocorre devido às deflexões dos diversos elementos do sistema, desgaste do rebolo e expansão térmica da peça e do rebolo.

Conforme Bianchi et al. (1997), o incremento do valor da penetração de trabalho resulta no aumento dos esforços de corte e da rugosidade da peça. Por outro lado, o aumento da penetração de trabalho implica em maior número de grãos abrasivos e de ligante em contato com a peça, como também de poros, o que auxilia na dissipação de calor gerado durante a retificação. Os valores de a_e normalmente empregados em retificações plana e cilíndrica com rebolos convencionais, com exceção da retificação *creep-feed*, se situam entre 5 μm e 50 μm , podendo atingir 100 μm , porém o aumento da penetração de trabalho, no geral, acarreta na

elevação dos valores de rugosidade e esforços de corte (TAWAKOLI et al., 2009; DAMASCENO, 2010; GOMES, 2016).

2.3.5 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Este parâmetro é peculiar dos processos de retificação e corresponde à espessura da camada de material da peça que é retirada em uma volta completa pelo rebolo sobre a peça, portanto relacionado com os principais parâmetros de corte do processo de retificação, velocidade de corte (V_s), a velocidade da peça (V_w) e a penetração de trabalho (a_e). Ele pode ser calculado pela Equação 2.3 (MARINESCU et al., 2007):

$$h_{eq} = a_e \cdot \frac{V_w}{V_s} \quad (2.3)$$

Como pode ser observado pela Equação 2.3, o aumento da penetração de trabalho e da velocidade da peça resulta no aumento do parâmetro h_{eq} . Segundo Rowe (2014), o incremento da espessura equivalente de corte acarreta o aumento da tensão sobre os grãos abrasivos, o que influencia negativamente nas forças de corte e no acabamento da peça e na vida do rebolo (SOUZA, 2007).

2.3.6 Energia específica de corte (e_c)

A energia específica de corte (J/mm^3) é dada pelo quociente entre a potência empregada no processo ($P = F_t \times V_s$) pela taxa de remoção de material ($Q_w = b \times a_e \times a_p$), sendo Q_w a quantidade de material que está sendo retirado da peça em função do tempo de retificação. Este parâmetro está relacionado com a facilidade do rebolo em remover material da peça. Dentre as variáveis que influenciam a energia específica, as principais são as propriedades do rebolo e a do material a ser usinado (ROWE, 2014). A energia específica de corte pode ser calculada por meio da Equação 2.4:

$$e_c = \frac{P}{Q_w} = \frac{F_t \times V_s}{b \times a_e \times a_p} \quad (2.4)$$

Onde: F_t , V_s , b , a_e e a_p são, respectivamente, força tangencial, velocidade de corte, largura de retificação, penetração de trabalho e profundidade de corte.

De acordo com Rowe (2010), em operações de retificação que necessitam de grande retirada de material a energia específica de corte é baixa, enquanto que para situações nas quais há retirada de pequena porção, como em operações de acabamento, o valor desta energia é elevado. Desta forma, este parâmetro serve como um indicativo da eficiência do um processo de usinagem, onde partículas abrasivas removendo material de maneira eficaz resultam em baixa energia específica.

2.3.7 Comprimento de contato rebolo-peça (l_c)

O comprimento de contato (mm) corresponde à amplitude do contato do rebolo com a peça ao longo da usinagem. Malkin (1989) propôs uma forma de cálculo deste parâmetro levando em consideração o diâmetro equivalente do rebolo (d_s) e a penetração de trabalho (a_e) conforme é mostrado na Equação 2.5. Para a obtenção deste equacionamento foram negligenciados os movimentos e deformações da peça e do rebolo.

$$l_c = \sqrt{a_e \cdot d_s} \quad (2.5)$$

Segundo Morris (2011), este parâmetro é um elemento principal no que diz respeito à distribuição de energia no decorrer da operação de retificação. Em processos nos quais há o emprego de um elevado valor de penetração de trabalho, que por sua vez aumenta o l_c , há uma maior quantidade de grãos abrasivos em contato com a peça, fazendo com que a energia por grão abrasivo seja menor. Contudo, não se pode aumentar demasiadamente o valor de l_c por causa do risco de aumento de temperatura localizada da peça e propensão de danos térmicos.

2.3.8 Forças de corte

Durante a retificação há o contato dos grãos abrasivos e ligante com a peça e que envolve a geração de esforços de corte no processo. São três os fatores responsáveis pela geração das componentes da força de corte na retificação: etapas em que é gerado o atrito por causa do contato dos abrasivos com a peça, e do ligante com os cavacos, seguida de deformação plástica seguida do arrancamento dos cavacos; pressão hidrostática existente entre o rebolo e peça, além do impacto do fluido de corte ao atingir o rebolo e/ou a peça. A força de corte em retificação pode ser decomposta em três componentes: força normal (F_n), força tangencial (F_t) e força axial ou lateral (F_a) (MARINESCU et al., 2004). A força

tangencial atua tangencialmente ao rebolo enquanto a força normal atua perpendicularmente ao mesmo. O valor da força normal é bastante superior ao da força tangencial e é o principal fator relacionado com as deflexões do rebolo e peça. A componente F_a só tem importância em casos onde o rebolo se desloca lateralmente.

2.4 Calor e temperatura durante o processo de retificação

Como já comentado previamente, é preciso ter atenção redobrada ao selecionar os parâmetros de corte no processo de retificação, pois em geral são em maior número que aqueles para os processos de usinagem com ferramenta de geometria definida, a fim de evitar a ocorrência de danos térmicos nas peças e de não causar desgaste prematuro do rebolo abrasivo. E em retificação a uma condição severa para um dado material pode não ser tão severa para outro, pois há materiais mais suscetíveis à queima de retífica que outros. Contudo, é de comum senso que o emprego de penetrações de trabalho elevadas (em geral superiores a 50 μm), baixa velocidade da mesa e elevada área de contato do rebolo (abrasivos convencionais) são fatores que contribuem individualmente ou em conjunto para a geração de danos sobre a superfície da peça, principalmente devido ao aumento do calor e da temperatura localmente. Conforme relatado por Malkin (1989), além de danos térmicos, podem ocorrer, com o aumento da temperatura, expansões térmicas na peça, afetando a qualidade da mesma e podendo acarretar em inexactidões e desvios dimensionais e geométricos.

Diversos fatores podem contribuir para a variação de temperatura no processo, sendo estes o material da peça, o tipo do rebolo utilizado (consequentemente, o abrasivo empregado), a constituição do fluido de corte e a forma de aplicação deste, os parâmetros selecionados (sendo a velocidade do rebolo uma das principais variáveis), a dressagem do rebolo, dentre outros (ROWE, 2014).

Nos processos de retificação é empregada uma elevada quantidade de energia, porém há pequena remoção de material. A maior parte da energia é transformada em calor na zona de corte, e este calor é distribuído entre rebolo (q_r), peça (q_p), fluido de corte (q_f) e cavaco (q_c), conforme ilustrado na Figura 2.9 (MALKIN, 1989). Segundo Brinksmeier et al. (2004) apud Neto (2013), aproximadamente 5% a 84% de todo o calor produzido na região do corte é direcionado à peça, 9% a 52% para o fluido de corte, 3% a 38% para o cavaco formado e 2% a 12% para o rebolo abrasivo. As razões para que grande parte do calor que é gerado seja

transferido para peça devem-se ao fato do rebolo abrasivo convencional possuir baixa condutividade térmica e dos cavacos serem de dimensões pequenas (por causa dos baixos valores de penetração de trabalho).

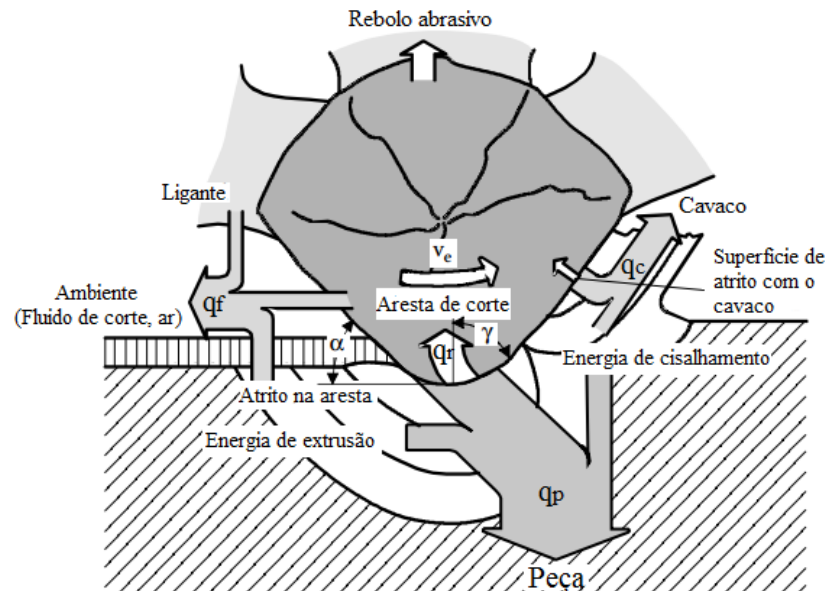


Figura 2.9 - Distribuição do fluxo de calor durante o processo de retificação (adaptado de KOENIG e KLOCKE, 1996 apud MARINESCU, 2007).

Os principais danos térmicos que podem ocorrer no processo de retificação são:

- Queima: é o nome dado ao fenômeno de oxidação da superfície da peça retificada, que na maioria dos casos apresenta-se com coloração azulada nos aços, e ocorre quando são excedidas temperaturas de 450°C durante a operação. As tonalidades da peça representam as temperaturas que foram desenvolvidas sobre sua superfície, sendo que as mais escuras são produzidas por elevadas temperaturas, enquanto as mais claras estão relacionadas às temperaturas menores (MARINESCU et al., 2004). Na Figura 2.10 é mostrado um exemplo de uma superfície de aço SAE 52100, retificada com rebolo de óxido de alumínio, apresentando queima, sendo este comportamento observado empregando $V_w = 2,9 \text{ m/min}$ e $a_e = 30 \text{ }\mu\text{m}$, e ensaio realizado a seco (PAIVA, 2016). Em algumas situações pode ocorrer queima, porém isto não é perceptível visualmente devido ao fato das marcas de queima terem sido removidas durante o ciclo de centelhamento do rebolo ao final processo de retificação, conhecido como “*spark-out*”. Geralmente as elevadas temperaturas causam danos até uma profundidade da ordem de $100 \text{ }\mu\text{m}$, e em muitos casos a operação de “*spark-out*” não

remove material suficiente para retirar toda esta camada afetada termicamente. Além da alteração na coloração da peça, este dano em geral é acompanhado de alteração da dureza e ou ainda por trincas na superfície das peças (MALKIN e GUO, 2008; MARINESCU et al., 2004; ROWE, 2014);



Figura 2.10 - Queima visível a olho nu em aço SAE 52100 após a retificação plana sem fluido de corte e com $V_w = 2,9$ m/min e $a_e = 30$ μ m (PAIVA, 2016).

- Têmpera: as elevadas temperaturas geradas durante o processo de retificação podem fazer com que o material da peça atinja ou exceda a sua temperatura de austenitização. Desta forma dependendo da taxa de resfriamento do material, na superfície da peça pode ocorrer a formação de uma fina camada de martensita, ou seja, o material terá sua dureza alterada. Na Figura 2.11 é ilustrada a formação desta camada em aço AISI 52100 após a retificação empregando $V_w = 18$ m/min, $a_e = 20$ μ m e $V_s = 40$ m/s. Essa camada possui como características elevada dureza e fragilidade, além de ser susceptível a trincas. Ainda como consequência do processo de retificação, logo abaixo da superfície do material que está sendo usinada são atingidas temperaturas menores e a taxa de resfriamento é reduzida em relação à superfície da peça. Com isso o material da peça sofre redução na dureza em relação à dureza da peça que não sofre influência do processo de retificação. Já em camadas mais profundas abaixo da superfície da peça, as temperaturas desenvolvidas no processo não são suficientes para alterar as propriedades do material, logo elas não sofrem danos térmicos (MARINESCU et al., 2004);

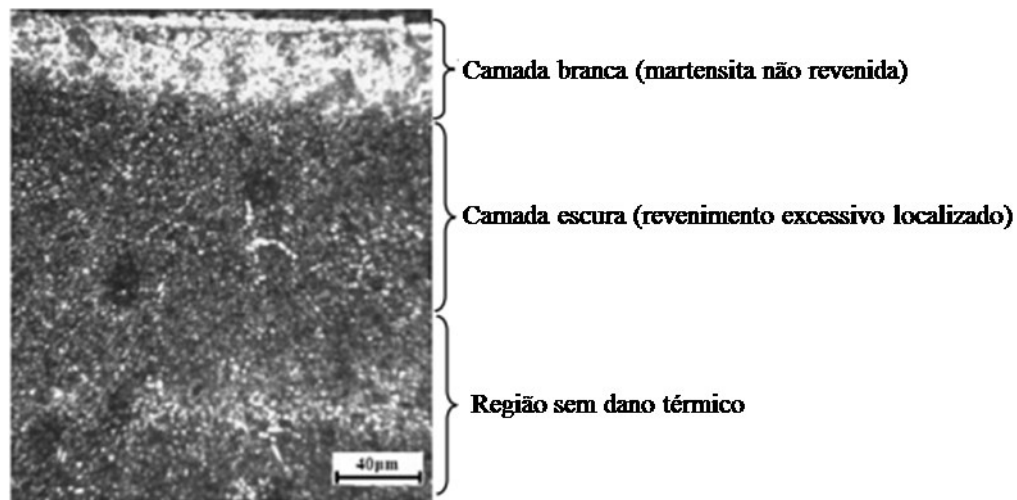


Figura 2.11 - Microestrutura do aço AISI 52100 com presença de martensita após a retificação com $V_w = 18$ m/min, $a_e = 20$ μ m e $V_s = 40$ m/s (MAO et al., 2011).

- Tensões residuais: de acordo com Rowe (2014), os grãos abrasivos atuam sobre a superfície da peça resultando em um fluxo plástico sob condições intensamente compressivas. Desta forma, após o processo de retificação a superfície da peça possui tensões residuais de compressão e estas tensões são favoráveis para o material. Quando o rebolo abrasivo passa por uma região da peça ocorre o aumento de temperatura ocasionando a expansão da peça. Ao resfriar, o material se contrai, originando assim as tensões trativas, que são resultantes da alternância do efeito de expansão e contração térmica sofrida pela peça, sendo elas prejudiciais à mesma, pois podem facilitar a propagação de trincas e comprometer a funcionalidade do material em serviço. A tensão residual resultante no processo de retificação será formada pela combinação dos efeitos térmicos e mecânicos;
- Trincas: segundo Marinescu et al. (2004), durante o processo de retificação, a peça sofre expansão (durante o contato do rebolo abrasivo com a peça são atingidas elevadas temperaturas, e este aquecimento resulta na expansão térmica da peça) e contração térmica (durante as várias voltas do rebolo sobre a peça, mesmo que em milésimos de segundo de intervalo entre uma volta e outra a peça se resfria, ocasionando a contração da mesma). A tensão residual ao final do processo será a diferença entre o efeito dos vários ciclos de expansão e contração da peça, ou seja, ao efeito predominante, que dependerá das condições de corte empregadas, do fluido de corte e do tipo de rebolo, como também das propriedades da peça.

Por causa dos prejuízos que os danos térmicos podem provocar, é importante atuar no monitoramento, identificar, controlar e/ou evitar a ocorrência deles e, neste sentido, algumas técnicas ou métodos são apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 - Principais métodos de identificação e controle de danos térmicos (Adaptado de NETO, 2013).

Técnica	Principais tipos de danos térmicos em peças retificadas			
	Queima de retifica	Alteração microestrutural	Tensões residuais de tração	Trincas
A olho nu ou com microscópio (i, ix)				
Ataque ácido (HNO ₃) (ii)				
Ataque ácido profundo (HCl) (ii)				
Partículas magnéticas (iii)				
Corrente parasita (iv)				
Microdureza (i, ix)				
Análise metalográfica (i)				
Ruído Magnético de Barkhausen (v, vi)				
Difração de raios-X (vii, ix)				
Impedância eletromecânica (viii, ix)				

(i) Malkin e Guo, 2008; (ii) Neto, 2013; (iii) Lovejoy, 1993; (iv) Pereira, 2007; (v) Rowe, 2014; (vi) Neslušan et al., 2016; (vii) Yin, Bai e Zhang, 2018; (viii) Marchi et al., 2015; (ix) Silva et al., 2018.

2.5 Fluidos de corte na retificação

Como já mencionado previamente, a energia mecânica necessária para o corte é transformada em energia térmica, e assim o calor gerado é distribuído entre os diversos componentes do sistema (conforme mostrado na Figura 2.9) (MALKIN e GUO, 2008). Ao se empregar rebolos abrasivos convencionais, a maior parte do calor é conduzida para a peça (até

85%), o que pode resultar em danos térmicos e comprometer a sua integridade superficial. Em outras palavras, a temperatura de retificação é um dos principais fatores de causa de danos térmicos, e por isso o uso de fluido de corte em grandes quantidades tem sido a forma mais simples e preferida dentre os usuários de usinagem por causa da função de refrigeração da peça. Mas além desta função, o fluido de corte geralmente exerce funções de lubrificação e de remoção de cavaco da zona de corte, além de limpeza, mesmo que superficial, da superfície do rebolo. O efeito de lubrificação diz respeito à redução do atrito entre os grãos abrasivos e a peça que por sua vez causa redução das forças envolvidas no processo, e consequentemente, da potência necessária para o corte. Outras funções secundárias do fluido de corte são ilustradas na Figura 2.12.

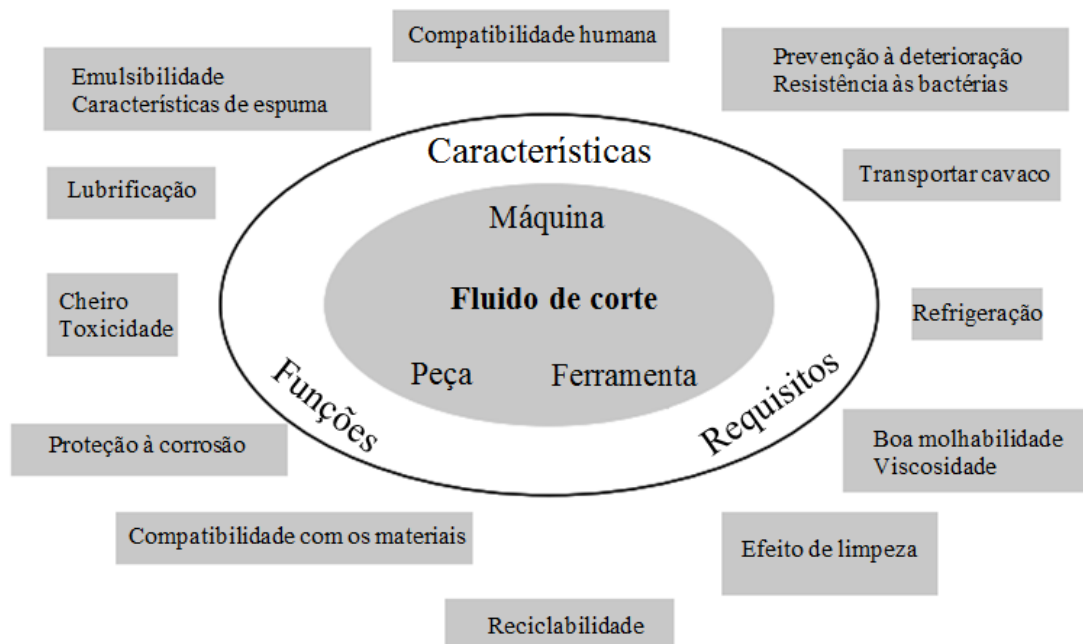


Figura 2.12 - Requisitos necessários para o fluido de corte em usinagem (adaptado de KLOCKE, 2009).

A norma DIN 51 385 apud Klocke (2009) classifica os fluidos de corte empregados na retificação em três grupos, conforme é ilustrado na Figura 2.13:

- 1) Fluidos não miscíveis em água: compreende os fluidos que não necessitam serem misturados em água para o uso. Os óleos minerais e vegetais são os principais materiais base empregados na constituição destes fluidos de corte;

- 2) Fluidos miscíveis em água: são fluidos que necessitam de água para serem utilizados, e são conhecidos como soluções ou emulsões;
- 3) Fluidos compostos por água: estes fluidos são à base de água o que torna desnecessário misturá-los com água antes do uso. Por isso, eles já são comercializados prontos para o emprego nos processos. Este grupo compreende os fluidos integrais.

Em processos de retificação os fluidos mais empregados são aqueles nos quais se adicionam água antes do uso por causa da sua ótima função de refrigeração que a água possui. Mas os fluidos de corte ainda podem conter aditivos que visam conferir a eles diversas propriedades, como resistência à corrosão e oxidação, por exemplo, e assim terão o seu custo elevado (MARINESCU et al., 2007). Na Figura 2.13 são apresentados os principais fluidos e suas propriedades, bem como alguns exemplos de aditivos utilizados nos fluidos.

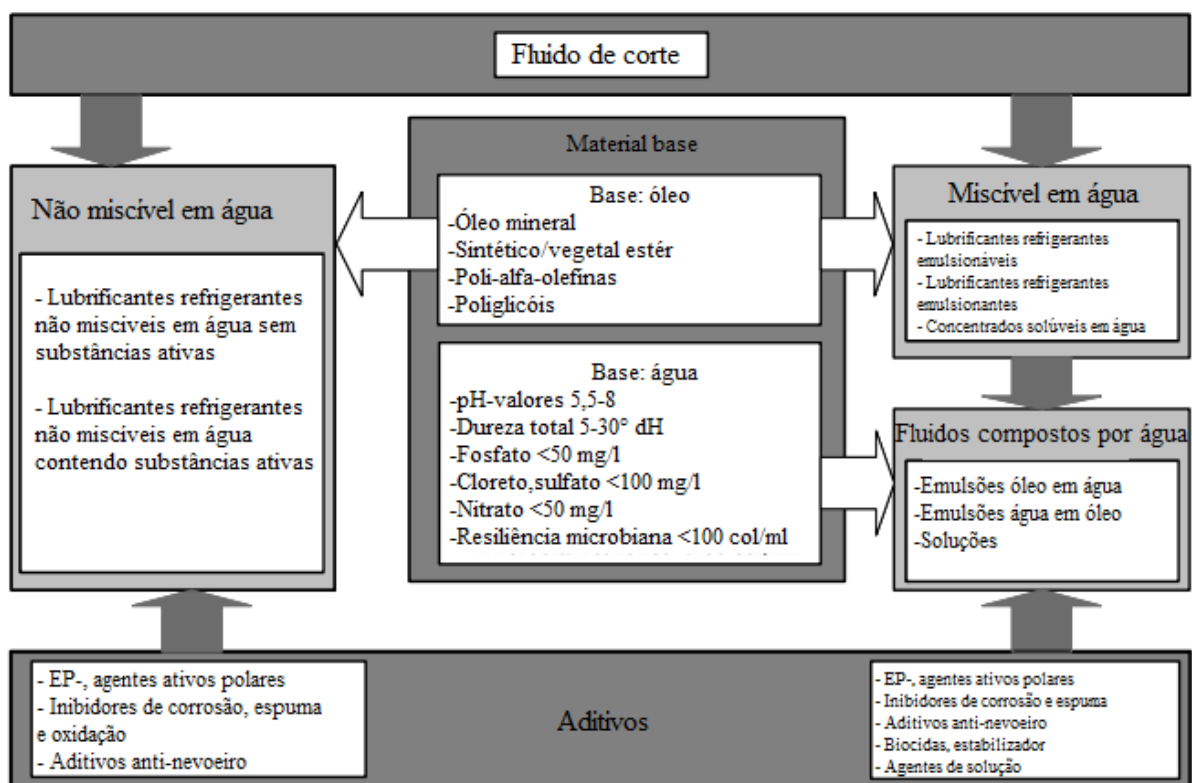


Figura 2.13 - Classificação e composição dos fluidos de corte (adaptado de BRÜCHER, 1996 apud MARINESCU, 2007).

2.6 Técnicas de aplicação do fluido de corte

A técnica de aplicação de fluido de corte mais empregada industrialmente é a convencional (conhecida também como abundante ou jorro), na qual são empregadas elevadas vazões de fluido que podem chegar a 300 L/min (1 800 L/h) mais especificamente para processos de retificação (NETO, 2013). Porém, esta técnica apresenta alguns desafios, sendo que o principal é relativo à manutenção, tratamento e descarte destes fluidos. Esses fluidos possuem em sua composição diversos componentes químicos que, além de serem danosos ao meio ambiente, podem contaminar os operadores e causar diversos problemas de saúde, principalmente respiratórios.

Outro fator relevante, que diz respeito ao emprego de grandes quantidades de fluido, são os elevados custos envolvidos desde armazenamento, bombeamento, filtros, perda com arraste, dentre outros. Neste sentido, pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o objetivo de substituir a forma convencional de aplicação de fluido por técnica que alie menor quantidade de fluido sem perda da função de refrigeração dele, que, como já comentado, é imprescindível para evitar os danos de origem térmica. Exemplos de pesquisas desenvolvidas nos últimos anos neste sentido são os trabalhos de: Ruzzi et al. (2016); Zhang et al. (2016); Bianchi et al. (2017); Mello (2015); Oliveira (2017).

E uma alternativa que vem sendo empregada desde meados da década de 1990 em processos de usinagem é a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), que consiste na aplicação de uma mistura formada por ar pressurizado em conjunto com uma pequena quantidade de fluido de corte (em geral inferior a 250 mL/h) (WALKER, 2013; MARINESCU et al., 2007). E já desde o início do século XXI várias pesquisas começaram a ser desenvolvidas com o uso desta técnica em processos de retificação e com resultados satisfatórios para a maioria dos casos, principalmente no que diz respeito à sua propriedade de lubrificação que se sobressai em relação à refrigeração. Alguns resultados destas pesquisas são comentados a seguir.

Pesquisas recentes em retificação com emprego da técnica MQL foram desenvolvidas por alguns pesquisadores, como Barczak; Batoko; Morgan (2010), Tawakoli et al. (2011), Hadad e Sadeghi (2012). No trabalho desenvolvido por Barczak; Batoko; Morgan (2010) os autores avaliaram o desempenho da condição de lubri-refrigeração MQL na retificação plana tangencial com rebolo de óxido de alumínio de três aços diferentes (EN8, M2 e EN31) e observaram que a MQL apresentou resultados comparáveis e em determinadas condições

superiores em relação à convencional, sendo estes resultados referentes aos menores esforços de corte e melhor acabamento superficial obtidos por meio da condição MQL. O óleo da técnica MQL em geral favorece a lubrificação da interface rebolo peça e reduz o atrito e, com isso, os esforços de corte. Tawakoli et al. (2011) testaram diferentes fluidos de corte aplicados pela as técnicas MQL (contendo óleo e somente água) e convencional com diferentes vazões no processo de retificação de mergulho do aço SAE 52100 com rebolos de Al_2O_3 e de CBN e perceberam que não houve diferença entre os resultados de acabamento e forças de corte em função da técnica empregadas. Os resultados obtidos por eles são mostrados nas Figuras 2.14 e 2.15, respectivamente. Conforme apresentado pode ser observado, no geral, tanto para os valores de rugosidade quanto para as forças de corte, o emprego do “MQL óleo 1” foi o responsável pela geração dos menores valores, o que os autores atribuíram a maior viscosidade deste fluido, que por sua vez implica em melhor propriedade lubrificante, dentre todos os óleos avaliados.

Já Rabiei et al. (2014) avaliaram a eficiência de fluido de corte aplicado via a técnica MQL com vazão de 120 ml/h na retificação de mergulho de diferentes tipos de aços, dentre eles o aço rápido e 100Cr6 (equivalente ao aço SAE 52100) com rebolo de óxido de alumínio e constataram que a condição de lubri-refrigeração MQL resultou no menores valores de força e de rugosidade, independente do material testado em comparação com a condição de lubri-refrigeração convencional.

