



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Bauru



**EFEITO DA REFRIGERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO UTILIZADO EM MQL
(MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE) APLICADO AO PROCESSO
DE RETIFICAÇÃO**

RICARDO BEGA DE ANDRADE

Bauru, SP
2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
Campus Bauru



**EFEITO DA REFRIGERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO UTILIZADO EM MQL
(MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE) APLICADO AO PROCESSO
DE RETIFICAÇÃO**

RICARDO BEGA DE ANDRADE

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia da UNESP – Campus de Bauru, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Co-orientador: Prof. Dr. Vicente Luiz Scalon

**Bauru – SP
2017**

Andrade, Ricardo Bega.
Efeito da refrigeração do ar comprimido
utilizado em MQL (mínima quantidade de
lubrificante) aplicado ao processo de retificação /
Ricardo Bega de Andrade, 2017
107 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017

1. Retificação cilíndrica. 2. Rebolo de óxido
de alumínio. 3. Mínima Quantidade de Lubrificante
(MQL). 4. MQL com ar frio 5. Influência da
viscosidade do fluido. I. Universidade Estadual
Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.




UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru



ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE RICARDO BEGA DE ANDRADE, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 21 dias do mês de julho do ano de 2017, às 09:00 horas, no(a) Anfiteatro da Seção Técnica de Pós-graduação da FEB, reuniu-se a Comissão Examinadora da Defesa Pública, composta pelos seguintes membros: Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI - Orientador(a) do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru - UNESP, Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA, Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de RICARDO BEGA DE ANDRADE, intitulada **EFEITO DA REFRIGERAÇÃO DO AR COMPRIMIDO UTILIZADO EM MQL (MÍNIMA QUANTIDADE DE LUBRIFICANTE) APLICADO AO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO** . Após a exposição, o discente foi arguido oralmente pelos membros da Comissão Examinadora, tendo recebido o conceito final: APROVADO_____. Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelos membros da Comissão Examinadora.



Prof. Dr. EDUARDO CARLOS BIANCHI



Prof. Dr. ROSEMAR BATISTA DA SILVA



Prof. Dr. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ

Dedico este trabalho à minha família.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus por todas as graças derramadas sobre mim durante toda minha vida, por me proporcionar saúde, paz e capacidade de aprendizado e, assim, conseguir concluir mais esta fase de minha vida.

Ao meu pai, Antonio Carlos de Andrade, a minha mãe, Márcia Aparecida Bega de Andrade, e a minha irmã, Débora Maria Bega de Andrade, quem sempre estiveram presente, me deram forças e suporte para que eu conseguisse chegar onde estou. Como também pelas dicas e conselhos que foram bem aplicados.

Ao meu orientador, Professor Doutor Eduardo Carlos Bianchi, quem me orientou de maneira espetacular durante o período de mestrado, quem em todos os momentos em que precisei de suas sugestões, elas vieram de maneira simples e me ajudaram..

A Universidade Estadual Paulista “Júlio Mesquita Filho” (UNESP) *campus* Bauru, pelo compromisso em disponibilizar recursos e conhecimento aos alunos.

Aos servidores da Faculdade de Engenharia que me ajudaram neste trabalho, principalmente ao Hamilton José de Melo, Hélio Aparecido de Souza e Cristiano Angélico, que em todos os momentos de experimentos e análises de resultados estiveram presentes e dispostos a ajudar.

Ao Professor Doutor Luiz Eduardo de Angelo Sanchez pelo empréstimo do secador de ar ao Laboratório de Usinagem por Abrasão, para que assim pudéssemos realizar os experimentos utilizando ar frio.

Ao aluno de Iniciação Científica Felipe Pererira Coelho e ao aluno de doutorado Rodrigo de Souza Ruzzi da Universidade Federal de Uberlândia pela ajuda e acompanhamento durante os experimentos e medições após os experimentos.

À professora Doutora Neusa Maria Pavão Battaglini quem não poupou esforços, por disponibilizar seu tempo e seu laboratório para a realização da análise da viscosidade do fluido de corte. Eu agradeço também ao aluno Caio Castanho Xavier pela ajuda e ensinamento sobre as técnicas de realização das fotos para metalografia.

À minha namorada Jéssica Fernanda Bernardes Roda, quem me deu força e apoio durante este período de mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos para a realização do mestrado.

Às empresas Saint Gobain (Norton) pela doação dos rebolos e apoio fornecido ao grupo de pesquisa do Laboratório de Usinagem por Abrasão, ITW Chemical[®] pela doação do fluido de corte LB 1100 utilizado na técnica MQL e à Quimatic Tapmatic[®] pela doação do fluido de corte ME-1.

À empresa EMUGE-FRANKEN[®] e, principalmente, ao Sr. Alexandre Araújo Lodi, pela doação do tubo de vórtice para o Laboratório de Usinagem por Abrasão (UNESP Bauru), também utilizado nesta investigação.

Por último, agradeço a todos que participaram direta ou indiretamente na realização deste trabalho.

“O questionamento constante é a primeira chave para a sabedoria” (**Pedro Abelardo**).

RESUMO

O processo de retificação é um processo de usinagem por abrasão que visa principalmente obtenção de superfícies com baixa rugosidade e tolerância dimensional estreita. Essa combinação é possível por causa das múltiplas arestas de corte sem geometria definida que removem material da peça em pequenas penetrações de trabalho. Contudo é um processo que apresenta problemas para a peça, devido à elevada geração de calor. Este calor pode causar alterações metalúrgicas, dentre outras. Por esta razão é necessário utilizar fluido de corte para refrigerar a zona de retificação. Ao mesmo tempo é preciso buscar uma produção mais sustentável em relação à técnica de lubri-refrigeração convencional. Esta técnica vem sendo substituída por outras que visam redução de custo e redução e/ou eliminação do impacto ambiental, sem prejuízos para qualidade da peça. Uma técnica de lubri-refrigeração que vem substituindo a técnica convencional competitivamente é a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL), que é bem difundida em processos de usinagem com geometria de corte definida (por exemplo, torneamento, fresamento e furação) e com resultados promissores também em processos de retificação. Entretanto, pelo fato da técnica MQL ser menos estudada no processo de retificação, seu desempenho ainda apresenta algumas restrições devido à sua baixa eficiência de refrigeração, que pode ocasionar danos térmicos à peça. Neste sentido, a realização deste trabalho consistiu em substituir o ar à temperatura ambiente do MQL por um ar a menor temperatura. Foi retificado o aço ABNT 4340 temperado e revenido com rebolo convencional de óxido de alumínio. Os experimentos foram realizados para as três diferentes técnicas de lubri-refrigeração (convencional, MQL e MQL com ar frio [MQL+AF]), com velocidade de corte igual a 30 m/s e com velocidade de mergulho variada em três graus de severidade (0,25; 0,50 e 0,75) mm/min. Para promover a redução da temperatura do ar misturado ao MQL, foi utilizado um sistema de refrigeração de ar por tubo de vórtice, visando aumentar a eficiência na retirada de calor do processo. Foram analisadas como variáveis de saída, a viscosidade relacionada ao fluido de corte utilizado nas técnicas MQL, a rugosidade (R_a), circularidade e integridade microestrutural relacionadas à peça, o desgaste relacionado ao rebolo e a potência de retificação relacionada ao processo. As técnicas MQL, nas duas formas de aplicação, apresentaram desempenho superior à técnica convencional. A técnica MQL+AF, mesmo com o ar frio atuando na retirada de mais calor da zona de retificação, apresentou desempenho geral inferior à técnica MQL,

devido à influência exercida pela viscosidade do fluido à menor temperatura de aplicação.

Palavras-chaves: *Retificação cilíndrica; Rebolo de óxido de alumínio; Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL); MQL com ar frio; Influência da viscosidade do fluido.*

ABSTRACT

The grinding process is an abrasion machining process that is mainly aimed at obtaining surfaces with low roughness and narrow dimensional tolerance. This combination is possible because of the multiple cutting edges without defined geometry that remove material from the workpiece at small work penetrations. However, it is a process that presents problems for the workpiece, due to the high generation of heat. This heat can cause metallurgical changes, among others. For this reason it is necessary to use cutting fluid to cool the grinding zone. At the same time it is necessary to seek a more sustainable production compared to the conventional lubri-cooling technique. This technique has been replaced by others that aim at cost reduction and reduction and/or elimination of environmental impact, without any damage to the quality of the part. A lubri-cooling technique that is replacing the conventional technique, competitively, is the Minimum Quantity of Lubricant (MQL) technique, which is well diffused in machining processes with defined cutting geometry (for example, turning, milling and drilling) and with promising results also in grinding processes. However, due the MQL technique is less studied in the grinding process, its performance still presents some restrictions due to its low cooling efficiency, which can cause thermal damage to the part. In this sense, the accomplishment of this work consisted in replacing the air at the ambient temperature of the MQL by air at a lower temperature. The quenched and tempered ABNT 4340 steel was ground with conventional aluminum oxide grinding wheel. The tests were carried out for three different lubri-cooling techniques (conventional, MQL and MQL with cold air [MQL + AF]), with a cutting speed of 30 m/s and a plunge speed varied in three degrees of severity (0.25, 0.50 and 0.75) mm/min. To promote the reduction of the temperature of the air mixed to the MQL, a vortex tube air cooling system was used aiming to increase the heat removal efficiency of the process. As output variables were analyzed the viscosity related to the cutting fluid used in MQL techniques, the roughness, roundness and microstructural integrity related to the workpiece, the wear related to the grinding wheel and the grinding power related to the grinding process. The MQL techniques, in both forms of application, presented superior performance to the conventional technique. The MQL+AF technique, even with the cold air acting to remove more heat from the grinding zone, presented worst general performance than the MQL technique, due to the influence exerted by the viscosity of the fluid at the lower application temperature.

Keywords: *Cylindrical grinding; Oxide aluminum wheel; Minimum quantity of lubricant (MQL); MQL with cold air; Influence of fluid viscosity.*

SUMÁRIO

RESUMO	viii
ABSTRACT	x
Lista de Figuras	xv
Lista de Tabelas	xviii
1. Introdução	22
2. Revisão bibliográfica	26
2.1 Retificação	26
2.1.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho	27
2.1.2 Parâmetros para o processo de retificação	28
2.1.2.1 Velocidade de corte (v_s)	28
2.1.2.2 Velocidade da peça (v_w)	28
2.1.2.3 Comprimento de contato (L_c)	29
2.1.2.4 Profundidade de corte (ae)	30
2.1.2.5 Taxa de remoção de material (Q_w)	30
2.1.2.6 Taxa de remoção de material específica (Q_w')	31
2.1.2.7 Espessura equivalente de corte (heq)	31
2.1.3 Mecanismo de formação de cavaco no processo de retificação	32
2.1.4 Temperatura no processo de retificação	33
2.1.5 Rebolo convencional de óxido de alumínio (Al_2O_3)	34
2.2 Processo de dressagem do rebolo	34
2.3 Fluidos de corte e técnicas de aplicação	37
2.3.1 Técnica convencional de aplicação do fluido de corte	38
2.3.2 Métodos de otimização da técnica convencional de aplicação de fluido de corte	41
2.3.3 Técnica MQL	43
2.3.4 A Técnica MQL no processo de retificação	44

2.3.5	Técnica MQL com criogenia na retificação	46
2.4	Tubo de vórtice	50
3.	Materiais e métodos	52
3.1	Equipamentos utilizados	52
3.2	Técnicas de lubri-refrigeração	53
3.2.1	Técnica convencional de aplicação de fluido de corte	53
3.2.2	Técnica MQL a temperatura ambiente	54
3.2.3	Técnica MQL com jato auxiliar de ar frio	55
3.3	Parâmetros utilizados nos ensaios	59
3.4	Condições dos ensaios	61
3.5	Variáveis de saída para análise do processo	63
3.5.1	Viscosidade do fluido	64
3.5.2	Rugosidade	65
3.5.3	Desvios de circularidade.....	67
3.5.1	Integridade Microestrutural	68
3.5.1.1	Microdureza	68
3.5.1.2	Microscopia ótica.....	70
3.5.2	Desgaste do rebolo	70
3.5.3	Potência de retificação.....	72
4.	Resultados e discussões	74
4.1	Viscosidade do fluido	74
4.2	Rugosidade	77
4.3	Desvios de circularidade.....	79
4.4	Integridade microestrutural.....	80
4.5	Desgaste do rebolo.....	90
4.6	Potência de retificação	92
5.	Conclusões	95

6. Sugestões para futuros trabalhos	96
Bibliografia.....	97
Apêndice A – Programa utilizado para os experimentos	107
Apêndice B - Programa utilizado para as impressões dos perfis do rebolo	107

Lista de Figuras

Figura 1: Representação esquemática do processo de retificação externa de mergulho. Fonte: Malkin e Guo (2008), modificada.	27
Figura 2: Etapas de formação de cavaco em materiais dúcteis no processo de retificação. Fonte: Klocke (2009), modificada.	32
Figura 3: Esquema do processo de dressagem do rebolo.	36
Figura 4: Porcentagem média dos custos de produção. Fonte: Walker (2013). Modificada.	39
Figura 5: Porcentagem dos custos com fluido de corte. Fonte: Walker (2013). Modificada.	40
Figura 6: Posicionamento dos bocais de Ebbrell et al. (2000).	42
Figura 7: Esquema do sistema de bocais para a técnica MQL+CO ₂ . Fonte: Sanchez et al. (2010), modificada.	47
Figura 8: Instalação experimental esquemática do sistema para a técnica MQL assistida com a técnica criogênica. Fonte: Balan et al. (2016), modificada.	48
Figura 9: Instalação da retificação com técnica MQL e jato de ar frio auxiliar. Fonte: Saberi et al. (2016). Modificada.	49
Figura 10: Fluxo do ar no interior do tubo de vórtice. Fonte: Aljuwayhel et al. (2005), modificada.	50
Figura 11: Esquema do fluxo de gás no tubo de vórtice.	51
Figura 12: Esquema de distribuição da temperatura na câmara do tubo de vórtice. Fonte: Pouraria et al. (2016), modificada.	51
Figura 13: Sistema da técnica Mínima Quantidade de Lubrificante.	54
Figura 14: Desenho do bocal utilizado na técnica MQL (BELENTANI et al., 2014), modificada.	55
Figura 15: Sistema da técnica Mínima Quantidade de Lubrificante assistida com jato de ar frio (MQL+AF).	56
Figura 16: Bocal utilizado na técnica MQL+AF.	56
Figura 17: Tubo de vórtice.	57
Figura 18: Montagem do tubo de vórtice.	58
Figura 19: Organograma de ensaios.	60
Figura 20: Fluxograma da sequência para uma dressagem do rebolo. ...	62

Figura 21: Marcas geradas no rebolo após a retificação (antes da impressão).....	62
Figura 22: Fluxograma de sequência de ensaios.....	63
Figura 23: Reator utilizado para medição de viscosidade do fluido.....	65
Figura 24: Método de medição do desvio de circularidade de acordo com a norma ISO 1101:2012, em que a é um plano qualquer e t é o valor do desvio.	67
Figura 25: Representação esquemática do posicionamento dos perfis de medição do desvio de circularidade.....	68
Figura 26: Ilustração da seção da peça selecionada para análise de microdureza e metalografia.	69
Figura 27: Esquema para posicionamento das endentações e medição da microdureza.	70
Figura 28: Representação esquemática da técnica de impressão para medição do desgaste.	71
Figura 29: Esquema de medição do desgaste. Fonte: Oliveira, 2011.	72
Figura 30: Valores de viscosidade do fluido pela temperatura.....	74
Figura 31: Valores de $\ln\eta$ versus $1/T$	76
Figura 32: Valores de rugosidade em função da velocidade de mergulho após a retificação cilíndrica, com a utilização de três diferentes técnicas de lubri-refrigeração.....	77
Figura 33: Valores de desvio de circularidade em função da velocidade de mergulho após a retificação cilíndrica, com a utilização de três diferentes técnicas de lubri-refrigeração.	79
Figura 34: Valores de microdureza em função da profundidade após a retificação cilíndrica, com a utilização da técnica convencional. A) $vf = 0,25$ mm/min, B) $vf = 0,50$ mm/min e C) $vf = 0,75$ mm/min.....	81
Figura 35: Microestrutura da peça após a retificação cilíndrica, com diferentes velocidades de mergulho e utilização da técnica convencional. A) $vf = 0,25$ mm/min e aumento de 500X; B) $vf = 0,25$ mm/min e aumento de 1000X; C) $vf = 0,50$ mm/min e aumento de 500X; D) $vf = 0,50$ mm/min e aumento de 1000X; E) $vf = 0,75$ mm/min e aumento de 500X; F) $vf = 0,75$ mm/min e aumento de 1000X.	82

Figura 36: Valores de microdureza em função da profundidade após a retificação cilíndrica, com a utilização da técnica MQL. A) $vf = 0,25$ mm/min, B) $vf = 0,50$ mm/min e C) $vf = 0,75$ mm/min..... 84

Figura 37: Microestrutura da peça após a retificação cilíndrica, com diferentes velocidades de mergulho e utilização da técnica MQL. A) $vf = 0,25$ mm/min e aumento de 500X; B) $vf = 0,25$ mm/min e aumento de 1000X; C) $vf = 0,50$ mm/min e aumento de 500X; D) $vf = 0,50$ mm/min e aumento de 1000X; E) $vf = 0,75$ mm/min e aumento de 500X; F) $vf = 0,75$ mm/min e aumento de 1000X..... 86

Figura 38: Valores de microdureza em função da profundidade após a retificação cilíndrica, com a utilização da técnica MQL+AF. A) $vf = 0,25$ mm/min, B) $vf = 0,50$ mm/min e C) $vf = 0,75$ mm/min..... 87

Figura 39: Microestrutura da peça após a retificação cilíndrica, com diferentes velocidades de mergulho e utilização da técnica MQL+AF. A) $vf = 0,25$ mm/min e aumento de 500X; B) $vf = 0,25$ mm/min e aumento de 1000X; C) $vf = 0,50$ mm/min e aumento de 500X; D) $vf = 0,50$ mm/min e aumento de 1000X; E) $vf = 0,75$ mm/min e aumento de 500X; F) $vf = 0,75$ mm/min e aumento de 1000X. 89

Figura 40: Valores de desgaste radial do rebolo em função da velocidade de mergulho após a retificação cilíndrica, com a utilização de três diferentes técnicas de lubri-refrigeração. 91

Figura 41: Valores de potência média de retificação em função da velocidade de mergulho após a retificação cilíndrica, com a utilização de três diferentes técnicas de lubri-refrigeração. 93

Lista de Tabelas

Tabela 1: Características dos tipos de fluidos de corte no processo de retificação. Em que: 1 são os piores e 4 são os melhores. Fonte: Irani, Bauer e Warkentin (2005).....	38
Tabela 2: Relação de pressão, abertura de válvula e temperatura do tubo de vórtice. Fonte: EMUGE-FRANKEN®	57
Tabela 3: Parâmetros de lubri-refrigeração.....	59
Tabela 4: Parâmetros de corte.....	59
Tabela 5: Valores de viscosidade para 0°C e 27°C pela relação do tipo Arrhenius.	75
Tabela 6: Valores de viscosidade entre 0°C e 27°C pela relação Canciam (2008).	76

Abreviaturas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

SAE – Sociedade dos Engenheiros Automotivos

ASTM – Sociedade Americana para Ensaio de Materiais

CBN – Nitreto de Boro Cúbico

CNC – Comando Numérico Computadorizado

ISO – Organização Internacional para Padronização

MQL – Mínima Quantidade de Lubrificante

MQL+AF - Mínima Quantidade de Lubrificante assistida com jato
auxiliar de Ar Frio

DIN – Instituto Alemão para Normatização

Lista de símbolos

- a_e – Profundidade de corte (μm)
 a_d – Profundidade de dressagem (mm)
 Al_2O_3 – Óxido de alumínio
 b – Largura de contato da peça (mm)
 b_d – Largura de atuação do dressador (mm)
 CO_2 – Dióxido de carbono
 d_e – Diâmetro específico do rebolo
 d_s – Diâmetro do rebolo (mm)
 d_w – Diâmetro da peça (mm)
 F_n – Componente normal da força de corte (N)
 F_t – Componente tangencial da força de corte (N)
 H_2O – Água
 h_{cu} – Espessura de corte
 h_{eq} – Espessura de corte equivalente (μm)
 HRc – Dureza em Rockwell “C”
 HV – Dureza Vickers
 L_c – Comprimento de contato
 l_e – Comprimento de amostragem ou cut-off (mm)
 l_m – Comprimento do percurso de medição (mm)
 η = Viscosidade;
 η_∞ = Viscosidade com temperatura tendendo ao infinito;
 n_s – Rotação do rebolo (rpm)
 n_w – Rotação da peça (rpm)
 P_{ot} – Potência de retificação (W)
 q_s – Relação entre de velocidade rebolo e da peça
 Q_w – Taxa de remoção de material (mm^3/min)
 Q_w' – Taxa de remoção de material específica (mm^2/min)
 R_a – Rugosidade média aritmética (μm)
 R_t – Rugosidade total
 R_z – Rugosidade máxima
 S_d – Passo de dressagem ou avanço axial do dressador por volta
(mm/rev)

Si – Silício

t_s – Tempo de faiscamento ou sparkout (s)

T_μ - Profundidade de corte do grão

v_f – Velocidade de mergulho ou avanço radial (mm/min)

v_{fd} – Velocidade de dressagem ou avanço longitudinal do dressador

(mm/min)

v_s – Velocidade de corte (m/s)

v_w – Velocidade da peça (m/s)

W_t – Ondulação teórica (μm)

z_w – Volume de material removido (mm^3)

1. Introdução

Para fabricar peças com forma e geometrias desejadas o processo de usinagem é aquele mais empregado. Este processo realiza a geração de superfícies através da remoção de material, ocorrendo pelo contato entre a ferramenta de corte e a peça, que gera cavacos. Na usinagem quase 99% da energia consumida na formação do cavaco é convertida em calor (BRUNI et al., 2006).

Dentre os processos de usinagem convencional, o processo de retificação tem como característica baixa taxa de remoção de material, e ele é usado como processo de acabamento, pois promove alta qualidade superficial e precisão dimensional. A ferramenta utilizada na retificação é o rebolo abrasivo, composto por grãos abrasivos (aleatoriamente posicionados), ligante e poros. Na retificação, muitos grãos abrasivos entram em contato com a peça simultaneamente, porém, devido ao posicionamento aleatório, nem todos realizam a remoção de cavaco, algumas superfícies dos grãos apenas atritam com a peça (TAWAKOLI et al., 2009; BELENTANI et al., 2014).

O fenômeno de formação do cavaco causa alta geração de calor devido a deformações plásticas na peça e sua remoção, esta quantidade de calor gerado causa danos térmicos à peça; Assim, os parâmetros do processo devem ser corretamente selecionados e a técnica de lubri-refrigeração deve ser eficaz, possibilitando que a retificação seja eficiente e não cause danos às peças (ANDERSON et al., 2007).

Na retificação cilíndrica de mergulho há vários parâmetros para serem determinados, por exemplo, velocidade do corte, velocidade de mergulho, tempo de centelhamento (*spark-out*), dentre outros. As velocidades de corte e de mergulho são parâmetros importantes, pois eles influenciam diretamente na taxa de produção das peças. Para que se tenha alta produção, são necessárias altas velocidades (de corte e de mergulho) no processo, por outro lado haverá maior geração de calor, causando rápido desgaste de ferramenta e podendo causar danos térmicos à peça. Para que a peça não seja submetida a altas temperaturas são utilizados fluidos de corte, para dissipar o calor na zona de corte e minimizar sua geração (SHARMA et al., 2016).

O método de lubri-refrigeração mais comum na indústria é a técnica por inundação, conhecida como convencional. Esta técnica realiza a refrigeração e limpeza do rebolo de maneira eficiente, porém apresenta dificuldade na entrega de lubrificante na zona de retificação, devido à baixa pressão de aplicação e barreira aerodinâmica formada ao redor do rebolo. O fluido de corte utilizado nesta técnica, geralmente

emulsão (água e óleo), é aplicado em abundância sobre a zona de corte. Apesar dos bons resultados conseguidos pela sua utilização, este fluido apresenta algumas desvantagens. Mesmo estando diluído em água o fluido de corte causa grande dano ambiental. Sua composição, geralmente à base de petróleo, contém substâncias químicas prejudiciais ao meio ambiente, que contaminam o solo, água e ar, provenientes de vazamentos, limpeza dos resíduos e descarte do fluido de corte (BELENTANI et al., 2014; IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005). Além disso, grande parte dos tipos de fluido de corte também gera risco à saúde do operador, pois o contato direto do fluido com o operador pode causar doenças respiratórias e de pele, como dermatite, asma, irritações respiratórias, que podem se desenvolver câncer (SABERI et al., 2016).

O custo devido à utilização desta técnica representa grande parcela no custo total da fabricação, aproximadamente 16%, custo esse devido ao tratamento que ele deve receber, como filtragem, refrigeração, controle de bactérias, armazenamento, descarte e custo energético (SANCHEZ et al., 2010).

Considerando a sustentabilidade do processo, incluindo redução de custos e de danos ambientais, vários estudos foram realizados com o objetivo de reduzir ou eliminar o uso de fluido de corte na usinagem, porém na retificação é inviável a sua eliminação devido ao excessivo calor gerado durante o processo que é direcionado para a peça e pode causar danos térmicos dentre outros problemas.

A técnica MQL é competitiva com a técnica convencional por ser mais eficiente na entrega do fluido de corte na zona de retificação, resultando em melhor lubrificação. Porém, é menos eficiente na dissipação do calor gerado e na limpeza da superfície do rebolo, sendo assim, podendo causar danos térmicos às peças retificadas, impossibilitando sua utilização.

Uma alternativa eficiente é o uso da técnica Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), que consiste em uma mistura de óleo com ar comprimido em forma de aerossol expelido diretamente na zona de corte (SABERI et al., 2016). A quantidade de óleo empregado no MQL é geralmente por volta de 100 ml/h, mas pode chegar a até 500 ml/h em casos específicos (WALKER, 2013).

Com objetivo de tornar a refrigeração mais efetiva Sanchez et al. (2010) utilizaram CO₂ com a técnica MQL para aumentar a retirada de calor da retificação. Eles aplicaram o MQL no rebolo, antes da zona de corte. Após o bocal de MQL em outro bocal era aplicado o CO₂ que provocava o congelamento do óleo, formando uma fina camada de óleo congelada. Os resultados obtidos pela técnica MQL com CO₂

foram comparados com aqueles obtidos pela técnica convencional. Os resultados obtidos apresentaram melhor desempenho para a técnica MQL + CO₂, e os autores concluíram que o bom desempenho da técnica MQL + CO₂ foi devido à efetividade de entrega do fluido de corte na zona de retificação e a maior capacidade de retirada de calor da interface de corte.