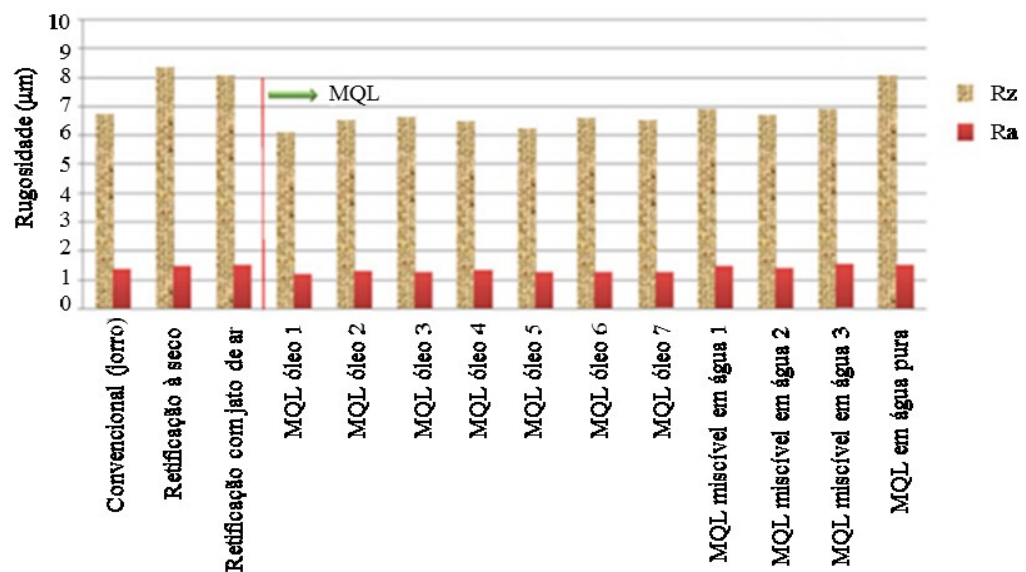


Figura 2.14 - Rugosidade do aço SAE 52100 após retificação de mergulho com rebolo de Al_2O_3 (89A60I11V217) (adaptado de TAWAKOLI et al., 2011).

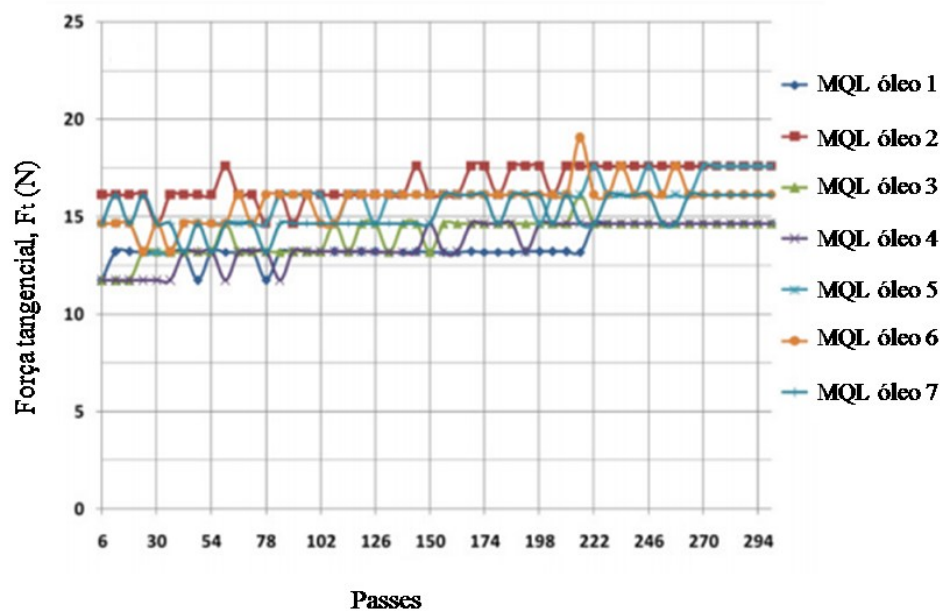


Figura 2.15 - Força normal de retificação do aço SAE 52100 utilizando rebolo de Al_2O_3 (89A60I11V217) (adaptado de TAWAKOLI et al., 2011).

Silva et al. (2007) realizaram a retificação do aço ABNT 4340 com rebolo de óxido de alumínio em diferentes condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e a seco) e relataram que o emprego da condição MQL resultou nos menores valores de rugosidade e nas maiores tensões residuais compressivas, o que é benéfico por aumentar a resistência à fadiga e vida útil do componente. Outro trabalho desenvolvido por Silva et al. (2013), também empregando a técnica MQL com diferentes vazões de fluido, em comparação com ensaios realizados a seco e com a condição de lubri-refrigeração convencional, os autores também constaram a melhor eficiência da técnica MQL na maioria das condições testadas em termos de menores resultados de rugosidade e desgaste diametral do rebolo, comparado com a técnica convencional.

Apesar destes benefícios já consolidados na literatura sobre a utilização da condição de lubri-refrigeração MQL tradicional em retificação, pesquisas também tem mostrado que esta condição também apresenta limitações quanto à função refrigeração com relação à condição de lubri-refrigeração convencional. Uma destas pesquisas refere-se ao trabalho de Hadad et al. (2011). Estes autores investigaram as temperaturas desenvolvidas no processo por meio de um termopar na retificação superficial de mergulho do aço endurecido 100Cr6 (SAE 52100) com rebolos de óxido de alumínio e de CBN em diferentes condições de lubri-

refrigeração (a seco, MQL e fluido em abundância) e observaram a menor eficiência da técnica MQL, como é mostrado na Figura 2.16. Os valores de temperatura desenvolvidos durante o processo empregando a técnica MQL só foram menores em comparação com o processo realizado a seco, sendo que os valores obtidos com a técnica convencional foram aproximadamente 50% menores em relação ao MQL. Essa discrepância dos valores de temperatura foi maior ainda quando realizado o processo com rebolo de CBN.

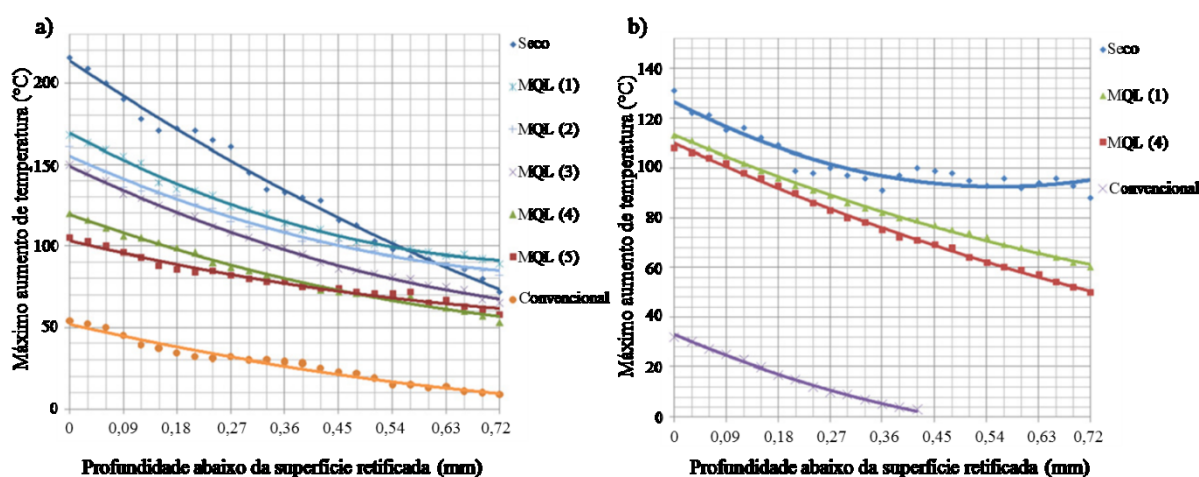


Figura 2.16 - Aumento máximo da temperatura em relação à profundidade z na retificação de mergulho com: a) rebolo de Al_2O_3 ; b) rebolo de CBN (adaptado de HADAD et al., 2011).

Hadad e Sadeghi (2012) também realizaram uma análise térmica durante retificação superficial de mergulho com rebolos de óxido de alumínio e CBN do aço endurecido 100Cr6 (SAE 52100) em diferentes condições de lubri-refrigeração e, assim como demonstrado por Hadad et al. (2011), eles observaram que os valores de temperatura obtidos durante o processo empregando a técnica MQL foram superiores aos encontrados após a usinagem com a técnica convencional, confirmando, portanto, a ineficiência desta técnica com relação à refrigeração do sistema na usinagem do aço SAE 52100.

Outras pesquisas vêm sendo desenvolvidas com o intuito de aprimorar a condição de lubri-refrigeração MQL, como, por exemplo, pela adição de um bocal para limpeza do rebolo (RUZZI et al., 2016; BIANCHI et al., 2017; BIANCHI et al., 2018). Ruzzi et al. (2016) realizaram a retificação cilíndrica de mergulho do aço AISI 4340 com rebolo de CBN em diferentes condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL convencional e MQL com sistema de limpeza do rebolo), incluindo ensaios realizados com a adição de água ao fluido de corte aplicado via a técnica MQL. Os autores observaram que o emprego da condição MQL

com água e com sistema de limpeza do rebolo resultou em melhoria do acabamento das peças, similares até à condição convencional. Bianchi et al. (2017) e Bianchi et al. (2018) também utilizaram o mesmo sistema de limpeza do rebolo em conjunto com a técnica MQL e observaram significativa melhoria do processo, principalmente em termos de redução dos valores de rugosidade, desgaste do rebolo e de potência de corte.

2.7 Partículas sólidas adicionadas em fluidos de corte para retificação

Conforme demonstrado por diversos estudos, a condição de lubri-refrigeração MQL vem sendo estudada como uma substituta da condição convencional por empregar uma pequena quantidade de fluido de corte, porém esta técnica ainda não tem se mostrado tão eficiente em relação à refrigeração. Neste sentido, vários trabalhos na literatura têm relatado melhorias nas propriedades de fluidos de corte convencionais, por exemplo, o aumento da condutividade térmica que aumenta a eficiência na refrigeração, pela adição de partículas sólidas que são dispersas neles, tais como o grafite em pó, nanotubos de carbono, grafeno, alumina (Al_2O_3) e bissulfeto de molibdênio (WANG et al., 2016; HUANG; LIU; WU, 2016; ZHANG et al., 2016; 2012; MELLO, 2015; OLIVEIRA, 2017). E o destaque em operação de retificação tem sido para as partículas de multicamadas de grafeno, que vem sendo bastante estudadas em diversas áreas, como na usinagem, principalmente devido às suas ótimas propriedades térmicas (elevada condutividade térmica: $> 3000 \text{ W/mK}$), além de ser um bom condutor elétrico (RENTERIA et al., 2014). Além disso, o grafeno multicamadas, que é composto por camadas de átomos de carbono (> 10) (LEE e RHEE, 2013) e derivado do grafite, também atua na região de corte, durante a usinagem, como lubrificante sólido, proporcionando redução do atrito e, assim, facilitando a remoção de material e reduzindo a geração de calor no processo (LIN, WANG e CHEN, 2010). Diversos estudos têm mostrado que o grafeno tem sido empregado em concentrações na faixa 0,05% a 0,5% em peso (SAMUEL et al., 2011; CHU et al., 2013; PAVAN et al., 2017; OLIVEIRA, 2017). A seguir serão apresentados alguns dos trabalhos da literatura que descrevem o uso de lubrificantes ou partículas sólidas e seus resultados para a retificação e outros processos de usinagem, além de pesquisas relacionadas à análise das propriedades destas partículas.

Alberts; Kalaitzidou; Melkote (2009) avaliaram a influência da concentração de nanopartículas de grafite (com dimensões entre $1 \mu\text{m}$ e $15 \mu\text{m}$ e concentrações em peso entre

0,5% e 2%) adicionadas ao fluido de corte na retificação de aço ferramenta D-2 (62 HRC) com rebolo de óxido de alumínio na rugosidade e força de corte. Os autores observaram que a combinação entre partículas de diâmetro maior (15 μm) e concentração média de grafite foi mais eficiente na redução das forças de retificação e da rugosidade.

Samuel et al. (2011) analisaram a influência da adição de grafeno (concentração de 0,1%, 0,2% e 0,5% em peso) e nanotubos de carbono (concentração de 0,5% em peso) dispersos no fluido de corte, com relação ao fluido de corte base (sem a presença destas partículas sólidas), no microfresamento do aço ABNT 1018. Uma análise das tendências das forças de corte, temperaturas do processo, além da capacidade de molhabilidade, condutividade térmica e viscosidade cinemática dos fluidos de corte, mostrou o grafeno como um aditivo superior sobre os nanotubos de carbono, sendo que o maior valor de concentração de grafeno (0,5%) apresentou os melhores resultados.

No trabalho de Kalita et al. (2012), os autores analisaram o efeito da adição de partículas de MoS_2 ao fluido de corte (nanofluidos) na retificação com diferentes concentrações em peso (2% e 8%), e aplicados via a técnica MQL à uma vazão de 150 mL/h e via a condição de lubri-refrigeração convencional, do ferro fundido e do aço EN 24 com rebolo de óxido de alumínio. Ao compararem as duas técnicas de aplicação, os autores relataram que os ensaios com nanofluidos aplicados via a técnica MQL melhoraram a eficiência do processo de retificação pelo fato de terem reduzido o consumo de energia, as perdas por atrito na região de contato entre o rebolo e a peça e o desgaste da ferramenta. E a eficiência ainda foi maior quando concentração de nanopartículas aumentou.

Chu et al. (2013) avaliaram a adição de partículas de grafeno em diferentes concentrações (que variaram de 0,05% a 0,15% em peso) em um fluido de corte à base de canola em microusinagem e constataram que as propriedades de refrigeração e lubrificação do fluido de corte foram melhoradas, independente das concentrações testadas. Em relação à refrigeração, ela foi tanto melhor quanto maior a concentração devido ao fato do aumento da concentração acarretar na elevação da condutividade térmica do fluido de corte. Os autores também afirmaram que a adição do grafeno resultou em menor rugosidade da superfície da peça, contudo o valor aumentou com a concentração das partículas. Este comportamento, segundo os autores, pode ser explicado devido à presença de detritos das partículas de grafeno na região usinada ou mudanças na dinâmica do corte pela construção de arestas na zona de corte.

Silva et al. (2015) realizaram ensaios testando multicamadas de grafeno adicionadas em fluido de corte de base vegetal que foi aplicado via a técnica MQL na retificação plana tangencial de aço ABNT VP 100 com rebolo de óxido de alumínio em diferentes condições de corte. Eles avaliaram a rugosidade e microdureza das peças e relataram que, após compararem os resultados com ensaios o fluido de corte sem grafeno aplicado via a condição de lubri-refrigeração convencional e com a condição MQL sem grafeno, que a presença do grafeno resultou em rugosidade mais uniforme e na menor variação de microdureza abaixo da superfície da peça.

Em um trabalho desenvolvido por Mello (2015) em retificação da liga Ti-6Al-4V com rebolo de carbeto de silício, o autor analisou o comportamento de partículas de grafeno (proporção de 60 mg de grafeno para 200 ml de fluido de corte) dispersas em fluido de corte (sintético de base vegetal) aplicado pela condição de lubri-refrigeração MQL (vazão de 240 mL/h), que o autor nomeou de MQL + grafeno, em diversas condições de corte. Em seguida ele comparou os resultados de acabamento, microdureza e potência elétrica obtidos com esta condição de lubri-refrigeração e com a condição convencional, além do MQL sem grafeno, e relatou, dentre os principais resultados, que a usinagem com fluido contendo grafeno proporcionou menor rugosidade e menor variação de microdureza abaixo da superfície, como também exigiu menor potência elétrica do motor do rebolo.

Zhang et al. (2016) avaliaram a influência, com relação à refrigeração do sistema, da adição de partículas de bissulfeto de molibdênio (MoS_2) em diversos tipos de óleo (parafina, palma, colza e soja) com concentração de 2% em volume, empregando a técnica de aplicação MQL (vazão igual a 50 mL/h). Para esta análise, foram realizados ensaios de retificação plana com rebolo WA80H12V no aço 1045 empregando $V_s = 30$ m/s, $V_w = 3$ m/min e $a_e = 10$ μm , além de ser avaliada também diferentes condições de lubri-refrigeração. Os autores constataram que, para um mesmo tipo de fluido, aqueles contendo partículas sólidas resultaram nas menores forças, coeficiente de atrito, energia específica (Figura 2.17). Além disto, o óleo de palma com partículas de MoS_2 , aplicado via a condição de lubri-refrigeração MQL, resultou no menor pico de temperatura dentre todas as outras condições de lubri-refrigeração, inclusive em relação à condição convencional.

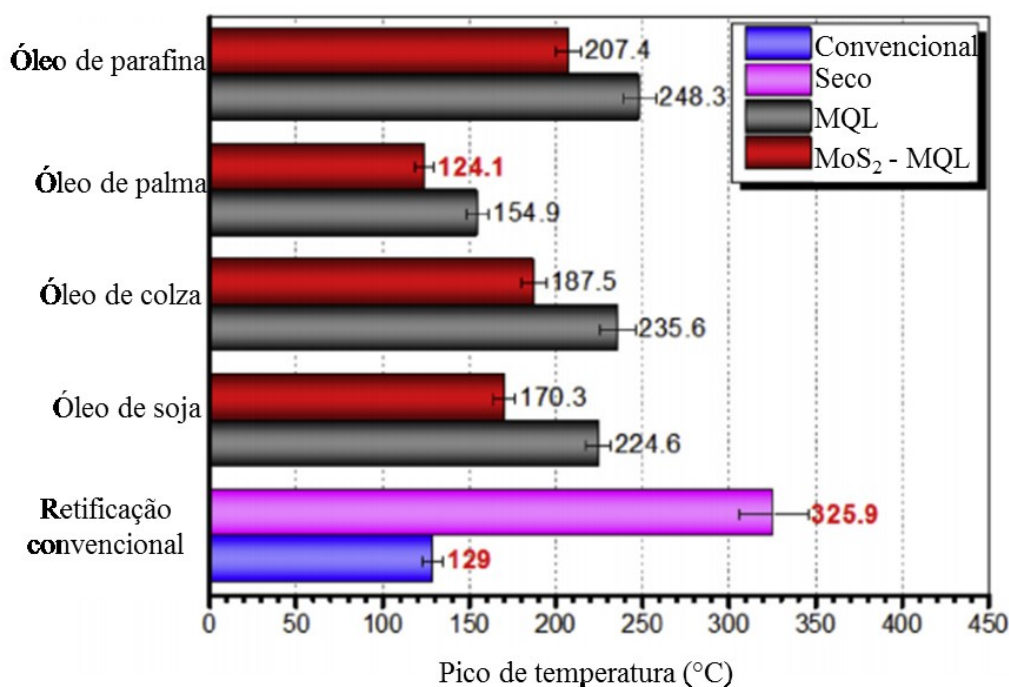


Figura 2.17 - Resultados de temperatura da peça sob diferentes condições de lubri-refrigeração (adaptado de ZHANG et al., 2016).

Wang et al. (2016) avaliaram as propriedades lubrificantes de diferentes nanofluidos (MoS_2 , SiO_2 , Al_2O_3 , ZrO_2 , nanotubos de carbono e diamante, com 6% em peso de massa de nanopartículas) em comparação com a condição de lubri-refrigeração convencional, através da retificação plana da liga de níquel GH4169 empregando $V_s = 30$ m/s, $V_w = 3$ m/min e $a_c = 10$ μm . Os autores relataram que os nanofluidos apresentaram as melhores propriedades de lubrificação, em comparação com a condição convencional, com destaque para o nanofluido contendo Al_2O_3 que foi considerado o mais eficiente. Em outro trabalho, Wang et al. (2017) compararam as propriedades lubrificantes de diferentes nanofluidos (concentração de 2% em volume) de base de óleo vegetal aplicados pela a técnica MQL com vazão de 50 mL/h durante ensaios tribológicos e de retificação e notaram que as propriedades lubrificantes dos fluidos foram melhoradas ao utilizar as nanopartículas. Os autores atribuíram a superioridade das propriedades lubrificantes dos nanofluidos ao tribofilme formado nas regiões desgastadas, sendo este responsável por reduzir o atrito entre as partes em contato.

Zhang et al. (2014) avaliaram a influência do emprego de partículas de MoS_2 em diferentes tipos de fluido (parafina líquida e óleos de soja, palma e colza) aplicados por meio da condição MQL na retificação do aço 1045 em comparação com as condições de lubri-refrigeração convencional, MQL apenas com óleo ou tradicional (sem água) e a seco. Os

autores constaram que a adição destas partículas, em comparação com os ensaios utilizando MQL apenas com óleo ou tradicional contribuiu para a redução dos valores de rugosidade, energia específica, coeficiente de atrito e força de corte, sendo que o óleo de palma com partículas de MoS_2 apresentou resultados comparáveis à condição convencional.

Em recente pesquisa desenvolvida por Molaie; Akbari; Movahhedy (2016), os autores analisaram a eficiência de partículas de MoS_2 adicionadas a dois tipos de óleo (parafina e soja) aplicados pela técnica MQL na retificação plana do aço SAE 52100, empregando $V_s = 35 \text{ m/s}$, $V_w = 5 \text{ m/min}$ e $a_e = 15 \text{ }\mu\text{m}$. Eles comparam os resultados com aqueles gerados nos ensaios com a condição de lubri-refrigeração convencional, MQL tradicional (com apenas óleo e sem partículas) e a seco. E como resultados eles relataram que a força de retificação e rugosidade foram reduzidas quando se empregou a técnica MQL com óleo contendo partículas sólidas em comparação com os resultados empregando a técnica de MQL tradicional, sendo que alguns ensaios realizados com estas partículas apresentaram resultados similares com relação à condição convencional.

Li et al. (2016) realizaram a retificação de uma liga de níquel empregando fluido de corte à base de óleo de palma com concentrações de nanotubos de carbono entre 0,5% e 4% em fração de volume via a técnica MQL com os parâmetros de corte $V_s = 30 \text{ m/s}$, $V_w = 3 \text{ m/min}$ e $a_e = 10 \text{ }\mu\text{m}$. Os autores observaram que as concentrações de 2% e 2,5% resultaram nos menores valores de força e temperatura do processo, e além disso, ocorreu o aumento da condutividade térmica e viscosidade com o aumento da concentração de nanotubos de carbono.

Pavan et al. (2017) investigaram o comportamento da adição de partículas de grafeno (em diferentes concentrações e área superficial) ao fluido de corte, aplicado por meio da condição MQL, na retificação com rebolo de óxido de alumínio do Inconel 718. Os resultados obtidos por meio do emprego do grafeno em comparação com os ensaios realizados a seco e MQL sem adição destas partículas, mostraram a influência positiva da adição de grafeno, reduzindo as forças de corte, rugosidade e temperaturas desenvolvidas no processo, além do aumento da condutividade térmica e viscosidade do fluido de corte com a concentração.

Oliveira (2017) avaliou a influência da adição de partículas de grafeno multicamadas (0,05% e 0,10% em peso) ao fluido de corte de base vegetal na integridade do Inconel 718, sendo o processo empregado a retificação plana com rebolo de carbeto de silício, e ensaios com as condições de lubri-refrigeração convencional, MQL tradicional (sem grafeno) e a seco realizados para comparação. Os ensaios empregando o fluido contendo o grafeno em menor

concentração resultou nos menores valores de rugosidade, variação de microdureza e potência elétrica dentre todas as condições de lubri-refrigeração avaliadas.

Alguns trabalhos envolvendo a análise de condutividade térmica e coeficiente de transferência de calor do grafeno em fluidos de corte também tem se tornado cada vez mais comuns, o que tem ajudado a compreender o comportamento e melhorar o desempenho deles nos processos de usinagem em geral. Alguns dos trabalhos foram os desenvolvidos por Shaikh; Lafdi; Ponnappan (2007), Yu et al. (2011) e Agromayor et al. (2016), mas é importante ressaltar que há outros vários disponíveis na literatura específica. Shaikh; Lafdi; Ponnappan (2007) investigaram a influência da adição de três tipos de nanopartículas (nanotubos de carbono, grafite esfoliado e nanofibras tratadas termicamente) ao óleo PAO (poli-alfa-olefina) na condutividade térmica. Eles confirmaram a tendência semelhante à observada na literatura para nanofluidos, com um aumento de aproximadamente 161% da condutividade térmica obtido com a adição dos nanotubos de carbono em relação ao fluido sem nanopartículas. Yu et al. (2011) também constaram em seus estudos que a condutividade térmica do fluido base contendo grafeno aumentou significativamente (cerca de 86% com grafeno contendo 5,0% em volume) em relação ao fluido sem presença de grafeno. Para estes autores, a estrutura 2D e a rigidez do grafeno e do óxido de grafeno ajudam a aumentar a condutividade térmica do nanofluido. A condutividade térmica do óxido de grafeno e do grafeno no fluido foi estimada em $\sim 4,9$ W/m.K e $6,8$ W/m.K, respectivamente. Agromayor et al. (2016) avaliaram os coeficientes de convecção, as quedas de pressão e as propriedades termofísicas de fluidos a base água contendo nanopartículas de grafeno em diferentes concentrações (0,25%, 0,50%, 0,75% e 1,00% em peso) em diferentes condições operacionais e os resultados foram comparados com os de água sem nanopartículas. Os autores constataram que a condutividade térmica e coeficiente de transferência de calor por convecção aumentaram em torno de 12% (1% em peso) e 32% (0,5% em peso), respectivamente.

2.8 Integridade superficial de aço SAE 52100 após a retificação

O processo de retificação é empregado com o intuito de conferir aos componentes usinados a combinação entre ótimo acabamento e tolerâncias dimensionais e geométricas estreitas. Desta forma, após o emprego do processo, é necessária a medição de alguns parâmetros com o intuito de verificar se o componente produzido está dentro das

especificações requeridas. Por isso, nesta seção serão abordadas as principais variáveis que são normalmente utilizadas para avaliar a qualidade e integridade superficial de componentes retificados.

2.8.1 Rugosidade

A rugosidade é o parâmetro mais comumente utilizado para avaliar rapidamente a qualidade de uma superfície de componente após o processo de retificação. Arencibia (2017) define a rugosidade como sendo um desvio de forma microgeométrico formado por saliências e reentrâncias, e a medição desta pode ser efetuada por diferentes aparelhos eletrônicos como rugosímetros, interferômetros e perfilômetros. Diversos parâmetros de rugosidade podem ser empregados para a avaliação de uma superfície conforme mostrado na Tabela 2.5 por Machado et al. (2009) de acordo com a Norma ISO 4287 (2002).

Tabela 2.5 - 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	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.

Dentre todos estes parâmetros apresentados, o que é normalmente mais encontrado na literatura para representar a rugosidade é o R_a . Este parâmetro é dado pela Equação 2.7 e representado na Figura 2.18.

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (2.7)$$

Onde: l é o comprimento de amostragem e y é a ordenada do perfil a partir da linha de centro.

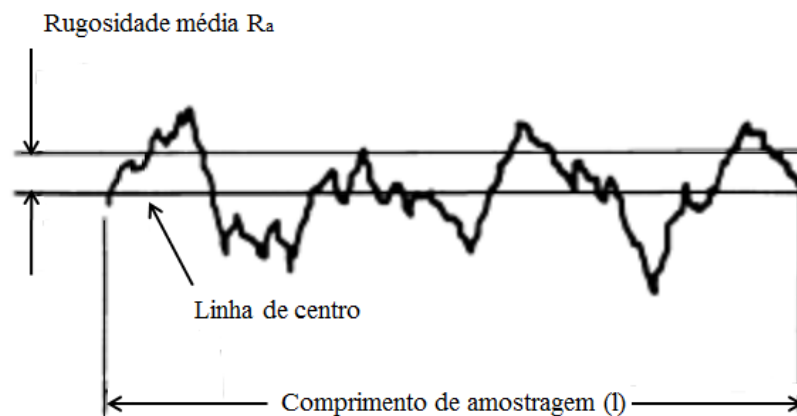


Figura 2.18 – Esquema do perfil da rugosidade (adaptado de ASM HANDBOOK, 2004).

Diversas variáveis de entrada influenciam na rugosidade do componente retificado, sendo os principais a velocidade da peça e a penetração de trabalho. Conforme discutido na secção 2.3.5, ambos estes parâmetros influenciam diretamente na espessura equivalente de corte (h_{eq}), ou seja, o aumento tanto qualquer um deles acarreta no aumento de h_{eq} . Desta forma, conforme discutido por Rowe (2014), o aumento da espessura equivalente de corte ocasiona o aumento da tensão sobre os grãos abrasivos, influenciando negativamente o acabamento (rugosidade) do material usinado. Dentre as diversas variáveis do processo, o parâmetro a_e é o que mais influencia diretamente nos resultados de rugosidade, sendo propostas formas teóricas de cálculo ($R_t = \sqrt{a_e}$) por diversos autores (MARINESCU et al., 2004; MALKIN e GUO, 2008), sendo que Paiva et al. (2017) observaram significativo aumento da rugosidade com a penetração de trabalho. Paiva (2016) relatou que os valores de rugosidade R_a situaram-se entre $0,16 \mu m$ e $0,29 \mu m$ enquanto o parâmetro R_z foi de $1,36 \mu m$ a $2,02 \mu m$ ao analisar a integridade superficial do aço SAE 52100 após retificação plana tangencial com rebolo de óxido de alumínio sob diferentes condições de lubri-refrigeração (a seco e ensaios com fluido de base vegetal aplicado através da condição convencional estando

o fluido a diferentes temperaturas). Silva et al. (2013) observaram que os valores de R_a encontrados para aço AISI 4340 (50-52 HRC) foram entre 0,5 μm e 1,0 μm após a retificação cilíndrica de mergulho com rebolo de Al_2O_3 em diferentes condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e a seco). Gomes (2016) encontrou valores de R_a entre 0,1 μm e 0,5 μm ao realizar ensaios de retificação plana tangencial do aço SAE 52100 com carbeto de silício e fluido sintético aplicado via a técnica convencional. Eles ainda constataram que o aumento de a_e e V_w resultou no aumento de rugosidade.