Saberi et al. (2016) realizaram um estudo em retificação utilizando a técnica MQL com jato auxiliar de ar frio (MQL+AF) que foi resfriado com tubo de vórtice. Os autores compararam três diferentes técnicas de lubri-refrigeração, convencional, ar frio e MQL+AF. A técnica MQL+AF utilizou quatro configurações diferentes de pressão e temperatura e a vazão de óleo da técnica MQL foi mantida constante a 120 ml/h. Foi concluído que a única condição que conferiu desempenho próximo da técnica convencional foi aquela com MQL+AF à pressão de 0,4 Mpa e temperatura de 14°C. Os autores atribuíram o maior poder de refrigeração à maior pressão de aplicação do jato de MQL+AF, sendo assim, a pressão de aplicação foi mais importante na refrigeração do que a diminuição da temperatura.

No estudo realizado por Saberi et al. (2016) foi variado a pressão e a temperatura de aplicação da técnica MQL, impossibilitando a análise da influência que a diferença da temperatura causa no processo de retificação. Neste sentido, este estudo visa apresentar a influência que a diferença da temperatura de aplicação da técnica MQL, sem a variação da pressão, causa nos resultados do processo de retificação.

Neste trabalho o objetivo foi realizar a análise dos resultados encontrados para as diferentes técnicas de lubri-refrigeração utilizadas na retificação cilíndrica de mergulho do aço ABNT 4340 com rebolo convencional de óxido de alumínio e compará-las por meio das variáveis de saída relacionadas à peça (rugosidade, desvio de circularidade e integridade microestrutural, analisada pela microdureza e metalografia), ao rebolo (desgaste radial do rebolo) e do processo (potência de retificação). As técnicas utilizadas são: convencional, mínima quantidade de lubrificante (MQL) e MQL com jato auxiliar de ar frio aplicado a 0°C, na zona de retificação. Além disso, foram variadas três diferentes velocidades de mergulho: 0,25 mm/min; 0,50 mm/min; 0,75 mm/min.

A estrutura dessa dissertação de mestrado é feita em seis capítulos, em que:

- Capítulo 1: Introdução, familiarizar o leitor sobre o assunto do trabalho e apresentar os objetivos.
- Capítulo 2: Revisão bibliográfica, aprofundar o assunto de retificação utilizando a técnica MQL, analisar o que foi encontrado em outros trabalhos e trazer credibilidade ao que é feito neste. Este capítulo é dividido em: retificação; processo de dressagem do rebolo; fluido de corte; variáveis de saída do processo.
- Capítulo 3: Materiais e métodos, onde são apresentados os equipamentos, os parâmetros utilizados nos experimentos e os métodos de medições das variáveis de saída.
- Capítulo 4: Resultados e Discussões, sessão em que são apresentados os resultados, as interpretações e análises deles.
- Capítulo 5: Conclusões, neste capítulo são apresentadas as conclusões a partir dos resultados obtidos.
- Capítulo 6: Sugestões para trabalhos futuros, sessão em que são apresentadas algumas ideias para futuras investigações com base no desenvolvimento deste trabalho.

2. Revisão bibliográfica

Este capítulo aborda os conceitos relacionados ao trabalho desenvolvido com o intuito de apresentar ao leitor o tema abordado, ou seja: processo de retificação, retificação cilíndrica externa de mergulho, parâmetros de retificação, rebolo de óxido de alumínio, dressagem do rebolo, fluidos de corte, técnicas de lubri-refrigeração, MQL na retificação, criogenia na retificação e variáveis de saída.

2.1 Retificação

Retificação é um processo de usinagem que realiza a retirada de cavaco pelos grãos abrasivos contidos na superfície de corte do rebolo (MARINESCU et al., 2007). Para realizar a retificação utiliza-se uma máquina retificadora, que pode ser uma retificadora plana ou cilíndrica. O rebolo é composto por grãos aleatórios que são aglomerados por um ligante e também por poros, os quais desempenham um importante papel na remoção dos cavacos, por permitirem alojar os cavacos formados (BIANCHI et al., 2011).

A retificação é um processo que produz peças com alta precisão dimensional, baixa rugosidade (0,1 μm a 1,6 μm) e com comportamento à fadiga melhorado (SANCHEZ et al., 2010). Por isso ela é um dos processos finais na produção de peças, por conferir melhor o acabamento superficial e tolerâncias dimensionais estreitas (MALKIN; GUO, 2008).

Diferente dos processos de usinagem que utilizam ferramentas de corte com geometria definida (por exemplo, torneamento, furação e fresamento), o rebolo possui arestas de cortes irregulares e distribuídas de maneira aleatória no grão abrasivo. Entretanto, não são todos os grãos que entram em contato com a peça que realizam a formação de cavaco, alguns grãos apenas atritam e deforma a superfície da peça. Este processo de usinagem é um dos mais complexos processos de fabricação devido a sua natureza estocástica de sua mecânica de corte (BELENTANI et al., 2014).

O processo de retificação pode ser empregado na geração de diversos tipos de superfície. Dependendo da superfície desejada um tipo de processo de retificação é realizado, as mais comuns são: Retificação plana transversal ou de mergulho; Retificação cilíndrica externa transversal ou de mergulho; Retificação cilíndrica interna transversal ou de mergulho; Retificação *centerless*. Neste estudo é realizada a retificação externa de mergulho, pois desejamos gerar uma superfície

cilíndrica, onde a profundidade de penetração e a velocidade de mergulho são determinadas pelo deslocamento do rebolo.

2.1.1 Retificação cilíndrica externa de mergulho

Na retificação cilíndrica externa de mergulho o rebolo se movimenta em direção a peça com a velocidade de mergulho (v_f). Normalmente a velocidade de mergulho é muito menor do que a velocidade da peça (v_w) e esta ainda muito menor do que a velocidade do rebolo (v_s). Na Figura 1 é representada esquematicamente a retificação cilíndrica externa de mergulho.

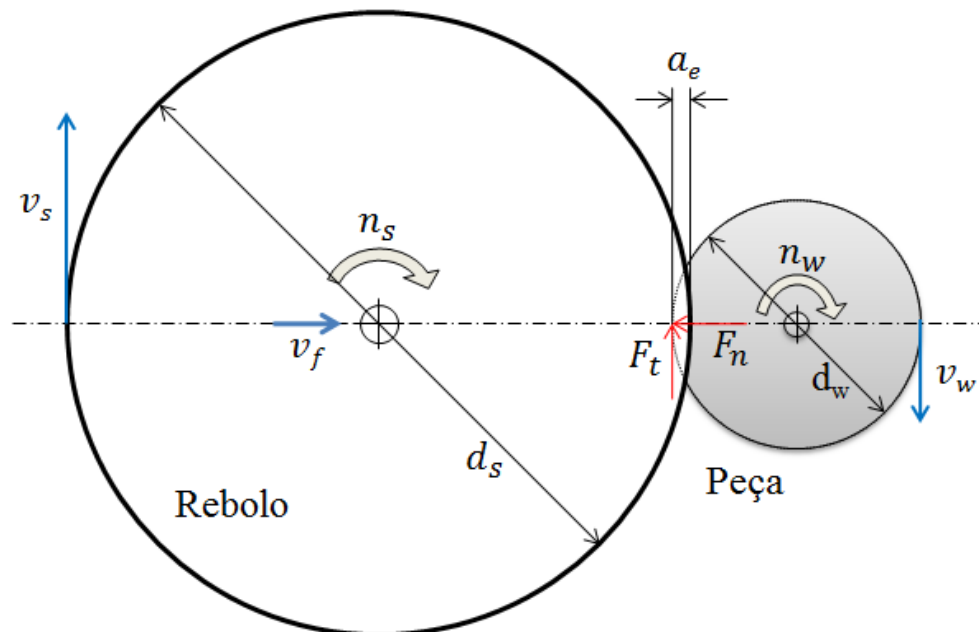


Figura 1: Representação esquemática do processo de retificação externa de mergulho.
Fonte: Malkin e Guo (2008), modificada.

Em que:

v_s = velocidade de corte;

a_e = profundidade de corte;

v_w = velocidade da peça;

d_s = diâmetro do rebolo;

d_w = diâmetro da peça;

n_s = rotação do eixo do rebolo;

n_w = rotação do eixo da peça;

v_f = velocidade de avanço;

F_n = Força normal de corte;

F_t = Força tangencial de corte;

É entendido então que a remoção de material neste tipo de retificação ocorre em forma espiral, pois o rebolo está penetrando na peça constantemente, porém a profundidade de corte é normalmente tão pequena que a espiral só pode ser detectada por uma parada repentina do processo de retificação (MARINESCU et al., 2004).

2.1.2 Parâmetros para o processo de retificação

2.1.2.1 Velocidade de corte (v_s)

A velocidade de corte é igual aquela da velocidade periférica do rebolo, pois esta velocidade é muito maior do que a velocidade da peça (GRAF, 2004).

A velocidade de corte é definida pela equação (1):

$$v_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60 \cdot 1000} \quad (1)$$

Onde:

v_s = velocidade de corte (m/s);

d_s = diâmetro do rebolo (mm);

n_s = rotação do eixo do rebolo (rpm);

v_f = velocidade de avanço (mm/min);

2.1.2.2 Velocidade da peça (v_w)

A velocidade da peça é a velocidade em que se encontra a região periférica da peça, e ela pode ser calculada semelhante aquela da velocidade de corte, porém, pela rotação e diâmetro da peça (GRAF, 2004).

A velocidade de corte é definida pela equação (2):

$$v_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60 \cdot 1000} \quad (2)$$

Onde:

v_w = velocidade da peça (m/s);

d_w = diâmetro da peça (mm);

n_w = rotação do eixo da peça (rpm);

2.1.2.3 Comprimento de contato (L_c)

É definido como comprimento de contato a extensão do contato entre o rebolo e a peça. O comprimento de contato pode ser calculado considerando o diâmetro equivalente do rebolo e a profundidade de corte (MARINESCU et al., 2007), conforme equação (3):

$$L_c = \sqrt{a_e \cdot d_e} \quad (3)$$

Onde:

L_c = comprimento de contato (mm);

a_e = profundidade de corte (mm);

d_e = diâmetro equivalente do rebolo (mm);

Na retificação plana o diâmetro equivalente (d_e) é igualado ao diâmetro do rebolo (d_s), porém na retificação cilíndrica externa ou interna esse valor é diferente, isso por causa da diferença de curvatura entre o rebolo e a peça (GUO; MALKIN, 2000), que é calculado seguindo a equação (4):

$$d_e = \frac{d_s}{1 \pm \frac{d_s}{d_w}} \quad (4)$$

Onde:

d_s - diâmetro do rebolo

d_w - diâmetro da peça

Utiliza-se o sinal negativo na equação (4) quando está sendo calculado para retificação cilíndrica interna e sinal positivo quando está sendo calculado para retificação cilíndrica externa. Analisando a equação conclui-se que o menor valor para o comprimento de contato é obtido pela retificação cilíndrica externa (MALKIN; GUO, 2008).

Segundo Sanchez et al. (2010), o comprimento de contato aumenta devido à deformação do sistema envolvido (peça, rebolo e máquina), e a deformação é causada pela força normal de corte. Durante os experimentos, os autores constataram que não houve alteração na potência consumida, pois não houve alterações na força

tangencial de corte. A potência é diretamente proporcional à força tangencial de corte, assim a energia dissipada na forma de calor diminuiu com a maior deformação. Os autores confirmaram essa hipótese por meio de simulação numérica, mostrando a redução de geração de calor devido a maior força normal de corte.

2.1.2.4 Profundidade de corte (a_e)

Na retificação cilíndrica externa a profundidade de corte é a grandeza que representa o quanto o rebolo entrou na peça durante uma revolução desta, ou seja, no período de uma revolução da peça qual a distância que o rebolo avançou (MARINESCU et al., 2007; MALKIN; GUO, 2008), que pode ser calculada pela equação (5):

$$a_e = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_w} \quad (5)$$

Onde:

a_e = profundidade de corte (mm);

v_w = velocidade da peça (mm/min);

v_f = velocidade de avanço (mm/min);

A profundidade de corte também é influenciada pela deformação do sistema (rebolo, peça e máquina), sendo assim a profundidade de corte é menor do que realmente é programado na máquina. Porém, após determinado tempo de retificação o sistema não se deforma mais e a profundidade de corte se torna a que foi definida previamente (MARINESCU et al., 2004).

2.1.2.5 Taxa de remoção de material (Q_w)

A taxa de remoção de material é representada pelo volume de material removido por unidade de tempo (MALKIN; GUO, 2008), conforme a equação (6):

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot b \cdot v_f \quad (6)$$

Onde:

Q_w = taxa de remoção de material (mm³/min);

b = largura de contato (mm);

v_f = velocidade de avanço (mm/min);

2.1.2.6 Taxa de remoção de material específica (Q_w')

A taxa de remoção de material específica é o volume de material removido por unidade de tempo e por unidade comprimento. Simplificando, ela é a taxa de remoção de material por unidade de largura da peça (CAMERON; BAUER; WARKENTIN, 2010). A Q_w' pode ser encontrada através da taxa de remoção de material (Q_w) pela largura de contato (b), vide equação (7) (MALKIN; GUO, 2008):

$$Q_w' = \frac{Q_w}{b} = \pi \cdot d_w \cdot v_f \quad (7)$$

Onde: Q_w' = taxa de remoção de material específica (mm²/min);

2.1.2.7 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Segundo Marinescu et al. (2007), a espessura equivalente de corte é a medida de profundidade de penetração do grão abrasivo na peça e é definida pela razão entre a velocidade da peça e a velocidade de corte, multiplicada pela profundidade de corte, ou como foi definido por Heinzl e Bleil (2007), é a relação entre a taxa de remoção específica de material pela velocidade de corte, conforme a equação (8):

$$h_{eq} = \frac{\pi \cdot d_w \cdot v_f}{v_s} = \frac{Q_w'}{v_s} \quad (8)$$

Onde:

h_{eq} = espessura equivalente de corte (mm);

a_e = profundidade de corte (mm);

Experimentalmente é difícil determinar precisamente a espessura de corte antes da retificação, mas sim após a retificação por meio da análise do cavaco em um microscópio e determinar a profundidade de corte. Além disso, também há dificuldade em determinar precisamente o espaçamento entre grãos, pois este depende do desgaste do rebolo e da profundidade de corte (MARINESCU et al., 2004).

A espessura equivalente de corte (h_{eq}) é ligeiramente menor que a espessura efetiva de corte (h_{cu}) devido às deformações elásticas que ocorrem na formação de cavaco (OLIVEIRA, 2011). Na Figura 2 são apresentadas, esquematicamente, as etapas de formação de cavaco, com detalhes para h_{cu} e a h_{eq} e pode-se observar que a h_{cu} é um pouco maior.

2.1.3 Mecanismo de formação de cavaco no processo de retificação

Na retificação os grãos abrasivos entram em contato com a peça dentre esses grãos apenas uma pequena parte realiza efetivamente o corte e a formação de cavaco, a outra parte dos grãos gera calor por meio do atrito e arranham a peça na zona de corte. A geração de calor está associada ao ângulo de saída negativo e ao elevado comprimento de contato (L_c) (HADAD; SADEGHI, 2012). A formação de cavaco ocorre em três fases distintas: região elástica, região plástica e corte (NGUYEN; BUTLER, 2005), conforme ilustrado na Figura 2.

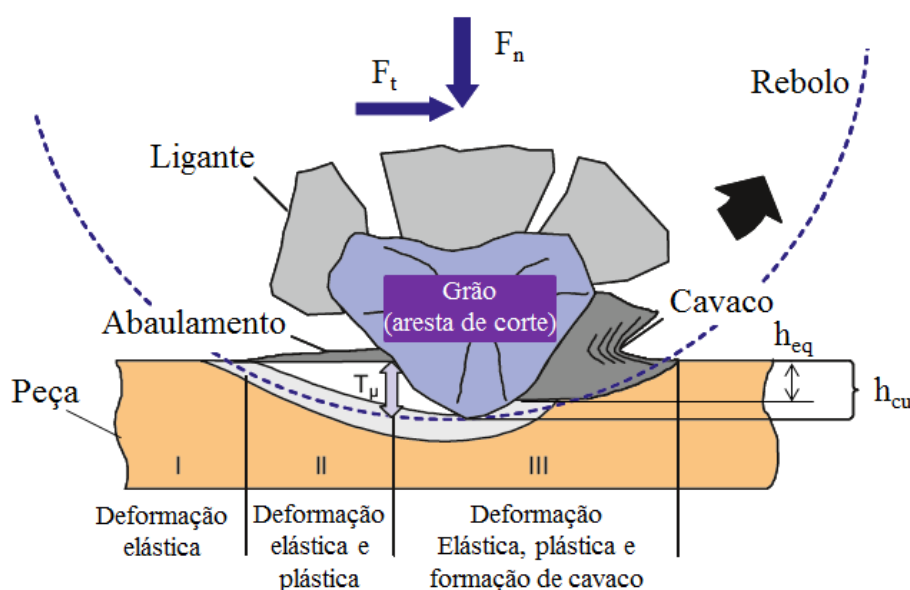


Figura 2: Etapas de formação de cavaco em materiais dúcteis no processo de retificação. Fonte: Klocke (2009), modificada.

Onde:

h_{cu} = espessura de corte;

T_{μ} = profundidade de corte do grão;

F_n = força normal de corte;

F_t = força tangencial de corte.

A primeira é a região de deformação elástica, onde o atrito entre o grão e o material e a deformação elástica. Na segunda região é onde ocorre a deformação elástica, há o início da região de deformação plástica do material e do atrito entre o grão e o material. Na terceira região já existem as fases de deformação elástica, e de

deformação plástica, já com atrito entre o grão e a peça em que o grão já penetra em toda sua profundidade na peça com determinação de toda espessura de corte para a formação do cavaco (OLIVEIRA, 2011).

2.1.4 Temperatura no processo de retificação

Um fator que torna limitante a produtividade no processo de retificação é a alta geração de calor, devido a danos térmicos que a peça pode sofrer. Estes danos térmicos podem ser reduzidos quando é aplicado fluido de corte durante a retificação, assim reduzindo-se o calor gerado e aumentando-se a lubrificação das superfícies em contato, reduzindo a quantidade de atrito (IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).

Durante a retificação há uma elevada quantidade de energia específica é necessária para a remoção de material, sendo assim é gerada uma grande quantidade de calor na zona de corte. Apenas uma pequena quantidade de calor é dissipada pelos cavacos, a maior parte do calor gerado é dissipada para a peça. Quando o calor gerado não é dissipado corretamente, levando a peça ser submetida à alta temperatura na superfície faz com que ocorra a queima na peça, deteriorando a integridade superficial e inviabilizando o uso desta peça (BENKAI et al., 2016). Dois tipos de queima podem ocorrer na peça de aço, a queima branca e a queima escura.

A queima escura acontece quando a temperatura na retificação alcança temperaturas superiores às alcançadas no revenimento do aço, ocorrendo um super revenimento. Quando isso ocorre, há redução da dureza próxima à superfície. Caso o super revenimento seja muito intenso, então ocorre queima escura (MALKIN; GUO, 2008).

A queima branca ocorre quando a temperatura na retificação alcança temperaturas acima da temperatura de transformação do material causando austenitização seguida de formação de martensita não revenida. Quando isso acontece é formada uma camada próxima a superfície de aparência clara que apresenta alta dureza, porém é frágil e há um acúmulo de tensões, facilitando a propagação de trincas (ROWE, 2013; MALKIN; GUO, 2008).

A redução na temperatura no processo de usinagem faz com que o desgaste seja menor, isso porque o material do rebolo é mais duro e tem maior resistência ao desgaste por abrasão a baixas temperaturas e também porque a taxa de difusão dos constituintes do material da ferramenta é menor a baixas temperaturas. Por

outro lado, a menor temperatura aumenta a resistência ao cisalhamento da peça, aumentando a força de corte e a potência consumida, que leva à menor vida da ferramenta (EL BARADIE, 1996).

2.1.5 Rebolo convencional de óxido de alumínio (Al_2O_3)

Os rebolos convencionais de óxido de alumínio são muito utilizados na retificação de ligas com baixa usinabilidade e também nos aços de alta liga (SALMON, 1992).

Apesar do óxido de alumínio possuir menor dureza comparada aos outros materiais abrasivos utilizados na fabricação de rebolos (2100 Knoop, enquanto carboneto de silício apresenta 2400 Knoop e superabrasivos possuem mais que o dobro de dureza), ele tem boa resistência ao impacto e pode ser empregado na retificação de materiais ferrosos (HASSUI, 2002).

A friabilidade do grão abrasivo é definida como facilidade do grão se quebra sobre determinada força ou impacto. Os grãos de óxido de alumínio possuem menor friabilidade do que o carboneto de silício, implicando em uma maior resistência à fratura ou fragmentação, devido ao impacto (NUSSBAUM, 1988 *apud* HASSUI, 2002).

Segundo Marinescu et al. (2007), o óxido de alumínio possui uma estrutura cristalina grande, contendo até três cristais em um grão, quando há a fratura de um grão, dependendo da dureza do ligante, ocorre a perda total deste grão, causando diminuição da eficiência do processo.

2.2 Processo de dressagem do rebolo

O processo de retificação gera superfícies com baixa rugosidade e confere a peça alta precisão dimensional. Para que o processo de retificação continue desempenhando essas características, deve ser realizado periodicamente a dressagem do rebolo, pois durante a retificação o rebolo perde progressivamente a capacidade de corte devido às altas temperaturas e cargas mecânicas que ele é submetido. Outro fator que piora o desempenho do rebolo é o entupimento dos poros com cavacos que ficam alojados. Então a dressagem é realizada para recuperar a topografia do rebolo e retirada dos cavacos alojados para que o desempenho ótimo volte a ser alcançado (POMBO et al., 2017; JACKSON et al., 2007).

A operação de dressagem é responsável pelas características de corte do rebolo e pela maior parte do desgaste do rebolo. Na retificação cerca de 10% do desgaste do rebolo é causado pelo processo de usinagem e 90% pela dressagem (JACKSON et al., 2007).

As operações de dressagem geram dois efeitos na superfície do rebolo, são eles o macro-efeito e o micro-efeito. O macro-efeito é formado pela geometria do dressador, profundidade de dressagem, pelo passo de dressagem utilizado, determina o posicionamento das arestas de corte e também gera uma rosca na superfície do rebolo, através do movimento de rotação do rebolo combinado ao movimento de translação do dressador. Com isso torna a remoção de material mais agressiva na retificação. O micro-efeito é formado pela fratura dos grãos, sendo assim gerando novas arestas de corte. Quando a dressagem é mais branda (menor profundidade e avanço, de dressagem causando micro-efeito), apenas pequenas partículas são removidas ou fraturadas, levando a menor agressividade do rebolo, aumentando as forças de retificação e o desgaste do rebolo (OLIVEIRA et. al., 1992).

Segundo Jackson e Davim (2011), os parâmetros de dressagem de maior importância são profundidade de dressagem (a_d) e grau de recobrimento (U_d). O grau de recobrimento (U_d) é informado por Jackson e Davim (2011), como sendo a quantidade de vezes que o dressador passa por cada ponto da superfície do rebolo. O U_d não pode ser menor do que um, pois se isso acontecer significa que o dressador não está passando por toda a superfície do rebolo. O U_d influencia diretamente na topografia do rebolo, quanto maior o valor de U_d maiores serão as forças de corte e menores os valores de rugosidade da peça.

König e Messer (1980) definiram que a equação para encontrar o grau de recobrimento, é a largura da ponta do diamante (b_d) pelo avanço por volta (S_d), conforme a equação (9).

$$U_d = \frac{b_d}{S_d} \quad (9)$$

De acordo com Inasaki e Okamura (1985) o valor do avanço por volta (S_d) é de grande importância no processo de dressagem, pois com o aumento do valor do S_d há também o aumento dos valores de rugosidade (R_a) obtidos na retificação. O S_d é calculado através da velocidade de dressagem (v_{fd}) (velocidade transversal da mesa

da máquina durante o processo de dressagem) pela rotação do rebolo (n_s), conforme equação (10).

$$S_d = \frac{v_{fd}}{n_s} \quad (10)$$

Na Figura 3 são apresentadas esquematicamente as variáveis de dressagem.

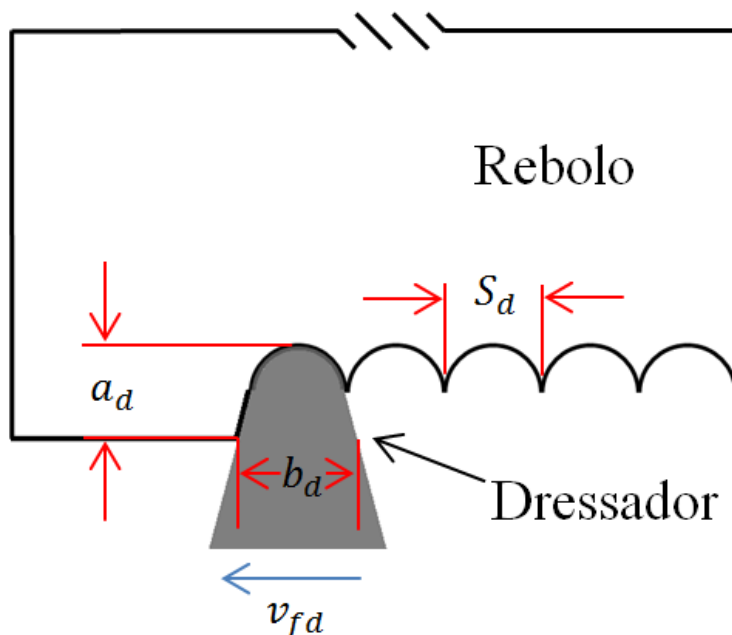


Figura 3: Esquema do processo de dressagem do rebolo.

De acordo com Salmon (1992), para realizar a operação de dressagem de rebolos com ligantes vitrificados são recomendados ferramentas de diamante de ponta única ou aglomerados em uma matriz metálica (dressador conglomerado).

O dressador conglomerado é composto por vários diamantes presos por uma matriz metálica. Os diamantes são dispostos de modo a realizar a dressagem do rebolo. Para realizar o cálculo do grau de recobrimento é necessário saber a largura da ponta do diamante (b_d). Para dressadores de ponta única o valor de b_d pode ser medido, porém para o conglomerado devido ao alto número de diamantes não é possível realizar a medição deste parâmetro, então o valor de b_d é informado pelo fabricante e utilizado nas mesmas fórmulas que são utilizadas para os dressadores de ponta única.

2.3 Fluidos de corte e técnicas de aplicação

O fluido de corte é aplicado na zona de corte para reduzir a geração de calor, através da redução do atrito, devido a sua propriedade de lubrificação. Outra maneira que o fluido de corte reduz a temperatura é pela dissipação do calor por condução térmica, na zona de corte, devido a sua propriedade de refrigeração. Então quanto menor a temperatura do fluido, maior é a eficiência de retirada de calor (IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005).

O fluido de corte possui três funções principais no processo de retificação, são elas, refrigeração da peça, retirada dos cavacos do processo e lubrificação. Esses benefícios gerados pelo fluido de corte são reconhecidos em todo setor industrial (EBBREL et al., 2000). Malkin e Guo (2008) reafirmam o que foi colocado por Ebbrel et al. (2000) e comentam que os fluidos na retificação são considerados em duas principais funções, refrigeração e lubrificação e ainda reforça que a utilização do fluido de corte pode ajudar na limpeza da peça e promover proteção contra corrosão nas superfícies retificadas.

Outro importante papel de refrigeração é a redução de expansões térmicas e distorções na peça, causada pela alta temperatura. A redução da temperatura do rebolo, ferramenta e peça é realizada através de condução de calor da zona de retificação e/ou da lubrificação na interface rebolo/peça (EL BARADIE, 1996).

No processo de retificação a eficiência de aplicação e as propriedades do fluido influenciam diretamente na qualidade da peça, desgaste do rebolo e consequentemente na produtividade do processo, os parâmetros que influenciam nessa efetividade são: tipos de refrigerante, composição química, vazão, pressão, projeto e posicionamento do bocal de aplicação (BRINKSMEIER; HEINZEL; WITTMANN, 1999).

De acordo com Blenkowski (1993, *apud* IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005), o tipo do fluido de corte pode ser definido com base em sua composição, sendo 4 categorias: sintéticos; semi-sintéticos; óleos emulsionáveis; óleos minerais. Os óleos utilizados nesses fluidos são origem sintética ou mineral, e cada um tem suas propriedades distintas.

Irani, Bauer e Warkentin (2005), apresentaram uma relação entre os tipos de fluido de corte e seu desempenho, com base no que foi apresentado por Webster et al. (1995). Esta relação está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1: Características dos tipos de fluidos de corte no processo de retificação. Em que: 1 são os piores e 4 são os melhores. Fonte: Irani, Bauer e Warkentin (2005).

Propriedades	Tipos de fluidos de corte			
	Sintéticos	Semi-sintéticos	Óleo emulsionável	Óleo puro
Remoção de calor	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Capacidade de filtragem	4	3	2	1
Meio ambiente	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1
Tempo de vida do rebolo	1	2	3	4

Devido às limitações pela alta geração de calor no processo de retificação. Não utilizar fluido de corte na retificação torna o processo inviável, impossibilitando a aplicação industrial. Isso porque, sem o fluido de corte para reduzir a geração de calor e/ou dissipar esse calor, maiores temperaturas são alcançadas na zona de corte, afetando negativamente a qualidade da peça e ainda aumentando o desgaste do rebolo (SU et al., 2007).

Na retificação, grande parte do calor gerado vai para a peça, pois os grãos abrasivos dos rebolos convencionais não são bons condutores térmicos e os cavacos são muito pequenos. Por isso é inviável a retificação a seco.

2.3.1 Técnica convencional de aplicação do fluido de corte

A técnica de aplicação por inundação (ou técnica convencional, ou ainda jorro) é aquela em que o fluido de corte é aplicado à baixa pressão e alta vazão (em geral entre 4 l/min [240.000 ml/h] a 300 l/min [18.000.000 ml/h]) por um bocal (MALKIN; GUO, 2008).

São muitas vantagens que o fluido de corte convencional proporciona à usinagem em geral, porém vários problemas são relacionados a essa técnica de lubri-refrigeração, sendo eles relacionados ao impacto causado ao meio ambiente, quando

descartado incorretamente, ao impacto econômico, pois exigem elevado custo de manutenção, e à saúde do operador, quando inalado ou em contato com a pele, por exemplo (TAWAKOLI et al., 2010).

Segundo Jegatheesan et al. (2009), rigorosas leis e regulamentos estão sendo impostas para as indústrias, além disso, a pressão a níveis políticos apoiando a sustentabilidade em todos os setores faz as empresas e os usuários levarem em consideração a produção sustentável.

Os custos com fluido de corte na produção industrial representam uma grande parcela no custo total de produção. Esse custo não ocorre apenas pelo custo de compra do fluido, mas também pelo custo de manutenção e custo energético para bombeamento deste (BYRNE; SCHOLTA, 1993).

Em estudo de caso apresentado por Sanchez et al. (2010), os autores observaram que o custo com sistema de lubri-refrigeração corresponde à grande parcela do custo total de produção. Este custo não está relacionado apenas com a compra do fluido, mas também com custos relacionados à filtragem, custo energético devido ao bombeamento e custo de descarte, corroborando com o que foi relatado por (WALKER, 2013).

Na Figura 4 são apresentados os custos envolvidos com fluido de corte, que são em torno de 16% do custo total da produção, quatro vezes maior do que o custo com ferramentas de corte.

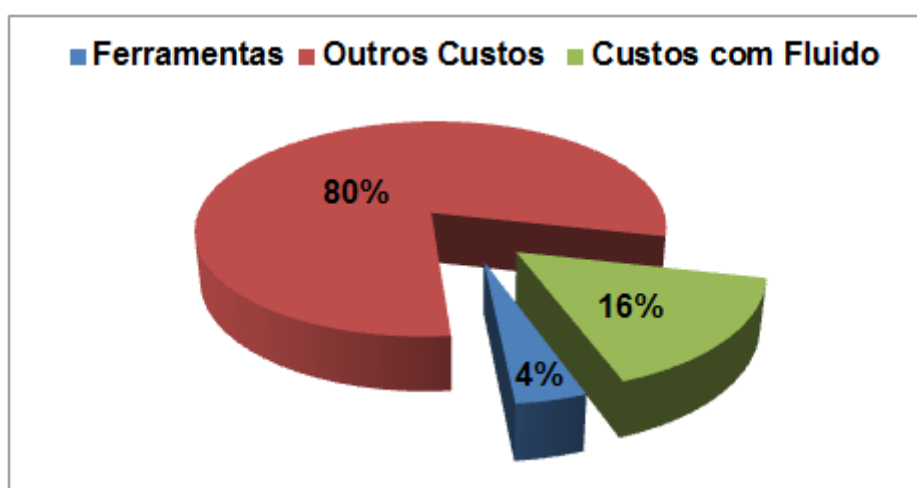


Figura 4: Porcentagem média dos custos de produção. Fonte: Walker (2013).
Modificada.

Na Figura 5 é apresentada a distribuição dos gastos com fluido de corte (WALKER, 2013).

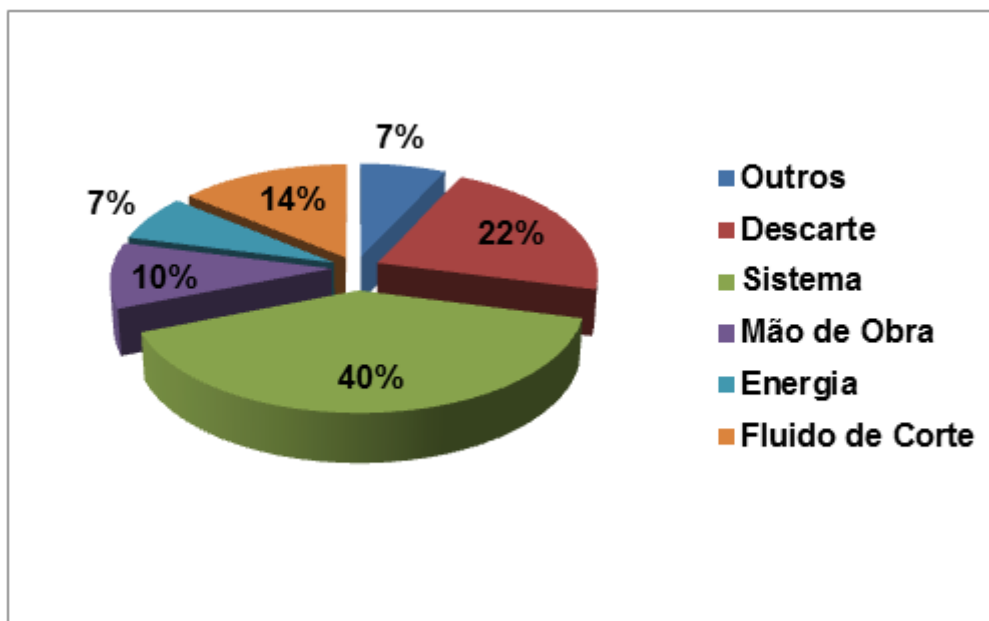


Figura 5: Porcentagem dos custos com fluido de corte. Fonte: Walker (2013).
Modificada.

Na Figura 5, observa-se que 40% de todo o custo que envolve fluido de corte convencional é destinado ao sistema de reutilização do fluido, esse sistema é composto pela filtragem, refrigeração, pelo bombeamento, controle do crescimento de bactérias e outras etapas, para que o fluido de corte possa ser reutilizado, 22% é o descarte deste fluido, que é realizado por empresas especializadas no descarte de fluido de corte e apenas 14% é o custo envolvido na compra deste fluido (WALKER, 2013).

O fluido de corte traz muitas vantagens ao processo, porém além do custo gerado por sua utilização é muito discutido quanto ao impacto à saúde do operador (DHAR; KAMRUZZAMAN; AHMED, 2006).

De acordo com Eversheim et al. (1994) os fluidos de corte são compostos por substâncias tóxicas, nocivas à saúde do operador, como por exemplo, dispersantes, anticorrosivos, biocidas e corantes. Segundo Sadeghi et al. (2009), a utilização de fluido de corte gera névoa, fumaça e outros tipos de partículas que contaminam o ar.

O contato direto ou com as partículas de fluido de corte gera risco à saúde do operador. Podendo assim desenvolver problemas respiratórios por causa da inalação, irritações dérmicas (dermatites) devidas ao contato com a pele e ainda problemas digestivos por engolir essas partículas, o que em casos mais extremos podem se desenvolver em câncer (ANON, 2003; BYERS, 2006, SABERI et al., 2016).

O fluido de corte convencional é reaproveitado no processo e, devido a esse reaproveitamento, ele começa a acumular impurezas como cavacos da peça e grãos que se soltaram do rebolo. Quanto maior o volume dessas impurezas, pior a qualidade do fluido e, conseqüentemente, chegando a um ponto ser necessário remover totalmente o fluido de corte e recolocar um fluido de corte novo. Esse descarte deve ser realizado de maneira correta, por uma empresa especializada, porque se este fluido for descartado de maneira incorreta, ele irá acarretar em grande e negativo impacto ambiental (IRANI et al., 2005).

A técnica convencional de lubri-refrigeração geralmente utiliza fluido de corte emulsionável, sendo que a proporção de água é maior que a de óleo. E mesmo estando diluído em água, o fluido de corte pode causar grande dano ambiental, devido a sua composição, que geralmente é à base de petróleo, há substâncias químicas prejudiciais ao meio ambiente que contaminam o solo, água e ar devido a vazamentos, limpeza dos resíduos e descarte do fluido (IRANI; BAUER; WARKENTIN, 2005; BELENTANI et al., 2014).

Devido aos problemas relacionados a utilização de fluido de corte convencional, novas técnicas de aplicação de fluido de corte vêm sendo desenvolvidos afim de minimizar ou mesmo extinguir a utilização de fluido de corte.

2.3.2 Métodos de otimização da técnica convencional de aplicação de fluido de corte

Otimizar é aperfeiçoar as condições, então as técnicas de otimização da técnica convencional de aplicação de fluido de corte objetivam melhorar os resultados através de menor uso de recursos, mas de maneira mais eficiente. Estes métodos implicam geralmente em desenvolvimento de bocais com melhor direcionamento de fluido, maior pressão de operação e menor quantidade de fluido utilizado. Webster et al. (1995) desenvolveram um bocal que desde sua criação vem sendo utilizado em diversas maneiras de aplicações.

Monici et al. (2006) realizaram um estudo sobre aplicação de fluido de corte em diferentes condições, sendo comparado dois fluidos de corte (sintético emulsionável e óleo puro), aplicados utilizando a técnica convencional (pressão = 0,394 Mpa e vazão = 84 l/min) e a técnica convencional otimizada através do bico proposto por Webster et al. (1995) (pressão = 0,549 Mpa e vazão = 14 l/min), para retificação utilizando dois tipos de rebolo (convencional de óxido de alumínio e CBN). As

variáveis analisadas foram: Força tangencial; energia específica de retificação; emissão acústica; desgaste do rebolo; rugosidade (Ra); tensão residual e análise superficial (microscópio eletrônico de varredura). Para todas as variáveis analisadas a técnica otimizada apresentou melhores resultados, devido a melhor capacidade de penetração na zona corte, pelo rompimento da barreira aerodinâmica formada em volta do rebolo, proporcionado pela maior pressão de aplicação. O óleo puro apresentou resultados melhores comparados à emulsão, porém ele gera um ambiente nocivo à saúde do operador.

No estudo de Ebbrell et al. (2000) foi variado o posicionamento do bocal afim de romper a barreira aerodinâmica formada pelo rebolo. Três posicionamentos de bocal foram realizados, posição angular (15°), intermediária e tangencial, observado na Figura 6. Os resultados de potência para o posicionamento tangencial e o intermediário não apresentaram diferenças significativas, enquanto para o posicionamento angular valores ligeiramente mais altos foram encontrados, sendo explicado pela menor quantidade de fluido de corte entregue na zona de retificação, piorando a lubrificação e consequentemente aumentando o atrito. A textura superficial foi avaliada pela rugosidade (Ra) e pela dispersão de tamanho. O posicionamento angular proporcionou menores valores de rugosidade e tangencial apresentou melhor desempenho na dispersão do tamanho. Devido a menor entrega de fluido pelo posicionamento angular, houve a aparição de danos térmicos (queima). Assim concluíram que o posicionamento do bocal é influencia nos resultados encontrados.

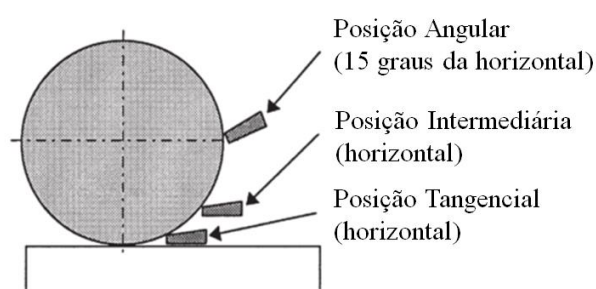


Figura 6: Posicionamento dos bocais de Ebbrell et al. (2000).

Ramesh et al. (2001) desenvolveram um bocal com o objetivo de minimizar o efeito da camada aerodinâmica formada pelo rebolo. Este bocal foi desenvolvido em forma de sapata, com três orifícios de aplicação de fluido de corte. O primeiro orifício rompia a barreira aerodinâmica, o segundo formava uma camada de fluido na superfície do rebolo e o terceiro era direcionado para a zona de retificação. Esse boca utilizado pelos autores apresentou melhoras significativas nos resultados,

houve melhora na taxa de remoção de material e no acabamento superficial e ainda redução nas forças de corte. Foi concluído que houve redução no atrito, pois a razão entre a força tangencial e normal diminuiu.

Outros autores estudaram outros tipos de bocais, como Zitt e Schäfer (1998), que apresentaram bons resultados e provaram a eficiência dos bocais tipo sapata. Porém Irani et al. (2005) comenta sobre a dificuldade de posicionamento destes bocais, pois com o desgaste e dressagem do rebolo, o bocal deve ser reposicionado sempre, aumentando a complexidade de sua utilização. Além disso, apenas mudar o bocal não soluciona os problemas encontrados na utilização do fluido de corte convencional. A substituição da técnica convencional de aplicação de fluido de corte por uma técnica diferente deve ocorrer de maneira que busquem a eliminação ou minimização do uso de fluidos de corte, mantendo ou melhorando os resultados obtidos (SANCHEZ et al., 2010).

Uma técnica que vem conseguindo suprir as limitações da usinagem a seco é a técnica de mínima quantidade de lubrificante (MQL). Esta técnica é bem aceita na usinagem com ferramentas com aresta de corte de geometria definida, isto porque esta técnica tem como característica, melhor penetração de lubrificante na interface de corte, assim, diminuindo os esforços de corte e promovendo melhor acabamento da peça em grande parte dos trabalhos em retificação que empregam esta técnica (SADEGHI et al., 2009).

2.3.3 Técnica MQL

A técnica MQL consiste em utilizar uma mistura de óleo com ar comprimido a pressão em torno de 0,6 MPa em forma de aerossol expelido diretamente na zona de corte (SABERI et al. 2016).

A quantidade de óleo lubrificante utilizado na técnica MQL depende muito do uso que será realizada. A norma alemã DIN especifica que MQL é a técnica em que a vazão de fluido de corte chega até 50 mL/h de óleo lubrificante, salvo em casos específicos onde este pode ser utilizado na quantidade de até 150 mL/h, em outros estudos são encontrados valores de MQL chegando a uma quantidade de 500 mL/h (WALKER, 2013).

O uso de mínima quantidade de lubrificante implica em várias vantagens, tais como redução do uso de fungicidas e biocidas, redução do volume de fluido gasto,

limpeza das peças ao final do processo, menor manutenção do fluido e não necessita de sistemas de circulação e filtragem do fluido (KLOCKE et al., 2000).

A técnica MQL não necessita de sistemas de limpeza, filtragem e nem de manutenção do fluido de corte. Assim, há uma redução direta no custo do processo que é uma das principais vantagens na utilização desta técnica (SANCHEZ et al., 2010; TAWAKOLI et al., 2011).

Com a utilização de MQL este custo é reduzido substancialmente, apesar do custo do fluido utilizado no MQL ser muito maior do que o custo de um fluido de corte convencional, a quantidade de lubrificante utilizado no MQL é 1/10.000 da quantidade de fluido de corte convencional. Também tem a redução de custos com armazenamento, reciclagem, recipientes, bombas e dispositivos para filtragem, que não são utilizados com a técnica MQL (WALKER, 2013).

Como já citado, o MQL reduz o custo de produção, Barczak et al. (2010) cita alguns estudos de caso realizados comparando os custos quando utilizado a técnica de mínima quantidade de lubrificante. No processo de fresamento houve uma redução dos custos de 65%, proporcionada pela utilização de MQL (MAKIYAMA, 2000 *apud* BARCZAK et al., 2010). A realização de um estudo de caso na companhia BMW comparando os custos de utilização entre a técnica convencional e a técnica MQL, com base nos investimentos, custos fixos e custos proporcionais, implicou em uma redução de 22% dos custos promovido pela utilização da técnica MQL (DÖRR; SAHM, 2000 *apud* BARCZAK et al., 2010).

2.3.4 A Técnica MQL no processo de retificação

Na retificação há problemas na implantação da técnica MQL devido à alta geração de calor, porém, Silva et al. (2005) apresentaram que na retificação do aço ABNT 4340 com rebolo de óxido de alumínio a utilização de MQL pode ser aplicada eficientemente. A utilização da técnica MQL reduziu as forças tangenciais de corte, aumentou a tensão residual de compressão em torno de 135%, reduziu o desgaste diametral do rebolo e ainda apresentou menores valores de rugosidade.

Silva et al. (2007) realizaram a análise da integridade superficial da peça retificada com a utilização da técnica de lubri-refrigeração MQL. Os resultados obtidos corroboraram com os resultados de Silva et al. (2005), além de relatar que não foi significativo o empastamento do rebolo e concluído que uso de MQL na retificação não afetou negativamente a peça.

De acordo com Tawakoli et al. (2009; 2010), quem realizaram retificação do aço de alta dureza 100Cr6. Os resultados de melhor acabamento e qualidade superficial foram obtidos quando utilizou-se a técnica MQL, que foram atribuídas pela deformação plástica na zona de contato. Brinksmeier et al. (1999) relacionam o menores valores de rugosidade, pelo aumento do efeito de lubrificação, que aumenta correspondentemente as deformação elásticas-plástica abaixo da aresta de corte do grão abrasivo. Ainda Tawakoli et al., 2010, concluíram que a localização do bocal de MQL é um fator de alta influência na efetividade da aplicação da técnica MQL, sendo o posicionamento mais efetivo com o bocal em direção ao rebolo, com angulação entre 10° e 20° em relação à superfície da peça.

Barczak et al., (2010) realizaram a retificação de três tipos de aço, sendo aço de baixa dureza, aço ferramenta e aço de rolamento (maior dureza). Foi utilizado rebolo de óxido de alumínio para analisar o desempenho de três técnicas de lubri-refrigeração (convencional, MQL e a seco). As técnicas foram comparadas em duas configurações de retificação, configuração 4: menor velocidade de corte (25 m/s) e retificou-se o aço de menor dureza; e configuração 8: maior velocidade de corte (45 m/s) e retificou-se o aço de rolamento. Ambas as configurações foram realizadas com profundidade de corte igual a 15 μm , velocidade da peça igual a 15 m/min e a dressagem do rebolo foi grosseira (para desbaste). Algumas variáveis analisadas foram força tangencial específica de corte (F_t'), rugosidade (R_a) e temperatura na zona de retificação, as variáveis foram relacionadas com a taxa específica de remoção de material (Q_w').

Segundo Barczak et al. (2010) para força tangencial específica de corte e rugosidade, com a configuração 4 (menor velocidade de corte, aço de menor dureza) os melhores resultados foram apresentados com a utilização da técnica MQL, pela maior eficiência de retificação, apresentando maior Q_w' . Enquanto a técnica convencional apresentou desempenho intermediário e a seco apresentou os piores resultados. Isso pode ser explicado por resultado do efeito hidrodinâmico na técnica convencional e pela melhora das propriedades de lubrificação da técnica MQL. A temperatura obtida quando foi utilizado a configuração 4 foi semelhante para todas as técnicas, porém a seco apresentou valores de Q_w' inferiores, sendo explicado pela falta do efeito de lubrificação e material de baixa dureza.

De acordo com Barczak et al. (2010), para a configuração 8 (maior velocidade de corte, aço de maior dureza), a técnica convencional apresentou melhor

desempenho comparado às outras técnicas, em que, a Q_w' foi maior. A F_t' foi semelhante para todos os casos, sendo para MQL ligeiramente menor, devido a maior a Q_w' , a técnica convencional foi considerada com melhor desempenho, explicado pela alta dureza do material, granulometria fina do rebolo e dureza do rebolo relativamente baixa. Os melhores resultados de R_a foram obtidos com a utilização da técnica convencional de aplicação de fluido de corte, sendo seguida pela técnica MQL e, novamente, retificação a seco apresentou o pior desempenho. Sendo, estes resultados relacionados à ineficiência de limpeza do rebolo proporcionada pelas técnicas MQL e a seco. As menores temperaturas foram encontradas para a técnica convencional, isso porque o rebolo favorece as condições do material duro, alta velocidade e dressagem grosseira. Comparando as técnicas MQL e a seco, a retificação a seco apresentou valor de temperatura mais alto, isso porque a lubrificação ajuda a remoção de cavacos, reduz a carga e, portanto, resulta em maior eficiência do processo.

Tawakoli et al. (2011) realizaram a retificação utilizando oito tipos de óleos, três tipos de emulsão e água pura na técnica MQL, comparando com a técnica convencional, técnica de jato de ar comprimido e a seco. A retificação foi realizada utilizando-se 4 diferentes tipos de rebolos (sendo três de alumina: baixa porosidade, alta porosidade e granulometria grossa; e um de CBN: ligante resinoide). Os melhores resultados de rugosidade foram obtidos quando foi utilizada a técnica MQL com óleo de base mineral devido ao melhor efeito de lubrificação proporcionado, enquanto que o rebolo que apresentou os melhores resultados de rugosidade foi o de alumina com baixa porosidade, podendo ser explicada pela menor agressividade dos grãos abrasivos.

Eficiência de retificação (relacionada pela energia específica) é o volume de material removido por uma unidade de trabalho (m^3/J), a técnica MQL com óleo puro apresentou os melhores resultados, assim como apresentou menores forças de retificação e reduziu os danos superficiais quando comparada às técnicas: convencional, MQL com emulsão, MQL com água pura, jato de ar e a seco sendo o pior caso (TAWAKOLI et al., 2011).

2.3.5 Técnica MQL com criogenia na retificação

Devido à baixa capacidade de dissipação de calor pela técnica MQL, algumas investigações foram realizadas sobre a forma diminuir a temperatura na

usinagem com a utilização da técnica MQL. Uma alternativa que tem sido relatada é a utilização de CO_2 em conjunto com MQL.

Sanchez et al. (2010) realizaram experimentos utilizando um bocal de CO_2 colocado à frente o bocal de MQL, conforme a Figura 7. Devido a esse posicionamento dos bocais, o jato de CO_2 congela o MQL, formando uma camada de óleo congelado sobre os grãos de alumina do rebolo.

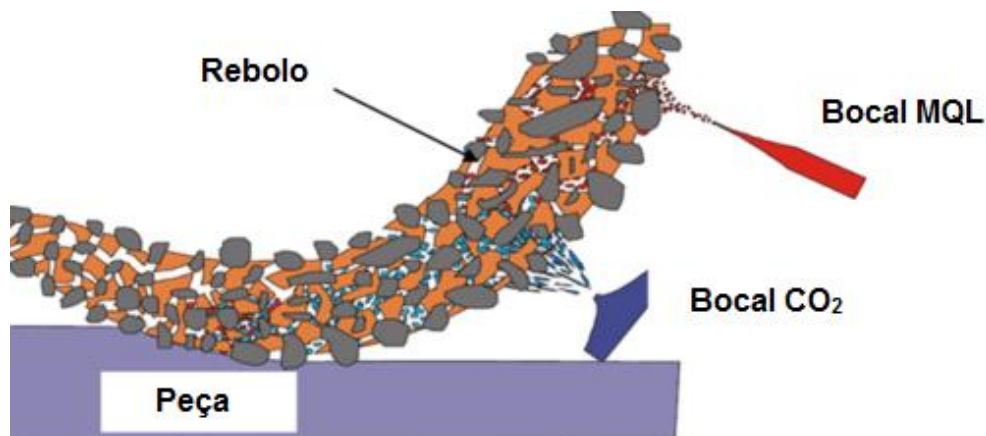


Figura 7: Esquema do sistema de bocais para a técnica MQL+ CO_2 . Fonte: Sanchez et al. (2010), modificada.