Além dos parâmetros de rugosidade, a textura da superfície usinada é normalmente utilizada para avaliar a integridade do componente. E como exemplo são citados os resultados obtidos por Tawakoli et al. (2009), quem realizaram a retificação cilíndrica de mergulho do aço 100Cr6 (SAE 52100) com rebolo de óxido de alumínio e sob diferentes condições de corte e lubri-refrigeração (convencional, MQL e a seco). Os autores observaram que a condição de lubri-refrigeração e os parâmetros de corte influenciaram nas superfícies produzidas, sendo a combinação entre a condição MQL e o menor valor de penetração de trabalho foram os responsáveis pela geração das superfícies de melhor textura, inclusive com sulcos mais uniformes nas peças deixados pelos abrasivos (Figura 2.19).

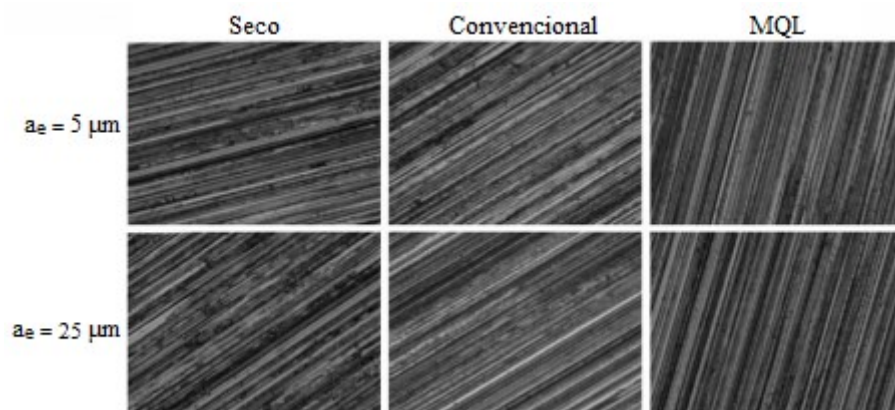


Figura 2.19 - Textura superficial do aço 100Cr6 sob diferentes condições de lubri-refrigeração e de corte (adaptado de TAWAKOLI et al., 2009).

2.8.2 Alterações sub-superficiais

Na avaliação da integridade superficial também é considerada as alterações sub-superficiais, sendo que, segundo Machado et al. (2009), estas são de natureza mecânica ou metalúrgica. Alguns exemplos de alterações de natureza mecânica são deformação plástica,

rebarbas, alterações de microdureza, trincas e tensões residuais, enquanto recristalização e transformação de fases são exemplos de alterações de natureza metalúrgica. E um parâmetro bastante empregado para esta análise é a microdureza abaixo da superfície, que está relacionada a testes nos quais as endentações estáticas são ocasionadas por cargas inferiores a 1 kgf (9,8 N) (CIMM, 2017).

A avaliação de microdureza está associada à microestrutura das camadas abaixo da superfície que foram afetadas pela parcela de calor que é direcionada para a peça durante a retificação. O calor gerado pode ocasionar alterações microestruturais resultando na alteração de dureza em regiões que variam desde a superfície até camadas bem próximas, cerca de 100 μm (MARINESCU et al., 2004). Diversos trabalhos empregando o aço SAE 52100 mostram a elevada susceptibilidade deste material a danos térmicos. Castro et al. (2016) realizaram retificação cilíndrica do aço ABNT 52100 com rebolo de carbeto de silício sob diferentes condições de lubri-refrigeração e constataram os danos à peça aumentam (em termos de maior variação dos valores de microdureza) conforme menor for a capacidade refrigerante do fluido de corte ou técnica de aplicação utilizados. Além disso, estes autores também comentaram que sobre a baixa estabilidade química entre o carbeto de silício e o ferro presente no aço usinado a altas temperaturas. Paiva (2016), por meio de análise microestrutural, verificou a presença de danos térmicos no aço SAE 52100 ao identificar a formação de martensita não revenida após a retificação plana tangencial com rebolo de óxido de alumínio e empregando diferentes condições de lubri-refrigeração. Ele ainda relatou que a condição de lubri-refrigeração exerce grande influência sobre a severidade dos danos térmicos. Mao et al. (2011) também constaram danos térmicos ao aço AISI 52100 após serem submetidos à retificação plana tangencial empregando $V_s = 40 \text{ m/s}$, $V_w = 18 \text{ m/min}$ e $a_e = 20 \mu\text{m}$. Além da análise microestrutural, os autores realizaram a medição de microdureza, comprovando assim a alteração microestrutural devido a variação destes valores próximos à superfície. A presença de danos térmicos no aço SAE 52100, após retificação centerless com diferentes condições de lubri-refrigeração, foi observada por Neto et al. (2016), onde a condição de lubri-refrigeração mostrou influência significativa sobre a ocorrência de alterações microestruturais dos componentes retificados.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Neste capítulo serão descritos os procedimentos adotados para a realização dos ensaios experimentais, assim como os parâmetros de corte, equipamentos, materiais e acessórios empregados neste trabalho. Na Figura 3.1 é mostrado um fluxograma contendo as principais informações necessárias no desenvolvimento desta pesquisa.

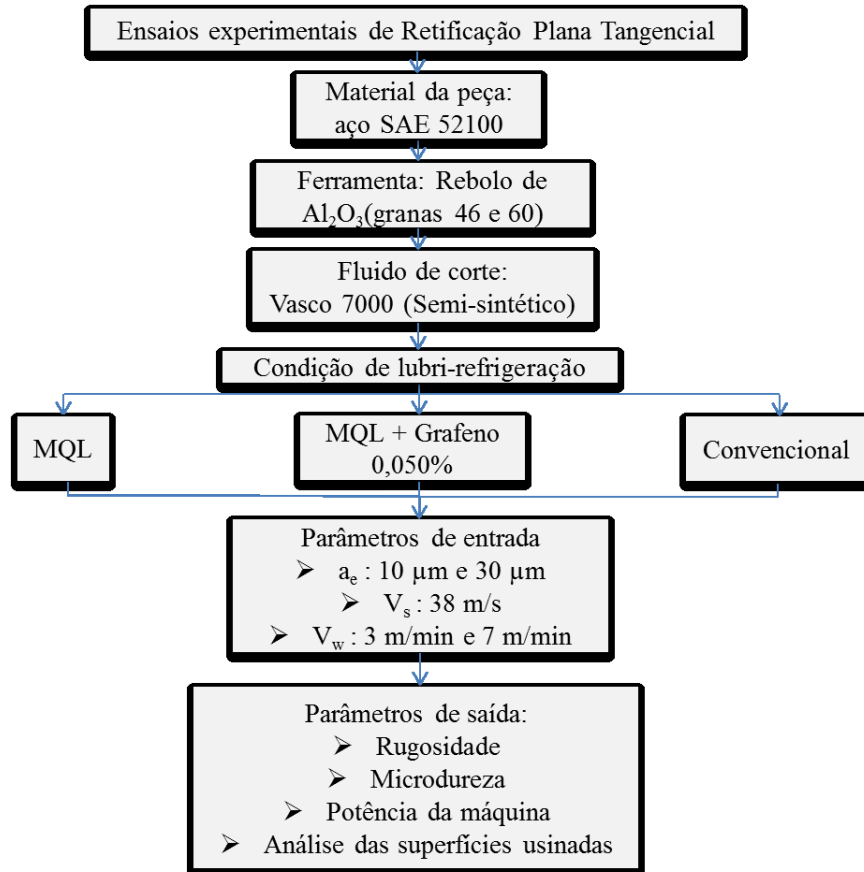


Figura 3.1 - Fluxograma com as principais informações referentes aos ensaios experimentais.

3.1 Material da peça

O material da peça utilizado nos ensaios de retificação foi o aço SAE 52100 (equivalente ao aço DIN 100Cr6) que foi previamente submetido aos processos de têmpera e revenimento. As dimensões das amostras deste aço são 16 mm de diâmetro por 17 mm de comprimento. A principal característica deste material é sua estrutura martensítica na superfície que confere uma dureza de $(60 \pm 2 \text{ HRC})$. A sua principal aplicação é na fabricação de componentes de rolamentos na indústria em geral, dentre outras.

Antes dos ensaios foi feita análise metalográfica e verificação da composição química deste material por meio de um Sistema de Energia Dispersiva (EDS) vinculado ao Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. As amostras foram previamente lixadas com lixas de grana mesh 80, 120, 220, 320, 600, 800, 1000 e 1200, nesta sequência, e em seguida foram polidas com pasta de alumina com granulometria de $0,1 \mu\text{m}$. Para a análise da microestrutura, a amostra foi atacada quimicamente por 30 segundos com reagente composto por 1g de ácido pícrico, 100 ml de álcool etílico e 5 ml de ácido clorídrico. As imagens foram adquiridas por meio de um Microscópio Ótico Olympus, modelo BX51, presente no Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM – UFU). Os resultados e imagens obtidas são mostrados na Tabela 3.1 e Figura 3.2, respectivamente.

Tabela 3.1 - Composição química do aço SAE 52100 obtida por meio de um Sistema de Energia Dispersiva (EDS).

Elemento	%
Carbono	1,03
Silício	0,207
Enxofre	0,042
Cromo	1,526
Manganês	0,120
Ferro	97,074

Da Figura 3.2 observa-se que os pontos brancos presentes na microestrutura são os carbonetos que compõe o material.

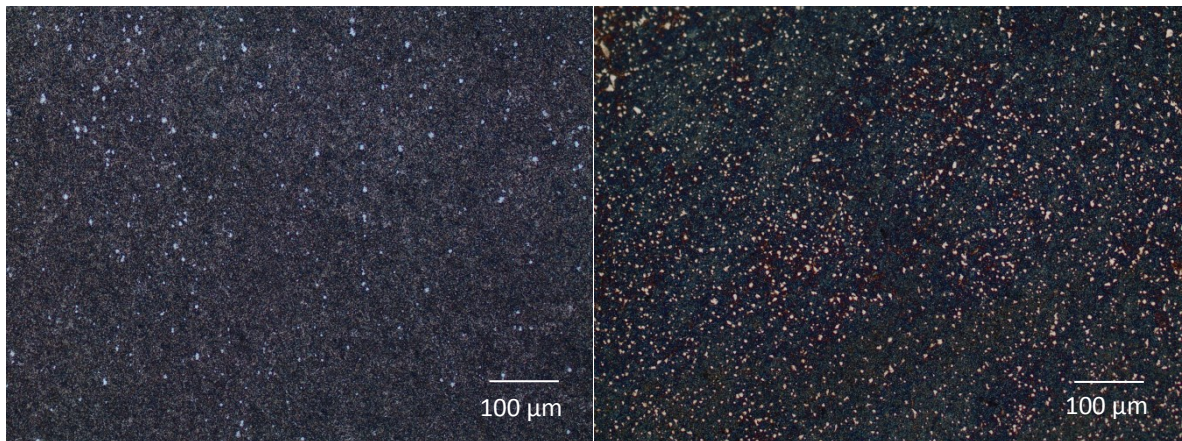


Figura 3.2 - Microestrutura do aço SAE 52100.

A microdureza do aço SAE 52100 foi avaliada utilizando um microdurômetro da marca SHIMADZU HMV-2 series com penetrador Vickers. Para a realização da medição deste parâmetro foi empregada uma carga de 490,3 mN ($HV_{0,05}$) e tempo de aplicação de 15 segundos. A microdureza média encontrada para este material (medida no centro da peça) foi de 737 HV.

3.2 Máquina-ferramenta

Nos ensaios experimentais de retificação foi empregada uma retificadora plana tangencial (Figura 3.3), modelo P36, do fabricante Mello S. A., com rotação constante de 2 400 rpm, potência de 3 HP e resolução no eixo que contém o nônio que regula a penetração do rebolo igual a 5 μm . Este é um equipamento semi-automático e possui uma mesa magnética que pode realizar movimentos transversal e longitudinal.

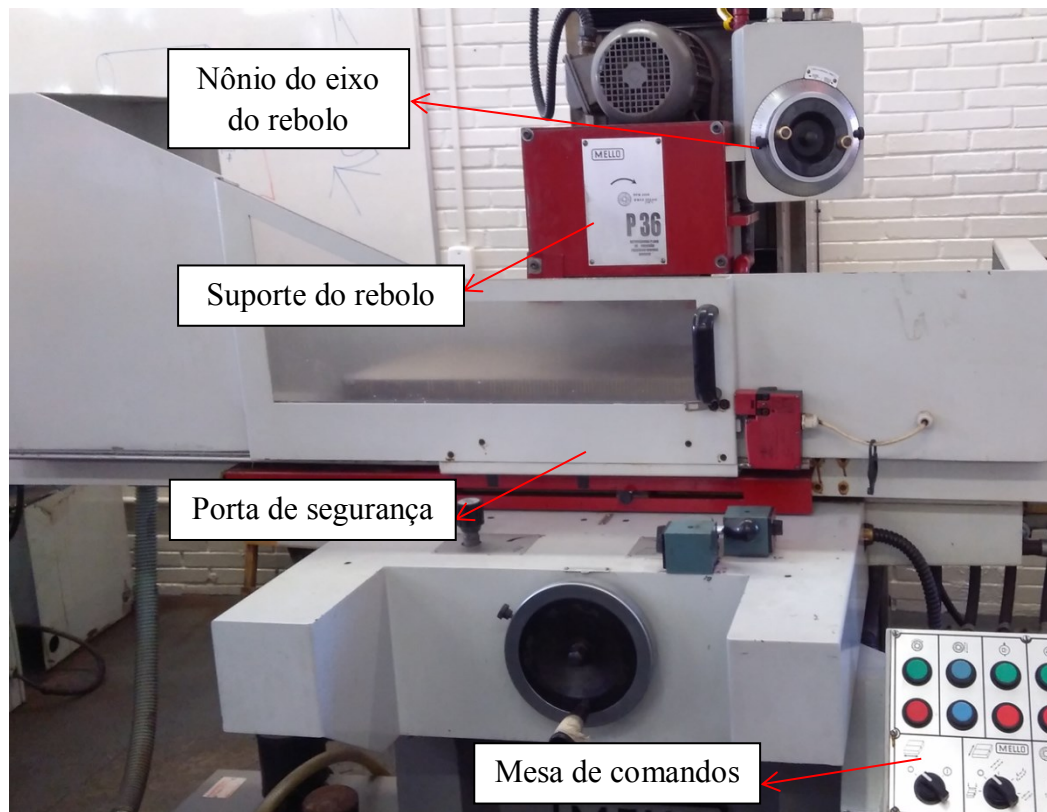


Figura 3.3 - Retificadora plana tangencial Mello.

3.3 Rebolos abrasivos

No desenvolvimento desta pesquisa foram utilizados dois rebolos de óxido de alumínio (Al_2O_3) do tipo reto com diferentes granulometrias, sendo um rebolo com grana mesh 46 e outro com grana mesh 60, possuindo especificações AA46K6V e AA60K6V, respectivamente. Essas ferramentas de corte são do fabricante NORTON – SAINT GOBAIN ABRASIVES e possuem dimensões de 303 mm x 25 mm x 76 mm.

Ambos os rebolos abrasivos foram balanceados previamente ao posicionamento na máquina-ferramenta com o intuito de evitar vibrações durante o processo.

3.4 Parâmetros de corte e planejamento dos ensaios

O desenvolvimento dos ensaios de retificação ocorreu de acordo com as informações contidas na Tabela 3.2, sendo os parâmetros de corte testados: dois valores de velocidade da

peça (V_w) (3 m/min e 7 m/min), valores comumente empregados na retificação de aços endurecidos, e dois valores de penetração de trabalho (10 μm e 30 μm). Estes parâmetros foram selecionados com base em ensaios preliminares. Além disto, foram avaliados como a granulometria do rebolo (grana 46 e 60) e as condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL + grafeno). Somente para algumas condições mais críticas de corte os ensaios tiveram réplicas. O critério de parada dos ensaios foi uma profundidade de corte de 30 μm , ou seja, três passes de 10 μm para a_e de 10 μm e um passe para a_e de 30 μm , totalizando um volume de material removido de 6,03 mm³.

Tabela 3.2 - Resumo dos parâmetros de corte empregados na realização dos ensaios.

Tipo de operação	Retificação plana tangencial
Rebolos	AA46K6V e AA60K6V
Corpos de prova	Aço endurecido SAE 52100 (62 HRC) 16 mm de diâmetro e 17 mm de altura
Fluido de corte	Semissintético de base vegetal – VASCO 7000
Condições de lubri-refrigeração	1) Convencional (abundância): 9 L/min (540 000 mL/h) 2) MQL apenas com óleo (sem grafeno) à vazão de 150 mL/h; Pressão do ar comprimido: 0,3 MPa 3) MQL + grafeno multicamadas (0,05% em peso; com base na pesquisa de Oliveira, 2017) à vazão de 150 mL/h; e pressão do ar comprimido: 0,3 Mpa
Velocidade de corte (V_s) [m/s]	38
Velocidade da peça (V_w) [m/min]	3,0 e 7,0
Penetração de trabalho (a_e) [μm]	10 e 30
Variáveis de saída	Rugosidade (R_a e R_z) Imagens da superfície retificada Microdureza Potência da máquina

Antes da realização de cada ensaio, o rebolo foi dressado por meio de um dressador de ponta única de diamante do fabricante Winter e com raio de ponta de 0,3 mm, fixado em um suporte, sendo que os parâmetros de dressagem empregados foram tempo de dressagem de 10 segundos, grau de recobrimento do rebolo $U_d = 5$ e largura do dressador $b_d = 0,3175$ mm. Como ocorre naturalmente o desgaste da ponta de diamante do dressador e a alteração no raio afeta aos parâmetros geométricos da dressagem, o grau de recobrimento foi mantido em todos os ensaios por meio do ajuste da profundidade de dressagem (a_d), de forma que o valor de b_d fosse mantido constante. Para isso a cada ciclo de dressagem o dressador foi levado ao estéreo

microscópio Olympus SZ61 (Figura 3.4) para a medição do raio de ponta do dressador. Em todos os ensaios realizados o rebolo entrou em cheio sobre a peça, ou seja, toda quantidade de material da peça era removida de uma única vez, e em seguida retornava sobre a mesma retirando mais uma pequena parcela de material, material este proveniente de uma recuperação elástica. Esta operação é também conhecida como “*spark-out*”.

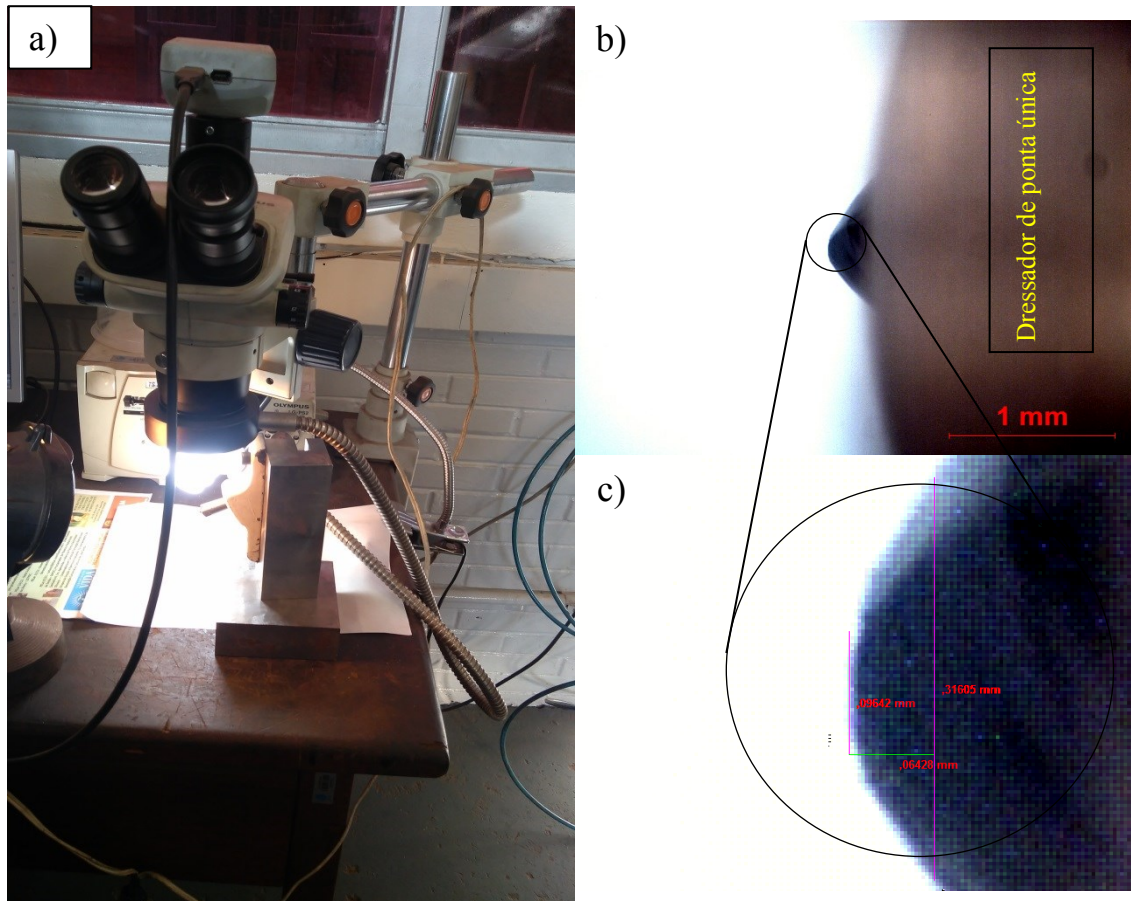


Figura 3.4 - Foto do sistema utilizado para medição das dimensões do raio de ponta do dressador, onde: a) montagem e posicionamento do dressador na base do estéreo microscópio; b) imagem da ponta do dressador; c) ampliação da ponta de diamante.

Devido às pequenas dimensões das peças a serem usinadas, foi necessário utilizar uma morsa de precisão para fixação destes componentes antes de seu posicionamento sobre a mesa magnética da máquina-ferramenta, como demonstrado na Figura 3.5. Antes dos ensaios de retificação definitivos, as duas faces das amostras a peça foram devidamente preparadas na mesma retificadora e com rebolo de óxido de alumínio AA46K6V para a remoção de camada de oxidação. Para esta preparação foram utilizadas condições de retificação brandas:

velocidade da mesa de 5 m/min, penetração de trabalho igual a 5 μm (o menor valor que pode se empregar com base na resolução do eixo do motor que faz girar o rebolo) e fluido de corte em abundância. Em seguida o rebolo era dressado e dado início aos ensaios definitivos.



Figura 3.5 - Posicionamento da peça de aço SAE 52100 em uma morsa de precisão sobre a mesa magnética da máquina-ferramenta.

3.5 Fluidos de corte e técnicas de aplicação

O tipo de fluido de corte empregado na realização foi o semissintético à base de óleo éster vegetal e miscível em água, Vasco 7000, com densidade igual a 0,98 g/cm³ e ponto de fulgor de 134°C, da fabricante Blaser Swisslube. Para a técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) utilizou-se óleo sem água, enquanto que para a convencional foi adicionada ao óleo água na proporção 1 parte de água para 19 partes de óleo (BRIX $\approx$ 4%, verificado com frequência com o auxílio de um refratômetro N1, ATAGO). A aplicação deste fluido via a técnica convencional se deu através do bocal original da retificadora a vazão de 9 L/min. A distância do bocal à superfície de corte do rebolo na direção horizontal foi igual a 95 mm e que se manteve constante em todos os ensaios.

Para os ensaios de retificação empregando a condição de lubri-refrigeração MQL (MQL tradicional (apenas com óleo e ar comprimido) e MQL + grafeno) foram utilizadas a mesma vazão de óleo 150 mL/h, pressão de ar comprimido igual a 0,3 Mpa e a velocidade do jato de fluido foi de 3,8 m/s. A montagem do sistema para aplicação de fluido via a técnica MQL é mostrada na Figura 3.6a). O fluido de corte utilizado para estes ensaios foi o mesmo da técnica convencional (VASCO 7000) a fim de eliminar a influência do fator tipo de fluido de corte nos resultados. Tanto nos ensaios via a técnica MQL apenas com óleo quanto nos ensaios com a técnica MQL com óleo contendo partículas de grafeno, o fluido foi aplicado por meio de um bocal desenvolvido por Guimarães (2016) e também empregado no trabalho de Mello (2015) para esta finalidade (Figura 3.6b). Antes de cada ensaio, o recipiente com fluido contendo grafeno era colocado em uma cuba ultrassônica com o intuito de dispersar as partículas sólidas que estivessem decantadas no fluido de corte, possibilitando desta forma o emprego de uma mistura homogênea.

Quanto às partículas sólidas de multicamadas de grafeno, selecionou-se a concentração de 0,05% em peso, com base no trabalho desenvolvido por Oliveira (2017). A autora avaliou duas concentrações de grafeno multicamadas (0,05% e 0,10%) na retificação plana tangencial do Inconel 718 em condições de corte semelhantes a este projeto e verificou que os melhores resultados obtidos (rugosidade, microdureza, potência) foram obtidos ao empregar a concentração de 0,05%. Elas foram 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.

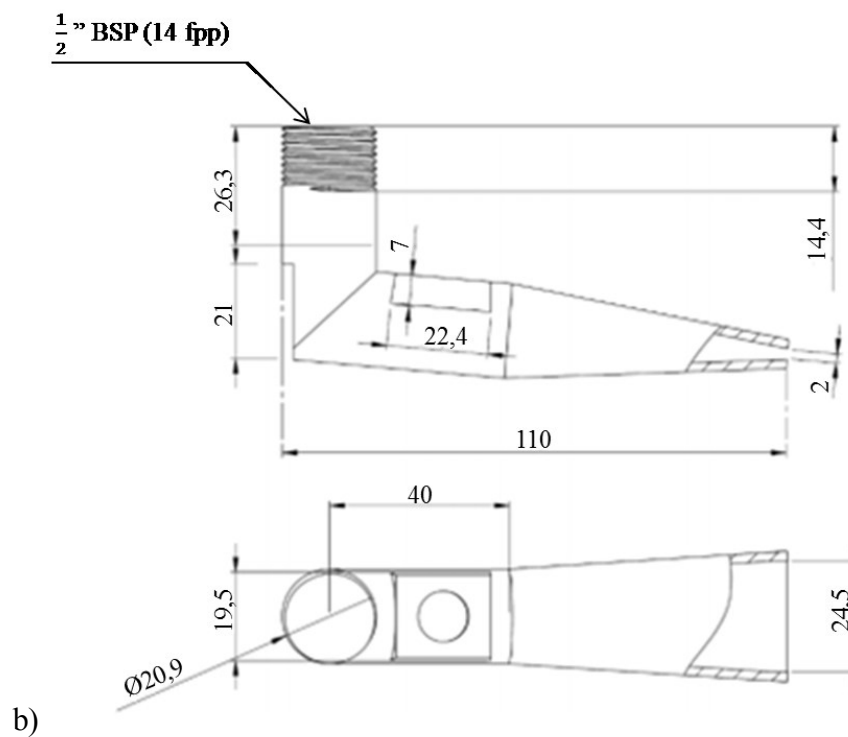
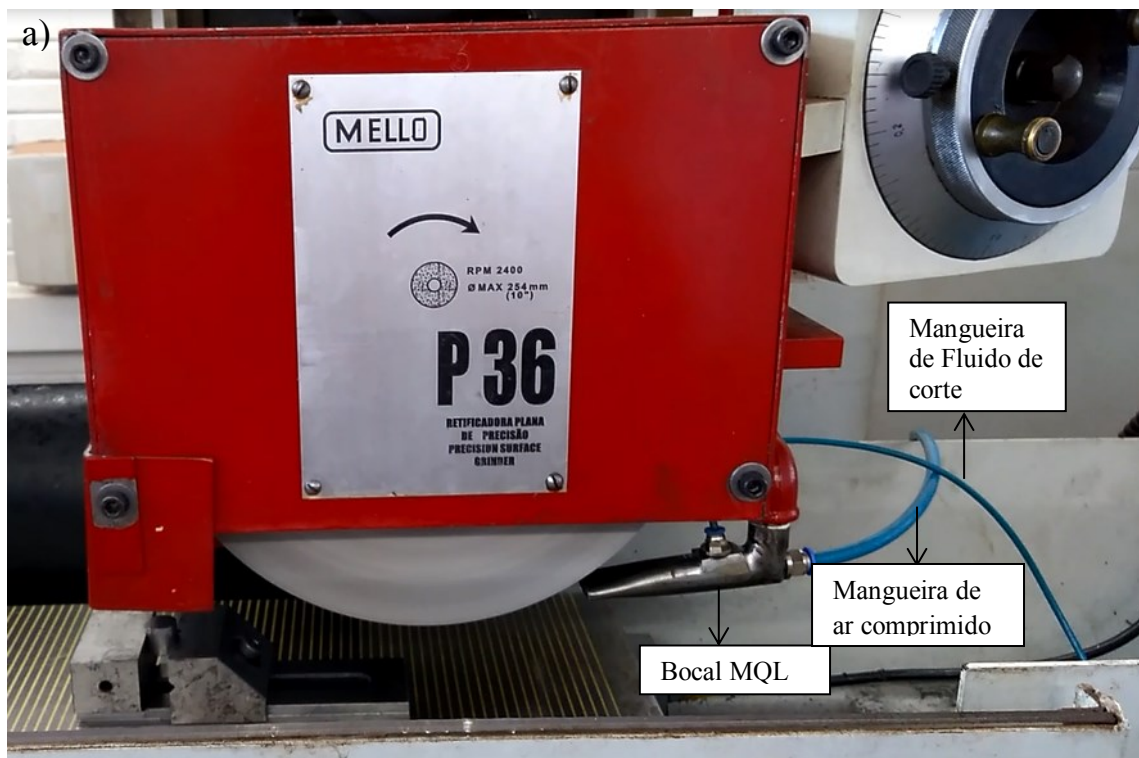


Figura 3.6 - a) Montagem do sistema para aplicação de fluido com e sem grafeno via a técnica MQL, b) detalhes do bocal para a técnica MQL (adaptado de Mello, 2015).