Sanchez et al. (2010) obtiveram bons resultados de desgaste do rebolo, quando MQL com adição de CO_2 é comparado à retificação com refrigeração convencional, devido a proteção que o óleo congelado proporcionou aos grãos abrasivos. A rugosidade média (R_a) foi considerada estatisticamente igual para as duas técnicas estudadas, já a rugosidade total (R_z) apresentou menores resultados para MQL+ CO_2 , confirmando a efetividade na entrega de fluido na zona de retificação. Apesar desta técnica não ter a mesma ação de refrigeração da água, foram obtidos valores ligeiramente maiores de temperatura, o que não causou danos térmicos à peça. O bom desempenho desta técnica foi devido à baixa temperatura proporcionada pelo CO_2 , que protege os grãos abrasivos do desgaste e proporciona melhor lubrificação, pela capacidade de levar o fluido até a zona de retificação.

Sanchez et al. (2010) concluíram que é importante o controle da espessura da camada de óleo congelado que se forma sobre os grãos, pois quando essa espessura aumenta, há um pico de força normal de corte na entrada do rebolo na peça. E esse pico de força pode acarretar em danos à peça, ao rebolo e à máquina retificadora.

Balan et al. (2016), realizaram uma investigação onde retificaram Inconel 751 com rebolo diamantado com ligante resinóide em uma retificadora plana. O

objetivo da investigação deles foi analisar qual a melhor técnica de lubri-refrigeração entre retificação a seco, MQL e MQL com criogenia. Os parâmetros variados foram: velocidade da peça, velocidade do rebolo e profundidade de corte.

A técnica a seco foi realizada sem nenhuma utilização de lubrificante ou de método de refrigeração, a técnica MQL foi utilizada com vazão de 60 mL/h e 6 bar de pressão e o método de criogenia utilizado por Balan et al. (2016), foi um bocal com nitrogênio líquido pressurizado, direcionado ao lado oposto de onde foi direcionado o MQL, vide Figura 8.

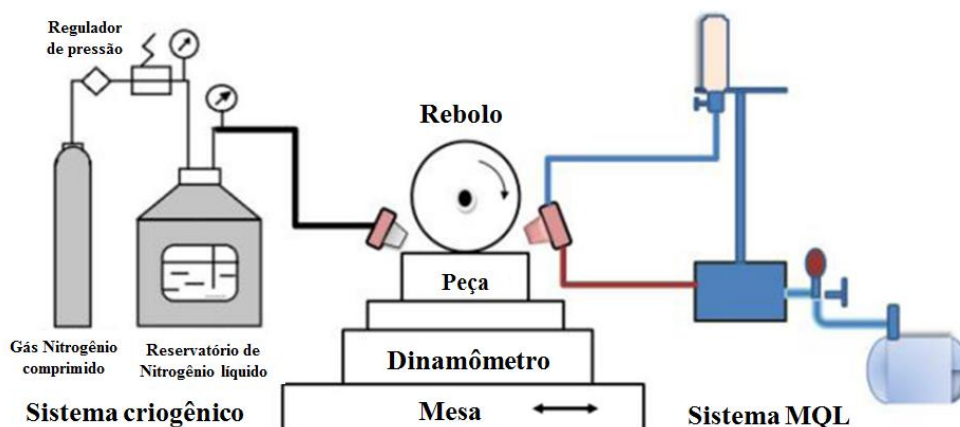


Figura 8: Instalação experimental esquemática do sistema para a técnica MQL assistida com a técnica criogênica. Fonte: Balan et al. (2016), modificada.

Os resultados obtidos por Balan et al. (2016) foram satisfatórios para a técnica MQL com criogenia, pois apresentou melhor desempenho em todas variáveis analisadas e em todas configurações de parâmetros. As variáveis analisadas por eles foram: energia específica, rugosidade, temperatura, análise do cavaco e da superfície, força tangencial e normal de corte. Estes autores concluíram que, a usinabilidade foi melhorada após a usinagem com as técnicas MQL e MQL com criogenia e que a técnica MQL apresentou melhor desempenho comparado a técnica a seco devido à melhor lubrificação proporcionada na zona de corte. Para eles a técnica MQL com criogenia reduz consideravelmente as forças de corte, temperatura e rugosidade, comparado a MQL e a seco. Os cavacos para a condição a seco foram do tipo lamelar, para técnica MQL foram do tipo fino em flocos e alongados e para técnica MQL com criogenia foram do tipo em blocos. A energia específica foi entre 50-65% menor para MQL com criogenia comparado a condição a seco

No mesmo contexto, Saberi et al. (2016) realizaram a retificação de aço de baixa dureza CK45 com 90 HRB (aproximadamente 192 HV) com rebolo de óxido

de alumínio e empregaram a técnica MQL com ar frio. O método desenvolvido por eles foi inserir uma tubulação de ar frio na tubulação de MQL, conforme ilustrado na Figura 9. Estes autores utilizaram um tubo de vórtice para resfriar o ar, os experimentos foram feitos empregando três técnicas de lubri-refrigeração diferentes, convencional, ar frio e MQL com ar frio. Nas técnicas que utilizam ar frio foram variadas quatro condições diferentes de pressões e temperaturas do ar, sendo elas: 0.1 MPa e -4°C ; 0.2 MPa e 1°C ; 0.3 MPa e 7°C ; 0.4 MPa e 14°C , sendo que o MQL com ar frio a taxa de óleo foi constante à 120 ml/h.

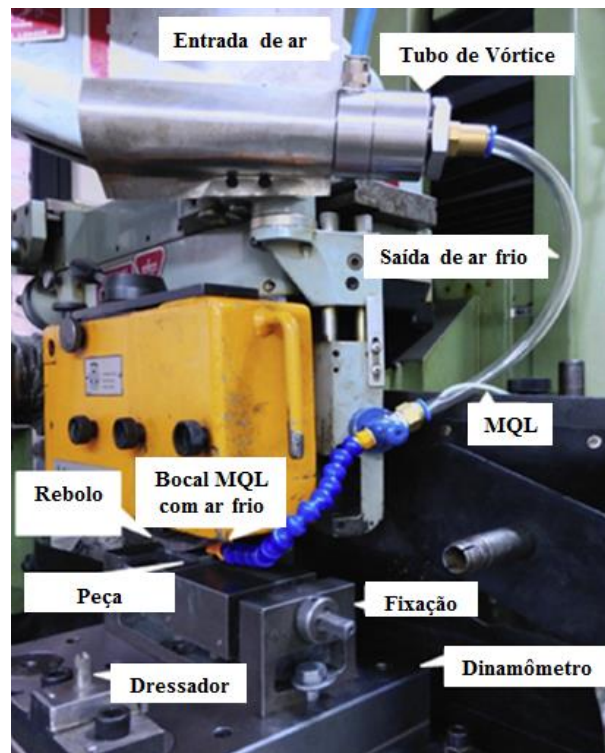


Figura 9: Instalação da retificação com técnica MQL e jato de ar frio auxiliar. Fonte: Saberi et al. (2016). Modificada.

Saberi et al. (2016) concluíram que as forças de corte com a utilização de MQL com ar frio foram menores em todos os casos devido ao baixo atrito na interface entre o grão e a peça. Contudo, nas outras variáveis analisadas a única condição que teve desempenho próximo ao do método convencional foi, MQL com ar frio à pressão de 0.4 MPa e temperatura de 14°C devido ao maior poder de refrigeração pela maior pressão empregada. Sendo assim, admitindo que a pressão influencia mais do que a temperatura do ar, pois com resultados numéricos foi concluído que a maior pressão é responsável pelo maior coeficiente de transferência de calor, logo há maior capacidade de retirar calor.

2.4 Tubo de vórtice

Segundo Gao et al. (2005), o tubo de vórtice é um dispositivo que gera gás frio e quente a partir de gás comprimido. Basicamente, esse dispositivo é constituído por uma entrada de gás comprimido, que é injetado na câmara do tubo tangencialmente, e duas saídas opostas, onde são expelidas uma parte quente e uma parte fria.

Aljuwayhel et al. (2005) afirmam que o tubo de vórtice é um dispositivo simples sem partes móveis que é capaz de separar um fluxo de alta pressão em dois fluxos de baixa pressão com diferentes temperaturas, conforme esquema na Figura 10.

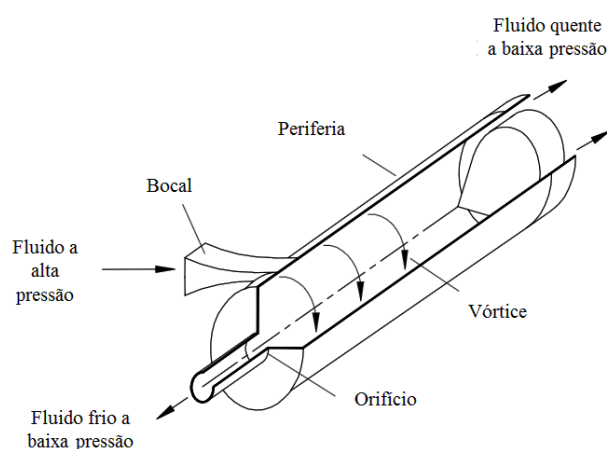


Figura 10: Fluxo do ar no interior do tubo de vórtice. Fonte: Aljuwayhel et al. (2005), modificada.

O gás é injetado a alta velocidade tangencialmente a parte do tubo de vórtice chamado gerador (Figura 11), onde ocorre a expansão do gás e é alcançada uma alta velocidade angular. O gás é direcionado a câmara de giro e, pelo efeito de separação da temperatura, se divide em temperaturas diferentes devido a alta velocidade rotacional que o gás se encontra (ALJUWAYHEL et al., 2005; LIU; CHOU, 2007).

A parte quente escoar pela periferia do tubo e a parte fria pelo centro. No final da câmara há uma válvula cônica que permite a saída apenas do gás que escoar na parte periférica da câmara (gás quente), sendo assim, as espirais de gás frio são bloqueadas pela válvula e “empurradas” para a direção oposta, onde há um orifício bem ao centro, então, através deste orifício o gás frio é escoado (LIU; CHOU, 2007), observado na Figura 11.

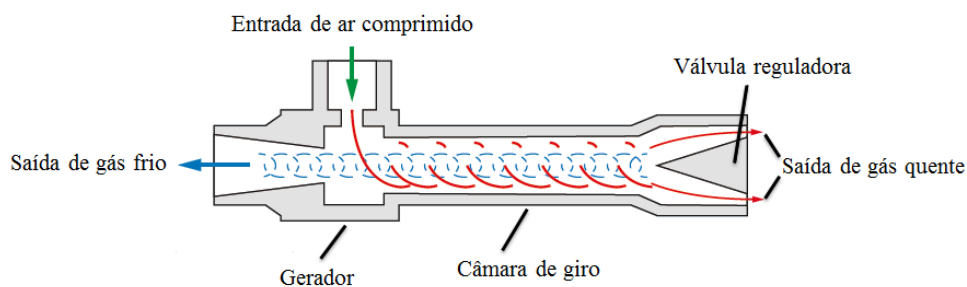


Figura 11: Esquema do fluxo de gás no tubo de vórtice.

Devido à pressão de entrada do gás que varia entre 0,5 MPa e 1 MPa, a temperatura pode chegar a -50°C na saída de ar frio e a 100°C na saída de ar quente, dependendo a regulagem da válvula cônica e da pressão do gás (GAO et al., 2005). Na Figura 12 é mostrado o esquema de distribuição de temperatura no interior do tubo de vórtice.

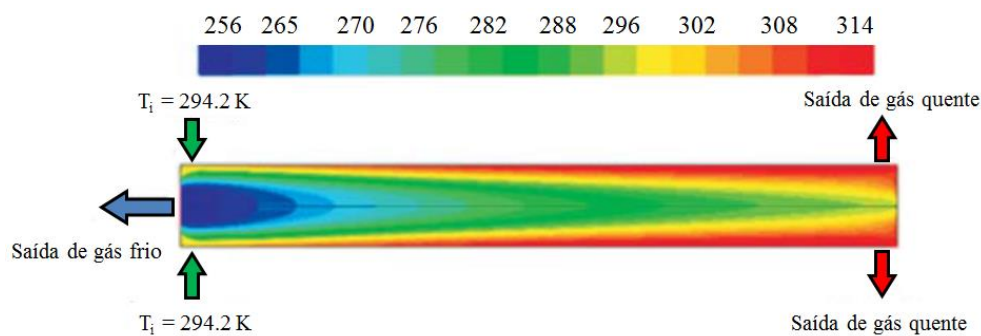


Figura 12: Esquema de distribuição da temperatura na câmara do tubo de vórtice.
Fonte: Pouraria et al. (2016), modificada.

3. Materiais e métodos

Neste tópico são descritos os equipamentos, materiais e métodos que foram empregados na realização deste trabalho, assim como os parâmetros de entrada utilizados nos experimentos e variáveis de saída que foram medidas para a análise e compreensão dos resultados.

As variáveis de saídas que foram medidas são: viscosidade do fluido, rugosidade, circularidade, integridade microestrutural, desgaste diametral, potência de retificação.

Os experimentos e medições de rugosidade, circularidade e desgaste diametral foram realizados no Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP *campus* Bauru. As medições de microdureza foram realizadas no Laboratório de Materiais da Faculdade de Engenharia de Bauru (FEB) – UNESP *campus* Bauru, as fotografias da microscopia ótica foram capturadas no Laboratório de Anelasticidade e Biomateriais da Faculdade de Ciências (FC) – UNESP *campus* Bauru e as medições de viscosidade foram realizadas no Laboratório de análises de viscosidade da Faculdade de Ciências (FC) – UNESP *campus* Bauru.

3.1 Equipamentos utilizados

Nesta seção são apresentados os equipamentos e materiais utilizados para a realização dos experimentos.

Os experimentos foram realizados em uma retificadora cilíndrica externa de mergulho da marca SULMECÂNICA modelo RUAP515H equipada com CNC da Fagor para acionamento do eixo X. Foram utilizados dois programas na retificadora, um para usinagem do corpo de prova (Apêndice A) e outro para impressão do rebolo (Apêndice B) que foi realizada em peças de ABNT1020 para assim realizar a medição de desgaste do rebolo.

Esta retificadora foi equipada com cortinas e placa de acrílico para minimizar a perda de fluidos de corte e também há um exaustor que retira a névoa de óleo formada na usinagem com a técnica MQL e melhora o ambiente para o operador.

Foram utilizados corpos de prova confeccionados em aço ABNT4340. Estes corpos de prova passaram por tratamentos térmicos (revenimento e têmpera) para aumentar a homogeneidade e dureza dos materiais, os tratamentos térmicos utilizados

foram tempera e revenimento. Após esses tratamentos térmicos o material passou a apresentar dureza média de 58 ± 2 HRc.

Os corpos de prova foram confeccionados em formato anelar com diâmetro externo de 58 mm, diâmetro interno de 30 mm e espessura de 4 mm.

Foi utilizado rebolo de óxido de alumínio branco com ligante vitrificado do fabricante Saint Gobain NORTON[®], sua especificação é 38A 150 L 6 V de dimensões 355,6 mm de diâmetro externo, 127 mm de diâmetro interno e 25,4 mm de espessura.

De acordo com a especificação do rebolo são apresentadas as seguintes características: a granulometria é 150 *mesh*, considerada fina e utilizada para retificação de precisão (STEMMER, 2008); o grau de dureza “L” indica que o grãos tem dureza média; a classificação da estrutura “6” significa um espaçamento/porosidade média, visto que a escala para porosidade do rebolo varia de 0 para estrutura fechada até 12 para estrutura aberta.

3.2 Técnicas de lubri-refrigeração

Nesta seção são apresentadas as técnicas de lubri-refrigeração que foram utilizadas nesta investigação, duas técnicas distintas foram utilizadas, a convencional e a mínima quantidade de lubrificante (MQL), sendo a técnica MQL dividida em dois tipos de aplicação, MQL a temperatura ambiente e MQL com jato auxiliar de ar frio.

3.2.1 Técnica convencional de aplicação de fluido de corte

O sistema de refrigeração convencional utilizado no trabalho é o sistema mais utilizado na indústria, que é a lubri-refrigeração de maneira abundante utilizando emulsão. Os resultados obtidos a partir deste sistema de refrigeração são utilizados como referência para comparação com os resultados obtidos pelos outros métodos de lubri-refrigeração.

Este sistema consiste em um reservatório com capacidade de 80 litros, fluido de corte, bomba de sucção, mangueiras e bocais de aplicação.

O fluido de corte é uma emulsão com proporção de diluição de 1:39 (indicado pelo fabricante), ou 2,5%, de óleo solúvel sintético ecológico ME-1 da empresa QUIMATIC[®] TAPMATIC[®]. Este fluido tem como característica maior lavabilidade, que não empasta o rebolo; é considerado ecológico, pois é isento de

nitrito, boro, cloro, enxofre, compostos aromáticos e metais pesados; apresenta ótima lubrificação e excelente proteção anticorrosiva.

São utilizados dois bocais de aplicação com diâmetro de saída \varnothing 6,5mm e tubos do tipo fixoflex[®]. A vazão utilizada foi de 17 l/min, maior vazão alcançada pela bomba, a 0,4 MPa de pressão e a velocidade de saída do fluido foi 8,54 m/s.

3.2.2 Técnica MQL a temperatura ambiente

O sistema de mínima quantidade de lubrificante (MQL), ilustrado na Figura 13, utilizado neste trabalho consiste em um compressor de ar, um filtro com válvula de purga na saída do compressor, um regulador de pressão com filtro na entrada da válvula que direciona o ar para o sistema, o equipamento MQL, mangueiras e um bocal.

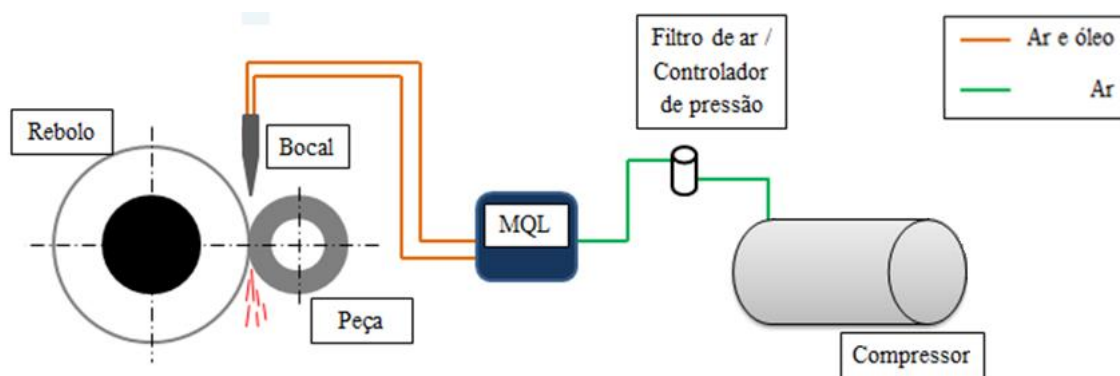


Figura 13: Sistema da técnica Mínima Quantidade de Lubrificante.

O compressor de ar utilizado é da marca Schulz linha Max modelo MSV 30/350, com deslocamento teórico de 30 pcm, aproximadamente 850 L/min, e deslocamento efetivo 20 pcm, aproximadamente 566 L/min.

O equipamento MQL é fabricado pela marca Accu-Lube[®] da ITW Chemical Products Ltda. Este sistema contém dois pistões regulados por uma válvula que varia a vazão do MQL entre 0 e 700 mL/hora a 0,6 MPa de pressão. O sistema MQL permite o controle de vazão do ar e vazão do fluido de forma distinta.

O bocal utilizado para este método é semelhante ao usado por Silva et al. (2005), esse bocal contém dois difusores de entrada de ar/óleo, cada difusor contém um furo no centro, onde só há a passagem de óleo, e seis furos adjacentes, onde entra o ar comprimido, vide Figura 14 B. O ar e o óleo são misturados no interior do bocal, mostrado na Figura 14 A, sendo expelidos pela seção retangular de 1,5mm X 22mm. Este bocal é posicionado a aproximadamente 30 mm da região de corte.

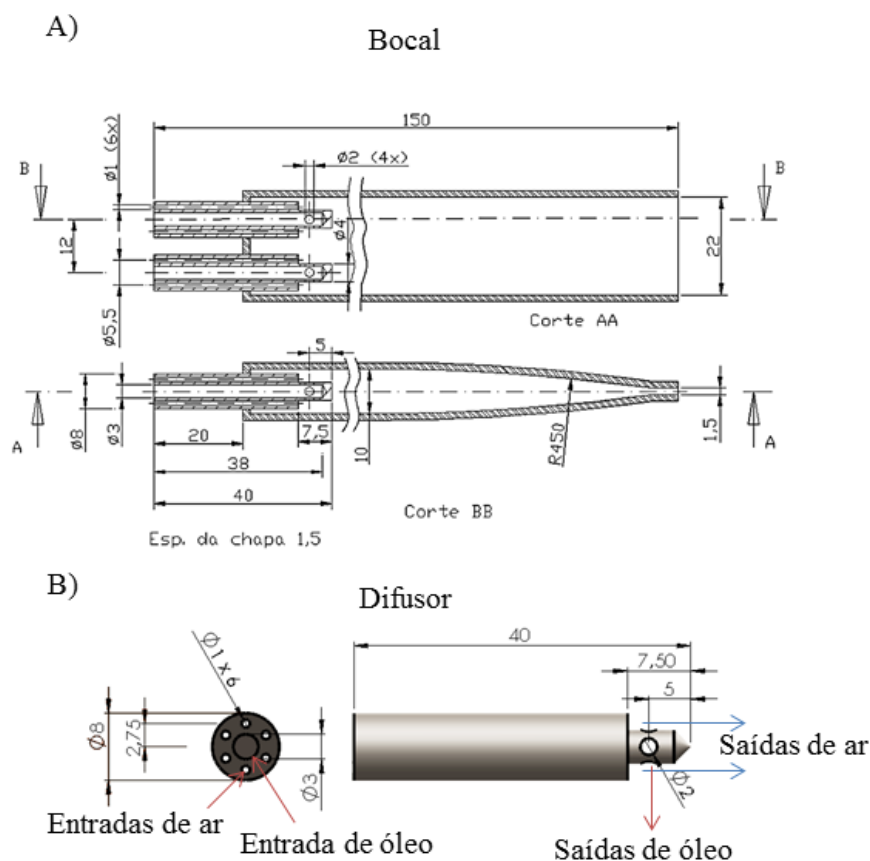


Figura 14: Desenho do bocal utilizado na técnica MQL (BELENTANI et al., 2014), modificada.

Nos experimentos com MQL deste trabalho foi utilizada vazão de óleo de 150 mL/h e vazão de ar de aproximadamente 480 L/min, a 0,6 MPa de pressão e a velocidade do fluido na saída do bocal foi de 30 m/s.

3.2.3 Técnica MQL com jato auxiliar de ar frio

O sistema usado no MQL com jato auxiliar de ar frio, ilustrado na Figura 15, é o mesmo utilizado no MQL com adição de alguns equipamentos para o resfriamento do ar comprimido, sendo estes equipamentos, um compressor com filtro equipado com válvula de purga na saída, regulador de pressão, um secador de ar, um tubo de vórtice e um bocal específico desenvolvido para esta investigação, conforme apresentado Figura 16, aonde além das mangueiras que vem do sistema de aplicação da técnica MQL é também adicionado uma mangueira que vem do tubo de vórtice.

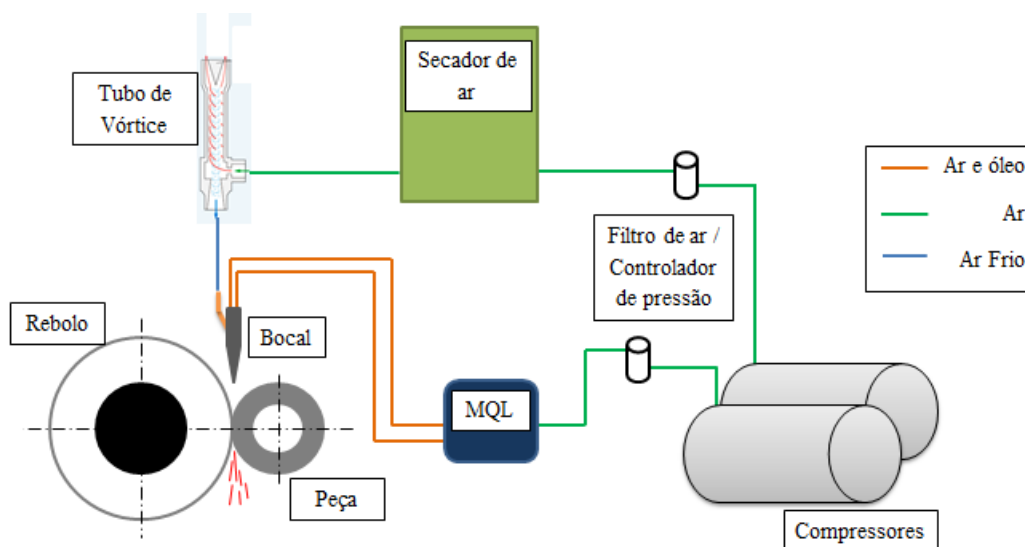


Figura 15: Sistema da técnica Mínima Quantidade de Lubrificante assistida com jato de ar frio (MQL+AF).



Figura 16: Bocal utilizado na técnica MQL+AF.

Nos experimentos com MQL com ar frio deste trabalho foi utilizada vazão de óleo de 150 mL/h e vazão de ar de aproximadamente 480 L/min, a 0,6 MPa de pressão e a velocidade do fluido na saída do bocal era de aproximadamente 30 m/s. A vazão do ar era aproximadamente 90% de ar do tubo de vórtice (frio) e 10% de ar do sistema de MQL (temperatura ambiente). Devido à perda de vazão que há no tubo de vórtice não foi possível medir esta vazão, por isso os valores são aproximados com base na abertura da válvula de ar quente do tubo de vórtice e abertura da válvula de ar do sistema MQL.

Os valores de vazões e pressões são aproximadamente os mesmos utilizados na técnica MQL. Assim conseguiu-se analisar as diferenças causadas pela diferença de temperatura, visto que a temperatura utilizando a técnica de MQL com ar frio foi aproximadamente zero graus Celsius. Essa temperatura não foi medida durante os ensaios, em tempo real, por impossibilidade de fixação do termopar próximo à zona de corte, porém foram realizados testes preliminares, que a temperatura foi medida a 20 mm da saída do bocal (mesma distância entre este bocal e a interface de retificação).

Sendo assim, o ar e o fluido atingiam a zona de retificação a 0°C, pois a temperatura na saída do bocal era mais baixa, aproximadamente -6°C.

O ar é resfriado pela ação de um tubo de vórtice da marca Emuge-Franken, o qual apresenta característica a capacidade de abaixar a temperatura do ar para até -46°C, conforme a Tabela 2 que indica as temperaturas alcançadas relacionando a abertura da válvula e pressão de entrada do ar comprimido.

Tabela 2: Relação de pressão, abertura de válvula e temperatura do tubo de vórtice.
Fonte: EMUGE-FRANKEN®.

Pressão de ar (MPa)	Temperatura de ar [°C] com uma porcentagem de abertura da válvula cônica de		
	25%	50%	75%
0,3	-32	-21	-6
0,4	-35	-35	-8
0,5	-39	-28	-10
0,6	-42	-31	-11
0,7	-46	-34	-13

O tubo de vórtice tem como característica a entrada de ar comprimido a alta pressão e saída de ar frio e ar quente a alta velocidade, este tubo pode ser observado na Figura 17.

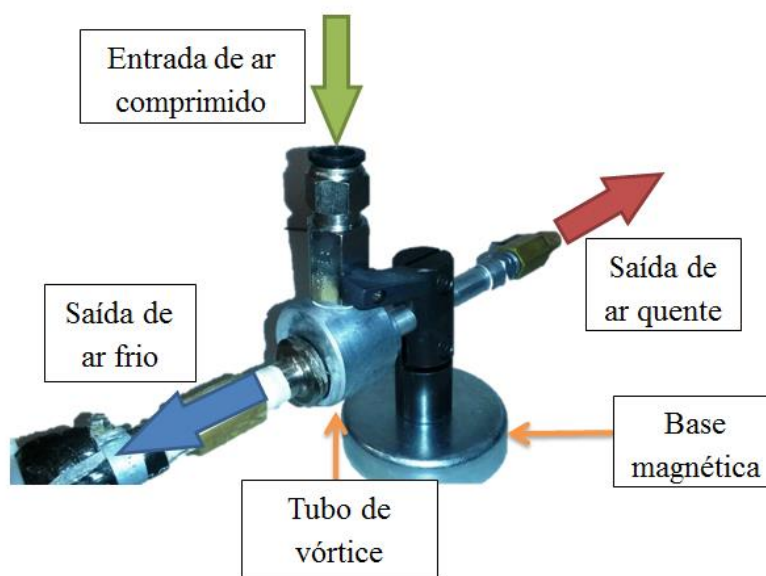


Figura 17: Tubo de vórtice.

Devido a umidade contida no ar comprimido, este passou por um secador de ar da marca Metalplan modelo TITAN-A 40 PLUS, isso porque as temperaturas de trabalho foram mais baixas do que a temperatura de fusão da água. Nestes testes preliminares, sem a utilização do secador de ar, houve alguns problemas com formação de gelo no interior da tubulação e assim causando obstrução da passagem do ar frio.

O ar quente foi dissipado no meio ambiente enquanto que o ar frio foi canalizado e levado para o bocal de MQL com ar frio. A mangueira que encaminhava o ar frio foi devidamente isolada termicamente e seu comprimento foi reduzido ao máximo (aproximadamente oito centímetros) para minimizar as perdas térmicas. O isolamento térmico foi realizado com uma camada de um tubo isolante térmico e uma camada de manta térmica. A montagem do tubo de vórtice e do bocal de MQL com ar frio é apresentado na Figura 18.

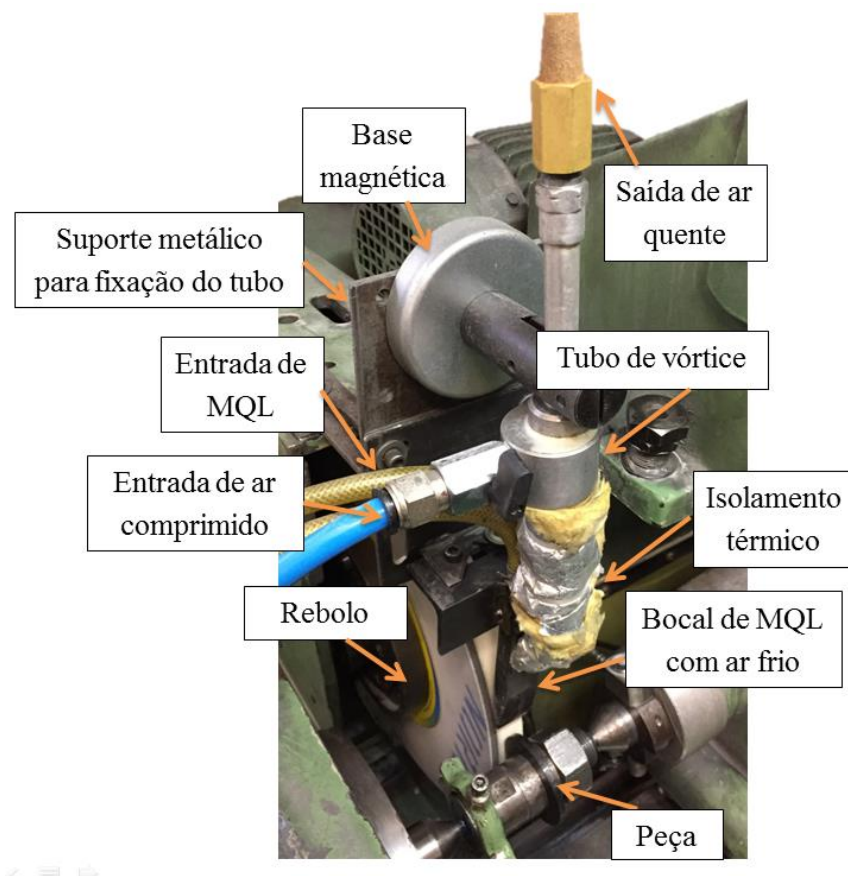


Figura 18: Montagem do tubo de vórtice.

Na Tabela 3 são apresentadas as condições de lubri-refrigeração de maneira resumida.

Tabela 3: Parâmetros de lubri-refrigeração.

Parâmetros	Convencional	MQL	MQL+AF
Fluido de corte	ME-1	LB 1100	LB 1100
Vazão de fluido de corte [mL/h]	1,02x10 ⁶	150	150
Vazão de ar [mL/h]	-	9,7x10 ⁶	9,7x10 ⁶
Pressão [Mpa]	0,4	0,6	0,6
Diluição [óleo:água]	1:39	-	-
Temperatura do fluido de corte/ar [°C]	27	27	0
Velocidade do fluido de corte/ar [m/s]	8,54	30	30

3.3 Parâmetros utilizados nos ensaios

Neste tópico são mostrados todos os parâmetros utilizados para a realização dos experimentos. Os parâmetros de retificação são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros de corte.

Parâmetros fixos utilizados	Valor
Velocidade de corte (v_s) [m/s]	30
Rotação do rebolo (n_s) [rpm]	1637
Velocidade da peça (v_w) [m/s]	0,2460
Rotação da peça (n_w) [rpm]	81
Número de ciclos	50
Avanço por ciclo [mm]	0,1
Volume de material removido (Z_w) [m ³]	1743,53
Tempo de spark-out [s]	7,5 s
Velocidade de mergulho (v_f) [mm/min]	0,25 0,50 0,75
Taxa de remoção de material específica (Q_w') [mm/min]	45,55 91,10 136,66
Espessura de corte equivalente (h_{eq}) [μm]	0,0253 0,0506 0,0759

Com a variação da velocidade de mergulho há também a variação da taxa de remoção específica de material e da espessura equivalente de corte, que variam proporcionalmente, à velocidade de mergulho.

Para ilustrar como foram realizados os experimentos, foi elaborado o organograma dos experimentos apresentado na Figura 19.

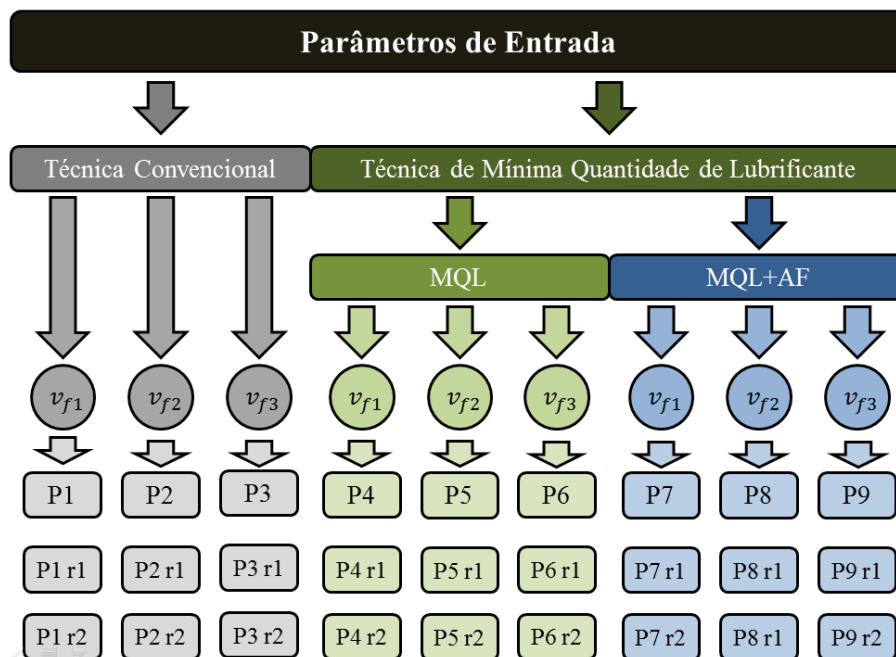


Figura 19: Organograma de ensaios.

Observando a Figura 19, nota-se que foram realizados, para cada condição de retificação, uma peça representada por (Pn) e duas réplicas representadas por (Pn r1) e (Pn r2), onde “n” varia de 1 até 9. Sendo assim, foram realizadas nove condições diferentes de usinagem e três peças para cada condição, totalizando 27 ensaios.

Como é observado na Figura 19, para a realização dos ensaios são determinados os parâmetros de entrada, que são fixos durante os experimentos. Três técnicas de lubri-refrigeração foram utilizadas, sendo a técnica convencional, a técnica MQL e a técnica MQL com ar frio. Foram realizados ensaios com três velocidades de mergulho diferentes, para cada técnica de lubri-refrigeração, v_{f1} , v_{f2} e v_{f3} .

Onde,

- ✓ v_{f1} – 0,25 mm/min
- ✓ v_{f2} – 0,50 mm/min
- ✓ v_{f3} – 0,75 mm/min

3.4 Condições dos ensaios

Para a realização dos ensaios, primeiramente, era realizada a dressagem do rebolo, para que não houvesse influência no ensaio que seria realizado. Para a realização da dressagem foi utilizado um dressador de diamantes tipo conglomerado da marca Master Diamond com dimensões 15 mm x 8 mm x 10 mm. O dressador conglomerado tem como característica vários diamantes que são unidos/fixos em uma matriz metálica, resultando em um alto valor de largura de atuação do dressador (b_d). Neste caso, o b_d é de aproximadamente 1,0. Este valor é informado pelo fabricante, e por ser um valor estimado, não necessita de verificação periódica do desgaste na ponta de diamante como ocorre nos dressadores de ponta única.

O grau de recobrimento (U_d) utilizado neste estudo foi igual a 8, de acordo com Marinescu et al. (2007), é um valor de grau de recobrimento utilizado para operações de acabamento.

Na realização de dressagem foi usado profundidade de dressagem (a_d) igual a 0,02 mm por passada; o avanço por volta (S_d) foi de 0,125 mm; a rotação do rebolo (n_s) foi de 1637 rpm e então a velocidade de dressagem (v_{fd}) foi de 200 mm/min.

A dressagem foi realizada de maneira manual e com a utilização da técnica convencional de lubri-refrigeração. O parâmetro utilizado para o total de passes do dressador sobre o rebolo, para finalizar a dressagem, foi até que as marcas deixadas pelas peças nos ensaios fossem completamente retiradas, e assim a superfície do rebolo estava pronta para novos ensaios.

Após a dressagem a peça era fixada na retificadora, na sequência era realizada a aproximação do rebolo na peça, para assim ajustar na rotina do código CNC os parâmetros que seriam utilizados. Quando os parâmetros estavam ajustados, era acionada a aquisição dos dados de potência e se iniciava a retificação, ao término da retificação, era desligada a aquisição dos dados de potência e a peça era retirada em sequência outro ensaio era realizado.

A Figura 20 contém um fluxograma apresentando a sequência da realização dos experimentos a cada dressagem do rebolo, em que, três ensaios e uma impressão do perfil do rebolo desgastado eram realizados ante de cada processo de dressagem.

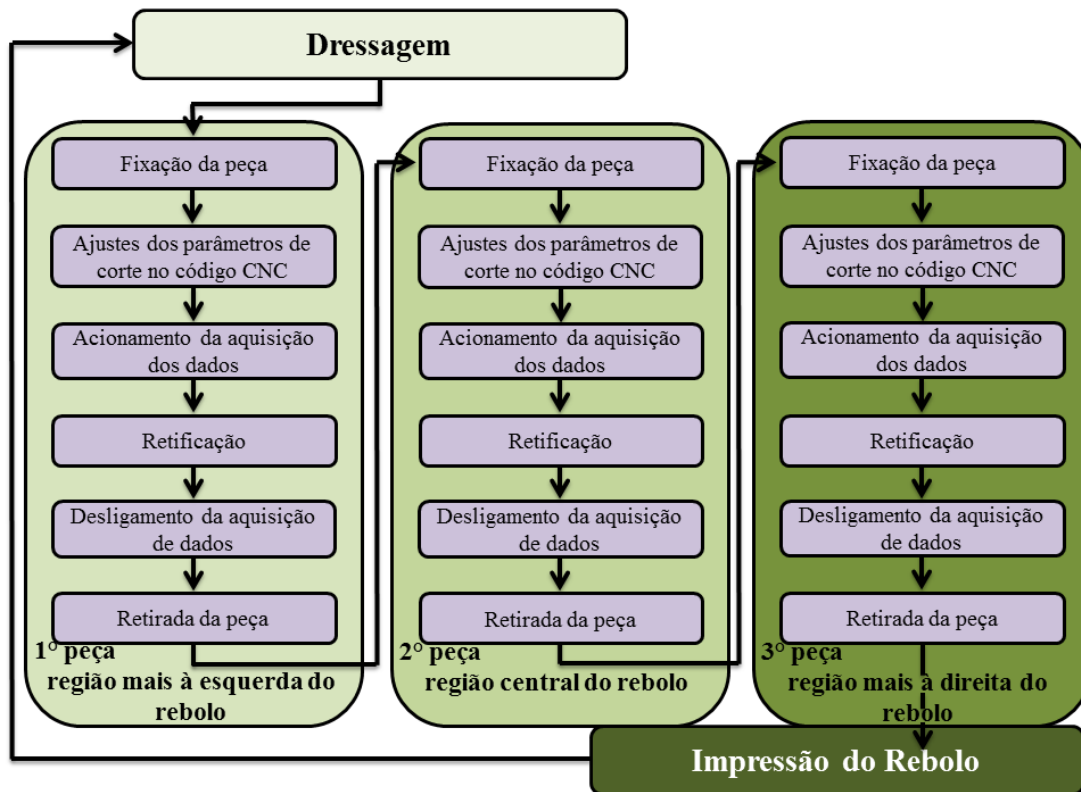


Figura 20: Fluxograma da sequência para uma dressagem do rebolo.

Como é observado na Figura 20 foram retificadas três peças a cada dressagem. A medida de desgaste do rebolo era realizada ao final da retificação de 3 peças, pelo método de impressão do rebolo. Esta estratégia foi adotada em função da dimensão da largura do rebolo ser 25,4 mm. Como a largura de cada peça é de 4 mm. Após os três ensaios serem realizados a superfície de corte do rebolo apresentava três marcas de desgaste, conforme é apresentada na Figura 21.

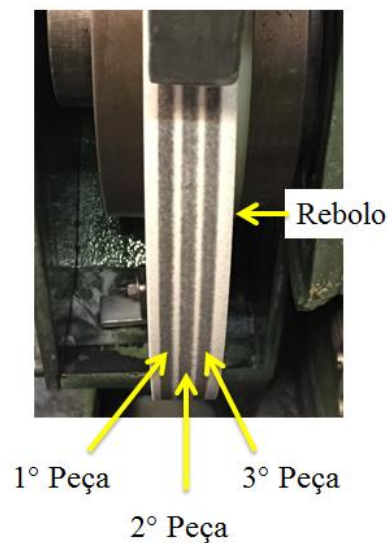


Figura 21: Marcas geradas no rebolo após a retificação (antes da impressão).

As configurações escolhidas, para cada uma das três peças que foram ensaiadas entre uma dressagem e outra, possuíam características diferentes, por exemplo, se a 1ª peça era retificada com v_s igual a 0,50 mm/min, então para a 2ª peça utilizaria v_s igual a 0,75 mm/min e para a 3ª peça v_s igual a 0,25 mm/min. O que variava a cada sequência de experimento, para que não fosse repetida nenhuma condição de corte duas vezes na mesma região do rebolo. Os experimentos foram realizados desta maneira, pois se houvesse alguma região do rebolo menos homogênea, não influenciaria de maneira considerável nos resultados, haveria apenas um erro sistemático, que apareceria para as três condições. Na Figura 22 é apresentado o fluxograma de sequência de ensaios para melhor entendimento.

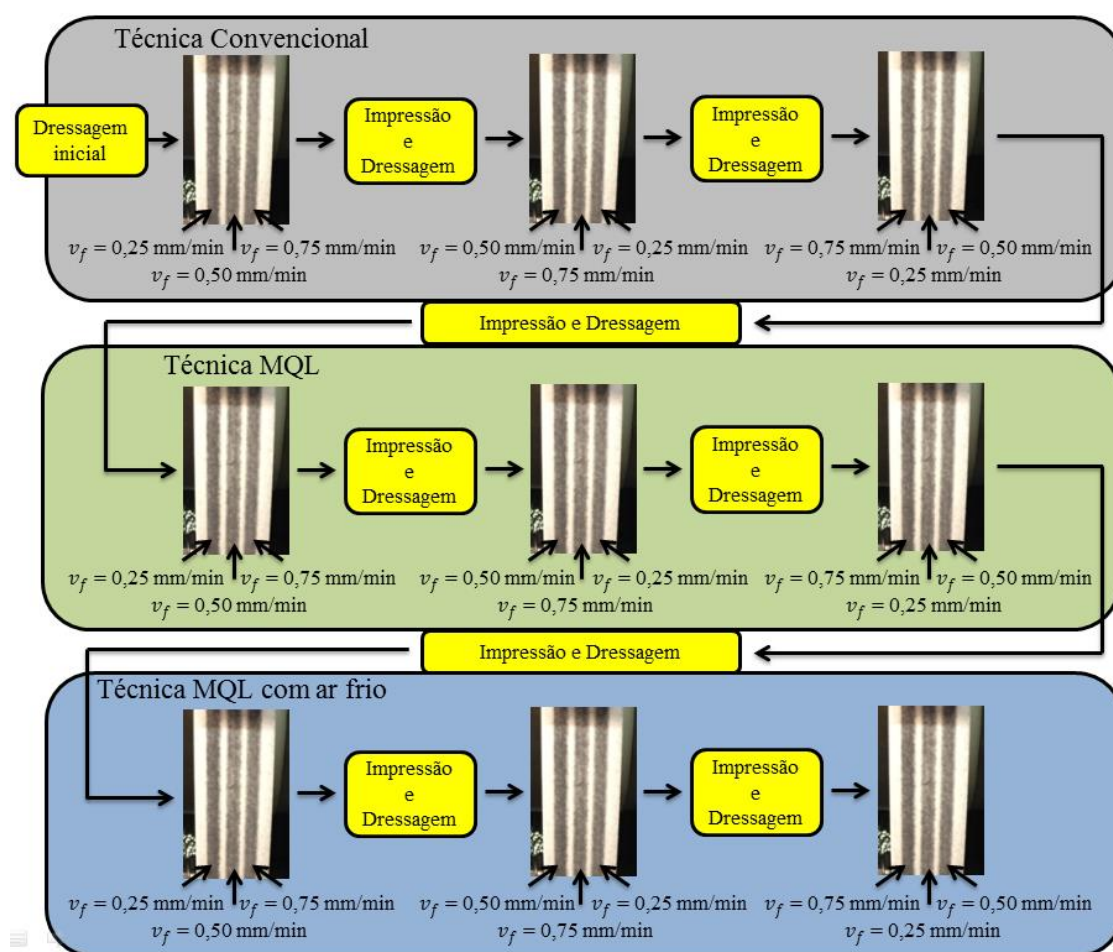


Figura 22: Fluxograma de sequência de ensaios.

3.5 Variáveis de saída para análise do processo

Nesta seção são apresentadas algumas variáveis de saída que são utilizados para analisar o desempenho de retificação, a metodologia e os equipamentos utilizados para a obtenção dos resultados. Como parâmetro de comparação foi utilizada

a técnica a de lubri-refrigeração convencional, para, a partir desses resultados avaliar o desempenho das técnicas MQL e MQL com ar frio (MQL+AF).

Foi utilizado o desvio padrão dos valores medidos como intervalo de confiança, para mais e para menos. Ou seja, o valor contido no gráfico é uma média e a tarja apresenta o valor do desvio padrão somado e subtraído. Sendo assim este intervalo de confiança apresenta 68% dos casos.

3.5.1 Viscosidade do fluido

A viscosidade do fluido é uma importante variável do processo, segundo Belentani et al. (2014) a redução da viscosidade do fluido aumenta a remoção de cavaco da zona de corte minimiza os riscos e reduz a rugosidade.

A viscosidade dinâmica é proporcional à força de atração entre as moléculas, quando ocorre o aumento da temperatura a força de atração diminui e consequentemente diminui a viscosidade. A força de atração diminui porque com o aumento da temperatura há maior agitação das moléculas que implica no distanciamento intermolecular, quanto maior a distância intermolecular menor é a força de atração (BRUNETTI, 2008; GRANJEIRO et al., 2007).

De acordo com Profito (2010), a viscosidade dinâmica dos lubrificantes (sendo de origem sintética ou mineral) é fortemente influenciada pela temperatura, podendo diminuir até 80% com o aumento na temperatura de 25°C. Levando em consideração a lubrificação, é muito importante conhecer o comportamento da viscosidade do fluido com relação à temperatura, pois esta propriedade influencia diretamente na espessura mínima de filme lubrificante que promove a separação entre as superfícies em contato.

As medidas de viscosidade foram realizadas por um reator da marca IKA[®], modelo Eurostar Power Control Visc P7, equipado com um tanque de dois litros de volume útil para armazenamento do fluido de corte, uma ancora impulsora e uma unidade de medição, como mostrado na Figura 23.

O tanque tem uma jaqueta de circulação externa responsável pelo controle térmico. Este controle é feito por banho térmico que mantém a temperatura de trabalho definida pelo operador e a temperatura da amostra é medida por um termopar mergulhado no fluido, no interior do tanque.

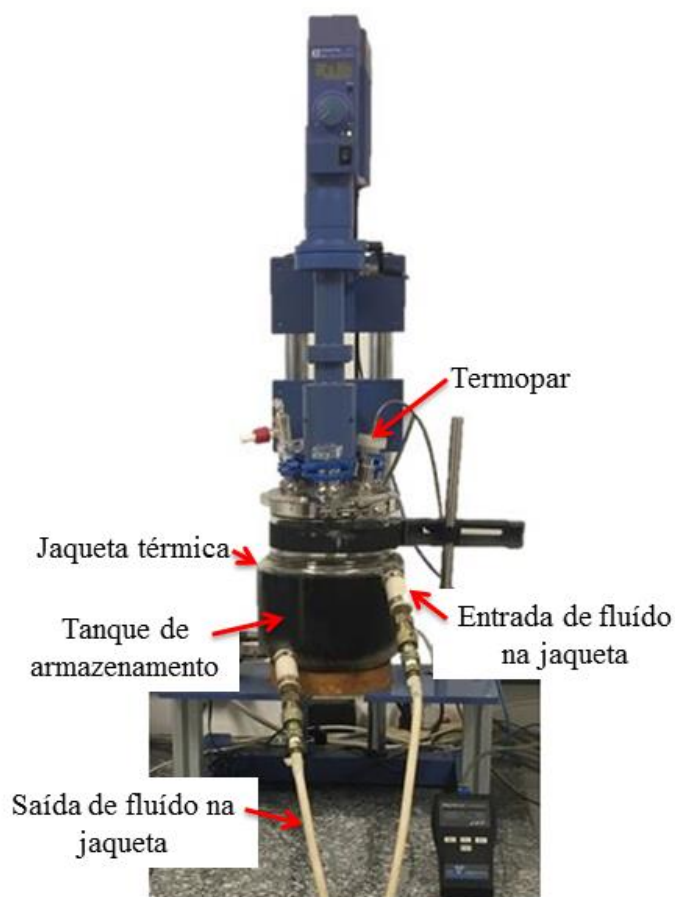


Figura 23: Reator utilizado para medição de viscosidade do fluido.

Foi realizado a medição da viscosidade do fluido LB 1100 da com relação à temperatura, estas medições foram realizadas com a rotação da âncora adotada a 30 rpm, os valores de viscosidade foram medidos nas temperaturas de 6,9°C; 9,2°C; 15,2°C; 21,8°C; 27,1°C e 35,1°C. Os dados foram obtidos através do dispositivo de medição do reator, que fornece os valores de viscosidade, interligado ao computador onde o software LabWorld armazena os dados automaticamente. Os dados utilizados são dos pontos de maior tempo de estabilidade térmica, sendo assim obtendo maior confiabilidade nos resultados.

3.5.2 Rugosidade

Segundo Hecker e Liang (2003), a qualidade superficial que é gerada pelo processo de retificação determina muitas características na peça, entre elas, mínima tolerância, eficiência na lubrificação, vida útil, resistência à fadiga e resistência a corrosão. Ainda ressaltam que um parâmetro muito utilizado para quantificar esta qualidade superficial é a rugosidade.

São três tipos de rugosidade que geralmente são quantificadas, a rugosidade total (R_t), a rugosidade máxima (R_z) e a rugosidade média (R_a). A R_t é a máxima diferença entre a altura do pico e a profundidade do vale em um comprimento de amostragem. A R_z é a média aritmética entre a máxima diferença entre picos e vales de cinco pontos individuais em um comprimento de amostragem. A rugosidade R_a é a média aritmética de todas as irregularidades do perfil a partir de uma linha média dentro de um comprimento de amostragem (MARINESCU et al., 2007).