A regulagem da vazão de fluido para a técnica MQL foi possível por meio de uma placa de arduino programada e o controle foi feito através de um potenciômetro. Este sistema (Figura 3.7) consiste em uma bomba de seringa que foi também desenvolvida no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) em conjunto com o Laboratório de Usinagem Convencional (LUC) e utilizada nos trabalhos de Mello (2015) e Guimarães (2016), e em cujos trabalhos podem ser obtidos maiores detalhes do sistema.

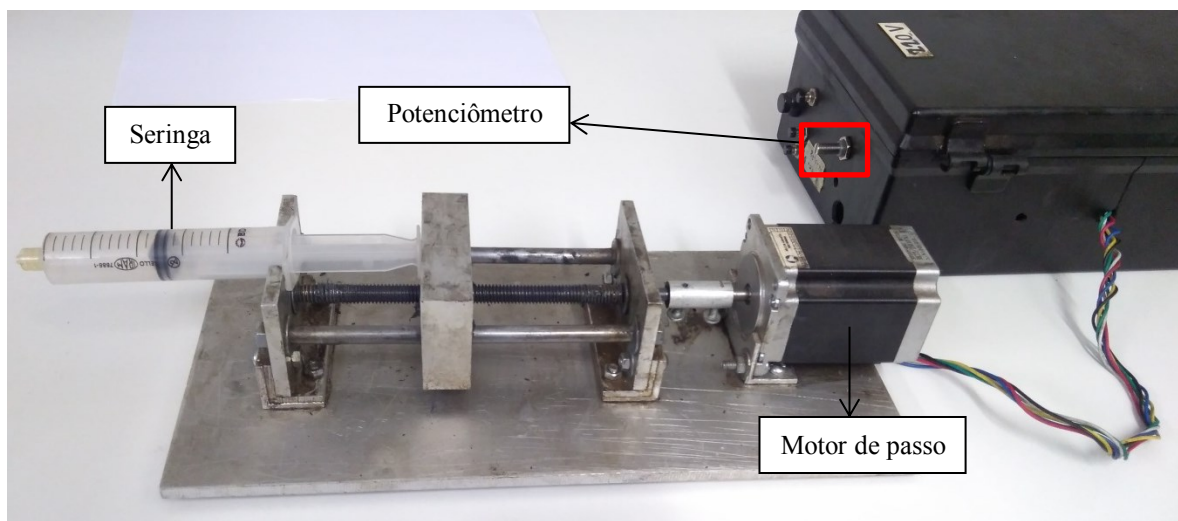


Figura 7 – Sistema de controle de vazão de MQL.

3.6 Variáveis de saída analisadas

A seguir serão apresentadas as variáveis de saída empregadas na avaliação do componente usinado e os procedimentos de medição e monitoramento delas. Elas são rugosidade, análise das superfícies usinadas (MEV) e microdureza das peças usinadas, como também a potência de corte.

3.6.1 Rugosidade

Os parâmetros de rugosidade das peças retificadas foram mensurados por meio de um rugosímetro portátil do fabricante Taylor Hobson, modelo Surtronic S-100, com resolução de $0,01 \mu\text{m}$ no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD – UFU). Todas as medições foram realizadas sobre o desempenho, garantindo assim o paralelismo com a superfície de medição em condições controlada de temperatura e umidade. Foi empregado comprimento de

amostragem (cut-off) de 0,8 mm. Devido ao fato das duas superfícies da peça terem sido retificadas e, visando garantir melhor apoio e interferências de erro de posicionamento nas medições, as peças foram fixadas em uma morsa de precisão (Figura 3.8).

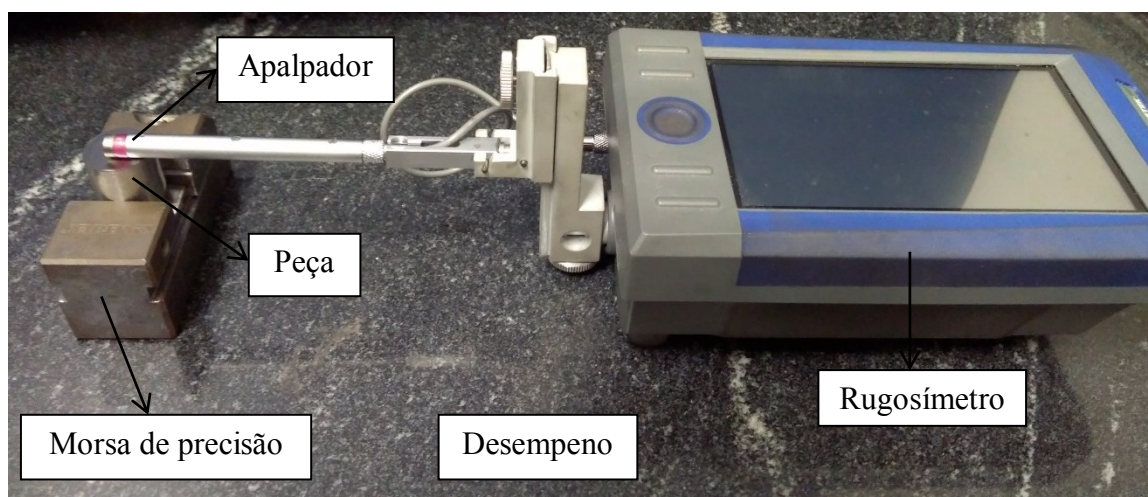


Figura 3.8 - Montagem da peça e posicionamento do rugosímetro para a medição de rugosidade.

Sobre cada superfície usinada foram realizadas cinco medições em regiões equidistantes de 2 mm, e todas perpendiculares à direção de corte (avanço longitudinal do rebolo). A cada medição foi gerado um arquivo digital contendo os valores dos diversos parâmetros relativos à rugosidade, sendo que nesta pesquisa, os avaliados foram a rugosidade aritmética média (R_a) e a altura média máxima do perfil (R_z).

3.6.2 Análise das superfícies usinadas

A análise das superfícies usinadas foi efetuada com o auxílio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), modelo TM3000, equipado com um Sistema de Energia Dispersiva (EDS), conforme mostrado na Figura 3.9 que se encontra no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da FEMEC-UFU. Como é muito comum, após a retificação, as peças apresentarem em sua superfície usinada cavacos, impurezas e até mesmo fluido de corte, elas foram submetidas à rigorosa limpeza com o auxílio de uma cuba ultrassônica e acetona pura. Antes de serem colocadas no equipamento, elas foram fixadas em uma morsa de precisão miniaturizada, sendo a justificativa para este procedimento já apresentada na seção 3.6.1. Desta forma, a utilização do MEV permitiu a avaliação de toda a superfície retificada e

identificação de qualquer alteração, sendo elas trincas, marcas e sulcos deixados pelos abrasivos, dentre outros.

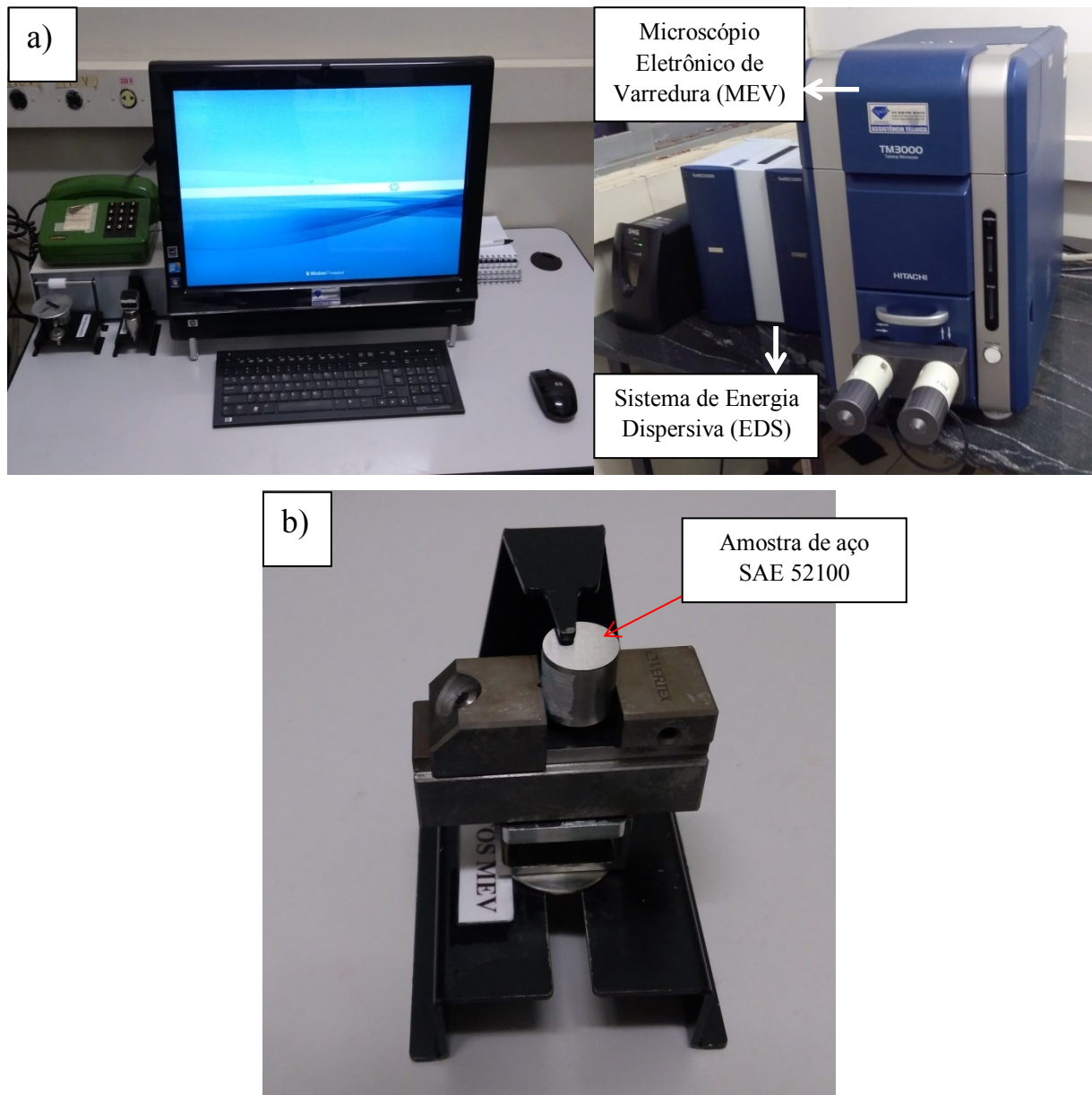


Figura 3.9 - a) Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) utilizado para obtenção das imagens das superfícies; b) fixação e posicionamento da peça na morsa de precisão miniaturizada.

3.6.3 Microdureza

Após os ensaios de retificação, as amostras cilíndricas do aço SAE 52100 foram embutidas em baquelite antes de passarem pelas etapas de lixamento, polimento e limpeza. Na

etapa de lixamento, devido às peças possuírem formato cilíndrico, inicialmente empregou-se uma lixa de grana mesh 80 para remoção de uma área lateral, segundo demonstrado na Figura 3.10, possibilitando desta forma a medição de microdureza sobre a área de material afetada termicamente. Após a retirada desta área, a região passou por lixamento utilizando lixas de carbeto de silício com diferentes granulometrias, na sequência grana mesh de 220, 320, 600, 800, 1000 e 1200. Em seguida, as peças passaram por polimento executado em uma máquina politriz cujo prato gira a 300 rpm e com uso de alumina com granulometria de 0,1 μm . A última etapa antes da medição de microdureza foi a limpeza da peça por meio de uma cuba ultrassônica. Para isso, a peça foi colocada em um bquer contendo acetona o suficiente para cobrir toda a peça. Esse recipiente foi levado à cuba contendo água e permaneceu lá por 180 segundos. Em seguida, procedeu-se com a etapa de secagem da peça por meio de ar comprimido.

As medições de microdureza foram realizadas em um microdurômetro da marca SHIMADZU HMV-2 series com penetrador Vickers pertencente ao Laboratório de Soldagem (LAPROSOLDA – UFU). Para a realização da medição deste parâmetro foi empregada uma carga de 490,3 mN ($HV_{0,05}$) e tempo de aplicação de 15 segundos, semelhante ao realizado para a medição de microdureza das amostras antes de serem retificadas (seção 3.1). O início das medições ocorreu a partir de 30 μm abaixo da superfície retificada com intervalos de 30 μm , conforme apresentado na Figura 3.10.

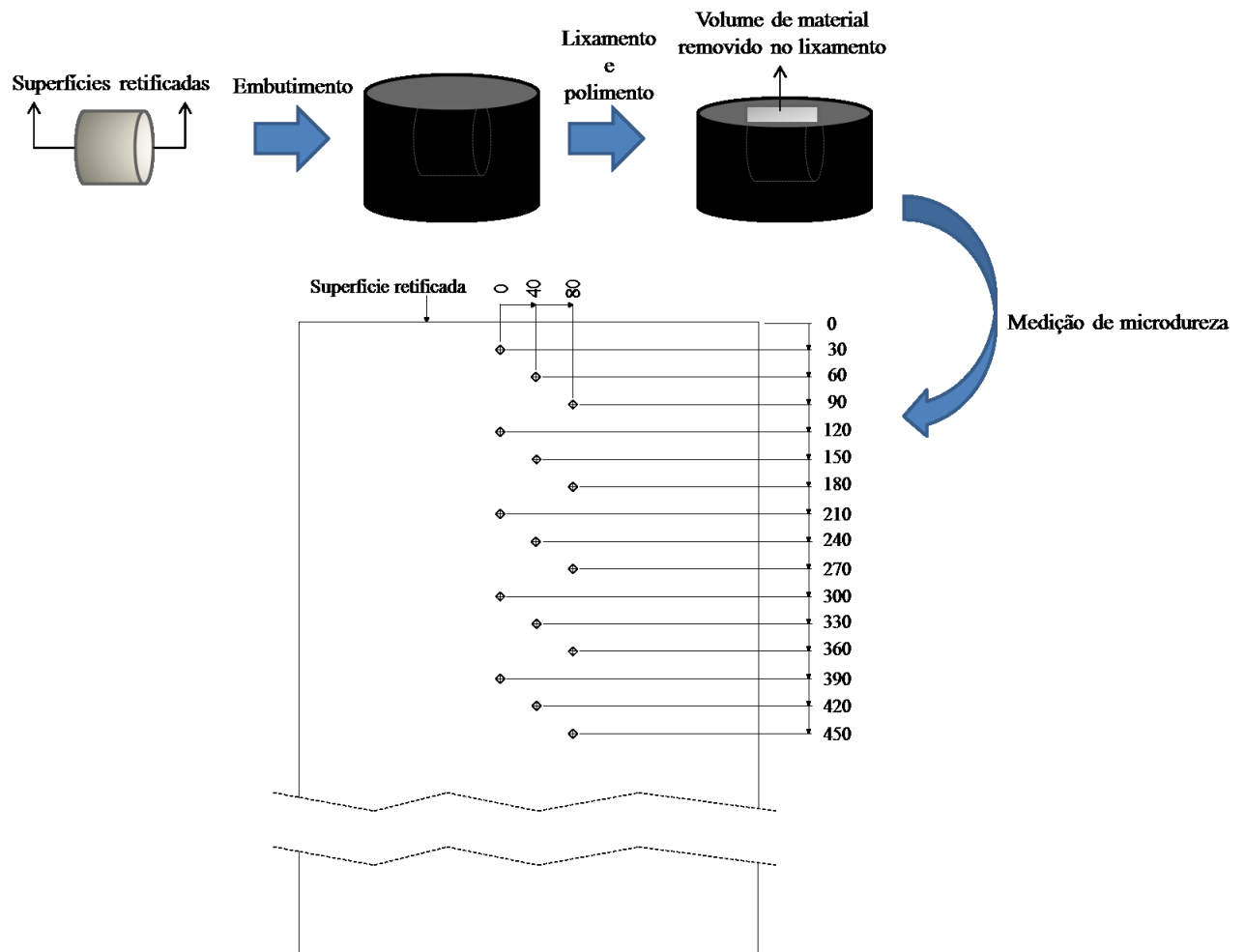


Figura 3.10 - Desenho esquemático mostrando as etapas de medição de microdureza (unidades em μm).

3.6.4 Potência de corte

A potência elétrica do motor de acionamento do eixo árvore do rebolo, aqui denominada por potência de corte, em cada ensaio foi obtida por meio dos valores de tensão elétrica e corrente elétrica que alimenta e circula no motor de indução trifásico (2,25 kW de potência nominal), monitorados por dois sensores de efeito hall em cada fase, um para a tensão elétrica e outro para a corrente elétrica.

O sistema de aquisição dos valores de tensão e corrente elétrica foi desenvolvido no LEPU em conjunto com LUC. O mesmo é conectado a um computador, sendo que na realização de cada ensaio ocorre a geração de um arquivo contendo três valores de tensão e três de corrente elétrica, obtendo desta forma a potência elétrica pelo produto da tensão e

corrente elétrica em cada fase. Maiores detalhes sobre o funcionamento e montagem deste sistema de monitoramento podem ser obtidos no trabalho de Guimaraes (2016).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Esta seção será destinada à apresentação dos resultados e discussão encontrados durante a retificação sob diferentes condições de corte e métodos de lubri-refrigeração do aço SAE 52100. As variáveis de saída analisadas nesta pesquisa foram a rugosidade e imagens das superfícies usinadas, a microdureza abaixo da superfície e potência de retificação.

4.1 Rugosidade

Nas Figuras 4.1 e 4.2 são apresentados os resultados referentes aos parâmetros de rugosidade R_a e R_z , respectivamente. No geral, ambos os parâmetros apresentaram comportamento semelhantes e aumentaram com a penetração de trabalho, conforme relatado na literatura. De acordo com Bianchi et al. (1997) o aumento da variável a_e ocasiona o aumento da quantidade de grãos abrasivos atuantes durante o processo e, conseqüentemente, no tempo de contato destes com a peça, e assim a porção de material retirada por cada abrasivo se torna menor, favorecendo a formação de cavacos com formato alongado e fino. Portanto, existe uma maior fração de atrito e riscamento entre os cavacos e a peça, ocasionando a elevação da temperatura na região de corte e deteriorando o acabamento da peça. Como pode ser observado, os ensaios realizados com penetração de trabalho de 30 μm apresentaram uma tendência mais uniforme em comparação com o emprego de $a_e=10\text{ }\mu\text{m}$, e, além disso, para o parâmetro R_a , em alguns ensaios o valor médio obtido com o emprego de $a_e=10\text{ }\mu\text{m}$ foi superior ao realizado empregando $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$. Uma possível explicação diz respeito à espessura mínima de corte. Ao empregar pequenos valores de penetração de

trabalho pode ocorrer de os grãos abrasivos apenas atritarem durante algumas voltas do rebolo, assim apenas deformando material sem de fato causar a remoção de cavaco, afetando negativamente a rugosidade do componente retificado.

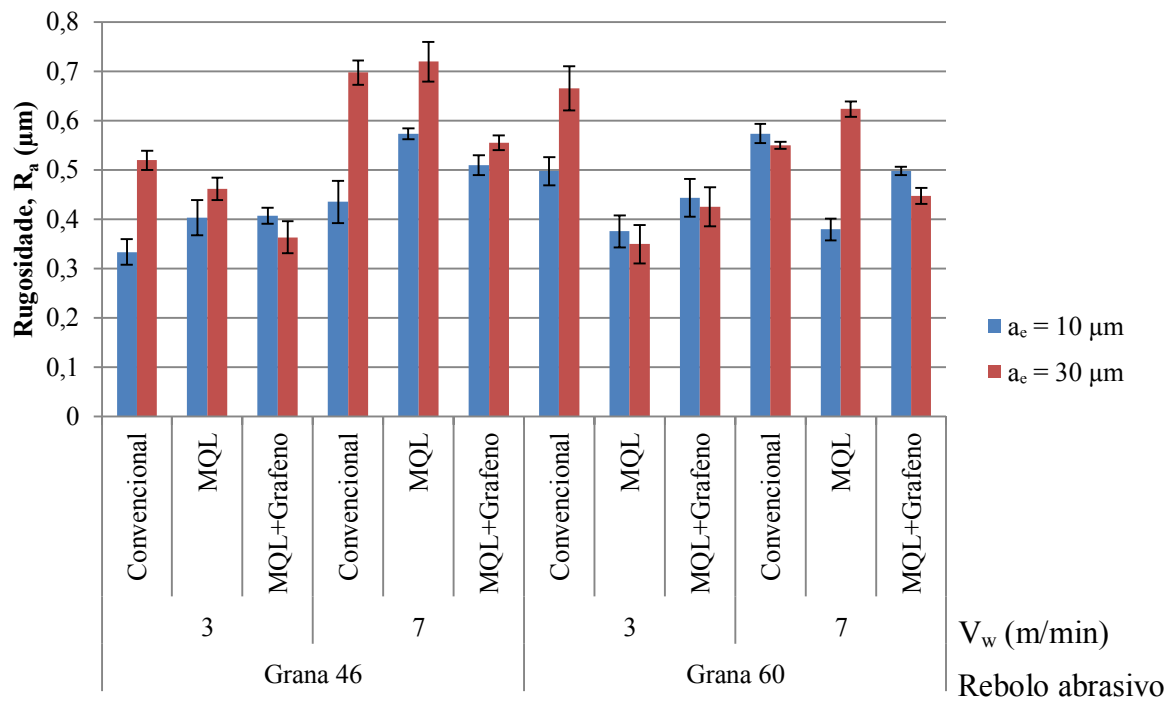


Figura 4.1 - Rugosidade média (R_a) em função da granulometria do rebolo abrasivo, penetração de trabalho (a_e) e velocidade da peça (V_w) para diferentes condições de lubri-refrigeração.

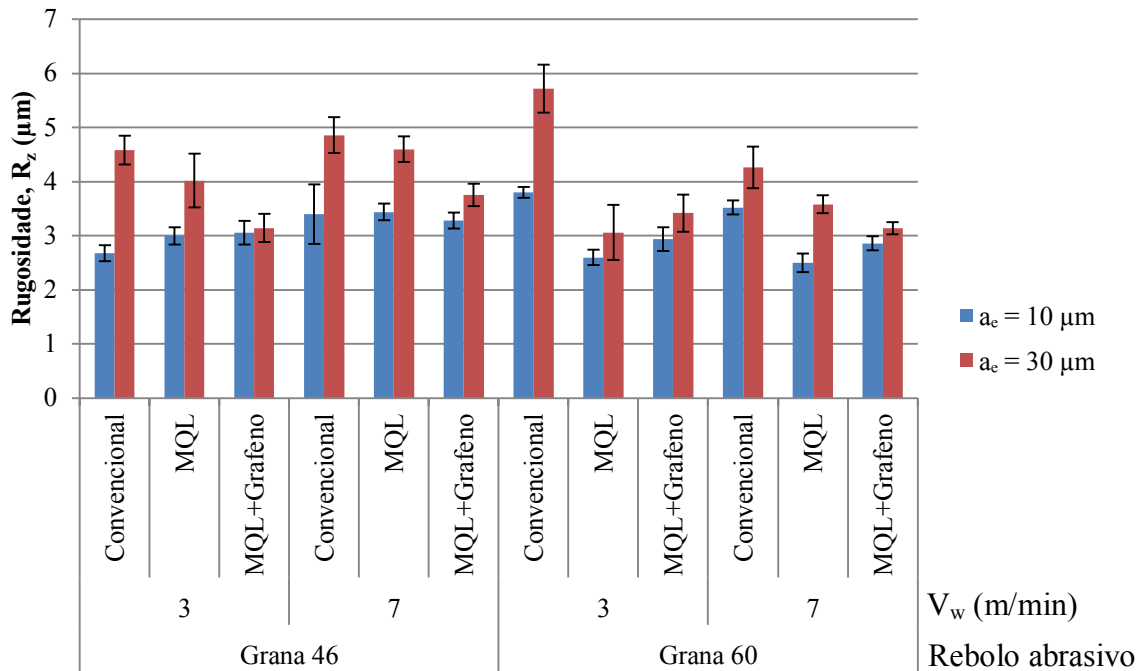


Figura 4.2 - Rugosidade R_z em função da granulometria do rebolo abrasivo, penetração de trabalho (a_c) e velocidade da peça (V_w) para diferentes condições de lubri-refrigeração.

Com relação à velocidade da peça, V_w , a influência deste parâmetro foi semelhante àquela da penetração de trabalho, em que o seu aumento resultou no aumento da rugosidade. Rowe (2014) explica esse fato com base na espessura equivalente de corte (h_{eq}). Conforme já discutido na secção 2.3.5 do Capítulo II (Revisão Bibliográfica), o parâmetro h_{eq} é diretamente proporcional às variáveis velocidade da peça e penetração de trabalho, sendo que o aumento de uma delas ou de ambas resulta na elevação da espessura equivalente de corte. Assim, o incremento de h_{eq} acarreta no aumento da tensão sobre os grãos abrasivos, e assim as forças de corte e a rugosidade da peça sofrem elevação.

Através dos gráficos das Figuras 4.1 e 4.2 também foi possível analisar a influência da granulometria dos abrasivos dos rebolos nos parâmetros de rugosidade R_a e R_z . No geral o aumento da grana mesh do rebolo, que equivale à redução nos tamanhos dos grãos abrasivos, resultou em uma redução dos valores médios de rugosidade para todas as condições de lubri-refrigeração avaliadas, conforme esperado. Segundo Klocke (2009), quando o rebolo possui grãos abrasivos menores, além de existir um menor espaçamento entre os grãos, o comprimento de contato entre abrasivos e peça é diminuído, as arestas de corte são menores e, com isso, menor quantidade de material é removida por grão. E como vantagem, menores

valores de rugosidade do componente são gerados (melhor acabamento), em relação ao uso de rebolos contendo grãos abrasivos maiores (menor grana mesh).

Tawakoli et al. (2009) realizaram a retificação de mergulho do aço 100Cr6 (SAE 52100) com rebolo de óxido de alumínio sob diferentes condições de corte (com velocidades da peça variando entre 2,5 m/min e 10 m/min e penetrações de trabalho na faixa de 5 μm a 25 μm) e de lubri-refrigeração (seco, MQL e convencional) e analisaram a influência destas condições na rugosidade da peça. Os autores relataram que a rugosidade aumentou com a penetração de trabalho e velocidade da peça, além do fato dos menores resultados terem sido obtidos através do emprego da condição MQL. E a melhor eficiência da técnica MQL foi atribuída à maior eficiência do óleo em lubrificar a interface rebolo/peça, reduzindo as forças de corte e facilitando a retirada de cavaco. Paiva et al. (2017) observaram o mesmo comportamento dos valores de rugosidade com a penetração de trabalho na retificação dos aços inoxidável VP80 (45 HRC) e VPATLAS (40 HRC) com rebolo de óxido de alumínio empregando diferentes condições de corte ($a_e = 5 \mu\text{m}$, 15 μm e 25 μm) e de lubri-refrigeração (fluido sintético com concentrações de 3% e 8%). Em outro trabalho desenvolvido por Tawakoli et al. (2011) foi analisada a influência da granulometria do rebolo de óxido de alumínio, granas mesh 36 e 60, na retificação de mergulho do aço 100Cr6 em diversas condições de lubri-refrigeração. Os autores relataram que a granulometria do rebolo exerceu grande influência no acabamento do componente usinado, e que o rebolo de menor granulometria resultou em menores valores de rugosidade, independente da condição de lubri-refrigeração empregada, resultado que os autores atribuíram à menor espessura de cavaco gerada pelos abrasivos menores.

Ao analisar a influência da condição de lubri-refrigeração nos parâmetros de rugosidade, em geral, nas condições que foram empregadas fluido de corte contendo partículas de grafeno multicamadas aplicado via a técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) foram registrados menores valores médios de rugosidade em relação à técnica convencional. Praticamente não se observou diferença em termos de acabamento entre as técnicas MQL tradicional e MQL + grafeno ao utilizar a menor velocidade da peça e menor a_e , ou seja, em condições mais brandas de usinagem, independente da granulometria testada (Figura 4.2). Contudo, quando foram empregadas condições mais severas de retificação, maiores V_w e a_e , a presença do grafeno resultou em menores valores de rugosidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira (2017) ao retificar o Inconel 718 em diversas condições e corte ($V_w = 10 \text{ m/min}$, $a_e = 20 \mu\text{m}$ e 40 μm) e diferentes técnicas de

lubrificação, incluindo a técnica MQL + grafeno. A autora atribuiu estes resultados ao aumento da viscosidade do fluido de corte com a adição destas partículas, que assim teve sua capacidade de lubrificação aumentada o que proporcionou melhoria das condições tribológicas entre rebolo e peça, consequentemente, reduzindo os valores de rugosidade.

O estudo do comportamento da eficiência da adição de partículas em fluidos de corte nos processos de retificação de aços com rebolo de óxido de alumínio também ocorreu em trabalho desenvolvido por Huang; Liu; Wu (2016), quem testaram nanotubos de carbono multicamadas ao fluido de corte (0,25% em peso) sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração. Ao compararem os resultados obtidos com a condição MQL + nanotubos de carbono com aqueles obtidos via a condição MQL sem partículas sólidas, os autores relataram que os menores valores de rugosidade foram obtidos na presença dos nanotubos de carbono pelo fato destas nanopartículas atuarem na melhoria da propriedade lubrificante do fluido de corte. Em outro trabalho com aplicação de partículas de grafeno dispersas em fluido de corte em retificação, Mello (2015) comparou os resultados de rugosidade da liga Ti-6Al-4V obtidos após o emprego de diferentes técnicas de lubri-refrigeração, MQL sem grafeno, MQL com grafeno e convencional e observou que a presença das partículas de grafeno favoreceu a queda nos valores de rugosidade em relação às outras condições de lubri-refrigeração. Wang et al. (2016) também testaram diferentes partículas sólidas adicionadas ao fluido de corte em comparação com a condição de lubri-refrigeração convencional e MQL sem partículas sólidas e observaram que menores valores de rugosidade após os ensaios com o fluido contendo grafeno, sendo a justificativa o aumento da propriedade lubrificante do fluido de corte, conforme observado em outros trabalhos apresentados nesta secção.

A fim de mensurar a diferença nos parâmetros de rugosidade analisados ao variar a penetração de trabalho de 10 μm para 30 μm e poder identificar alguma tendência, foi elaborada a Tabela 4.1 que apresenta os resultados obtidos para as diferentes condições de lubri-refrigeração, velocidades da peça e granulometrias mesh do rebolo.

Tabela 4.1 - Variação percentual dos parâmetros R_a e R_z ao aumentar a penetração de trabalho.

Condição de Lubri-refrigeração	Rebolo	Velocidade da peça (m/min)	Parâmetro de rugosidade	Variação percentual (%)
Convencional	Grana 46	3	R_a	55,7
			R_z	70,9
		7	R_a	60,1
			R_z	42,9
	Grana 60	3	R_a	33,7
			R_z	50,5
		7	R_a	-4,2
			R_z	21,0
MQL	Grana 46	3	R_a	14,4
			R_z	34
		7	R_a	25,4
			R_z	33,7
	Grana 60	3	R_a	-6,9
			R_z	17,7
		7	R_a	64,2
			R_z	43,2
MQL+Grafeno	Grana 46	3	R_a	-10,8
			R_z	2,6
		7	R_a	9,0
			R_z	14,6
	Grana 60	3	R_a	-4,0
			R_z	16,3
		7	R_a	-10,0
			R_z	9,8

Como pode ser observado através da Tabela 4.1, a condição de lubri-refrigeração MQL+Grafeno foi a que resultou em menor variação percentual dos valores obtidos enquanto a condição em que se usinou empregando a condição convencional de aplicação de fluido de corte foi a responsável por apresentar as maiores variações com o aumento da penetração de trabalho.

Com o intuito de melhorar a análise relativa ao efeito de cada variável de entrada (penetração de trabalho, velocidade da peça, grana mesh do rebolo e condição de lubri-refrigeração) sobre os parâmetros de rugosidade R_a e R_z , na Tabela 4.2 são apresentados os p-valores destas variáveis, obtidos por meio de uma análise de variância (ANOVA) realizada no software Excel 2016 e que são apresentados graficamente nas Figuras 4.3a a 4.3h. Os pontos apresentados nestas figuras indicam a média aritmética dos valores de rugosidade, sendo as barras de dispersão referentes a um intervalo de confiança de 95%. O p-valor tem como

função indicar se estas variáveis empregadas são significativas, quando o p-valor $< 0,05$ ou não, quando o p-valor $> 0,05$, para uma confiabilidade estatística de 95%, neste caso, para os valores de rugosidade.

Tabela 4.2 - Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z comparando as três condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL+Grafeno).

Rugosidade R_a	
Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,078364
Velocidade da peça (V_w)	0,011184
Grana do rebolo	0,785184
Condição de lubri-refrigeração	0,378825
$a_e \times V_w$	0,508903
$a_e \times$ grana do rebolo	0,505893
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,272868
$V_w \times$ grana do rebolo	0,161160
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,475479
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,279761
Rugosidade R_z	
Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,002047
Velocidade da peça (V_w)	0,767274
Grana do rebolo	0,542565
Condição de lubri-refrigeração	0,041092
$a_e \times V_w$	0,843731
$a_e \times$ grana do rebolo	0,730572
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,071556
$V_w \times$ grana do rebolo	0,265954
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,770951
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,212510

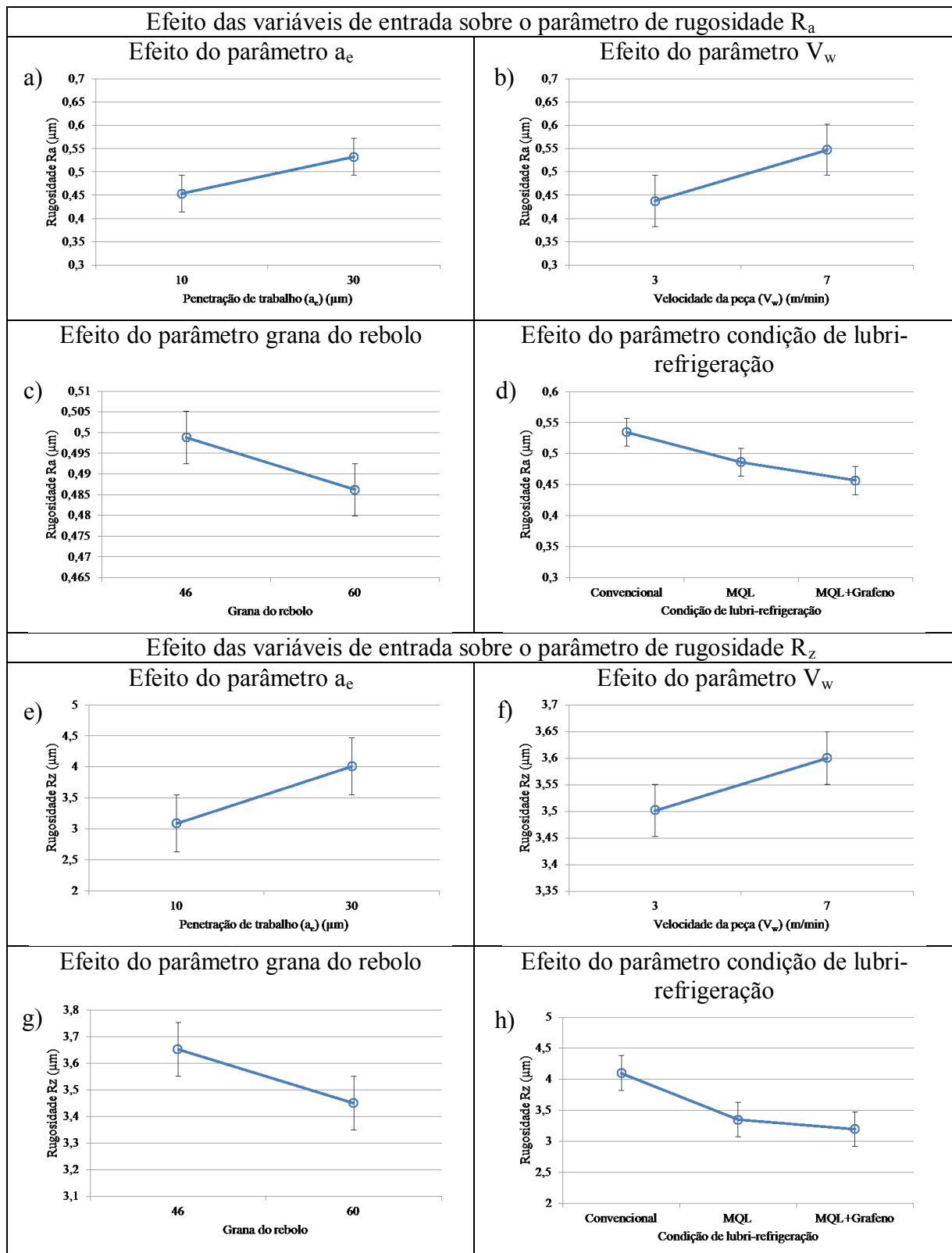


Figura 4.3 - Efeito das variáveis de entrada sobre os parâmetros de rugosidade: a) a_e em R_a ; b) V_w em R_a ; c) grana do rebolo em R_a ; d) condição de lubri-refrigeração em R_a ; e) a_e em R_z ; f) V_w em R_z ; g) grana do rebolo em R_z ; h) condição de lubri-refrigeração em R_z .

Conforme pode ser observado na Tabela 4.2 através da análise do p-valor, apenas o parâmetro velocidade da peça (V_w) mostrou-se significativo para os valores de rugosidade R_a obtidos nas condições de usinagem empregadas neste trabalho. Porém, ao avaliar os gráficos de efeito das variáveis (Figuras 4.3a a 4.3d) sobre este parâmetro de rugosidade, percebe-se que ocorreu o que normalmente é relatado na literatura, em que o aumento de a_e e/ou de V_w e a redução da grana mesh (maior tamanho do grão abrasivo) resultam na elevação dos valores médios de R_a , enquanto com relação às condições de lubri-refrigeração o emprego das partículas de grafeno ao fluido de corte contribui para a obtenção dos menores valores médios do parâmetro R_a . Para o parâmetro R_z (Tabela 4.2) apenas a penetração de trabalho e a condição de lubri-refrigeração se mostraram significativa sobre este parâmetro, e o comportamento sobre o efeito das variáveis (Figura 4.3e a 4.3h) foi semelhante ao encontrado para o parâmetro R_a .

Nas Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5 são apresentadas a ANOVA (p-valor) comparando apenas duas condições de lubri-refrigeração por vez, sendo respectivamente as condições de aplicação de fluido convencional com a técnica MQL, MQL com MQL+Grafeno e condição convencional com MQL+Grafeno.

Tabela 4.3 - Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL.

Rugosidade R_a	
Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,038758
Velocidade da peça (V_w)	0,056577
Grana do rebolo	0,806059
Condição de lubri-refrigeração	0,462025
$a_e \times V_w$	0,545357
$a_e \times$ grana do rebolo	0,549942
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,720794
$V_w \times$ grana do rebolo	0,338151
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,330651
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,176310
Rugosidade R_z	
Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,002717
Velocidade da peça (V_w)	0,853921
Grana do rebolo	0,684708
Condição de lubri-refrigeração	0,095973
$a_e \times V_w$	0,770218
$a_e \times$ grana do rebolo	0,644993
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,320525
$V_w \times$ grana do rebolo	0,407271
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,554219
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,148494

Tabela 4.4 - Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z comparando as condições de lubri-refrigeração MQL e MQL+Grafeno.

Rugosidade R_a	
Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,408583
Velocidade da peça (V_w)	0,004432
Grana do rebolo	0,290198
Condição de lubri-refrigeração	0,586495
$a_e \times V_w$	0,197150
$a_e \times$ grana do rebolo	0,898955
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,271480
$V_w \times$ grana do rebolo	0,242198
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,317433
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,353565
Rugosidade R_z	
Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,011667
Velocidade da peça (V_w)	0,384486
Grana do rebolo	0,043383
Condição de lubri-refrigeração	0,589974
$a_e \times V_w$	0,598038
$a_e \times$ grana do rebolo	0,763332
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,185970
$V_w \times$ grana do rebolo	0,361239
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,679443
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,220106

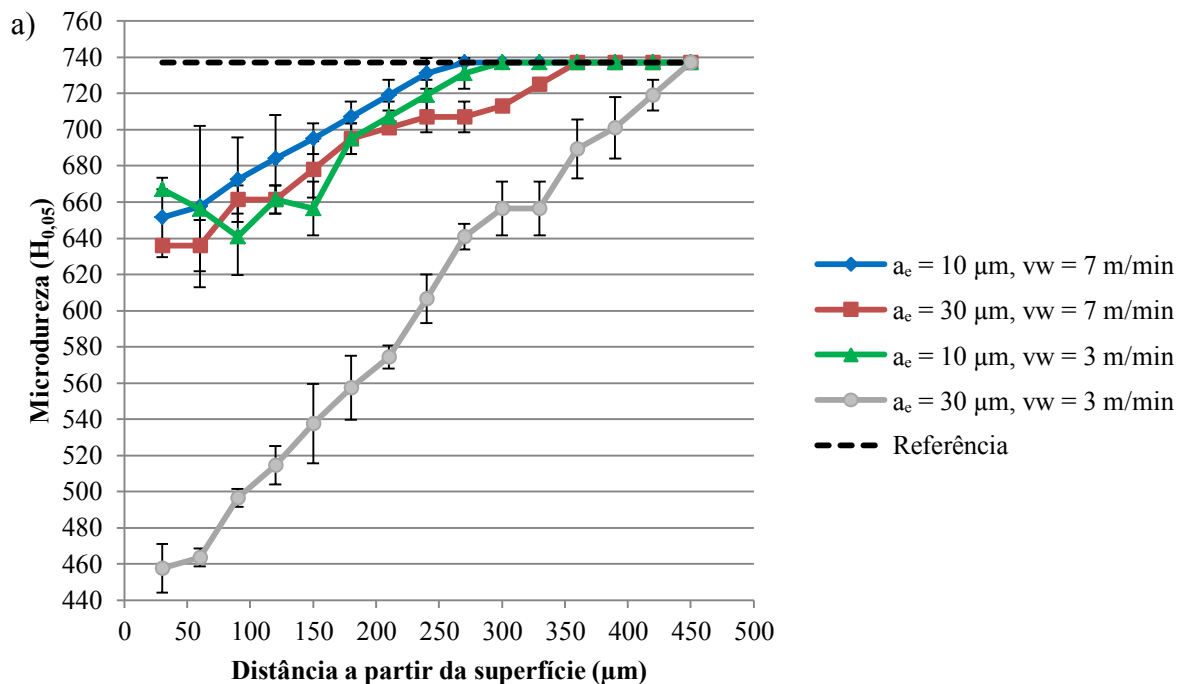
Tabela 4.5 - Análise de variância (ANOVA) para os parâmetros de rugosidade R_a e R_z comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL+Grafeno.

Rugosidade R_a	
Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,195041
Velocidade da peça (V_w)	0,128495
Grana do rebolo	0,503146
Condição de lubri-refrigeração	0,120475
$a_e \times V_w$	0,880646
$a_e \times$ grana do rebolo	0,362634
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,066119
$V_w \times$ grana do rebolo	0,169940
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,727366
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,422005
Rugosidade R_z	
Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,020119
Velocidade da peça (V_w)	0,940443
Grana do rebolo	0,795699
Condição de lubri-refrigeração	0,022748
$a_e \times V_w$	0,643975
$a_e \times$ grana do rebolo	0,870821
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,018232
$V_w \times$ grana do rebolo	0,282661
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,694004
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,383169

Das Tabelas 4.3, 4.4 e 4.5, ao comparar inicialmente a condição de lubri-refrigeração convencional com a MQL, observa-se que tanto para o parâmetro R_a quanto o R_z apenas a variável penetração de trabalho se mostrou significativa. Ao analisar os resultados obtidos comparando as condições MQL e MQL+Grafeno para o parâmetro R_a , apenas a velocidade da peça exerceu influência significativa, enquanto que para o parâmetro R_z tanto a penetração de trabalho quanto a grana do rebolo foram significativas. Com relação à comparação da técnica convencional com MQL+Grafeno, nenhuma variável de entrada se mostrou significativa para o parâmetro R_a . Para o parâmetro R_z , as variáveis a_e , condição de lubri-refrigeração e interação entre a_e e a condição influenciaram significativamente os resultados.

4.2 Microdureza abaixo da superfície

Nas Figuras 4.4, 4.5 e 4.6 são apresentados os gráficos dos perfis de microdureza Vickers medidos abaixo das superfícies das amostras de aço SAE 52100 após o processo de retificação plana em diferentes condições de corte, com duas diferentes granas mesh do rebolo de óxido de alumínio e três condições de lubri-refrigeração, convencional, MQL e MQL+Grafeno, respectivamente. A linha pontilhada representa o valor médio da microdureza do material antes do processo de retificação (737 HV), ou seja, considerando que nesta região a microestrutura do material está livre de danos térmicos, enquanto os pontos formam o perfil de microdureza das peças submetidas à retificação sob diferentes condições de corte (velocidade da peça de 3 m/min e 7 m/min, e penetração de trabalho de 10 μm e 30 μm). Cada ponto no gráfico corresponde à média de três medições realizadas em diferentes regiões, porém à mesma profundidade da superfície retificada, para cada corpo de prova.



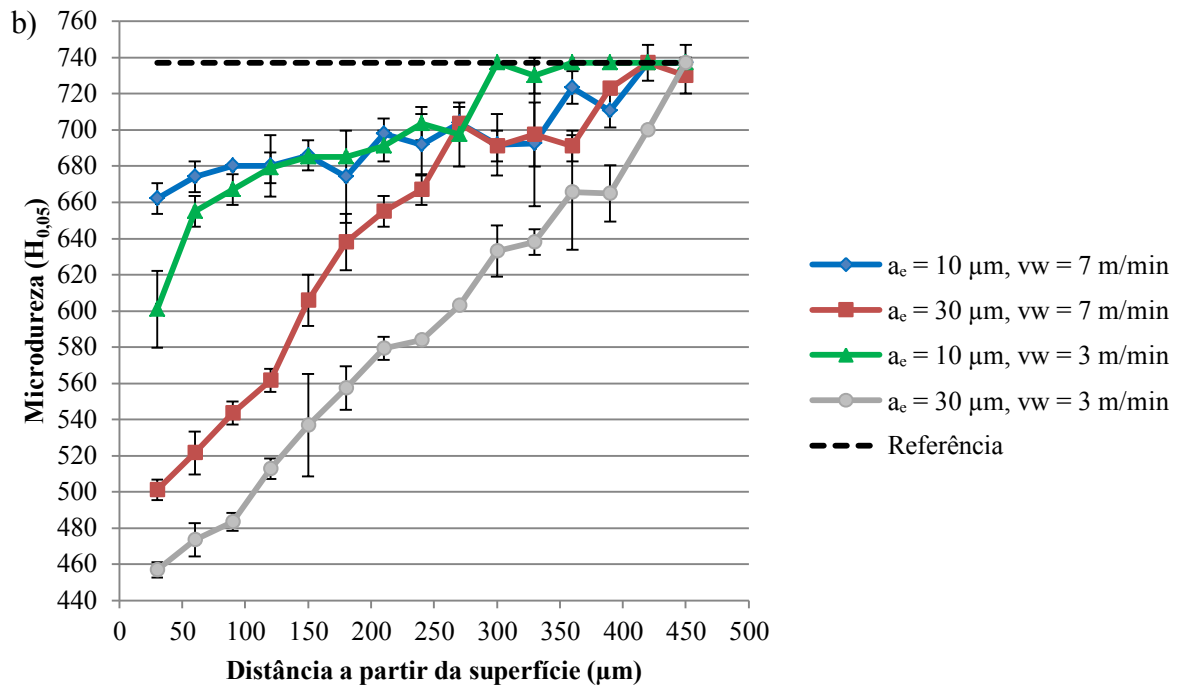


Figura 4.4 - Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço SAE 52100 após processo de retificação via a condição convencional com rebolo de óxido de alumínio grana mesh: a) 46; b) 60.

Nas Figuras 4.4a e 4.4b, em que são apresentados os resultados de microdureza após a usinagem com as granas mesh 46 e 60, respectivamente, e fluido de corte aplicado via a condição de lubri-refrigeração convencional, observa-se que ao empregar rebolo de óxido de alumínio de grana mesh 46 (Figura 4.4a) a queda dos valores de microdureza em comparação com aquela medida antes da retificação (microdureza de referência) foi mais significativa na condição de usinagem na qual foi utilizado $a_e=30 \mu\text{m}$ e $V_w=3 \text{ m/min}$. Nesta condição, em decorrência da expressiva redução do valor de microdureza (próxima a 38%), pode-se inferir que há evidência da ocorrência de danos térmicos no componente retificado e que, por meio da microdureza pode-se afirmar que eles se estenderam até aproximadamente $350 \mu\text{m}$ abaixo da superfície usinada. Para os outros ensaios mostrados na Figura 4.4a, a queda dos valores com relação à microdureza de referência (antes do processo de retificação) do aço SAE 52100 foi menor (aproximadamente 13%), sendo que estes três perfis apresentam valores bem próximos. Segundo Malkin e Guo (2008), esta queda dos valores ocorre pelo revenimento excessivo do material nas regiões abaixo à superfície usinada. Em decorrência das elevadas temperaturas desenvolvidas durante o processo, o material nestas regiões apresenta

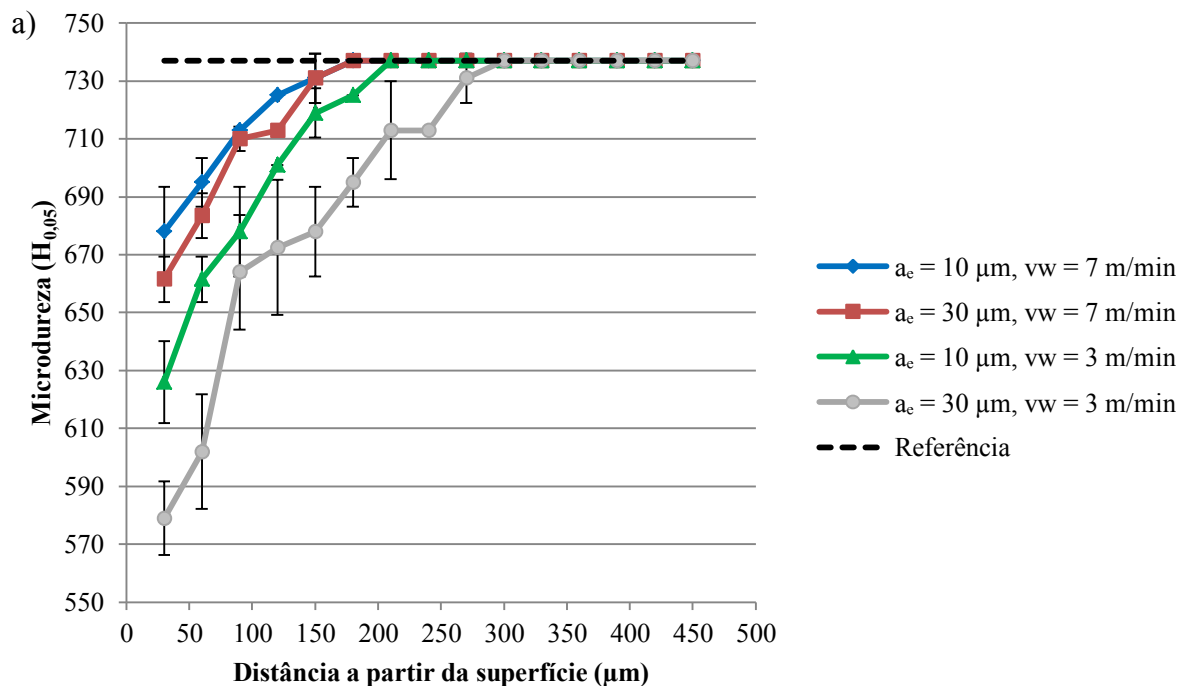
comportamento mais dúctil, ocasionando a redução dos valores de microdureza. De acordo com Rowe (2014) o emprego de baixas velocidades da peça (V_w) acarreta no aumento da possibilidade de ocorrer danos térmicos ao componente usinado, devido ao fato da energia do processo se encontrar concentrada na região de contato rebolo/peça por um tempo mais longo. E conforme discutido anteriormente no Capítulo II (secções 2.3.4 e 2.3.7) quando há o aumento da penetração de trabalho (a_e), uma maior quantidade de grãos abrasivos entra em contato com a peça, aumentando assim a área e o tempo de contato, o que contribui para elevar as temperaturas da região de corte e consequentemente maior geração de calor (MORRIS, 2011; BIANCHI et al., 1997). E quanto mais calor é gerado, maior será a transferência dele para a peça quando se empregam abrasivos convencionais, como é o caso do rebolo de óxido de alumínio empregado neste trabalho. Fedoseev e Malkin (1991) realizaram a retificação de diferentes aços e foi observada uma maior queda dos valores de microdureza à medida que a penetração de trabalho era aumentada. Huang; Liu; Wu (2016), durante ensaios de retificação tangencial do aço NAK80 (41 HRC), observaram que o aumento de a_e acarretou na elevação dos valores de temperatura, consequentemente, o que elevou a probabilidade de ocorrência de danos térmicos no referido aço.

Nos ensaios realizados através do rebolo de óxido de alumínio com grana mesh 60 (Figura 4.4b) foi verificado um comportamento semelhante ao observado quando se empregou o rebolo de óxido de alumínio com a grana mesh 46 (Figura 4.4a). Porém, conforme observado na Figura 4.4b, na condição na qual foi empregado $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$ e $V_w=7\text{ m/min}$, a redução dos valores de microdureza a partir da superfície foram bastante significativos, sendo próximos ao ensaio realizado com $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$ e $V_w=3\text{ m/min}$.

Além disso, a partir dos perfis de microdureza, constata-se que o parâmetro penetração de trabalho exerceu maior influência sobre essa variável que a velocidade da peça, tanto para os ensaios realizados com rebolo de grana mesh 46 quanto para o de 60. Ou seja, mantendo-se a velocidade da peça constante e aumentando-se a penetração de trabalho, verificou-se uma maior queda dos valores de microdureza (-23,96% para rebolo de grana mesh 60/ $V_w=3\text{ m/min}$ e -24,32% para rebolo de grana mesh 60/ $V_w=7\text{ m/min}$) do que se fosse feito o contrário, mantendo a penetração de trabalho fixa e variando o parâmetro V_w (-9,21% para rebolo de grana mesh 60/ $a_e=10\text{ }\mu\text{m}$ e -8,78% para rebolo de grana mesh 60/ $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$).

Na Figura 4.5a e 4.5b são apresentados os gráficos de microdureza obtidos após a retificação do aço SAE 52100 empregando a condição de lubri-refrigeração da mínima quantidade de lubrificante (MQL). Nestes ensaios a condição que apresentou maior queda nos

valores de microdureza foi devida à combinação entre maior penetração de trabalho, $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$, e menor velocidade da mesa, $V_w=3\text{ m/min}$, assim como evidenciado nos ensaios com fluido aplicado via a técnica convencional. Entretanto, esta queda foi menor para os testes realizados com a técnica MQL. De maneira geral, ao comparar estas duas técnicas de aplicação de fluido de corte, observa-se que a técnica MQL proporcionou menor redução dos valores de microdureza nas condições de corte aplicadas, além de que a camada afetada pelo calor, extensão da área com danos térmicos no componente, foi mais estreita. Alves et al. (2017) observaram este mesmo comportamento na retificação cilíndrica do aço N2711 sob diferentes condições de lubri-refrigeração. Os autores atribuíram estes resultados a melhor capacidade lubrificante da condição MQL em relação à convencional. Devido à maior velocidade de aplicação do fluido por esta condição em relação a técnica convencional, é bem provável que a barreira de ar formada ao redor do rebolo tenha sido rompida e que o fluido tenha conseguido atingir com mais eficiência a zona de corte. Com isso, há menor redução do atrito na interface rebolo peça, o que favorece o cisalhamento e resulta em menor geração de calor.