O valor da rugosidade é influenciado por diversos fatores, segundo Puerto et al. (2013) ela é influenciada pelo rebolo, processo de dressagem e processo de retificação. Sendo mais específico, Bigerelle et al. (2008) relatam que a rugosidade depende do tamanho e forma do grão abrasivo, e estabelecem a relação que quanto maior o número de grãos em contato com a superfície, menor será a rugosidade, pois com os grãos menores e maior quantidade de grãos em contato com a superfície, conseqüentemente, a profundidade de penetração será menor, diminuindo a rugosidade.

Para Hecker e Liang (2003), a rugosidade é influenciada pela profundidade de corte, velocidade de corte e pelo material que está sendo usinado. Shaji e Radhakrishnan (2003) complementam, afirmando que o tipo de lubri-refrigeração, características estruturais e dinâmicas da máquina, também são fatores que influenciam no valor de rugosidade.

A qualidade superficial pode ser considerada por dois aspectos: integridade superficial e topografia superficial. Para retificação o aspecto mais importante de integridade superficial está associado com os danos térmicos, pois é o que causa as mudanças metalúrgicas e mecânicas do material. A topografia superficial se refere a geometria da superfície retificada, que é geralmente caracterizada pela rugosidade. A rugosidade média (R_a) em peças produzidas por retificação apresentam uma faixa de valores entre 0,15 μm e 1,5 μm , (MALKIN; GUO, 2008).

A rugosidade média aritmética, parâmetro R_a , foi medida por um rugosímetro modelo Surtronic3+, do fabricante Taylor Hobson®. Os parâmetros de medição utilizados foram: comprimento de amostragem (l_e) igual a 0,25 mm e comprimento de medição (l_m) igual a 1,25 mm. Foram utilizados esses parâmetros devido à largura da peça ser 4 mm, impossibilitando a medição com maior comprimento de amostragem. Cada peça foi medida em 5 pontos diferentes da superfície, obtendo um valor médio para cada peça. Posteriormente o valor e o desvio padrão de R_a foram

calculados a partir das médias da peça e das duas réplicas, para assim obter confiabilidade na medição.

3.5.3 Desvios de circularidade

O desvio de circularidade é definido como sendo diferença radial entre os dois círculos teóricos concêntricos, esses dois círculos devem conter o círculo real da superfície que deseja-se medir o desvio, para melhor entendimento observar na Figura 24 (JĘDRZEJEWSKI; MODRZYCKI, 1997).

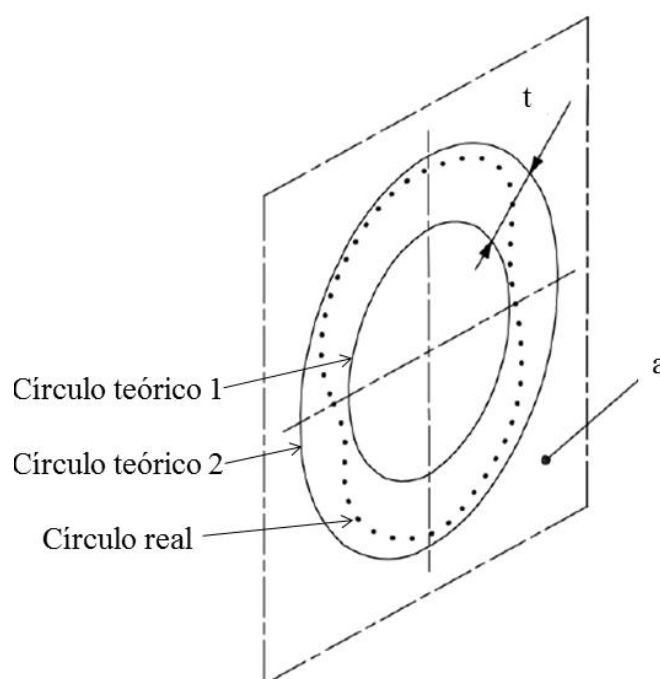


Figura 24: Método de medição do desvio de circularidade de acordo com a norma ISO 1101:2012, em que a é um plano qualquer e t é o valor do desvio.

De acordo com a norma ISO 1101:2012, o desvio de circularidade é aceitável desde que o perfil da peça esteja dentro de dois círculos concêntricos, onde a diferença entre os raios seja igual ou menor que a tolerância desejada.

Segundo De Meter e Hockenberger (1997), a temperatura na zona de corte é um fator que influencia diretamente no desvio de circularidade, pois quanto maior a temperatura na zona de corte, maior será a distorção térmica que ocorre na peça, sendo assim, maior é o desvio de circularidade. Para minimizar este erro é recomendada a utilização de uma técnica de lubri-refrigeração eficiente.

Outro fator que influencia nos erros de circularidade são as deflexões causadas pelo movimento de mergulho do rebolo (avanço), devido às forças empregadas. Para minimizar os desvios de circularidade é utilizado o tempo de spark-out (centelhamento) estabilizando a geometria e reduzindo as distorções (MALKIN; GUO, 2008).

Os desvios de circularidade foram medidos com um medidor de circularidade modelo Tayround 31C, do fabricante Taylor Hobson®. Cada peça foi medida em três pontos diferentes, sendo um ponto no centro da peça, um ponto a 1 mm acima do centro e um ponto 1 mm abaixo do centro, ilustrado na Figura 25. A partir dos três valores foi obtido um valor médio para cada peça. Posteriormente o valor e o desvio padrão, do desvio de circularidade, foram calculados baseados nas médias da peça e das duas réplicas.

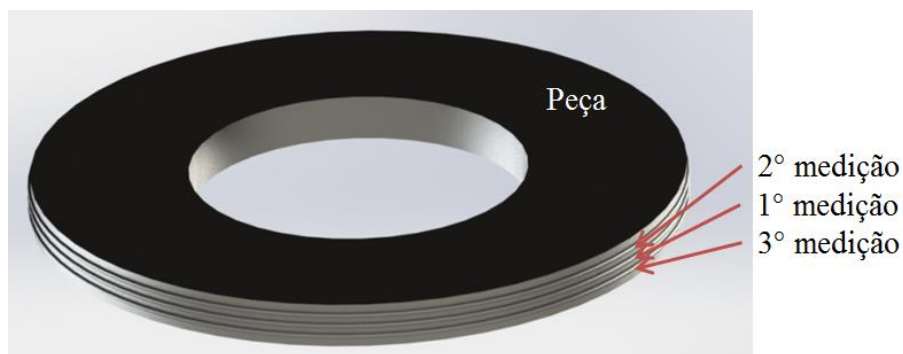


Figura 25: Representação esquemática do posicionamento dos perfis de medição do desvio de circularidade.

3.5.1 Integridade Microestrutural

Para analisar da integridade microestrutura das peças retificadas foi realizada a medição da microdureza na sub-superfície e feita metalografia, pelas imagens obtidas por microscopia ótica.

3.5.1.1 Microdureza

Para a realização da medição de microdureza primeiramente é necessário realizar a preparação metalográfica da peça. As amostras são cortadas e uma pequena parte dela, mostrada na Figura 26, que deve compreender a superfície usinada, é embutida em baquelite. Posteriormente elas são lixadas com a seguinte sequência de lixas (granulometria *mesh*): 120, 220, 320, 400, 500, 600, 1000, 1200 e 1500. Em seguida elas são polidas com uma solução água e alumina com granulometria de 1 μm .

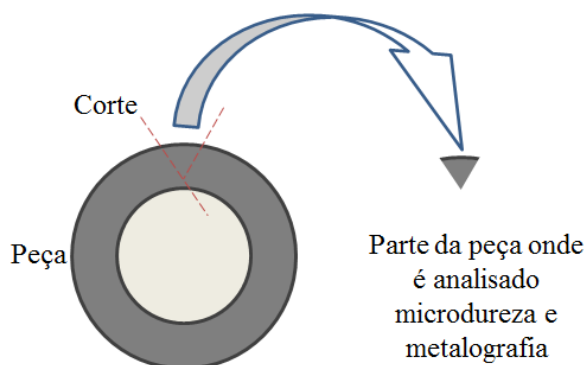


Figura 26: Ilustração da seção da peça selecionada para análise de microdureza e metalografia.

A medição foi realizada no microdurômetro da marca Mitutoyo, modelo HM-200, equipado com duas lentes de aumento objetivas, uma de 10 vezes e outra de 50 vezes e um indentador de dureza Vickers.

Após alguns testes preliminares foi adotado que a carga de indentação seria de 300 gramas, pois essa carga proporcionou diagonais com valores entre 28 μm e 30 μm , estando coerente com a norma ASTM E92 que estabelece que para uma objetiva de 50 vezes as diagonais devem medir valores acima de 21 μm .

A norma ASTM E92 especifica que a medição deve iniciar a uma distância da superfície de 2,5 vezes o tamanho da diagonal. Após essa primeira medição deve-se manter essa mesma distância para a próxima medição. Porém, essa norma também sugere que em algumas situações essa medida pode ser menor. Para a realização da medição deste trabalho foi adotado uma medição a cada 2 vezes o valor da diagonal.

Como o maior valor da diagonal ficou abaixo de 30 μm , então foi adotada que a diagonal seria 30 μm ; Assim, a distância mínima entre cada indentação foi de 60 μm . Para obter medidas mais próximas foi realizada medição em duas colunas, uma coluna com as medições iniciando a 60 μm da superfície e outra iniciando a 90 μm da superfície retificada, sendo assim obtendo valores a cada 30 μm de distância, conforme Figura 27. Para maior confiabilidade nas medições, foram realizadas três medições.

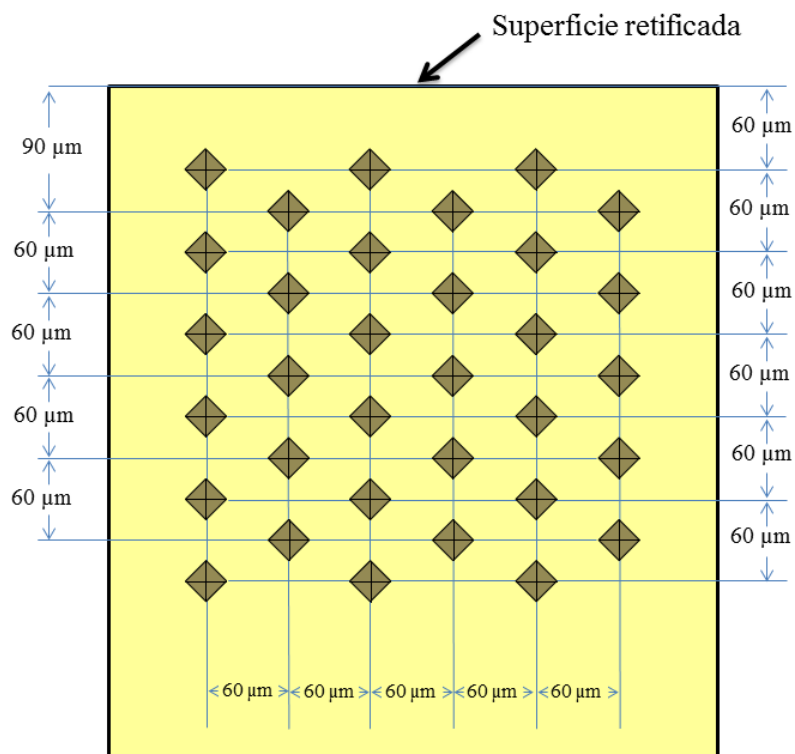


Figura 27: Esquema para posicionamento das indentações e medição da microdureza.

3.5.1.2 Microscopia ótica

Para a realização da análise microestrutural do material após a retificação foi realizada a análise por metalografia.

Para a realização da microscopia ótica, deve ser realizado o preparo das peças de forma análoga as realizadas para medição de microdureza. Após o término do processo de polimento, as peças foram submetidas a um ataque químico. Foi utilizado como reagente químico Nital 1%, por 10 segundos.

Para obter a imagem das peças foi utilizado um microscópio ótico da marca Olympus, modelo BX51M, equipado com uma câmera digital e conectado ao software analisIS imager, também da marca Olympus. As imagens foram capturadas com aumento de 500 vezes e aumento de 1000 vezes.

3.5.2 Desgaste do rebolo

Segundo Liao et al. (2000), o desgaste do rebolo ocorre de três maneiras distintas, sendo elas, pelo atrito entre o grão abrasivo e a peça, pela fratura de grão e pelo desprendimento do grão, esse desprendimento ocorre pela fratura do ligante. O desgaste ocorre pela sollicitação mecânica que o rebolo é submetido e pela deterioração térmica que ocorre no ligante.

O desgaste do rebolo está diretamente relacionado à espessura equivalente de corte (h_{eq}), quanto maior é a h_{eq} maior é o desgaste do rebolo. A eficiência do grão de abrasivo está ligada à velocidade de corte (quanto maior a velocidade maior a eficiência do grão) e também a lubri-refrigeração aplicada (CHOI et al., 2008).

O desgaste influencia em algumas variáveis, como no aumento das forças de corte, da rugosidade e no tamanho final da peça, pois quando é definida a profundidade de corte não é levado em consideração o desgaste do rebolo, e outras variáveis (MARINESCU et al., 2007).

A técnica utilizada para medir o desgaste do rebolo foi pelo método indireto, pois, é inviável a medição diretamente no rebolo, então para realizar esta medição foi necessária a impressão da superfície desgastada do rebolo (após três ensaios), na Figura 28 é apresentado esquematicamente como era realizada a impressão do rebolo.

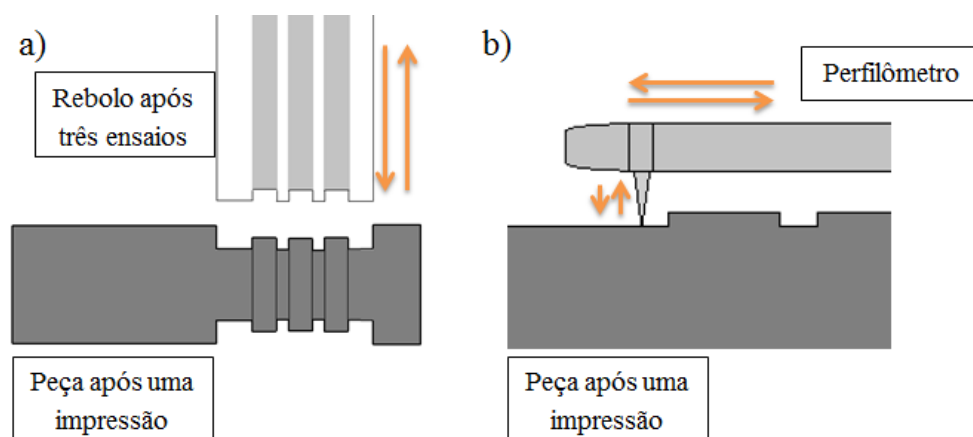


Figura 28: Representação esquemática da técnica de impressão para medição do desgaste.

A impressão do perfil desgastado do rebolo era realizada após os ensaios de retificação. O rebolo retificava a peça de aço específica para essa aplicação, que assim reproduzia o desnível do rebolo em sua superfície. As peças usadas foram confeccionadas em aço ABNT 1020, com dimensões 35 mm de diâmetro e 120 mm de comprimento, obtidas por torneamento, que possuía como característica baixa dureza.

Para medir os desníveis na superfície da peça onde foi impresso o perfil do rebolo, foi utilizado um rugosímetro modelo Surtronic3+, do fabricante Taylor Hobson® assistido pelo software TalyMap, também do fabricante Taylor Hobson®, onde

foi plotado e medido o desnível do perfil. Na Figura 29 é apresentado um exemplo de como é realizada a medição através do software.

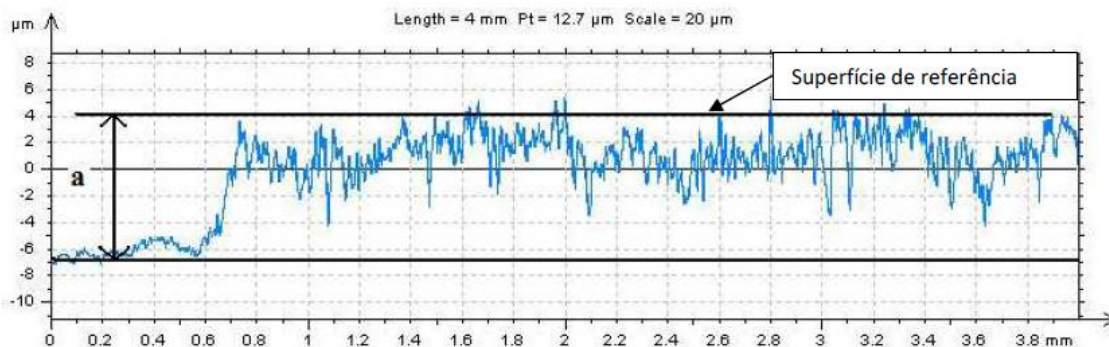


Figura 29: Esquema de medição do desgaste. Fonte: Oliveira, 2011.

Pode-se observar na Figura 29 que há uma diferença “a” no nível do perfil obtido, essa diferença é o valor do desgaste radial do rebolo. Através do software TalyMap é obtido o valor de “a”.

3.5.3 Potência de retificação

A potência de retificação (Pot) é uma varável relacionada à força tangencial (F_t) de corte, a velocidade de corte (v_s) e a velocidade da peça (v_w) (MALKIN; GUO, 2008). Segundo Marinescu et al. (2004), a força tangencial é a responsável pela geração de potência, sendo assim, desprezando a potência gasta para o avanço e pela velocidade transversal. A equação para determinar potência é apresentada pela equação (11):

$$Pot = F_t \cdot (v_s \pm v_w) \quad (11)$$

É utilizado o sinal positivo quando as velocidades estão em direções opostas e negativo quando as velocidades estão na mesma direção. Porém a velocidade de corte (v_s) é muito maior que a velocidade da peça (v_w), então geralmente é desprezada a (v_w), então a equação (11) é apresentada na forma simplificada pela equação (12):

$$Pot = F_t \cdot v_s \quad (12)$$

A potência de retificação foi medida através da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento do eixo árvore do rebolo. O monitoramento

desta potência elétrica foi realizado por um módulo que capta valores de tensão e corrente e transforma esses valores em sinais de tensões compatíveis com a placa de aquisição de dados utilizada. A placa de aquisição é ligada a um computador e transmite os dados para um software, onde esses dados são monitorados e salvos. O software usado foi o LabView 7.1®, da marca National Instruments, mesma marca da placa de aquisição.

Após a coleta dos dados, estes são tratados em uma rotina no software MatLab R2015a, da marca MathWorks, e assim o sinal é convertido e os dados são obtidos em Watt, assim é possível analisar os valores máximos de potência e calcular a média de cada ensaio.

4. Resultados e discussões

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos experimentalmente, para cada condição de retificação e cada técnica de lubri-refrigeração estudada. Para realização das análises, foram analisadas variáveis de saída com relação ao fluido de corte, à peça, ao rebolo e ao processo, sendo estas variáveis: viscosidade, do fluido de corte; rugosidade, desvios de circularidade e integridade microestrutural (microdureza e microscopia ótica), da peça; desgaste, do rebolo; potência de retificação, do processo.

Primeiramente são apresentados os valores da viscosidade do fluido LB 1100 com relação à variação da temperatura. Este fluido foi empregado nos experimentos que utilizaram a técnica MQL e MQL+AF.

4.1 Viscosidade do fluido

Os valores de viscosidade com relação à temperatura estão inseridos na Figura 30.

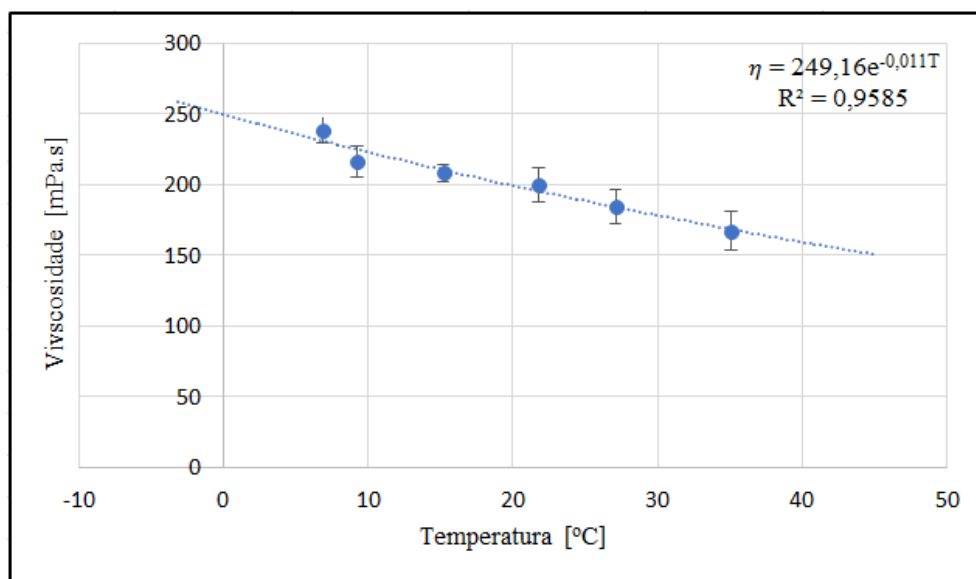


Figura 30: Valores de viscosidade do fluido pela temperatura.

É observada na Figura 30 uma tendência de decréscimo da viscosidade conforme a temperatura aumenta, conforme comentado por Granjeiro et al. (2007) quem relacionaram a diminuição da viscosidade com o aumento da temperatura. Segundo os autores, quanto maior é a temperatura, maior será a distância intermolecular, porém menores serão as força de atração e menor a viscosidade.

O efeito da temperatura sobre a viscosidade é modelado por uma relação do tipo Arrhenius, sendo assim apresentada pela equação (13) (CANCIAM, 2012).

$$\eta = \eta_{\infty} \cdot e^{\left(\frac{E_a}{R.T}\right)} \quad (13)$$

Em que:

η = Viscosidade;

η_{∞} = Viscosidade com temperatura tendendo ao infinito;

E_a = Energia de ativação viscosa;

T = Temperatura;

R = Constante dos gases ideais;

Devido ao decréscimo constante foi possível determinar uma equação exponencial com boa confiabilidade que represente a viscosidade do LB 1100 devido à variação de temperatura, sendo assim apresentada pela equação (13).

$$\eta = 249,16e^{-0,011T} \quad (14)$$

Onde,

η = Viscosidade [mPa.s];

T = Temperatura [°C];

Devido às limitações do aparelho não foi possível medir temperaturas abaixo de 6,9°C. Como a temperatura de trabalho do MQL+AF é aproximadamente 0°C e a temperatura de trabalho do MQL foi ambiente (aproximadamente 27 °C), então esses valores foram substituídos na equação (13) e inseridos na Tabela 5.

Tabela 5: Valores de viscosidade para 0°C e 27°C pela relação do tipo Arrhenius.

Temperatura de trabalho [°C]	Viscosidade [mPa.s]	Diferença
0	249,16	34,58%
27	185,14	

Pela aproximação do tipo Arrhenius a diferença de viscosidade do fluido LB 1100 entre as temperaturas de 0°C e 27°C é igual a 34,58%. O aumento da

viscosidade dificulta a entrega de fluido na zona de retificação, sendo assim, a maior viscosidade dificulta a lubrificação.

Para comparação da aproximação dos valores de viscosidade, a equação (13), pode ser reescrita na maneira da equação (15) (GRATÃO; BERTO; JÚNIOR, 2004 *apud* CANCIAM, 2012). A qual, segundo Canciam (2008), fornece uma reta.

$$\ln \eta = \ln \eta_{\infty} + \left(\frac{E_a}{R} \right) \cdot \frac{1}{T} \quad (15)$$

Então à partir dos valores de viscosidade e temperatura, é possível plotar uma reta $\ln \eta$ versus $\frac{1}{T}$ e definir a equação por regressão, ilustrado na Figura 31.

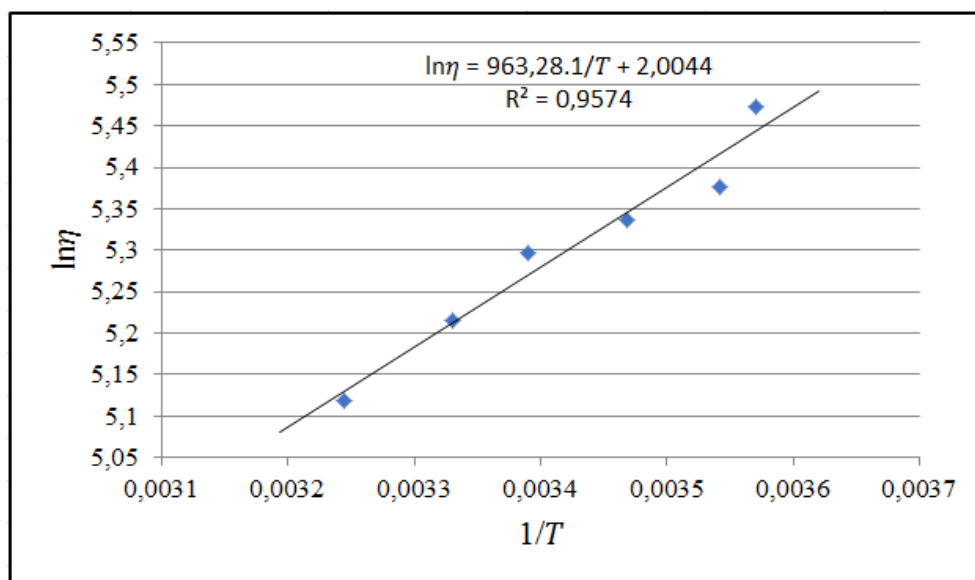


Figura 31: Valores de $\ln \eta$ versus $1/T$

A partir desta regressão é possível obter que os valores de viscosidade e comparar a diferença da viscosidade entre 0°C e 27°C, observada na Tabela 6.

Tabela 6: Valores de viscosidade entre 0°C e 27°C pela relação Canciam (2008).

Temperatura de trabalho [°C]	1/T [K ⁻¹]	ln η	Viscosidade [mPa.s]	Diferença
0	0,00366	5,53096	252,38621	37,33%
27	0,00333	5,21373	183,77803	

Pela relação de Canciam (2008) a diferença de viscosidade do fluido LB 1100 entre as temperaturas de 0°C e 27°C é igual a 37,33%. Sendo assim, é apresentada

uma ainda maior na viscosidade, julgando pelo método de regressão, a diferença de 37,33% apresenta melhor confiabilidade, mas independente do método de regressão utilizado, a diferença foi baixa, sendo assim, provando que a temperatura influencia consideravelmente na viscosidade do fluido de corte LB 1100.

4.2 Rugosidade

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de rugosidade para as diferentes velocidades de mergulho e diferentes técnicas de lubri-refrigeração. Na Figura 32 são mostrados os valores de rugosidade média (R_a) para todas considerações investigadas.

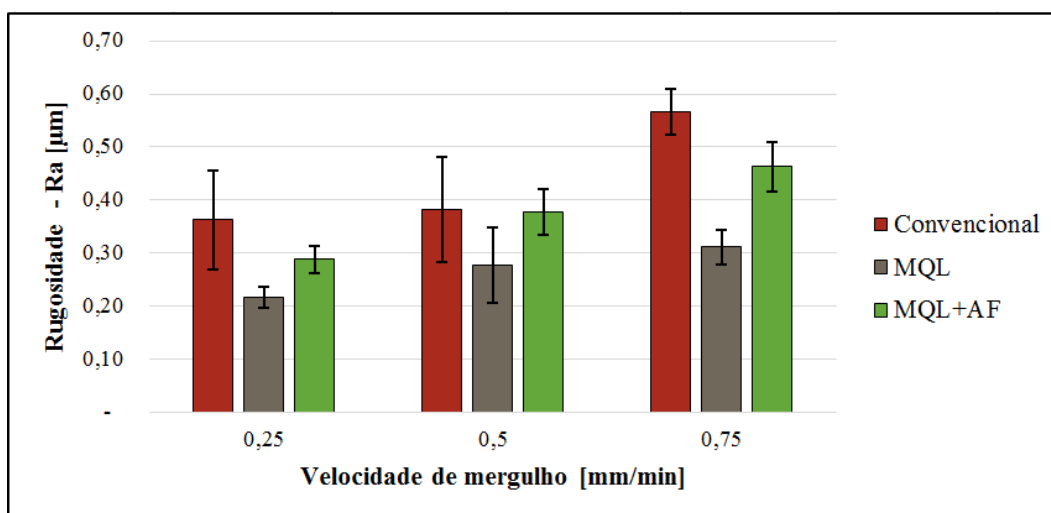


Figura 32: Valores de rugosidade em função da velocidade de mergulho após a retificação cilíndrica, com a utilização de três diferentes técnicas de lubri-refrigeração.

Na Figura 32 são apresentados os valores de rugosidade para todas as condições testadas, é observado que independente da técnica de lubri-refrigeração utilizada, a rugosidade aumenta com a velocidade de mergulho. Isso se deve ao fato da velocidade de mergulho estar ligada diretamente a espessura equivalente de corte (h_{eq}), equação (8) apresentada por Heinzl e Bleil (2007). Com o aumento da velocidade de mergulho, conseqüentemente aumentam as forças de corte e assim aumentam os valores de rugosidade devido a vibrações que ocorrem no processo (SOHAL; SANDHU; PANDA, 2014).

As técnicas MQL e MQL+AF apresentaram resultados de rugosidade melhores do que a técnica convencional, para todas as velocidades de mergulho testadas. A técnica MQL tem a capacidade de promover menores rugosidades e melhor qualidade superficial, quando comparado à técnica convencional devido a maior

eficiência de lubrificação do óleo de corte. Isso ocorre devido ao fato que o óleo lubrificante gera menor atrito e maior força normal de retificação, o que torna o cavaco mais fino e melhora a superfície (TAWAKOLI et al., 2011; RABIEI et al., 2015). Segundo Tawakoli et al. (2011), quando a lubrificação possui melhor eficiência, há um aumento na deformação elásto-plástica do material na aresta de corte do grão abrasivo, resultando em uma diminuição da rugosidade da peça.

Para todas as velocidades de mergulho a técnica MQL apresentou melhores resultados de rugosidade do que o MQL+AF, isso se deve ao fato do fluido apresentar viscosidade cerca de 35%, ou até 37%, maior com a utilização do ar frio Tabela 5 e Tabela 6. Segundo Belentani et al. (2014) quando a viscosidade do fluido é diminuída, é aumentada a remoção de cavacos pela maior quantidade de fluido que passa na zona de retificação, minimizando os arranhões e assim, reduzindo o valor de rugosidade.

Na Figura 32 é observado que a mudança da velocidade de mergulho de 0,25 mm/min para 0,50 mm/min afetou mais a rugosidade com a técnica MQL (aumento de 28,40%) e MQL+AF (aumento de 31,02%) do que a técnica convencional (aumento de 5,33%). Levando em consideração o desvio padrão, os valores para 0,25 mm/min e 0,50 mm/min da técnica convencional são considerados estatisticamente iguais. Quando é observada a mudança de velocidade de mergulho de 0,50 mm/min para 0,75 mm/min a técnica convencional apresentou a maior diferença (aumento de 48,34%), enquanto as técnicas MQL (aumento de 12,50%) e MQL+AF (aumento de 22,61%) mantiveram o aumento percentual mais constante.

Segundo Belentani et al. (2014), a técnica MQL é mais eficiente do que a técnica convencional na entrega de lubrificante na zona de retificação, devido à técnica MQL proporcionar melhor entrega de fluido na zona de corte, por trabalhar com pressões e velocidades do ar e do fluido mais altas, comparadas à técnica convencional, que promove melhor lubrificação. Então em condições mais severas de retificação maiores serão as diferenças dos resultados.

A técnica MQL comparada à técnica convencional apresentou tendência semelhante a autores que já realizaram retificação de aço com rebolo convencional de óxido de alumínio. Entre estes autores estão Tawakoli et al. (2011), Barczak et al. (2010), Silva et al. (2007) e Silva et al. (2005) que apresentou diferentes quantidades de fluido e velocidades de aplicação, onde para algumas condições a técnica MQL apresentou rugosidade melhor, para outras a técnica convencional foi melhor.

4.3 Desvios de circularidade

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de circularidade para as diferentes velocidades de mergulho e diferentes técnicas de lubri-refrigeração. A Figura 33 apresenta os valores de desvio de circularidade para as velocidades de mergulho analisadas.

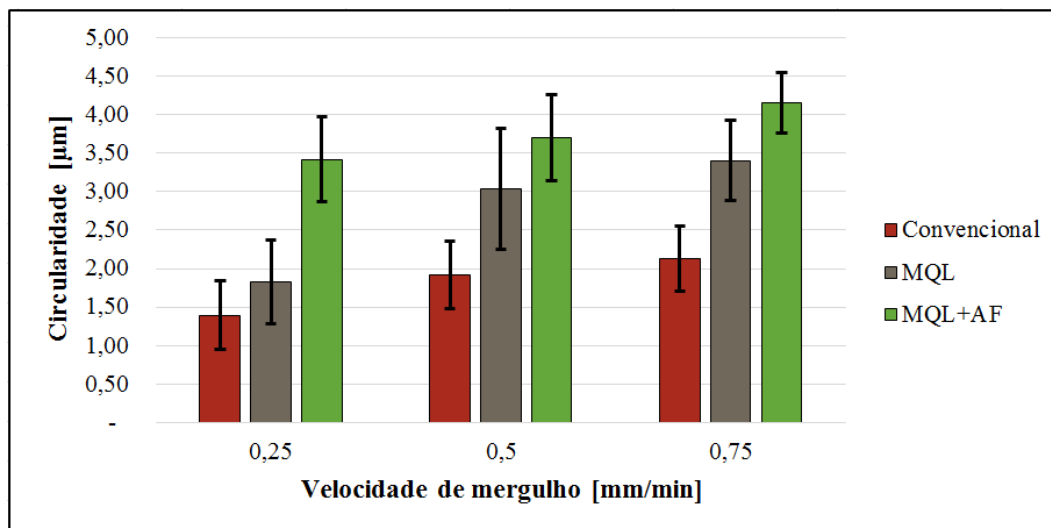


Figura 33: Valores de desvio de circularidade em função da velocidade de mergulho após a retificação cilíndrica, com a utilização de três diferentes técnicas de lubri-refrigeração.

Observa-se na Figura 33 que, independente da técnica de lubri-refrigeração utilizada, os valores de circularidade aumentam com a velocidade de mergulho. A elevação da velocidade de mergulho proporciona valores mais elevados de espessura equivalente de corte e das taxas específicas de remoção de material, causando piores acabamentos superficiais (SHAW, 1996). Ainda desta figura observa-se que os menores valores ocorrem para a técnica convencional de lubri-refrigeração, seguido pela técnica MQL. Já os piores resultados foram encontrados pela técnica MQL+AF.

A técnica convencional apresentou os melhores resultados devido a melhor capacidade de refrigeração da peça e limpeza do rebolo (evitando a formação de borra), pois apesar da lubrificação não ser efetiva, a refrigeração pelo fluido em abundância consegue retirar calor da peça de maneira eficiente, de acordo com Belentani et al. (2014) a utilização da técnica convencional minimiza as distorções térmicas que ocorrem na peça durante a retificação, sendo assim resultando em peças com menores desvio de circularidade.

Comparando a técnica convencional com as técnicas MQL e MQL+AF, para a condição mais branda de retificação (0,25 mm/min), comparado ao convencional, a técnica MQL apresentou resultados 31,13% maiores e para a técnica MQL+AF essa diferença foi ainda maior, 145,33%. Quanto maior a diferença, pior são os resultados, pois maior será o valor do desvio de circularidade. Para a condição intermediária de retificação (0,50 mm/min), a diferença da técnica MQL foi 58,54% maior e da técnica MQL+AF foi 92,82% maior, comparado à técnica convencional. Finalmente para a condição mais severa de retificação (0,75 mm/min), a diferença apresentada com a utilização da técnica MQL foi 59,76% maior e da técnica MQL+AF foi 95,04% maior.

Os valores da técnica convencional e da técnica MQL são considerados estatisticamente iguais para a velocidade de mergulho de 0,25 mm/min, enquanto que para 0,75 mm/min a técnica MQL se torna estatisticamente igual à técnica MQL+AF, que apresentou os piores resultados, sendo assim a técnica MQL foi a que apresentou maior relevância com o aumento da velocidade de mergulho.

De acordo com De Meter e Hockenberger (1997), o desvio de circularidade é diretamente relacionado com as distorções térmicas, a técnica MQL+AF apresentou os piores resultados relacionado às outras técnicas, evidenciando a influência da viscosidade do fluido. Pois, a geração de calor foi maior pela lubrificação ter sido menos eficiente, mesmo com a aplicação de MQL com ar a 0°C, proporcionando assim os piores resultados para desvio de circularidade.

4.4 Integridade microestrutural

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de microdureza e as imagens de metalografia para realizar as análises microestruturais entre as diferentes velocidades de mergulho e diferentes técnicas de lubri-refrigeração testadas. A microdureza consegue detectar se houve dano térmico a partir de 60 µm abaixo da superfície, então a metalografia é usada para analisar a partir da superfície retificada.

Na Figura 34 são apresentados os valores de microdureza quando foi utilizada a técnica convencional de lubri-refrigeração. A linha tracejada representa o valor de dureza no ponto a 360 µm de distância da superfície retificada, este ponto é tomado como referência do valor de dureza da peça antes da retificação. Pois a 360 µm de distância da superfície é assumido que o material não é afetado pela retificação, não havendo perda de dureza, por isso representa o valor médio de dureza de cada peça.

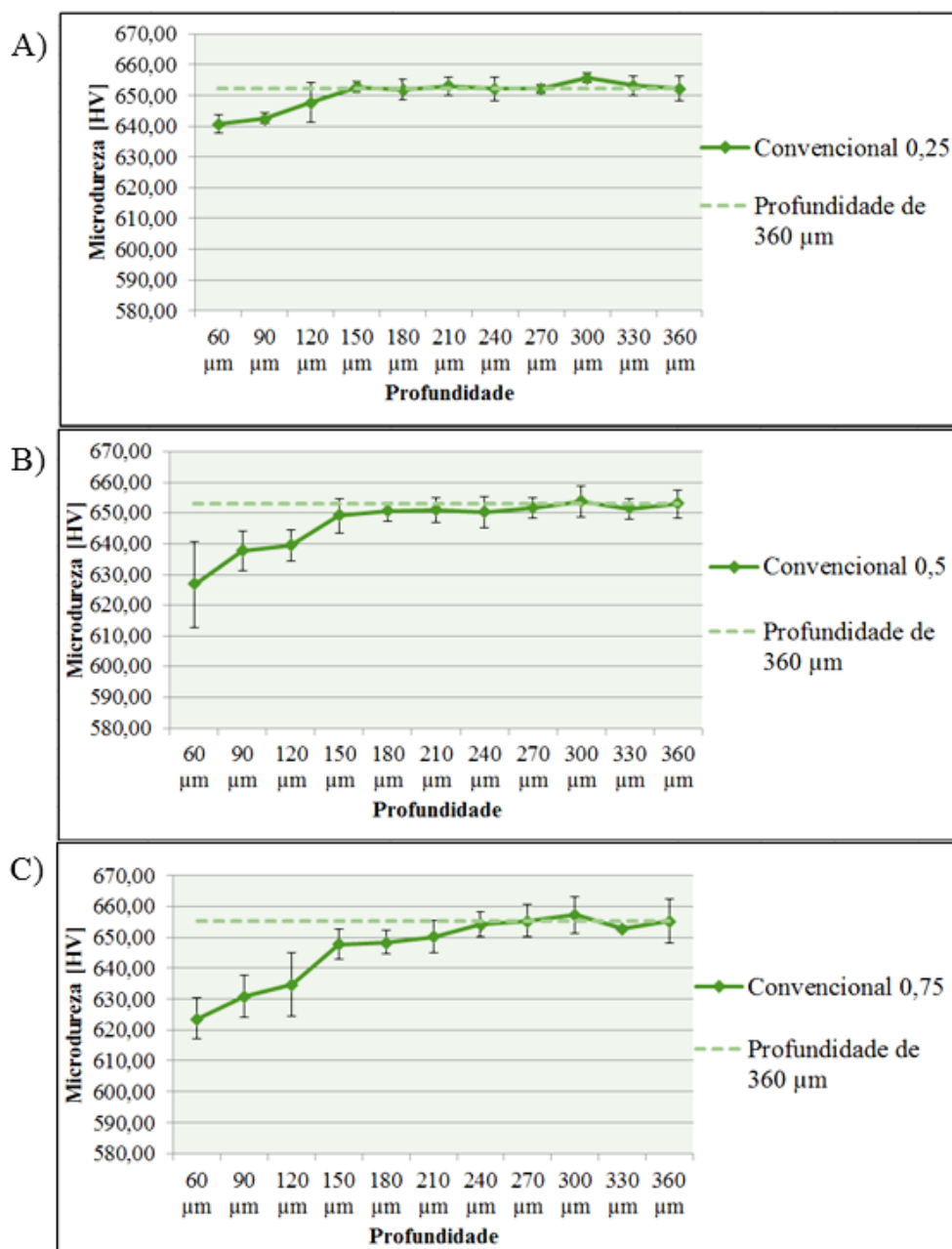


Figura 34: Valores de microdureza em função da profundidade após a retificação cilíndrica, com a utilização da técnica convencional. A) $v_f = 0,25$ mm/min, B) $v_f = 0,50$ mm/min e C) $v_f = 0,75$ mm/min.

Na Figura 34 (A) a (C) são expostas três tendências, onde cada uma delas apresenta a curva de dureza para cada velocidade de mergulho na condição de lubri-refrigeração convencional.

Quando é utilizada a técnica convencional com velocidade de mergulho igual a 0,25 mm/min (Figura 34 A), é observada que a diminuição da dureza foi de 11,63 HV em relação ao ponto de maior profundidade, o que representa 1,78%. Com o aumento da velocidade de mergulho para 0,50 mm/min, a diferença entre a dureza dos

pontos de maior proximidade a superfície e de referência aumentou para 26,40 HV, que representa 4,04%. Para 0,75 mm/min a redução da dureza foi 31,57 HV, que representa 4,81% do valor de referência.

A Figura 35 apresenta as imagens da microestrutura das peças que foram retificadas utilizando a técnica convencional como método de lubri-refrigeração para todas as velocidades de mergulho, sendo as imagens (A e B) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,25 mm/min, as imagens (C e D) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,50 mm/min e as imagens (E e F) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,75 mm/min. As imagens têm dois níveis de ampliação, sendo as imagens (A, C e E) empregado o aumento de 500 vezes e as imagens (B, D e F) empregado aumento de 1000 vezes.

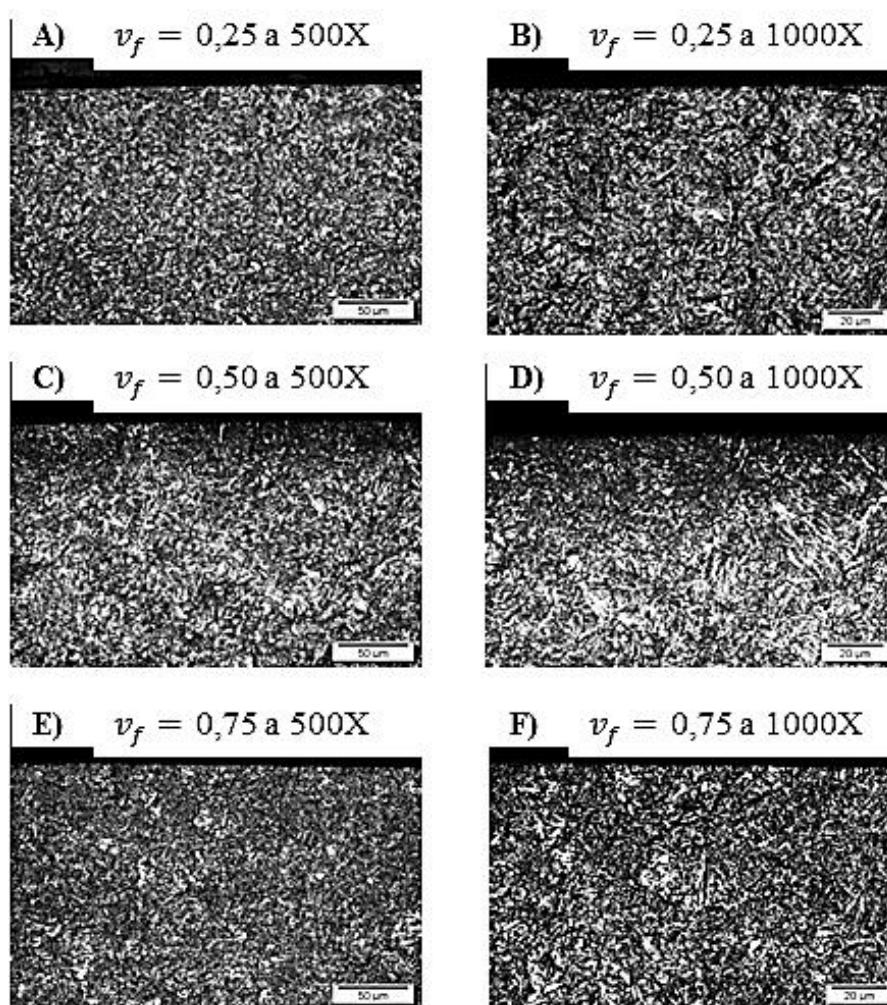


Figura 35: Microestrutura da peça após a retificação cilíndrica, com diferentes velocidades de mergulho e utilização da técnica convencional. A) $v_f = 0,25$ mm/min e aumento de 500X; B) $v_f = 0,25$ mm/min e aumento de 1000X; C) $v_f = 0,50$ mm/min e aumento de 500X; D) $v_f = 0,50$ mm/min e aumento de 1000X; E) $v_f = 0,75$ mm/min e aumento de 500X; F) $v_f = 0,75$ mm/min e aumento de 1000X.

Analisando as micrografias, pode-se observar que a operação de retificação com velocidade de mergulho de 0,25 mm/min resultou em peças com uma microestrutura da sub-superfície mais homogênea, comprovada pela menor diminuição da dureza próxima à superfície.

Para a retificação com velocidade de mergulho de 0,50 mm/min as peças apresentaram uma microestrutura da sub-superfície um pouco mais heterogênea, com regiões em que houve mudança de fase. Pode-se observar na Figura 35 (A e B) que a microestrutura predominante é martensítica, enquanto que nas Figura 34 (C e D), embora a microestrutura predominante continue sendo martensítica, há o surgimento de outra fase caracterizada por pontos brancos de formato arredondado em meio a uma região escura. O resultado da microdureza para esta mesma região aponta uma queda nos valores de dureza, evidenciando o efeito de um super revenimento que ocorreu na região. Com isso justifica-se a microestrutura encontrada como cementita em contornos de grãos (região escura) e o surgimento de grãos de dureza inferior à martensita (pontos brancos), como por exemplo, ferrita (CALLISTER, 2008).

Já após a retificação na condição mais severa, com velocidade de mergulho igual a 0,75 mm/min, as peças apresentaram características mais acentuadas que aquelas encontradas na condição intermediária, houve uma queda maior na dureza próxima à superfície e na Figura 35 (E e F). Pode-se observar um aumento na heterogeneidade microestrutural. Tais resultados eram esperados ao passo que em condições mais severas, há uma maior taxa de remoção de material e uma espessura de corte equivalente maiores, o que ocasiona uma maior geração de calor, que, segundo Malkin e Guo (2008), é responsável pelo super revenimento que ocorre na região.

Realizando a comparação entre os resultados de microdureza e a metalografia, é observado que não houve nenhum dano térmico que comprometesse a peça retificada, mesmo na condição mais severa de usinagem, pois apesar da diminuição da dureza, não foi observado nenhum dano térmico (camada branca e queima escura) nas imagens analisadas.

A Figura 36 apresenta os valores de microdureza quando foi utilizada a técnica MQL, a linha tracejada representa o valor de dureza no ponto a 360 μ m de distância da superfície retificada, este ponto é tomado como referência, pois representa o valor médio de dureza de cada peça.

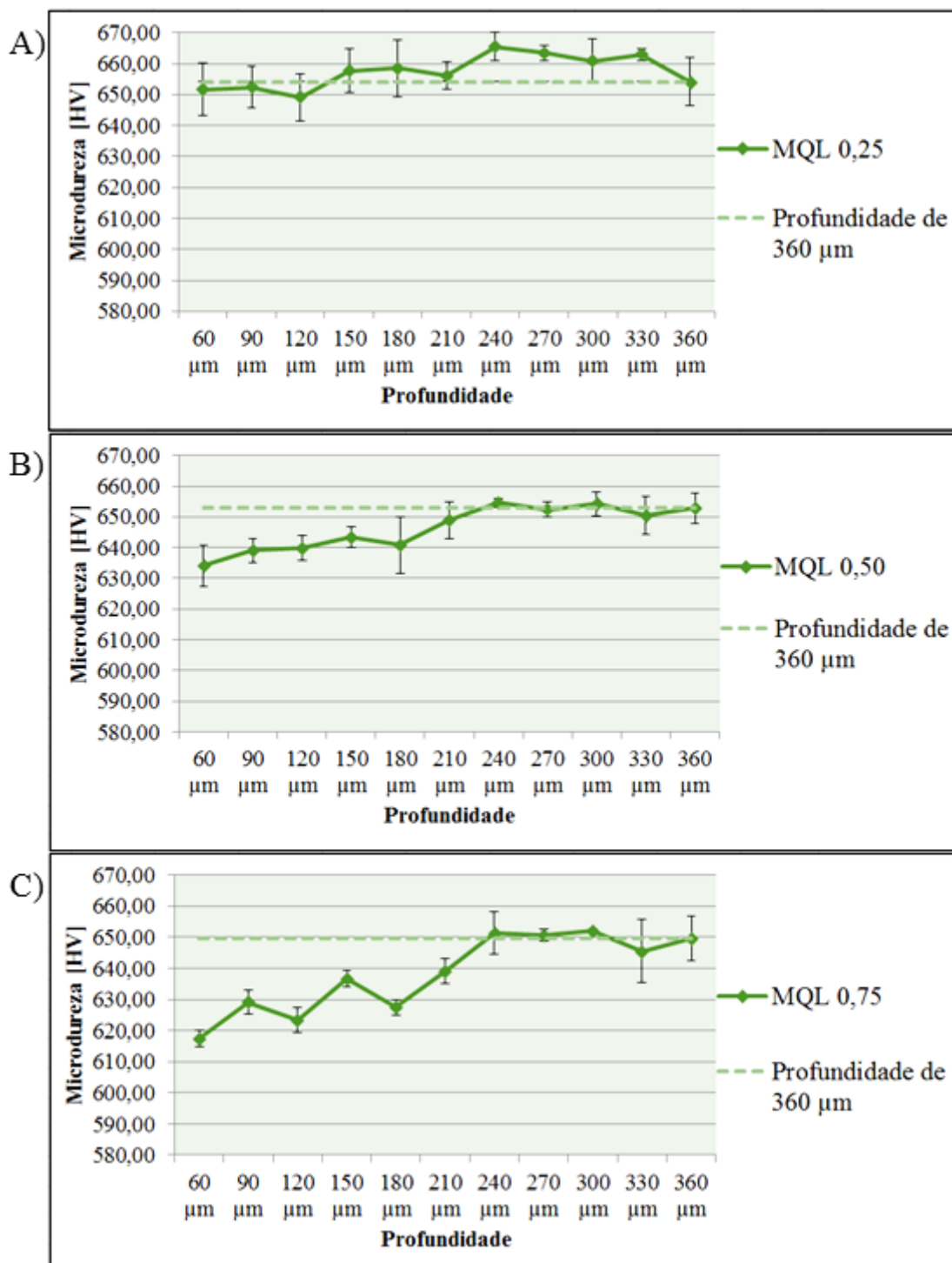


Figura 36: Valores de microdureza em função da profundidade após a retificação cilíndrica, com a utilização da técnica MQL. A) $v_f = 0,25$ mm/min, B) $v_f = 0,50$ mm/min e C) $v_f = 0,75$ mm/min.

A Figura 36 (A) é referente à técnica MQL com velocidade de mergulho igual a 0,25 mm/min, a Figura 36 (B) é referente à técnica MQL com velocidade de mergulho igual a 0,50 mm/min e a Figura 36 (C) é referente à técnica MQL com velocidade de mergulho igual a 0,75 mm/min.

Na Figura 36 (A) observa-se que a diferença entre os valores de microdureza em profundidade mais próxima à superfície (60 μm) até a profundidade tomada como referência (360 μm) a alteração na microdureza foi igual a 0,37%. Logo não houve diminuição de dureza significativa. A Figura 36 (B) é diferente da (A), pois há queda no valor de dureza próxima à superfície, a diferença entre a medida mais próxima da superfície e a referência foi igual a 2,88%. Isso ocorreu devido ao aumento na severidade do processo, havendo aumento na geração de calor, submetendo a peça a temperaturas maiores e afetando diretamente na diminuição da dureza da peça próxima a superfície retificada.