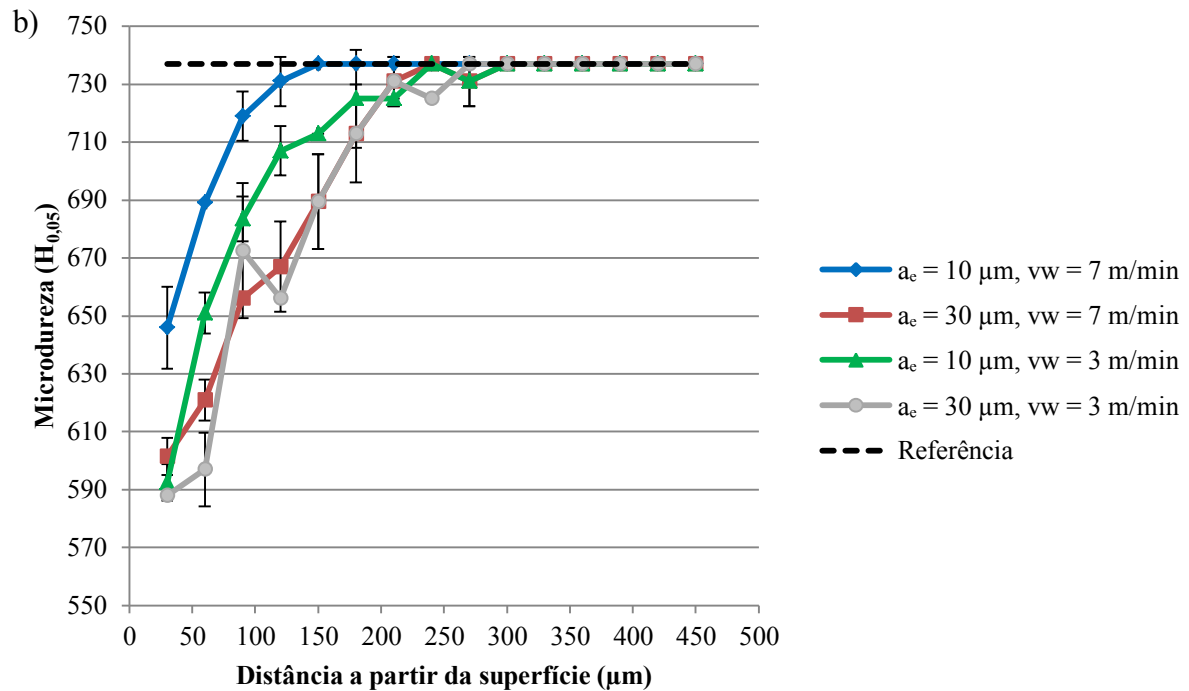


Figura 4.5 - Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço SAE 52100 após processo de retificação via a condição MQL com rebolo de óxido de alumínio grana mesh: a) 46; b) 60.

Na Figura 4.6a e 4.6b são apresentados, respectivamente, os perfis de microdureza do aço SAE 52100 após retificação plana com as granas mesh 46 e 60, utilizando no processo fluido contendo partículas de grafeno aplicado via a condição MQL. Em comparação com as outras condições de lubri-refrigeração empregadas (convencional e MQL), o comportamento dos perfis de microdureza para estes ensaios foi semelhante aos encontrados, ou seja, há uma queda dos valores de microdureza próxima à superfície e a partir deste ponto estes aumentam até atingirem a microdureza inicial do material, além de que os maiores valores de a_e e V_w resultaram nas maiores variações de microdureza. No entanto, a utilização de um fluido de corte contendo partículas de grafeno atuou reduzindo a queda destes valores, sendo que para os ensaios realizados empregando rebolo com grana mesh 46 (Figura 4.6a) a maior queda observada foi de 17%, enquanto que para os resultados obtidos após a retificação com o rebolo de grana mesh 60 foi de aproximadamente 9% em relação à microdureza do material medida em região livre de efeitos de danos térmicos. Além disso, a profundidade máxima afetada pela geração de calor, ou seja, a profundidade na qual foi possível observar a variação dos valores de microdureza em comparação com a linha de referência, foi de

aproximadamente 200 μm , sendo bastante inferior ao encontrado nos ensaios com técnica convencional (450 μm) e MQL sem grafeno (300 μm).

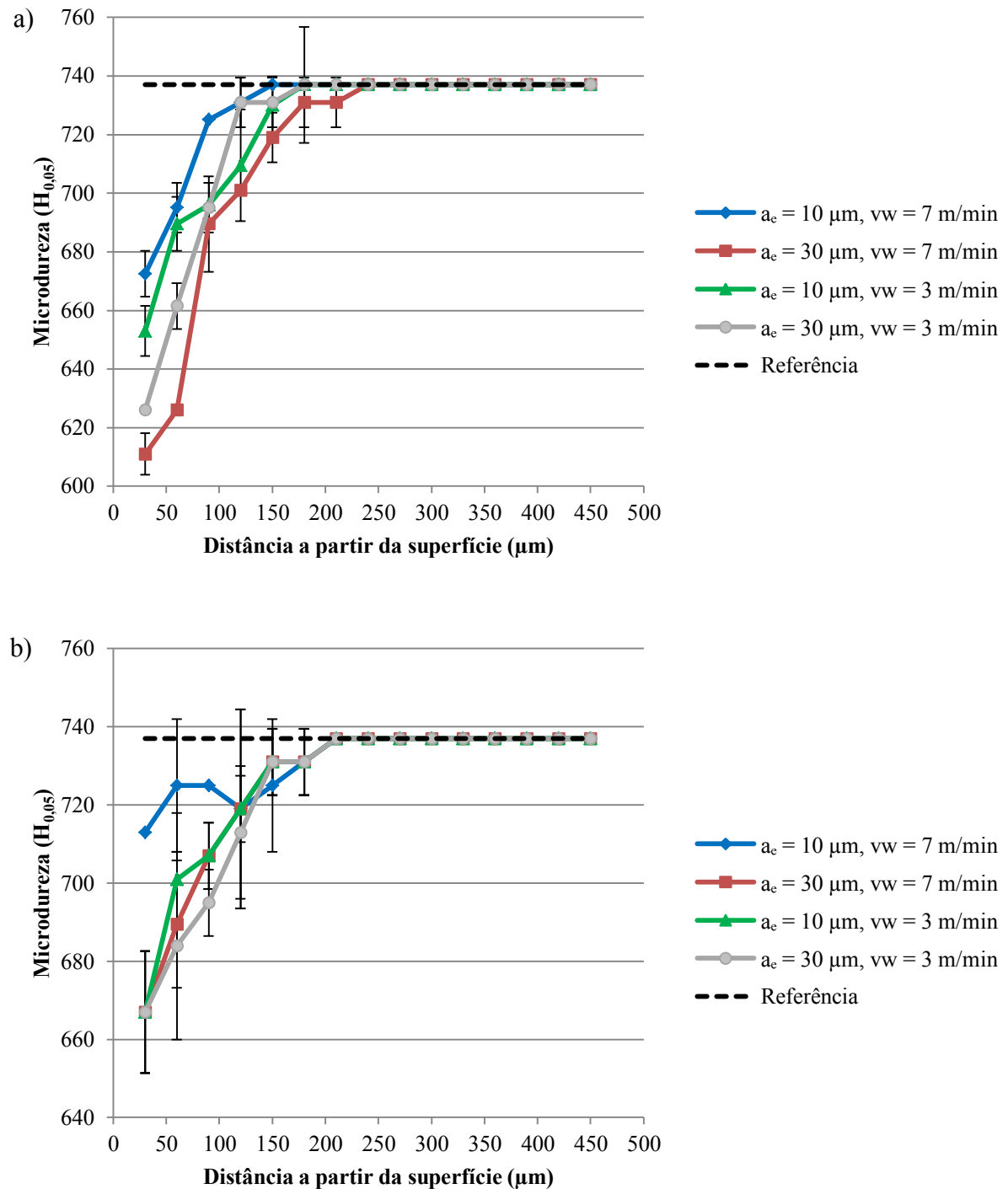


Figura 4.6 - Valores de microdureza em função da distância a partir da superfície usinada do aço SAE 52100 após processo de retificação via a condição MQL+Grafeno com rebolo de óxido de alumínio grana mesh: a) 46; b) 60.

A fim de facilitar as análises do desempenho entre as diferentes técnicas de lubri-refrigeração em termos de microdureza, foram selecionados os resultados que representam as maiores quedas de microdureza dentre todas as condições (Figuras 4.4 a 4.6) e estes foram agrupados na Figura 4.7 para as três condições de lubri-refrigeração testadas. Estes resultados referem-se a usinagem com combinação entre penetração de trabalho de 30 μm , velocidade da peça de 3 m/min e rebolo com grana mesh 46. No geral, considerando esta condição como a mais severa, o emprego do grafeno (MQL + grafeno) resultou em apenas 15% de redução na microdureza obtida após o ensaio de retificação, seguida pela condição MQL sem grafeno, com 21% e pela condição convencional, com 38%. Este resultado reforça a constatação que a adição de partículas de grafeno ao fluido de corte influenciou positivamente o processo por ter minimizado a ocorrência de danos térmicos ao componente retificado nas condições investigadas. Li et al. (2017) realizaram ensaios de retificação de liga de níquel com diferentes partículas sólidas adicionadas em fluido de corte, dentre elas os nanotubos de carbono, e relataram que o fluido contendo estas partículas resultou em menor temperatura do processo e conseqüentemente reduziu a ocorrência de danos térmicos. Eles atribuíram estes resultados às ótimas propriedades de transferência de calor dos nanotubos de carbono. Oliveira (2017) também encontrou resultados positivos ao empregar partículas sólidas (grafeno multicamadas) no que diz respeito à redução de ocorrência danos térmicos. Além do fato de o grafeno ter melhorado a transferência de calor do fluido de corte, a autora justifica os resultados pela melhoria das condições de lubrificação com a adição destas partículas, onde o grafeno atuou na redução do atrito na interface rebolo-peça e foi determinante na quantidade de calor gerado durante a usinagem nesta condição.

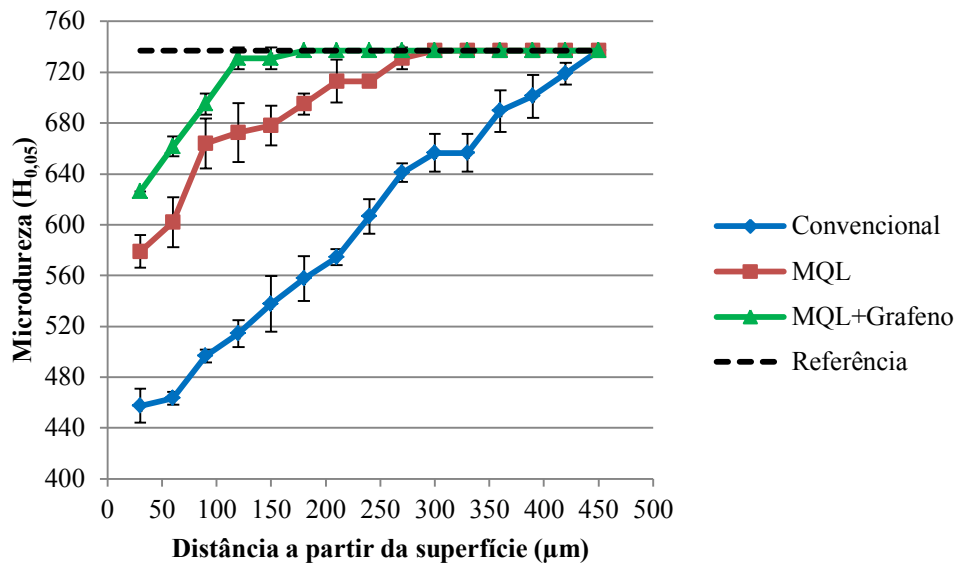


Figura 4.7 - Perfis de microdureza para os ensaios empregando rebolo de grana mesh 46, penetração de trabalho de 30 μm e velocidade da peça de 3 m/min para todas as condições de lubri-refrigeração.

Assim como para os resultados de rugosidade, a análise de variância (ANOVA) foi realizada para os valores de microdureza que são resumidos na Tabela 4.6, e apresentados graficamente nas Figuras 4.8a a 4.8d.

Tabela 4.6 - Análise de variância (ANOVA) para a microdureza comparando as três condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL+Grafeno).

Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	$2,80 \cdot 10^{-07}$
Velocidade da peça (V_w)	0,001960
Grana do rebolo	0,215638
Condição de lubri-refrigeração	$2,58 \cdot 10^{-17}$
$a_e \times V_w$	0,044720
$a_e \times$ grana do rebolo	0,492298
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	$9,40 \cdot 10^{-8}$
$V_w \times$ grana do rebolo	0,355924
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,008860
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,120936

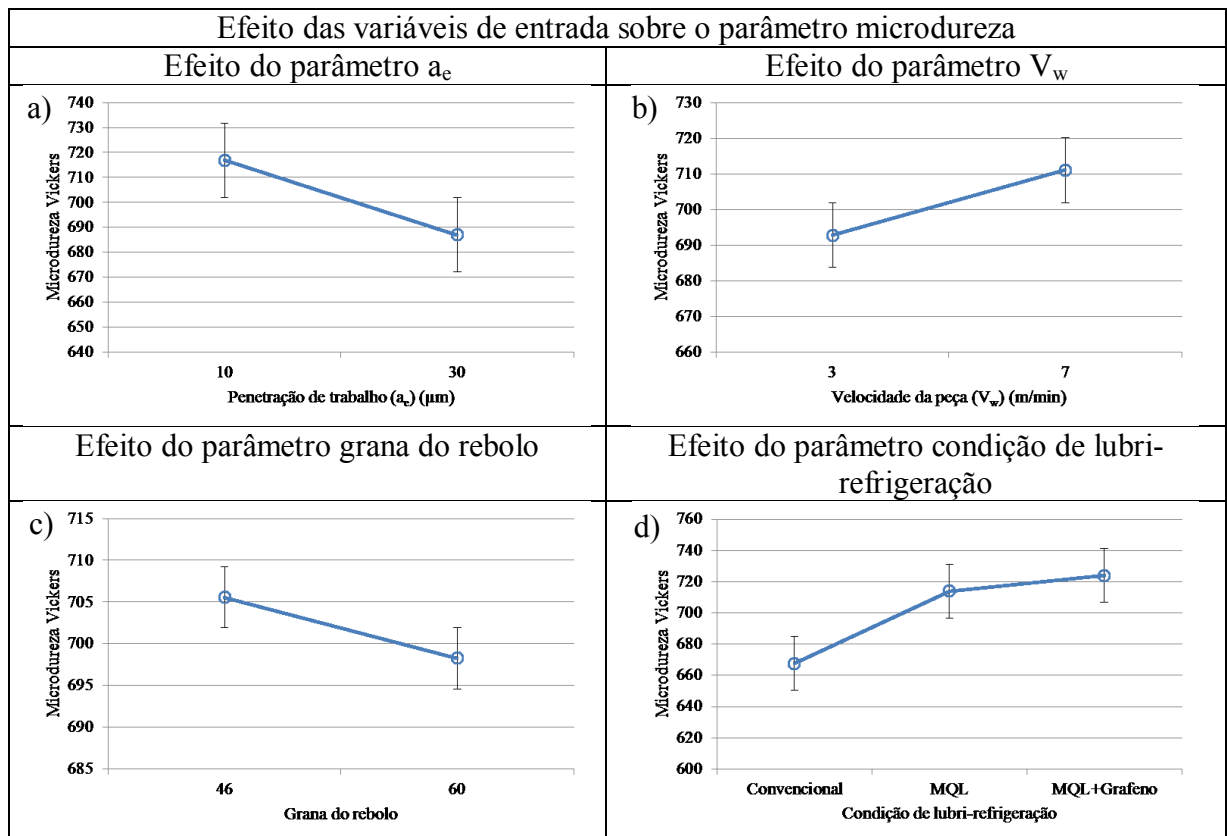


Figura 4.8 - Efeito das variáveis de entrada sobre os valores de microdureza: a) a_e ; b) V_w ; c) grana do rebolo; d) condição de lubri-refrigeração.

Ao avaliar a análise de variância para o parâmetro microdureza, observa-se que a penetração de trabalho, velocidade da peça e a condição de lubri-refrigeração, além das interações de a_e com V_w e de a_e com V_w e com a condição de lubri-refrigeração, influenciaram significativamente nos resultados obtidos. Em relação ao efeito das variáveis de entrada sobre os valores de microdureza, o aumento da penetração de trabalho e grana do rebolo e a redução da velocidade de trabalho ocasionaram na queda do valor médio de microdureza. Dentre as condições de lubri-refrigeração a MQL+Grafeno foi a que apresentou valor médio mais próximo à microdureza inicial do material (737 HV).

Nas Tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 são apresentadas, respectivamente, a ANOVA (p-valor) comparando as condições de lubri-refrigeração convencional com MQL, MQL com MQL+Grafeno e convencional com MQL+Grafeno.

Tabela 4.7 - Análise de variância (ANOVA) para o parâmetro microdureza comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL.

Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	$1,97.10^{-7}$
Velocidade da peça (V_w)	0,001029
Grana do rebolo	0,100924
Condição de lubri-refrigeração	$5,25.10^{-9}$
$a_e \times V_w$	0,011679
$a_e \times$ grana do rebolo	0,367565
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	$6,31.10^{-5}$
$V_w \times$ grana do rebolo	0,250540
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,078210
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,282923

Tabela 4.8 - Análise de variância (ANOVA) para o parâmetro microdureza comparando as condições de lubri-refrigeração MQL e MQL+Grafeno.

Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	0,021042
Velocidade da peça (V_w)	0,083965
Grana do rebolo	0,967540
Condição de lubri-refrigeração	0,017772
$a_e \times V_w$	0,713385
$a_e \times$ grana do rebolo	0,951763
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,420007
$V_w \times$ grana do rebolo	0,709237
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,148829
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,233684

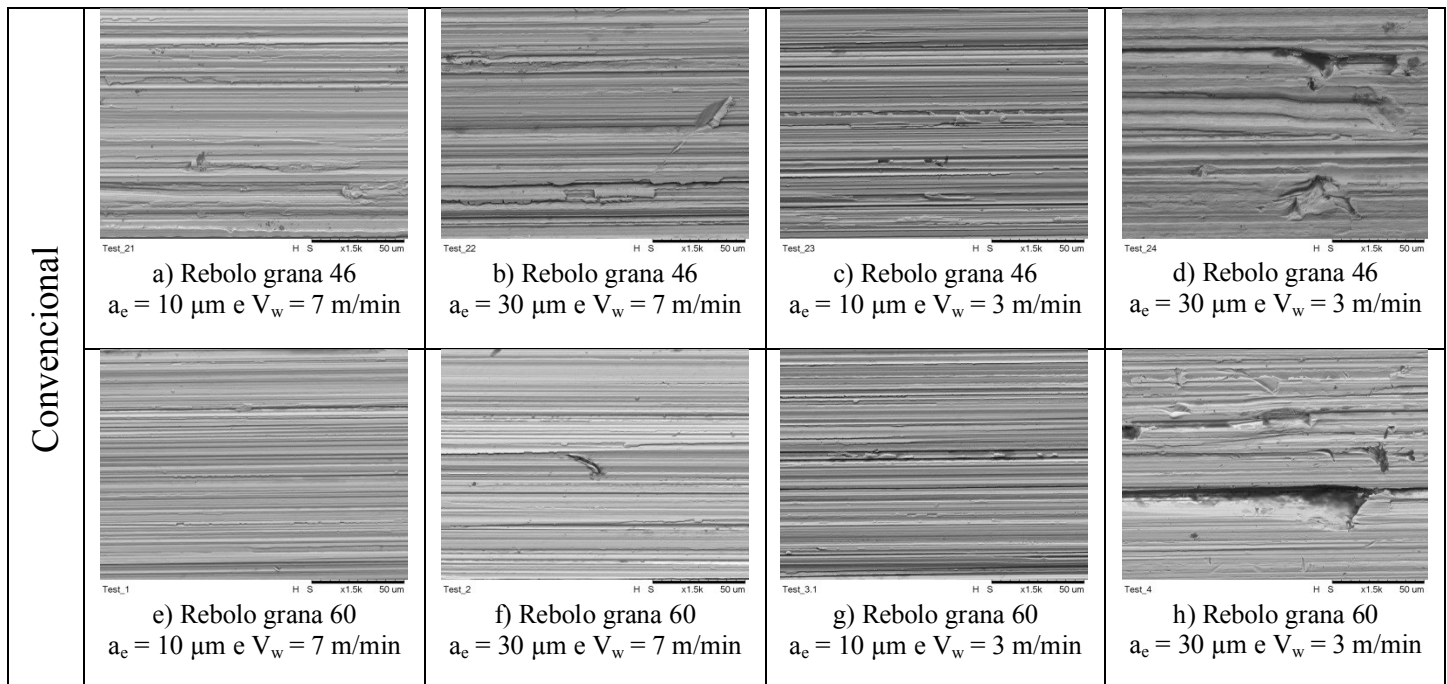
Tabela 4.9 - Análise de variância (ANOVA) para o parâmetro microdureza comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL+Grafeno.

Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	$1,16.10^{-6}$
Velocidade da peça (V_w)	0,010072
Grana do rebolo	0,298102
Condição de lubri-refrigeração	$1,07.10^{-13}$
$a_e \times V_w$	0,029338
$a_e \times$ grana do rebolo	0,554565
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	$1,50.10^{-6}$
$V_w \times$ grana do rebolo	0,498225
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,006015
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,063280

Após a realização da ANOVA e comparando duas condições de lubri-refrigeração por vez, observa-se que tanto para a comparação entre as técnicas convencional e MQL quanto para as técnicas convencional e MQL+Grafeno, a penetração de trabalho, a velocidade da peça, a condição de lubri-refrigeração e as interações de $a_e \times V_w$, $a_e \times$ condição de lubri-refrigeração e $V_w \times$ condição de lubri-refrigeração mostraram-se significativas sobre a os valores de microdureza. Já para a comparação entre as técnicas MQL e MQL+Grafeno, observou-se que apenas a penetração de trabalho e a condição de lubri-refrigeração apresentaram influência significativa sobre os valores obtidos.

4.3 Imagens das superfícies de aço SAE 52100 obtidas via MEV

Na Figura 4.9 são mostradas as imagens das superfícies retificadas de aço SAE 52100 submetidas a diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração. Na Figura 4.10, a seguir, serão apresentados os principais eventos identificados nas imagens das superfícies da Figura 4.9 (alterações na textura, deformação plástica, interrupção dos riscos deixados pela passagem dos grãos abrasivos, dentre outros).



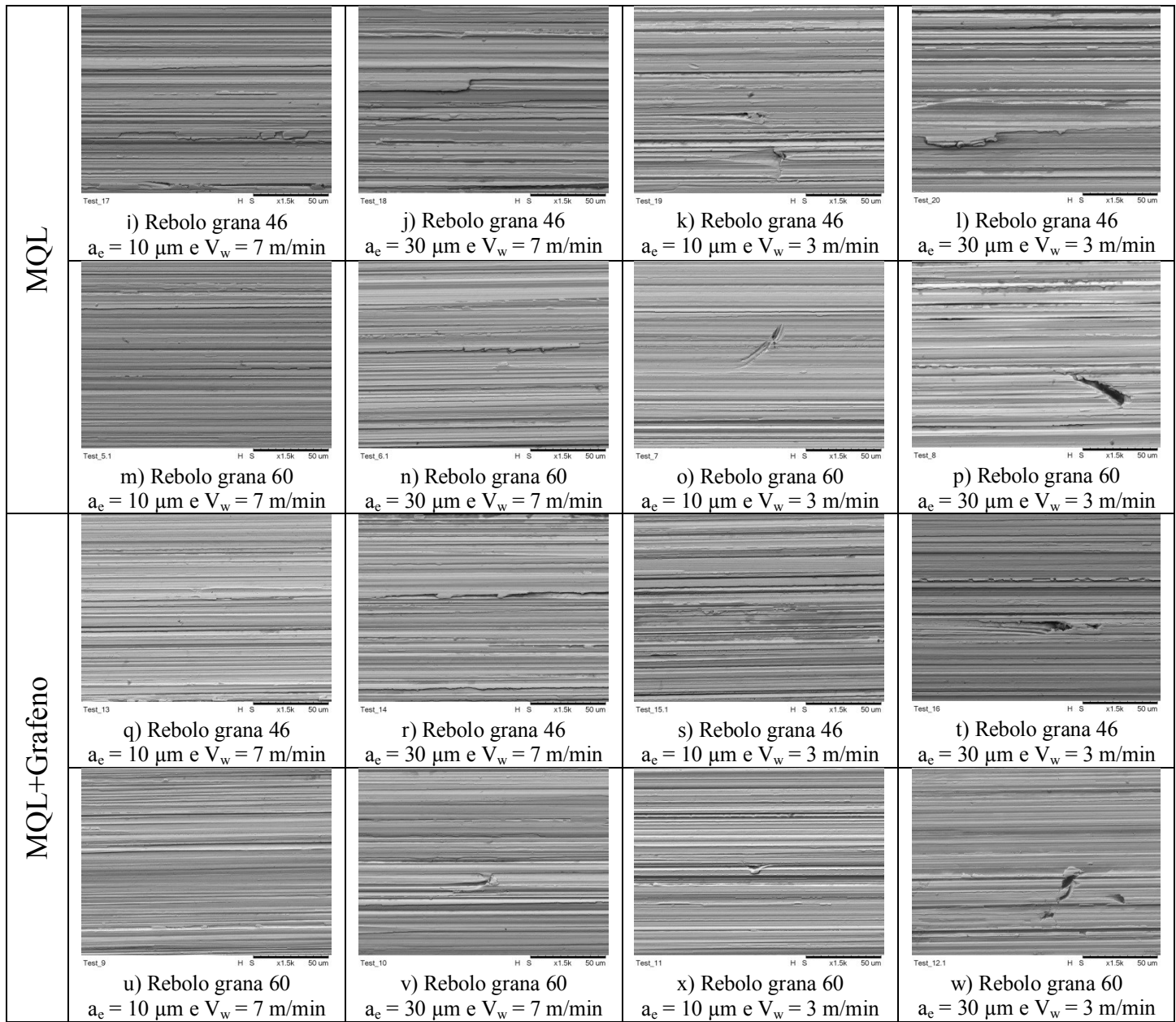


Figura 4.9 - Imagens de MEV das superfícies de aço SAE 52100 endurecido obtidas após a retificação plana com diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração.

No geral as superfícies usinadas apresentaram comportamento semelhante, sendo observadas regiões com material deformado e sulcos, em sua maioria, orientados na direção do corte. Com base na ampliação de imagem (1,5k) utilizada no MEV, e com base nas análises das superfícies não foi possível identificar trincas em nenhuma condição de corte empregada.

Quanto à influência dos parâmetros utilizados, o aumento da grana mesh do rebolo (diminuição da granulometria) resultou em superfícies com melhor acabamento, ou seja, com sulcos mais uniformes e menor quantidade de regiões com deformações plásticas de material (Figuras 4.9e a 4.9h, 4.9m a 4.9p e 4.9u a 4.9w). Este resultado está de acordo com informações contidas na literatura que diz que rebolos com menor tamanho de grão (maior grana mesh) são recomendados para obtenção de superfícies que necessitam de melhor acabamento enquanto que rebolos com maiores tamanhos de grão são normalmente utilizados em operações de desbaste (KLOCKE, 2009).

Em relação à penetração de trabalho, o aumento neste parâmetro de 10 μm para 30 μm , como já comentado nesta seção, implicou em peças com maiores valores de rugosidade, o que foi possível verificar nas superfícies usinadas com estas condições. As superfícies obtidas após os ensaios realizados com o maior valor de penetração de trabalho ($a_e = 30 \mu\text{m}$) (Figuras 4.9b, 4.9d, 4.9f, 4.9h, 4.9j, 4.9l, 4.9n, 4.9p, 4.9r, 4.9t, 4.9v e 4.9w) apresentaram sulcos não tão uniformes quanto às peças que foram retificadas com a penetração de trabalho $a_e = 10 \mu\text{m}$ (Figuras 4.9a, 4.9c, 4.9e, 4.9g, 4.9i, 4.9k, 4.9m, 4.9o, 4.9q, 4.9s, 4.9u e 4.9x), e, além disso, foi constatada maior quantidade de áreas contendo deformações plásticas de material. Tawakoli et al. (2009) observaram a influência de diversos parâmetros de corte, dentre eles a_e variando na faixa de 5 μm a 25 μm , e condições de lubri-refrigeração na retificação cilíndrica de mergulho do aço 100Cr6 (equivalente ao aço SAE 52100) na qualidade de superfícies usinadas, por meio da textura, sendo que os resultados encontrados mostraram que o aumento da penetração de trabalho atuou afetando negativamente a textura das superfícies usinadas, como esperado. Damasceno et al. (2017) também encontraram uma relação semelhante aos encontrados neste trabalho ao realizarem ensaios de retificação plana do aço AISI 4340 sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração. Eles constataram que o aumento da penetração de trabalho resultou em sulcos com maior largura devido ao fato do aumento deste parâmetro acarretar em maior área de contato dos abrasivos com a peça e, assim, uma maior quantidade de material estará sendo deformada. Desta forma, o maior valor de a_e empregado (80 μm) resultou em maior quantidade de regiões com deformação plástica. Em trabalho desenvolvido por Guimarães (2016), o autor observou também que o aumento dos valores de penetração de trabalho na retificação plana dos aços ABNT N2711M e VPATLAS também elevaram os valores de rugosidade. O aumento da deformação plástica com o aumento de a_e aumenta a quantidade de calor gerado e, conseqüentemente, prejudicando o acabamento.

Na medição de microdureza observou-se que os ensaios que foram obtidos maiores quedas deste parâmetro foram aqueles nos quais houve o emprego de $a_e = 30 \mu\text{m}$ e $V_w = 3 \text{ m/min}$, sendo que na análise das superfícies retificadas constatou-se que estes mesmos ensaios foram aqueles que resultaram nas superfícies com os piores acabamentos (Figuras 4.9d, 4.9h, 4.9l, 4.9p, 4.9t e 4.9w).

Conforme pode ser observado na Figura 4.9 dentre todas as condições de lubrificação, no geral, a que proporcionou a obtenção de superfícies com melhor acabamento foi a condição empregando fluido de corte contendo partículas de grafeno. Esse resultado comprova a eficiência da adição destas ao fluido de corte, e está de acordo com os resultados de rugosidade e microdureza que também mostraram a superioridade desta técnica com relação às condições convencional e MQL (sem grafeno). E para buscar suporte a esta afirmação, no trabalho desenvolvido por Wang et al. (2016) os autores testaram diferentes partículas dispersas (MoS_2 , SiO_2 , diamante, nanotubos de carbono, $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ e m-ZrO_2) em fluido de corte aplicados também via a técnica MQL na retificação de liga de níquel (GH4169) e também constataram que o emprego, principalmente dos nanotubos de carbono, resultou em superfícies com melhor acabamento, que os sulcos nas superfícies da peça apresentaram-se mais uniformes em relação a técnica convencional de aplicação de fluido e à técnica MQL (sem adição de partículas sólidas). Em outro trabalho na retificação de aço NAK80 com rebolo abrasivo convencional com grana mesh 46 e empregando diferentes partículas sólidas (nanotubos de carbono de paredes múltiplas) dispersas em fluido de corte aplicada via a técnica MQL em retificação Huang; Liu; Wu (2016) relataram que a presença das partículas de nanotubos de carbono resultou em superfícies das peças com sulcos mais uniformes, além delas possuírem menor quantidade de detritos aderidos, em relação aquelas que foram usinadas pela condição convencional e via a técnica MQL (sem partículas de nanotubos de carbono). E os autores atribuíram este melhor desempenho dos nanotubos de carbono dispersos em fluido de corte ao filme de pequena espessura que é formado sobre a superfície usinada durante a usinagem. Pavan et al. (2017) também observaram a influência positiva de partículas de grafeno com relação a qualidade das superfícies de Inconel 718 retificadas, onde a adição destas partículas atuou no aumento da propriedade lubrificante do fluido de corte, melhorando as condições tribológicas e favorecendo o cisalhamento. Neste sentido, também há menor geração de calor, o que contribuiu para integridade superficial do componente usinado.

Na Figura 4.10 são apresentados os principais eventos encontrados sobre as superfícies das peças retificadas. Foram identificadas regiões com deformação plástica e outras com riscos que foram interrompidos, além de sulcos irregulares e mais profundos principalmente após os ensaios realizados empregando a condição convencional com $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$ e $V_w=3\text{ m/min}$ (Figura 4.9d e 4.9h). Conforme pode ser observado, também foram encontradas regiões com fluxo de material empurrado para as laterais do grão abrasivo, sendo este fenômeno conhecido como “plowing” por MALKIN e GUO (2008), ou sulcamento, e definido como um mecanismo no qual há deformação plástica sem remoção de material.

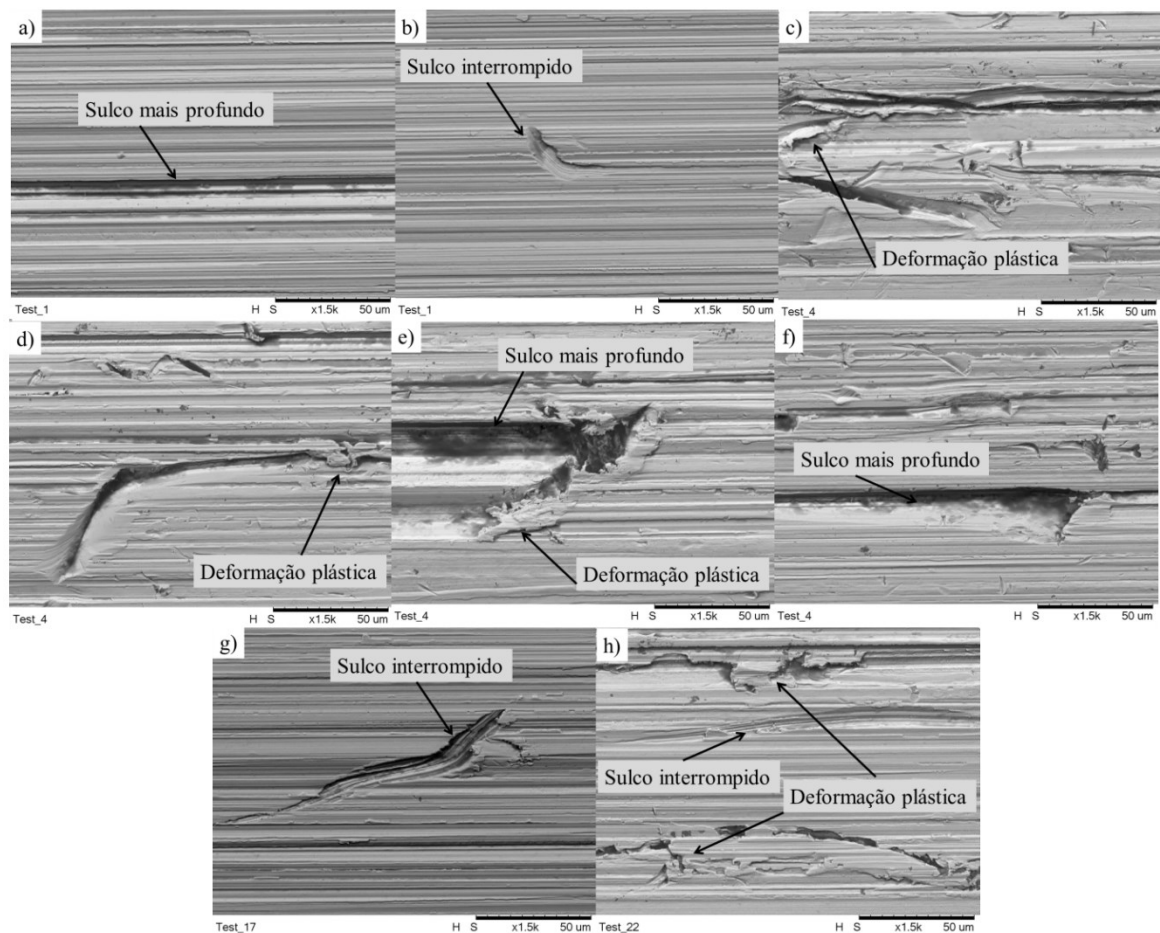


Figura 4.10 - Eventos identificados sobre as superfícies usinadas sob diferentes condições de lubri-refrigeração e de corte: a) e b) - condição convencional empregando rebolo de grana mesh 60 com $a_e=10\text{ }\mu\text{m}$ e $V_w=7\text{ m/min}$; c), d), e) e f) - condição convencional empregando rebolo de grana mesh 60 com $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$ e $V_w=3\text{ m/min}$; g) - condição MQL empregando rebolo de grana mesh 46 com $a_e=10\text{ }\mu\text{m}$ e $V_w=7\text{ m/min}$; h) - condição convencional empregando rebolo de grana mesh 46 com $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$ e $V_w=7\text{ m/min}$.

Durante as análises por meio do microscópio eletrônico de varredura (MEV), e com auxílio de um sistema de energia dispersiva (EDS), foram encontradas partículas de grafeno sobre todas as superfícies retificadas empregando a condição de lubri-refrigeração MQL+Grafeno, independente das condições de corte empregadas (Figura 4.11), o que foi benéfico. Sabe-se da literatura específica que partículas de grafeno podem atuar como lubrificantes sólidos e, assim, reduzindo o atrito entre rebolo e peça como também podem facilitar a troca de calor entre a peça e o ambiente devido às boas propriedades térmicas do grafeno. Mello (2015) também observou partículas de grafeno multicamadas aderidas sobre as superfícies da liga Ti-6Al-4V após a retificação plana tangencial com rebolo carbeto de silício, além do fato destas partículas estarem presentes em todas as superfícies obtidas utilizando a condição MQL+Grafeno.

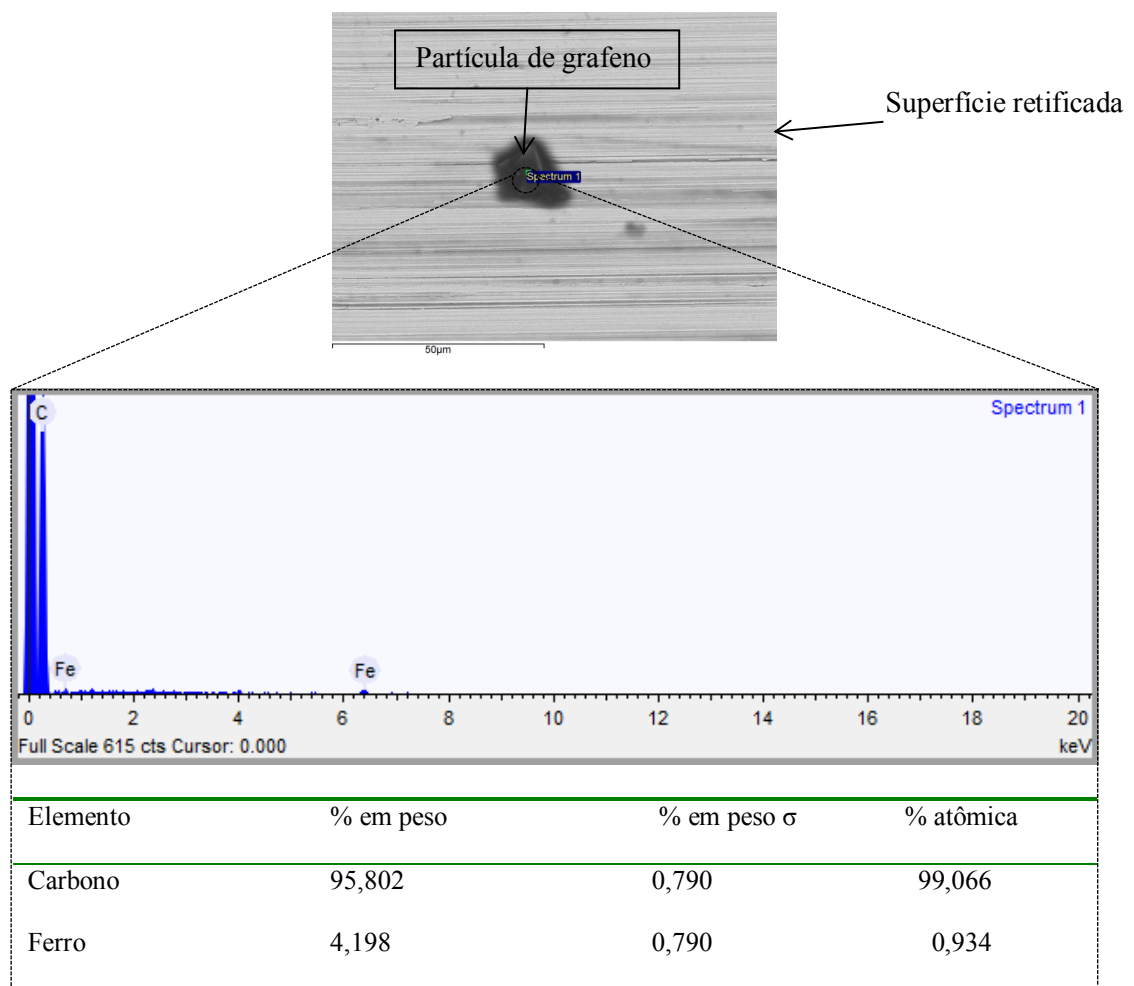


Figura 4.11 - Resultado da análise (EDS) de material sobre a superfície da peça evidenciando a presença de partículas grafeno após a retificação.

4.4 Potência de corte

Os valores de potência elétrica relativos à retificação do aço SAE 52100 em diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração são apresentados nas Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, sendo respectivamente referentes aos ensaios realizados com aplicação de fluido de corte via as técnicas convencional, MQL e MQL+Grafeno.

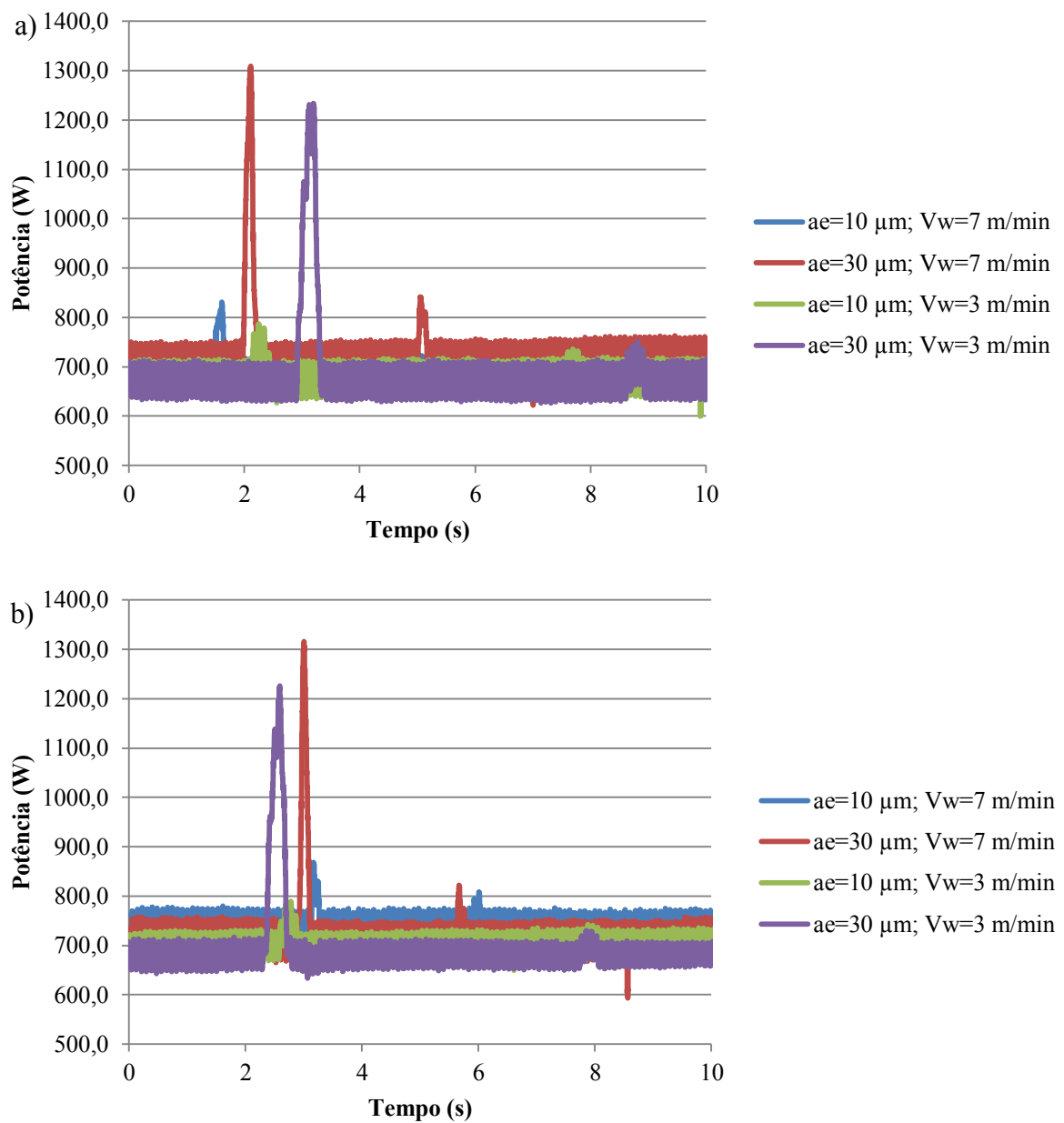


Figura 4.12 - Valores de potência elétrica obtidos durante os ensaios realizados com fluido de corte aplicado via a condição convencional empregando rebolo de óxido de alumínio de grana mesh: a) 46; b) 60.

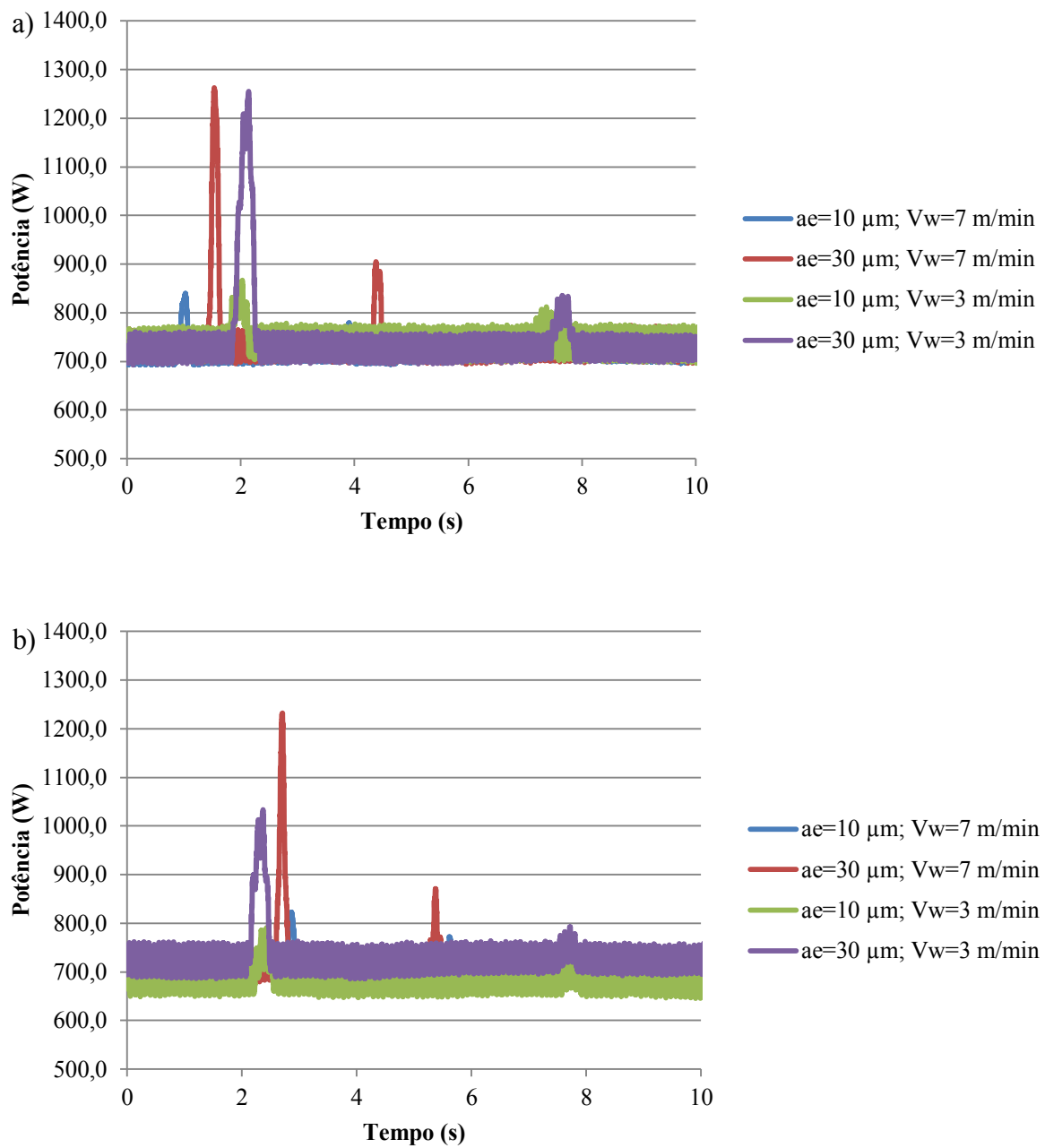


Figura 4.13 - Valores de potência elétrica obtidos durante os ensaios realizados com fluido de corte (apenas óleo - sem água) aplicado via a condição MQL empregando rebolo de óxido de alumínio de grana mesh: a) 46; b) 60.

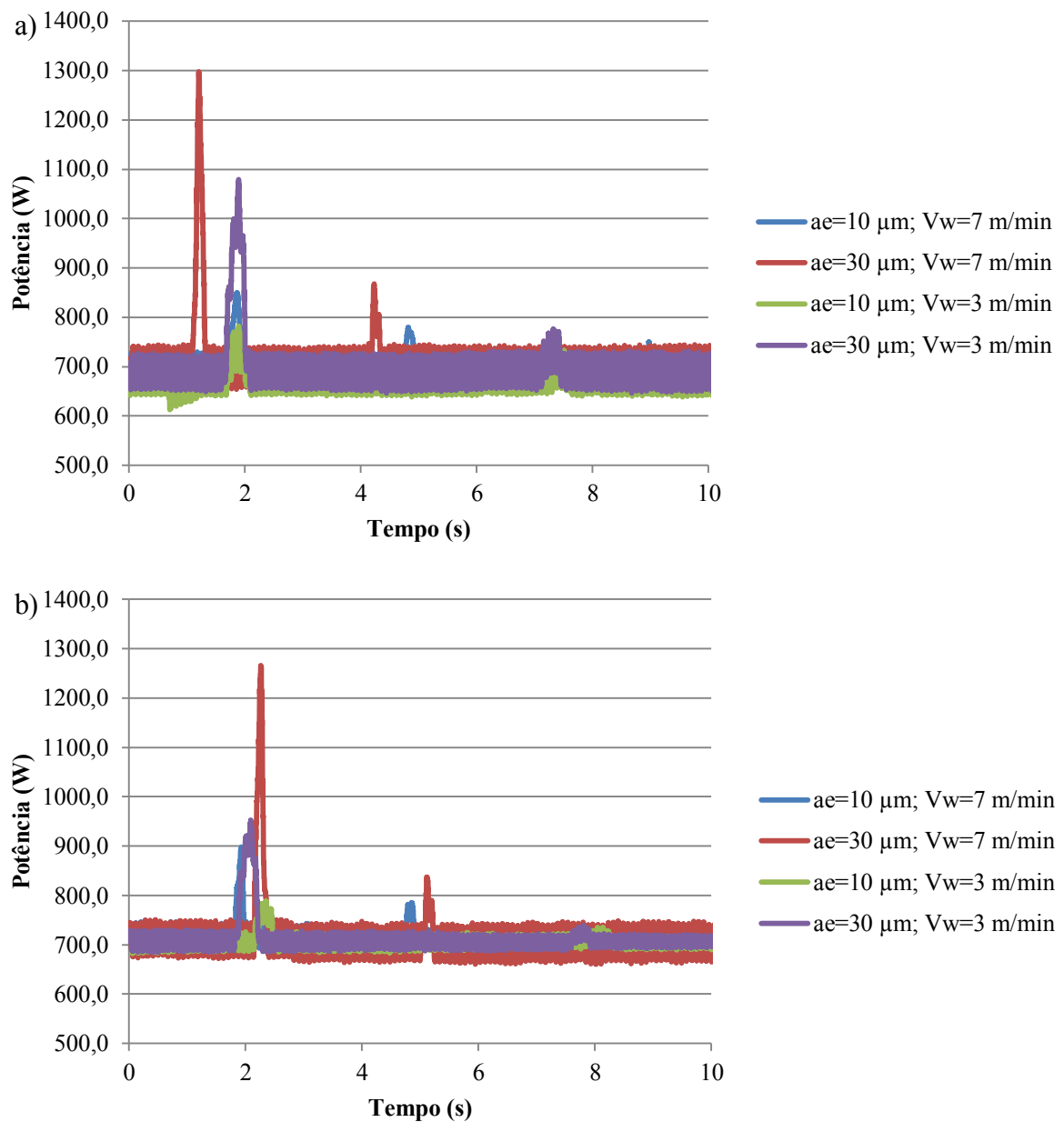


Figura 4.14 - Valores de potência elétrica obtidos durante os ensaios realizados com fluido de corte contendo partículas de grafeno multicamadas aplicado via a condição MQL empregando rebolo de óxido de alumínio de grana mesh: a) 46; b) 60.

Ao analisar as Figuras 4.12, 4.13 e 4.14, observa-se que no geral o aumento da penetração de trabalho causou elevação nos valores de potência obtidos. Segundo Rowe et al. (1997), o parâmetro a_e influencia diretamente sobre a taxa de remoção de material ($Q = b_w \cdot a_e \cdot v_w$) e área de contato rebolo/peça ($A_c = a_e \cdot l_c$), além da espessura equivalente de corte. Ou seja, com o aumento da penetração de trabalho exige maiores esforços de corte para

remover uma maior quantidade de material. Com o aumento da velocidade da peça de 3 m/min para 7 m/min também foi observado este efeito, sendo este comportamento explicado da mesma forma que para a penetração de trabalho. Kwak; Sim; Jeong (2005) analisaram a potência de corte durante o processo de retificação cilíndrica externa do aço endurecido SCM440 e verificaram o aumento da potência de retificação com a penetração de trabalho e a velocidade da peça, e que o a_e foi o mais influente. Em outro trabalho, Rabiei et al. (2014) realizaram a retificação de diferentes aços (CK45, S305, HSS e 100Cr6) sob diferentes condições de corte e lubri-refrigeração e também constataram que houve aumento das forças de corte com a penetração de trabalho.

Com relação ao tamanho dos grãos abrasivos, no geral, observou-se pequena diferença nos valores de potência ao empregar o rebolo com maior tamanho de grãos (rebolo de óxido de alumínio grana mesh 46), com relação aos valores obtidos empregando abrasivos mais de menor tamanho de grão (grana mesh 60). De acordo com a literatura, o emprego de rebolos com maiores tamanhos de grão resultam em menores esforços de corte em comparação com os rebolos com abrasivos menores, porém devido à diferença entre as granas mesh empregadas nesta pesquisa ser relativamente pequena (tamanho de grão de 368 μm para o rebolo de grana mesh 46 e 282 μm para o rebolo com grana mesh 60 mesh), pode-se afirmar que, praticamente, não houve variação entre os valores de potência obtidos, embora a média geral mostrar que o rebolo de grana mesh 60 apresentou um valor levemente inferior do que para o rebolo de grana mesh 46, ou seja, maior grana mesh implica em menor tamanho de grão. Tawakoli et al. (2011) avaliaram a influência do emprego de diferentes rebolos, sendo dois alterando apenas o tamanho de grão (rebolos de óxido de alumínio granas mesh 36 e 60), na retificação de mergulho do aço 100Cr6 e relataram que a usinagem com o rebolo com a menor grana mesh (maior tamanho de grão) resultou nos menores valores de potência do processo. Segundo os autores, isto ocorre devido ao fato do número de grãos ativos por unidade de área ser menor, resultando em menores forças de retificação.

A fim de melhor visualizar e comparar os valores de potência elétrica monitorados para todas as condições, os resultados dos picos desta variável foram agrupados em um só gráfico apresentado na Figura 4.15. Desta figura observa-se que a usinagem com a técnica convencional resultou, em geral, nos maiores picos de potência monitorados, principalmente ao empregar a maior penetração de trabalho, independente da grana mesh e velocidade da peça empregados, sendo que os maiores valores, que situaram-se próximos a 1300 W, foram registrados ao empregar as condições de corte mais severas, maiores a_e e V_w . Já os ensaios

com a técnica MQL+Grafeno, no geral, proporcionou os menores valores de potência em comparação às outras condições de lubri-refrigeração, principalmente ao analisar os ensaios realizados empregando menor velocidade da peça, $V_w = 3$ m/min, e maior penetração de trabalho, $a_e = 30$ μm (1079,37 W para o ensaio realizado com rebolo de grana mesh 46 e 952,65 W para o de 60). Estes resultados podem ser atribuídos à presença das partículas de grafeno no fluido de corte que atuaram como lubrificante sólido na interface rebolo/peça e reduziu os esforços de corte necessários para a retirada de material. Desta forma, pode-se inferir que o fluido de corte contendo grafeno melhora o acabamento (menores valores de rugosidade), gera superfícies com melhor textura (menor quantidade de regiões com deformação plástica e sulcos mais uniformes), promove a redução dos danos térmicos ao componente (menor variação dos valores de microdureza com relação à microdureza inicial do material) e exige menores esforços de corte (representa economia de energia para o processo de retificação).

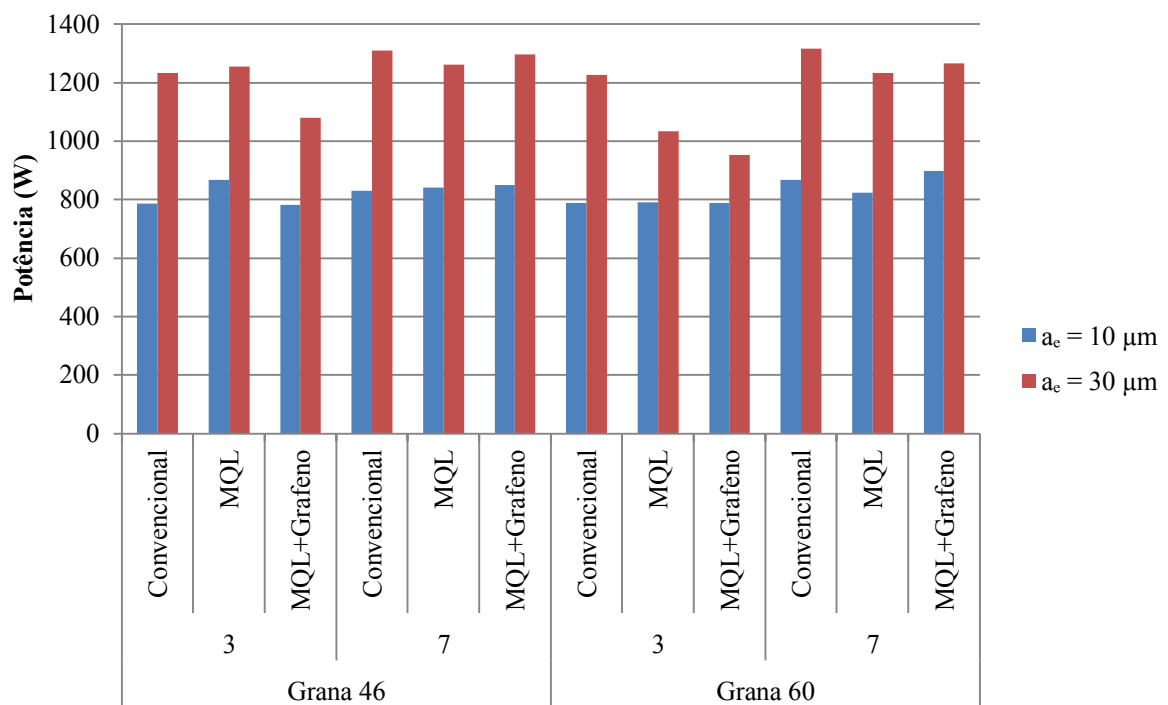


Figura 4.15 - Picos de potência obtidos para cada ensaio realizado.

Huang; Liu; Wu (2016) empregaram fluido de corte contendo nanotubos de carbono de paredes múltiplas dispersos ao fluido de corte na retificação do aço para molde NAK80 e os resultados obtidos mostraram que a adição destas partículas contribuiu para a redução dos

esforços de corte do processo. Wang et al. (2016) testaram o desempenho de diversas partículas (MoS_2 , SiO_2 , diamante, nanotubos de carbono, Al_2O_3 e ZrO_2 ,) adicionadas ao fluido de corte no processo de retificação plana de uma liga de níquel GH4169 (equivalente ao Inconel 718) e também constataram que os menores esforços de corte foram registrados após a usinagem com fluido contendo as partículas sólidas, em comparação com a condição de lubri-refrigeração convencional, pelo fato destas partículas atuarem melhorando as propriedades lubrificantes do fluido de corte, sendo necessário assim menor quantidade de energia empregada para a remoção de material. Zhang et al. (2016) também observaram a influência positiva das partículas sólidas no que diz respeito a potência do processo, onde justificam os resultados obtidos pela melhoria do poder de lubrificação do fluido de corte pela adição das partículas sólidas. Mello (2015) e Oliveira (2017), ao retificarem superligas de titânio e de níquel, respectivamente, constataram comportamento semelhante ao encontrado neste trabalho, que a potência reduziu com o emprego de partículas de grafeno multicamadas, fato que eles atribuíram à redução do atrito dos abrasivos com a peça pelo aumento da lubrificação do sistema.

Na Tabela 4.10 é apresentada a ANOVA referente aos valores de potência obtidos durante o processo de retificação comparando as três condições de lubri-refrigeração empregadas e na Figura 4.16 os gráficos que representam o efeito das variáveis de entrada sobre este parâmetro, enquanto nas Tabelas 4.11, 4.12 e 4.13 são apresentadas a ANOVA comparando, respectivamente, as condições de lubri-refrigeração convencional com MQL, MQL com MQL+Grafeno e convencional com MQL+Grafeno. Como pode ser observado destas tabelas, o único fator que influenciou significativamente nos valores de potência, em todas as situações avaliadas (Tabelas 4.10, 4.11, 4.12 e 4.13), foi a penetração de trabalho. Porém, ao avaliar os efeitos das variáveis de entrada (Tabela 4.10) constata-se que o aumento da penetração de trabalho e velocidade da peça e a redução do tamanho dos grãos abrasivos (ou seja, aumentando a grana mesh) resultaram na elevação do valor médio de potência e, dentre as condições de lubri-refrigeração testadas, o emprego da técnica MQL+Grafeno resultou no menor valor médio de potência, enquanto que a usinagem com técnica convencional o maior.

Tabela 4.10 - Análise de variância (ANOVA) para a potência de retificação comparando as três condições de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL+Grafeno).

Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	$4,2 \cdot 10^{-10}$
Velocidade da peça (V_w)	0,252321
Grana do rebolo	0,701788
Condição de lubri-refrigeração	0,879455
$a_e \times V_w$	0,089318
$a_e \times$ grana do rebolo	0,350801
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,329427
$V_w \times$ grana do rebolo	0,688031
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,843296
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,918824

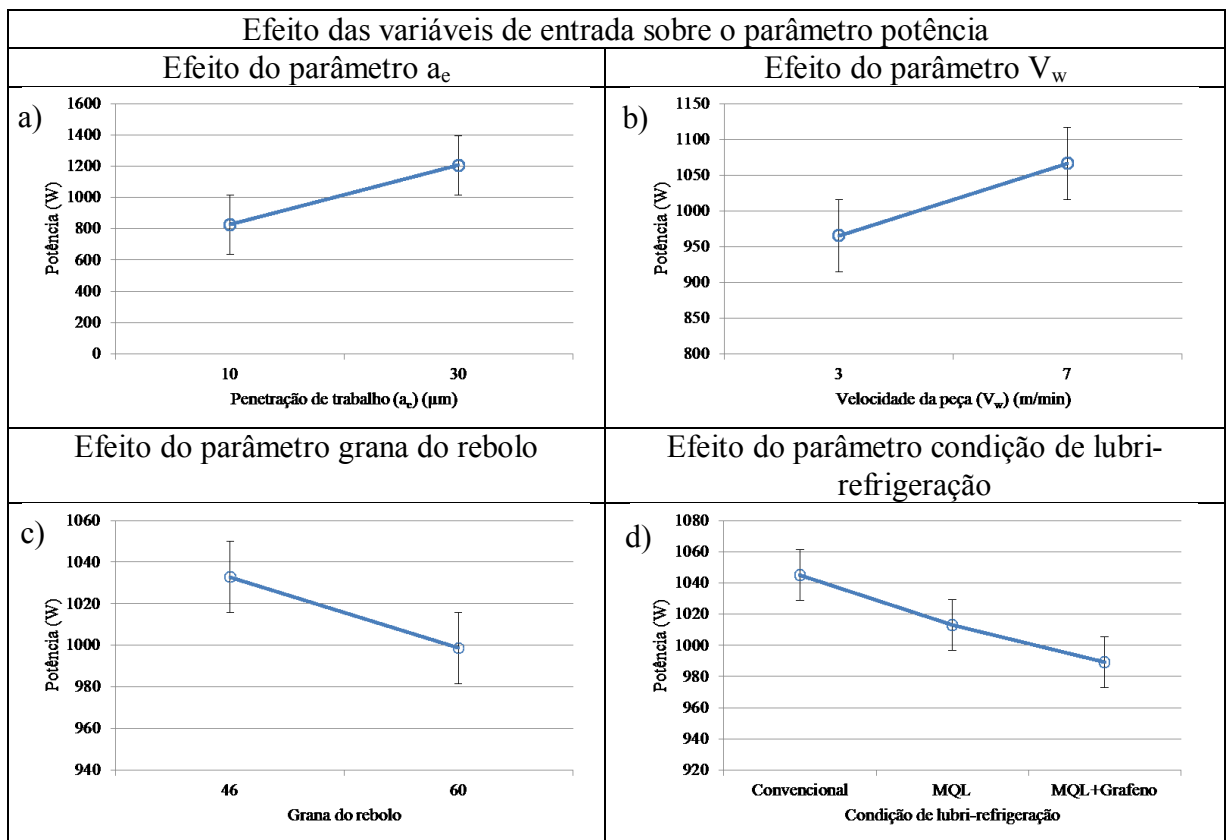


Figura 4.16 - Efeito das variáveis de entrada sobre os valores de potência: a) a_e ; b) V_w ; c) grana do rebolo; d) condição de lubri-refrigeração.

Tabela 4.11 - Análise de variância (ANOVA) para a potência de retificação comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL.

Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	$6,64.10^{-9}$
Velocidade da peça (V_w)	0,588878
Grana do rebolo	0,741975
Condição de lubri-refrigeração	0,783156
$a_e \times V_w$	0,325162
$a_e \times$ grana do rebolo	0,468707
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,205663
$V_w \times$ grana do rebolo	0,762789
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,938114
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,699340

Tabela 4.12 - Análise de variância (ANOVA) para a potência de retificação comparando as condições de lubri-refrigeração MQL e MQL+Grafeno.

Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	$5,58.10^{-6}$
Velocidade da peça (V_w)	0,263873
Grana do rebolo	0,591793
Condição de lubri-refrigeração	0,820956
$a_e \times V_w$	0,071737
$a_e \times$ grana do rebolo	0,351837
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,660492
$V_w \times$ grana do rebolo	0,652171
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,564480
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,789071

Tabela 4.13 - Análise de variância (ANOVA) para a potência de retificação comparando as condições de lubri-refrigeração convencional e MQL+Grafeno.

Fator:	p-valor:
Penetração de trabalho (a_e)	$1,34.10^{-6}$
Velocidade da peça (V_w)	0,270675
Grana do rebolo	0,944399
Condição de lubri-refrigeração	0,628546
$a_e \times V_w$	0,178397
$a_e \times$ grana do rebolo	0,547281
$a_e \times$ condição de lubri-refrigeração	0,170775
$V_w \times$ grana do rebolo	0,845848
$V_w \times$ condição de lubri-refrigeração	0,656581
Grana do rebolo $\times$ condição de lubri-refrigeração	0,884675

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

De acordo com os resultados experimentais obtidos com a retificação plana tangencial do aço SAE 52100 sob diferentes condições de corte e de lubri-refrigeração, as seguintes conclusões foram obtidas:

- A maior parte dos valores da rugosidade R_a se encontraram abaixo de $0,63 \mu\text{m}$, valor este considerado como sendo o limite máximo para a retificação de semi-acabamento;
- Conforme já esperado, tanto o aumento da penetração de trabalho (a_e) quanto da velocidade da peça (V_w) resultou na elevação dos valores médios de rugosidade dos dois parâmetros (R_a e R_z). Além disso, o aumento da grana mesh do rebolo (redução do tamanho dos abrasivos) resultou na redução dos valores médios de rugosidade, comportamento este de acordo com as informações contidas na literatura;
- Dentre todas as condições de lubri-refrigeração empregadas, o fluido aplicado via a técnica MQL+Grafeno resultou, no geral, em superfícies com menores valores médios de rugosidade para a maioria das condições testadas, enquanto a usinagem com a técnica convencional nos maiores;
- Com relação aos valores de microdureza, as maiores quedas, ou seja, maior variação dos valores abaixo da superfície retificada, foram registradas ao utilizar a condição convencional de aplicação de fluido de corte e que a redução neste valor é evidência da presença de danos térmicos ao componente, enquanto que o emprego da condição MQL+Grafeno se destacou por ter resultado na menor variação de valores de microdureza entre as condições de lubri-refrigeração testadas;

- Assim como verificado nos valores de rugosidade, o incremento do parâmetro a_e resultou em componentes com maiores quedas (variação) de microdureza com relação aos ensaios realizados com $a_e=10\text{ }\mu\text{m}$. Porém, ao contrário do observado na rugosidade, as menores reduções dos valores de microdureza foram observadas com o aumento de V_w em comparação com o aumento de a_e . A granulometria dos grãos abrasivos também influenciou estes valores sendo as maiores quedas obtidas com emprego do rebole de grana mesh 46;
- A condição de corte na qual foi observada as maiores quedas do parâmetro microdureza foi empregando $a_e=30\text{ }\mu\text{m}$ e $V_w=3\text{ m/min}$, sendo esta mesma condição a que resultou nas piores superfícies retificadas;
- No geral, o aumento de a_e e do tamanho dos grãos abrasivos resultaram em superfícies com maiores quantidades de regiões com deformação plástica e sulcos não tão uniformes. Ou seja, o acabamento dos componentes retificados piorou com a elevação destes parâmetros. Entretanto, em nenhuma condição de corte empregada foi observada a presença de trincas;
- Em relação aos valores de potência obtidos durante a realização dos ensaios, conforme já esperado, o aumento da penetração de trabalho e da velocidade da peça resultaram nos maiores valores. A retificação com aplicação do fluido de corte via a condição MQL+Grafeno acarretou em menores valores de potência de retificação;
- A ordem de desempenho das condições de lubri-refrigeração empregadas neste trabalho em termos dos parâmetros de rugosidade, microdureza, imagens da superfície e potência de corte foi: 1º MQL+Grafeno, 2º MQL e 3º Convencional.

Sugestões para trabalhos futuros

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

- i. Realizar ensaios com as mesmas condições de corte empregadas neste trabalho na retificação de superfícies interrompidas;
- ii. Avaliar a influência de outros tipos de partículas sólidas (MoS_2 , nanotubos de carbono e óxido de alumínio) sobre a integridade superficial do aço SAE 52100;
- iii. Investigar a influência das partículas de grafeno na retificação cilíndrica do aço SAE 52100 em diferentes condições de corte;
- iv. Realizar ensaios no material apresentado neste trabalho comparando diferentes tipos de fluido de corte em diferentes concentrações de óleo na água;
- v. Testar diferentes profundidades de corte do rebolo e avaliar a integridade da superfície deste mesmo aço por meio de ruído magnético de Barkausen;
- vi. Monitorar o processo de retificação via a técnica de emissão acústica em ensaios com as mesmas condições de corte e de lubri-refrigeração empregadas nesta pesquisa, além das variáveis de saída empregadas neste trabalho.

Referências Bibliográficas

- AGROMAYOR, R., CABALEIRO, D., PARDINAS, A. A., VALLEJO, J. P., FERNANDEZ-SEARA, J., LUGO, L. Heat Transfer Performance of Functionalized Graphene Nanoplatelet Aqueous Nanofluids. *Materials Science Journal*, 2016. <https://doi.org/10.3390/ma9060455>
- ALBERTS, M., KALAITZIDOU, K., MELKOTE, S. An investigation of graphite nanoplatelets as lubricant in grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.49, 2009, p. 966-970. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2009.06.005>
- 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*, 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4037041>
- ANFAVEA (Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores). 2018. Disponível em: <www.anfavea.com.br/estatisticas.html>. Acesso em: 13 jul. 2018.
- ARENCÍBIA, R. V. Rugosidade. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2017. 99 p. Notas de aula.
- ASM HANDBOOK. “Machining”. 10th Edition, Volume 16, ASM International, 2004. 1089 p.
- BARCZAK, L. M., BATOKO, A. D. L., MORGAN, M. N. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 2010, p. 977-985. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2010.07.005>
- BIANCHI, E. C., FERNANDES, O. C., MOGAMI, O., JÚNIOR, C. E. S., VALARELLI, I. D., AGUIAR, P. R. Análise do Comportamento de Rebolos Convencionais na Retificação de Aços Frágeis e Dúcteis. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*, v.XIX, n.3, 1997.
- 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>

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, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-1396-5>

CASTRO, L. N., BIANCHI, E. C., ANDRADE, R. B., MELLO, H. J., AGUIAR, P. R., NETO, L. M. G. Análise de diferentes métodos de lubri-refrigeração no processo de retificação cilíndrica do aço ABNT 52100 com rebolo de carbeto de silício com liga resinóide. Revista Matéria, v.21, n.3, 2016, p.691-705. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620160003.0066>

CHU, B., SINGH, E., KORATKAR, N., SAMUEL, J. Graphene-enhanced environmentally-benign cutting fluids for high performance micro-machining applications. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, v. 13, 2013, p. 5500-5504. <https://doi.org/10.1166/jnn.2013.7538>

CIMM, Centro de Informação Metal Mecânica, 1997-2017.

DAMASCENO, R. F. Análise da influência da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação plana de aço ABNT 4340. 2010. 165p. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru-SP.

DAMASCENO, R. F., RUZZI, R. S., FRANÇA, T. V., MELLO, H. J., SILVA, R. B., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Performance evaluation of various cooling-lubrication techniques in grinding of hardened AISI 4340 steel with vitrified bonded CBN wheel. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017. <https://doi.org/10.1007/s00170-017-0434-7>

DIMAS FERRAMENTAS DIAMANTADAS (São Paulo). **Dressadores para rebolo**. 2017. Disponível em: <<http://www.dimasferramentas.com.br/dressadores-para-rebolo>>. Acesso em: 13 jul. 2017.

FEDOSEEV, O. B., MALKIN, S. Analysis of Tempering and Rehardening for Grinding of Hardened Steels. ASME, v. 113, 1991. <https://doi.org/10.1115/1.2899712>

FUSSE, R. Y. Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho. 2005. 118p. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru-SP.

GOMES, M. O. Estudo da influência dos parâmetros de corte no processo de retificação plana tangencial do aço SAE 52100 utilizando rebolo de carbetto de silício. 2016. 87p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de São João del-Rei, São João del-Rei-MG.

GUIMARÃES, C. Retificação plana de aços para moldes e matrizes em várias condições de corte e diferentes técnicas de aplicação de fluido de corte. 2016. 219p. Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.
<http://dx.doi.org/10.14393/ufu.te.2018.44>

HADAD, M., SADEGHI, B. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2012, p. 1-15.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2012.07.003>

HADAD, M. J., TAWAKOLI, T., SADEGHI, M. H., SADEGHI, B. Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 2011, p. 10-17.
<https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2011.11.010>

HUANG, W. T., LIU, W. S., WU, D. H. Investigations into lubrication in grinding processes using MWCNTs nanofluids with ultrasonic-assisted dispersion. Journal of Cleaner Production, 2016, p. 1553-1559. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.038>

KALITA, P., MALSHE, A. P., KUMAR, S. A., YOGANATH, V. G., GURUMURTHY, T. Study of specific energy and friction coefficient in minimum quantity lubrication grinding using oil-based nanolubricants. Journal of Manufacturing Processes, 2012, p. 160-166.
<https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2012.01.001>

KATNA, R., SINGH, K., AGRAWAL, N., JAIN, S. Green Manufacturing – Performance of a Biodegradable Cutting Fluid. Materials and Manufacturing Processes, 2017.
<https://doi.org/10.1080/10426914.2017.1328119>

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

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, G. J., RHEE, C. K.. Enhanced thermal conductivity of nanofluids containing graphene nanoplatelets prepared by ultrasound irradiation. *Journal of Materials Science*, v. 49, 2013, p. 1506-1511. <https://doi.org/10.1007/s10853-013-7831-6>

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

LI, B., LI, C., ZHANG, Y., WANG, Y., YANG, M., JIA, D., ZHANG, N., WU, Q. Effect of the physical properties of different vegetable oil-based nanofluids on MQLC grinding temperature of Ni-based alloy. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2016. <https://doi.org/10.1007/s00170-016-9324-7>

LIN, J., WANG, L., CHEN, G. Modification of Graphene Platelets and their Tribological Properties as a Lubricant Additive. *Tribology Letters*, v. 41, 2010, p. 209-215. <https://doi.org/10.1007/s11249-010-9702-5>

LOVEJOY, D. *Magnetic Particle Inspection – A practical guide*. 1^a ed. Kluwer Academic Publishers, 1993. 458p. <https://doi.org/10.1007/978-94-011-1536-0>

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

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

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

MAO, C., ZHOU, Z., ZHANG, J., HUANG, X., GU, D. An experimental investigation of affected layers formed in grinding of AISI 52100 steel. *The International Journal of Advanced*

Manufacturing Technology, v.54, 2011, p. 515-523. <https://doi.org/10.1007/s00170-010-2965-z>

MARCHI, M., BAPTISTA, F. G., AGUIAR, P. R., BIANCHI, E. C. Grinding process monitoring based on electromechanical impedance measurements. Measurement Science and Technology, v. 26, 2015. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/26/4/045601>

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, A. V. Retificação da liga Ti-6Al-4V, com fluido de corte contendo partículas de grafeno. 2015. 95p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

MOLAIE, M. M., AKBARI, J., MOVAHHEDY, M. M. Ultrasonic assisted grinding process with minimum quantity lubrication using oil-based nanofluids. Journal of Cleaner Production, v.129, 2016, p. 212-222. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.080>

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

NESLUŠAN M., ČIŽEK J., KOLAŘÍK 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, 2016, p. 104-117. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.09.015>

NETO, L. M. G. Aplicação de Fluido de Corte em Quantidades Reduzidas para Usinagem do Aço SAE 52100 no Processo de Retificação Centerless de Passagem. 2013. 130p. Tese de Doutorado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru – SP.

NETO, L. M., PAIVA, R. L., SILVA, R. B., BIANCHI, E. C., EZUGWU, E. O. Influence of Combination of Multi-jet nozzle and low flow rate of cutting fluid on the microstructure

during through-feed centerless grinding of SAE 52100 steel. STLE Annual Meeting & Exhibition, 2015.

NEUGEBAUER R., BOUZAKIS K.D., DENKENA B., KLOCKE F., STERZING A., TEKKAYA A. E., WERTHEIM R. Velocity effects in metal forming and machining processes, CIRP Annals – Manufacturing Technology, v.60, 2011, p. 627-650. <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2011.05.001>

NORTON COMPANY. 2018. Disponível em: <<https://www.nortonabrasives.com/pt-br/gr%C3%A3os-abrasivos-e-inova%C3%A7%C3%A3o-nos-processos>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

NUSSBAUM, G. CH. Rebolos e Abrasivos: tecnologia Básica, Vols.: I, II e III. São Paulo: Editora Ícone, 1988.

OLIVEIRA, D. Retificação de Inconel 718 com multicamadas de grafeno dispersas em fluido de corte aplicado via técnica MQL. 2017. 109p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG. <http://dx.doi.org/10.14393/ufu.di.2018.1125>

PAIVA, R. L. Aplicação de fluido de corte a baixas temperaturas na retificação plana tangencial do aço SAE 52100. 2016. 108p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG.

PAIVA, R. L., SILVA, R. B., JACKSON, M. J., ABRÃO, A. M. The Influence of Cutting Fluid Concentration on Surface Integrity of VP80 Steel and the Influence of Cutting Fluid Flow Rate on Surface Roughness of VPATLAS Steel After Grinding. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, v.139, 2017. <https://doi.org/10.1115/1.4038149>

PAVAN, R. B., GOPAL, A. V., AMRITA, M., GORIPARTHI, B. K. Experimental investigation of graphene nanoplatelets-based minimum quantity lubrication in grinding Inconel 718. Journal of Engineering Manufacture, 2017. <https://doi.org/10.1177/0954405417728311>

PEREIRA, P. A. S. Estudo preliminar da aplicação da técnica de correntes parasitas visando a inspeção submersa de elementos combustíveis. 2007. 94p. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro – RJ.

RABIEI, F., RAHIMI, A. R., HADAD, M. J., ASHRAFIJOU, M. Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. *Journal of Cleaner Production*, 2014, p. 447-460.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.08.045>

RENTERIA, J. D., NIKA, D. L., BALANDIN, A. A. Graphene Thermal Properties: Applications in Thermal Management and Energy Storage. *Applied Science*, 2014, 525-547.
<https://doi.org/10.3390/app4040525>

ROWE, W. B. *Modern Grinding Techniques*. Scrivener Publishing LLC, 2010.
<https://doi.org/10.1002/9780470882313>

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

RUZZI, R. S. Aplicação de Fluido de Corte pela Técnica MQL com Limpeza do Rebolo de Alumina na Retificação do Aço ABNT 4340. 2017. 94p. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Bauru – SP.

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>

SAINT GOBAIN ABRASIVES. *Fundamentos em Processo de Retificação*, Univen – Universidade de Vendas - Saint-Gobain Abrasives. 2016. 87p. Apostila.

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

SAMUEL, J., RAFIEE, J., DHIMAN, P., YU, Z.-Z., KORATKAR, N. Graphene Colloidal Suspensions as High Performance Semi-Synthetic Metal-Working Fluids. *The Journal of Physical Chemistry C*, ACS Publications, v. 115, 2011, p. 3410-3415.
<https://doi.org/10.1021/jp110885n>

SHAIKH, S., LAFDI, K., PONNAPPAN, R. Thermal conductivity improvement in carbon nanoparticle doped PAO oil: an experimental study. *Journal of Applied Physics*, 2007. <https://doi.org/10.1063/1.2710337>

SHAJI, S., RADHAKRISHNAN, V. Analysis of process parameters in surface grinding with graphite as lubricant based on the Taguchi method. *Journal of Materials Processing Technology*, v.141, 2003, p. 51-59. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)01112-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)01112-3)

SHOKOOHI, Y., SHEKARIAN, E. Application of Nanofluids in Machining Processes – A Review. *Journal of Nanoscience and Technology*, 2015, p. 59-63.

SILVA, L. R., BIANCHI, E. C., FUSSE, R. Y., CATAI, R. E., FRANÇA, T. V., AGUIAR, P. R. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant – MQL in grinding. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v. 47, 2007, p. 412-418. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2006.03.015>

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 processes. *Journal of Cleaner Production*, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.01.033>

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

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

SILVA, R. B., FERREIRA, F. I., BAPTISTA, F. G., AGUIAR, P. R., RUZZI, R. S., HUBNER, H. B., FONSECA, M. P. C., BIANCHI, E. C. Electromechanical impedance (EMI) technique as alternative to monitor workpiece surface damages after the grinding operation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v. 98, 2018, p. 2429–2438. <https://doi.org/10.1007/s00170-018-2390-2>

SOUZA, A. J. Fundamentos da usinagem de acabamento por abrasão mecânica. Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões, Santo Ângelo - RS, 2007. 46p. Apostila.

TAWAKOLI, T., HADAD, M., SADEGHI, M. H., DANESHI, A., SADEGHI, B. Minimum quantity lubrication in grinding: effects of abrasive and coolant-lubricant types. *Journal of Cleaner Production*, 2011, p. 2088-2099. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.06.020>

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

TELLE, R. Properties of ceramics. In: Marinescu, I.D., Toenshoff, H.K., Inasaki, I. (Eds.), *Handbook of Ceramic Grinding and Polishing*. Noyes Publications/William Andrew Publishing, Norwich, NY, Chapter 1, 2000. <https://doi.org/10.1016/B978-081551424-4.50003-2>

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

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

WANG, Y., LI, C., ZHANG, Y., LI, B., YANG, M., ZHANG, X., GUO, S., LIU, G., ZHAI, M. Comparative evaluation of the lubricating properties of vegetable-oil-based nanofluids between frictional test and grinding experiment. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, p. 94-104. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2017.02.001>

WINTER ABRASIVOS. 2018. Disponível em: <<http://www.winter.com.br/ponta-unica.aspx>>. Acesso em: 13 jul. 2018.

YIN, J., BAI, Q., ZHANG, B. Methods for Detection of Subsurface Damage: A Review. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*, 2018, p. 31-41. <https://doi.org/10.1186/s10033-018-0229-2>

YU, W., XIE, H., WANG, X., WANG, X. Significant thermal conductivity enhancement for nanofluids containing graphene nanosheets. *Physics Letters A*, 2011, p. 1323-1328. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2011.01.040>

ZHANG, Y., LI, C., YANG, M., JIA, D., WANG, Y., LI, B., HOU, Y., ZHANG, N., WU, Q. Experimental evaluation of cooling performance by friction coefficient and specific friction energy in nanofluid minimum quantity lubrication grinding with different types of vegetable oil. *Journal of Cleaner Production*, 2016, p. 685-705. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.08.073>

ZHANG, Y., LI, C., JIA, D., ZHANG, D., ZHANG, X. Experimental evaluation of MoS₂ nanoparticles in jet MQL grinding with different types of vegetable oil as base oil. *Journal of Cleaner Production*, 2014, p. 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.10.027>