O caso mais crítico de diminuição da dureza para técnica MQL ocorreu com velocidade de mergulho de 0,75 mm/min, apresentado na Figura 36 (C), que a diferença entre o valor mais próximo da superfície e o valor de referência foi igual a 4,95%, que representa 32,13 HV. Conforme já foi citado, a diminuição da dureza ocorre devido ao fenômeno de super revenimento, característico de aços submetidos a temperaturas elevadas.

A Figura 37 apresenta as imagens da microestrutura das peças que foram retificadas utilizando a técnica MQL como método de lubri-refrigeração para todas as velocidades de mergulho, sendo as imagens (A e B) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,25 mm/min, as imagens (C e D) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,50 mm/min e as imagens (E e F) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,75 mm/min. As imagens têm dois níveis de ampliação, sendo as imagens (A, C e E) empregado o aumento de 500 vezes e as imagens (B, D e F) empregado aumento de 1000 vezes.

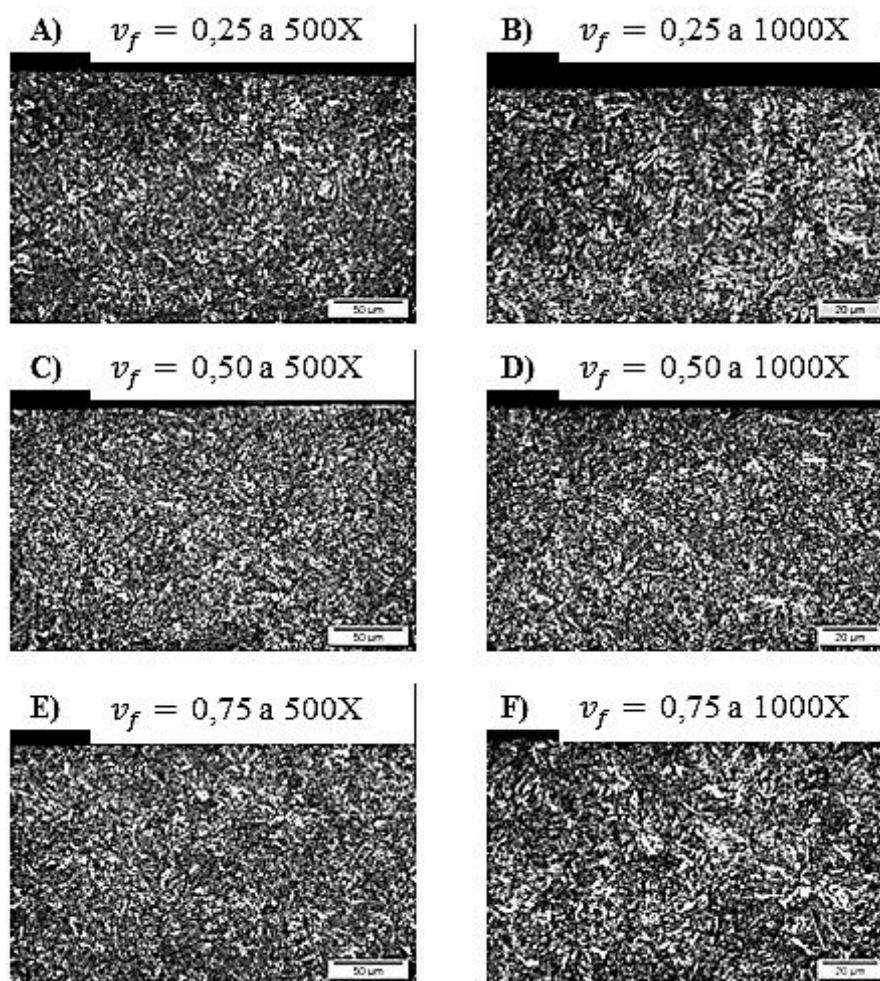


Figura 37: Microestrutura da peça após a retificação cilíndrica, com diferentes velocidades de mergulho e utilização da técnica MQL. A) $v_f = 0,25$ mm/min e aumento de 500X; B) $v_f = 0,25$ mm/min e aumento de 1000X; C) $v_f = 0,50$ mm/min e aumento de 500X; D) $v_f = 0,50$ mm/min e aumento de 1000X; E) $v_f = 0,75$ mm/min e aumento de 500X; F) $v_f = 0,75$ mm/min e aumento de 1000X.

É observado na Figura 37 (A, B, C e D) que as microestruturas apresentam uma estrutura bem homogênea com pouca quantidade de pontos brancos em sua estrutura, com a maior severidade do processo (Figura 37 (E e F)), maior quantidade de pontos brancos são encontrados dispersos na estrutura, isso é caracterizado pela maior intensidade do super revenimento causada por temperaturas mais elevadas a qual a peça foi submetida, sendo assim é observado que para velocidade de mergulho igual a 0,75 mm/min houve maior geração de calor.

Na Figura 38 são apresentados valores de microdureza quando foi utilizada a técnica MQL+AF de lubri-refrigeração, a linha tracejada representa o valor de dureza no ponto a 360 μ m de distância da superfície retificada, este ponto é tomado como referência, pois representa o valor médio de dureza de cada peça.

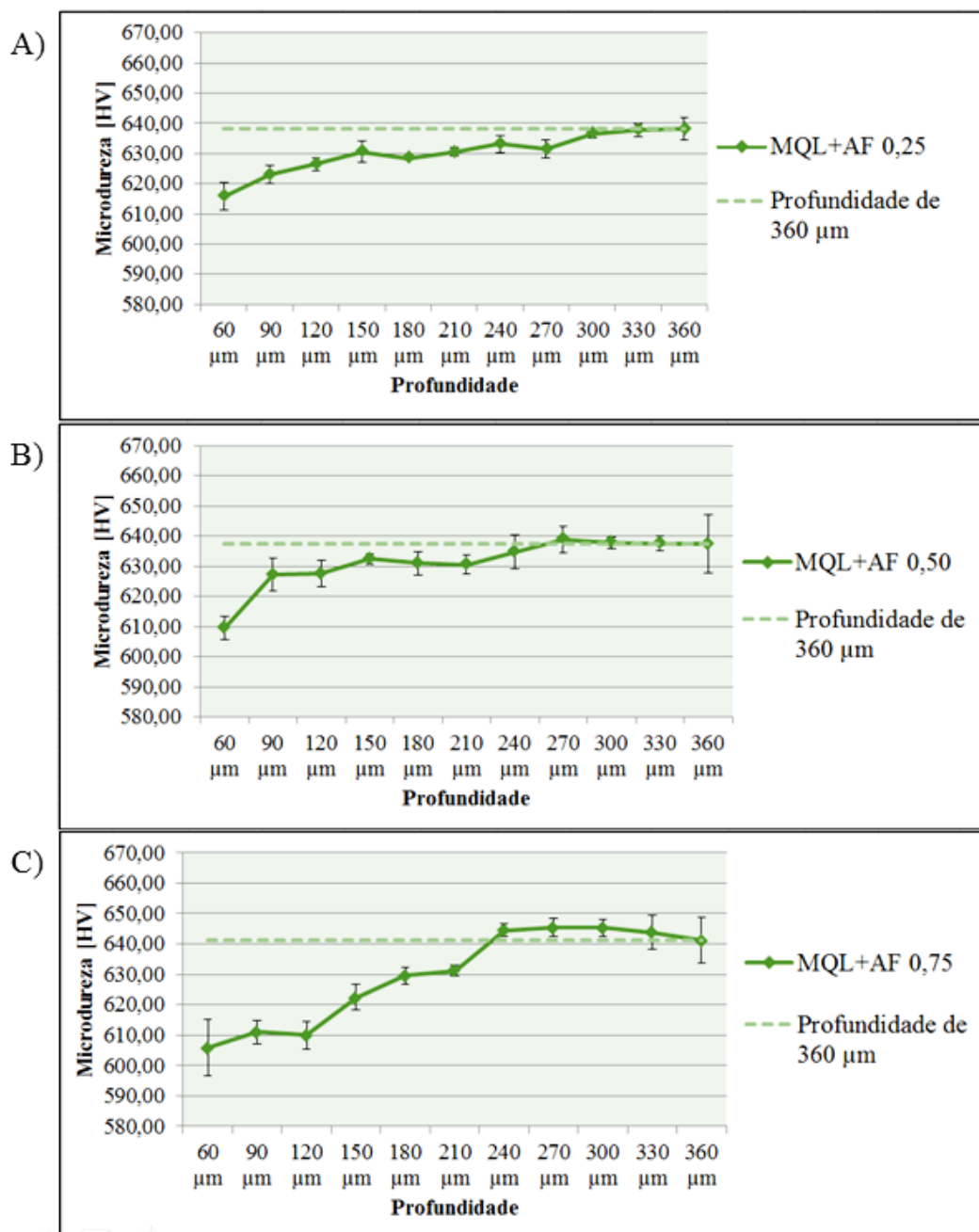


Figura 38: Valores de microdureza em função da profundidade após a retificação cilíndrica, com a utilização da técnica MQL+AF. A) $v_f = 0,25$ mm/min, B) $v_f = 0,50$ mm/min e C) $v_f = 0,75$ mm/min.

Os resultados de microdureza obtidos após a retificação utilizando a técnica MQL+AF e velocidade de mergulho igual a 0,25 mm/min (Figura 38 A) mostra uma pequena queda de dureza próxima à superfície, essa queda é quantificada em 22,40 HV, que representa 3,51% menor do valor de referência. Na Figura 38 (B), velocidade de mergulho igual a 0,50 mm/min, a queda de dureza foi de 27,83 HV, que representa 4,37% e na Figura 38 (C) (0,75 mm/min) a queda de dureza foi de 35,40 HV.

Para todos os avanços a técnica de lubri-refrigeração que mais foi afetada foi a técnica MQL+AF, com base nos resultados de microdureza esta foi a técnica em que as peças foram submetidas a maiores valores de temperatura. Isso ocorreu pela maior viscosidade do fluido à baixa temperatura, dificultando a lubrificação, aumentando o atrito, conseqüentemente aumentando a geração de calor.

Ao analisar a Figura 34, Figura 36 e Figura 38, observa-se que para as três técnicas de lubri-refrigeração houve redução da dureza nos pontos mais próximos à superfície. Na condição mais branda de retificação a diferença de dureza, entre o ponto mais próximo à superfície e o ponto mais distante medido (tomado como referência), é menor. Contudo, com o aumento da severidade do processo há o aumento da diferença de dureza, ou seja, quanto maior a velocidade de mergulho, maior é a diminuição da dureza que ocorre na peça.

A diminuição da dureza ocorre devido ao fenômeno de super revenimento, este fenômeno ocorre em aços endurecidos, quando a temperatura de retificação ultrapassa a temperatura que a peça foi submetida no processo de revenimento, como característica esse fenômeno acarreta na redução da dureza e se ocorrer com maior intensidade pode causar queima escura na peça (MALKIN; GUO, 2008).

A Figura 39 apresenta as imagens da microestrutura das peças que foram retificadas utilizando a técnica MQL+AF como método de lubri-refrigeração para todas as velocidades de mergulho, sendo as imagens (A e B) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,25 mm/min, as imagens (C e D) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,50 mm/min e as imagens (E e F) da peça retificada com velocidade de mergulho de 0,75 mm/min. As imagens possuem dois níveis de ampliação, sendo as imagens (A, C e E) empregado o aumento de 500 vezes e as imagens (B, D e F) empregado aumento de 1000 vezes.

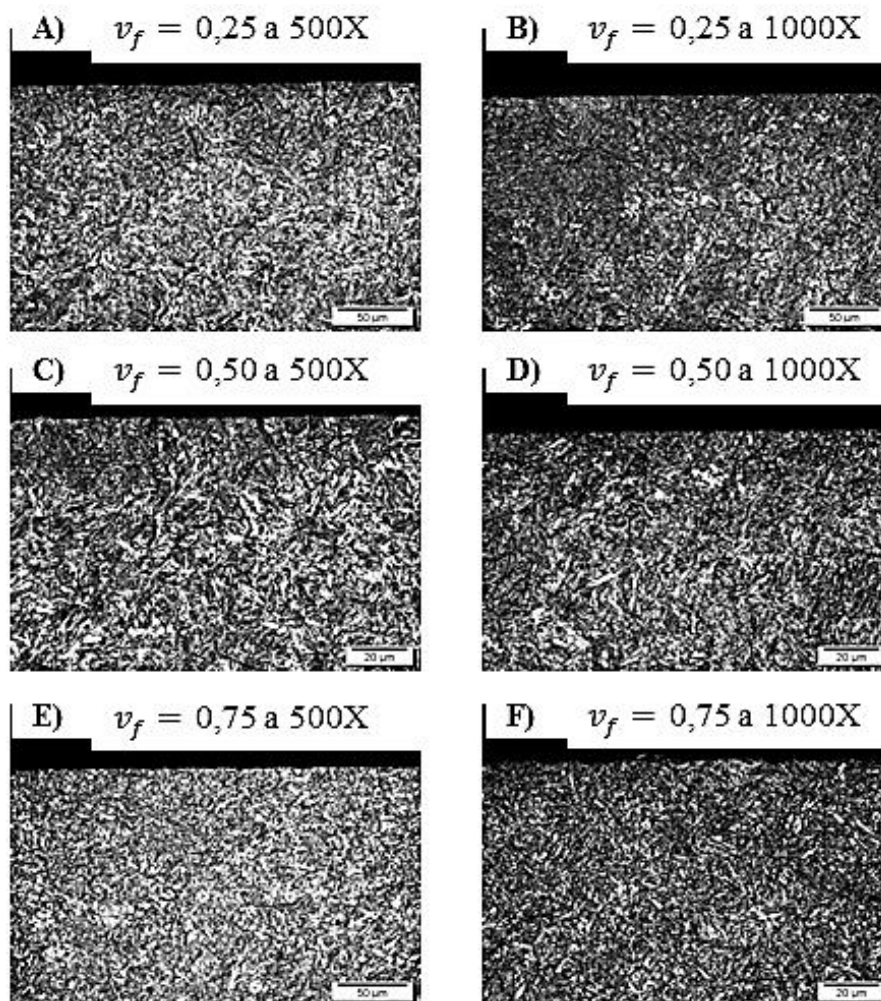


Figura 39: Microestrutura da peça após a retificação cilíndrica, com diferentes velocidades de mergulho e utilização da técnica MQL+AF. A) $v_f = 0,25$ mm/min e aumento de 500X; B) $v_f = 0,25$ mm/min e aumento de 1000X; C) $v_f = 0,50$ mm/min e aumento de 500X; D) $v_f = 0,50$ mm/min e aumento de 1000X; E) $v_f = 0,75$ mm/min e aumento de 500X; F) $v_f = 0,75$ mm/min e aumento de 1000X.

Em todas as micrografias contidas na Figura 39 é possível observar pequenas regiões brancas dispersos na microestrutura, apesar da Figura 39 (E) apresentar maiores regiões brancas não é caracterizado em nenhum ponto queima branca ou escura.

Comparando as técnicas, convencional e MQL, é possível observar que para as condições mais brandas de retificação (0,25 mm/min e 0,50 mm/min) a técnica MQL apresentou melhor desempenho, em termos de menor queda de dureza próxima a superfície. Já para a condição mais severa de retificação as técnicas, convencional e MQL, apresentam diferenças de dureza próximas, sendo 4,81% e 4,95% respectivamente. Nenhuma das duas técnicas apresentam danos térmicos que comprometam a peça. Com base nos resultados obtidos, é entendido que para as duas

técnicas, na condição mais severa de retificação, a peça foi submetida à temperaturas semelhante.

Comparando as microestruturas de todas as técnicas de lubri-refrigeração é observado que para os corpos de prova retificados utilizando a técnica MQL+AF houve super revenimento em maior intensidade, maiores pontos brancos foram formadas, sendo assim houve mais transformações de fase e conseqüentemente maior diminuição da dureza na peça. Com base nos resultados obtidos, pode-se afirmar que quando foi utilizada a técnica MQL+AF as peças foram submetidas a maiores temperaturas. Novamente é observado que apesar do jato de ar ser aplicado à baixa temperatura, o aumento da viscosidade do fluido influencia de forma negativa e torna os resultados piores comparados à técnica MQL.

Mesmo esta técnica tendo proporcionado os piores resultados, ou seja, onde ocorreram super revenimento com maior intensidade abaixo da superfície usinada, em nenhum dos casos houve queima branca ou escura detectada nem pela microdureza nem pela análise da microestrutura.

4.5 Desgaste do rebolo

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de desgaste radial do rebolo para as diferentes velocidades de mergulho e diferentes técnicas de lubri-refrigeração. Na Figura 40 são apresentados os valores de desgaste radial do rebolo para todas as condições investigadas.

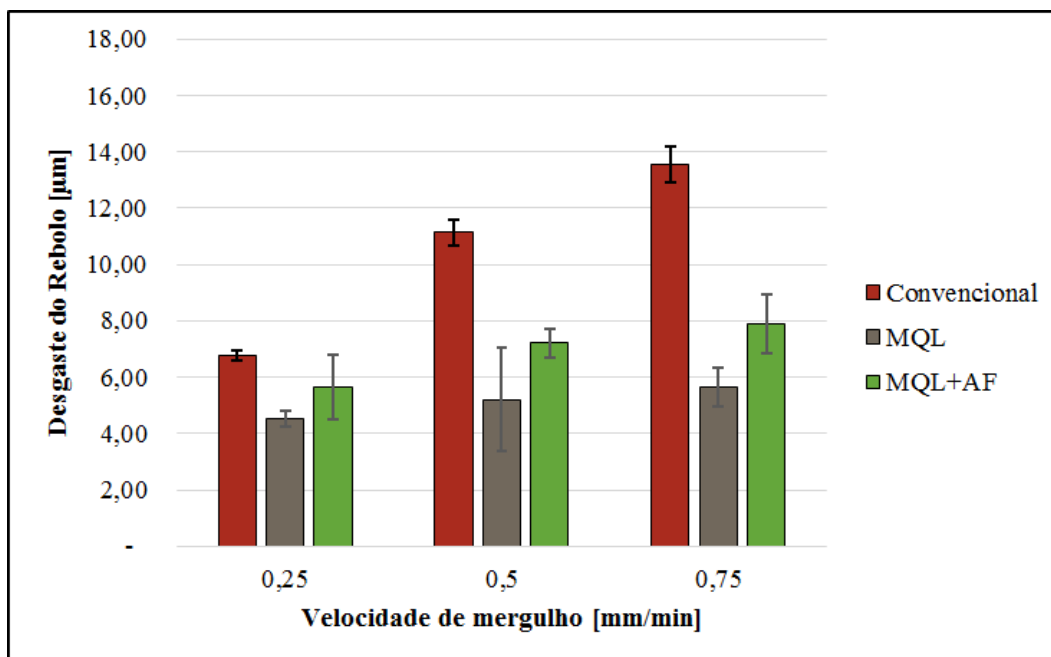


Figura 40: Valores de desgaste radial do rebolo em função da velocidade de mergulho após a retificação cilíndrica, com a utilização de três diferentes técnicas de lubri-refrigeração.

É observado na Figura 40 que, com o aumento da velocidade de mergulho, há também o aumento do desgaste, de forma análoga ao que aconteceu para rugosidade (Figura 32) e circularidade (Figura 33). Choi et al. (2008) relacionam o aumento do desgaste ao aumento da espessura equivalente de corte (h_{eq}), pois aumenta a força tangencial de corte, conseqüentemente aumentando a carga sobre o grão abrasivo, facilitando a fratura e o desprendimento do grão.

De todas as técnicas avaliadas, a técnica MQL foi a que apresentou o melhor desempenho, independente da velocidade de mergulho empregada. O pior desempenho foi obtido pela técnica convencional. Segundo Silva et al. (2007), o desgaste do rebolo está relacionado ao atrito entre os grãos abrasivos e a peça. Assim, se a lubrificação é mais eficiente, o desgaste do rebolo é menor, evidenciando a eficiência em termos de lubrificação da técnica MQL, como também é relatado por Brinksmeier et al. (1999), Barczak et al. (2010) Tawakoli et al. (2011).

A técnica MQL+AF apresentou desgaste um pouco mais elevado, comparada à técnica MQL. Na velocidade de mergulho de 0,25 mm/min, a diferença foi de 24,98%. Na velocidade de mergulho de 0,50 mm/min a diferença entre as técnicas MQL foi de 38,32%. Na situação mais severa, com a velocidade de mergulho igual a 0,75mm/min a diferença foi igual a 39,72%. Analisando esses resultados é

perceptível que quanto maior foi a velocidade de mergulho, a diferença entre as técnicas houve a tendência de aumentar e estabilizar em aproximadamente 40%.

Como a lubrificação é um fator de alta influência no desgaste do rebolo, corroborando com Belentani et al. (2014), é concluído que a maior viscosidade do fluido piora os resultados de desgaste do rebolo. De acordo com Profito (2010) a viscosidade do fluido influencia diretamente na espessura mínima de filme lubrificante. Quanto maior a viscosidade, maior é espessura mínima de filme lubrificante, o que dificulta na entrega de lubrificante na zona de corte, pois, é levantada a hipótese de que, com o aumento da viscosidade há um crescimento no tamanho das gotículas de óleo lubrificante na aplicação da técnica MQL, dificultando a penetração deste óleo na zona de retificação.

Após a usinagem com a técnica convencional de lubri-refrigeração, foram obtidos os piores resultados de desgaste do rebolo, apesar da boa refrigeração proporcionada à peça. Isso se deve a pior eficiência de lubrificação entre os métodos estudados. Quanto maior foi a severidade do processo, maior foi a diferença percentual entre a melhor técnica e a técnica convencional. Para as velocidades de mergulho de 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min, as diferenças encontradas foram 49,74%, 113,69% e 139,95%, respectivamente. Esse aumento na diferença entre os diversos desgastes foi relatado por Malkin e Guo (2008), afirmando que quanto maior o atrito gerado, maiores forças são geradas e maior é o calor na zona de retificação. Sendo assim, a maior temperatura enfraquece a ligação entre os grãos e as maiores forças retiram os grãos do rebolo, aumentando o desgaste deste.

Os piores resultados foram encontrados pela técnica convencional, então esta técnica foi responsável pelo maior atrito gerado entre as que foram estudadas. Sendo assim, as forças de corte foram maiores e conseqüentemente houve maior desgaste. Os melhores resultados foram para a técnica MQL, isso aconteceu devido à alta eficiência de lubrificação e a técnica MQL+AF apresentou desempenho intermediário devido à maior viscosidade do fluido influenciar negativamente na eficiência de lubrificação.

4.6 Potência de retificação

Nesta seção são apresentados e discutidos os resultados de potência de retificação para as diferentes velocidades de mergulho e diferentes técnicas de lubri-

refrigeração. Na Figura 41 são apresentados os valores de potência média de retificação pela velocidade de mergulho para todas as técnicas estudadas.

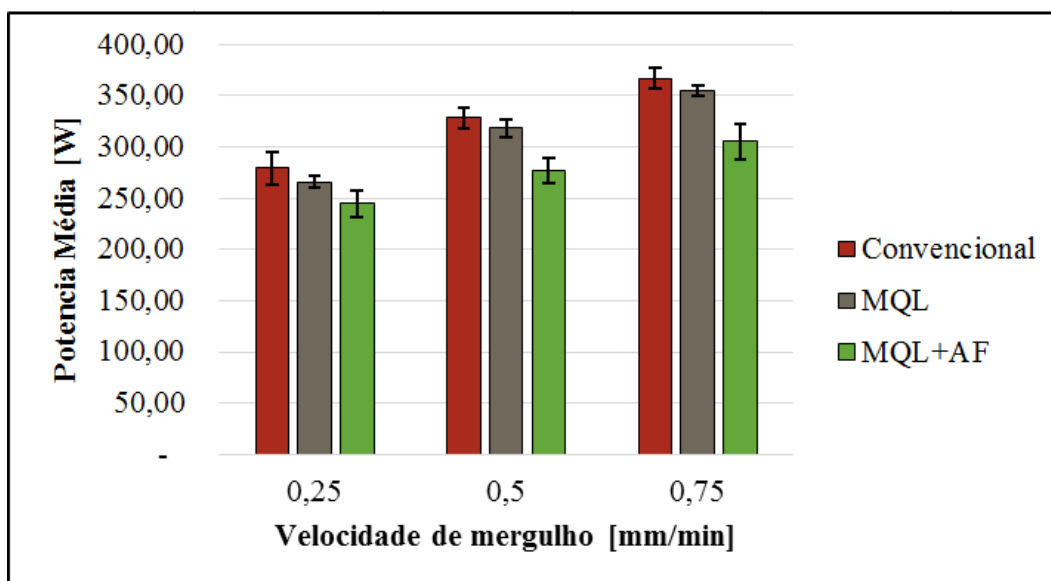


Figura 41: Valores de potência média de retificação em função da velocidade de mergulho após a retificação cilíndrica, com a utilização de três diferentes técnicas de lubri-refrigeração.

De forma análoga às outras variáveis de saída a potência média de corte teve a tendência de aumento, com o aumento da velocidade de mergulho.

Os piores resultados foram encontrados para a técnica convencional, isso porque a potência está diretamente ligada às forças de retificação (equação [11]). Essas forças estão relacionadas ao atrito e o atrito à eficiência de lubrificação. As técnicas que utilizam MQL proporcionaram os menores valores de potência consumida, devido à eficiência de lubrificação ser melhor, proporcionado pela maneira de aplicação que facilita a entrega do fluido de corte na zona de retificação.

Silva et al. (2005) comentam que a técnica MQL, apesar da baixa capacidade de refrigeração, reduz a potência de retificação consumida e a energia específica e ainda melhora a qualidade superficial, em comparação à técnica convencional.

Barros et al. (2014) relatam que a técnica MQL, mesmo sem nenhum sistema auxiliar de limpeza do rebolo, proporciona satisfatórios resultados de potência de retificação, abaixo da potência consumida utilizando a técnica convencional. Corroborando com o que foi encontrado nesta investigação, como pode ser observado na Figura 41.

Os resultados obtidos nesta investigação corroboram com os resultados obtidos por Barczak et al., (2010), que compararam retificação com três métodos de lubrificação diferentes, sendo eles MQL, convencional e a seco. De forma similar a este trabalho, Barczak et al., (2010) encontraram os menores valores de força tangencial de corte, que é diretamente proporcional à potência consumida, para a técnica MQL. A técnica convencional ocupou posição intermediária e o pior caso foi da técnica a seco. Os autores também ressaltam que, com a utilização da técnica convencional, a peça foi submetida a temperaturas mais baixas, seguida pela técnica MQL. Sendo assim a potência de corte está ligada a lubrificação e à temperatura, sendo que quando maior a temperatura que a peça for submetida, menor a potência consumida.

Os resultados de MQL+AF apresentaram os menores valores de potência consumida, isso porque o uso de MQL fornece maior eficiência de lubrificação, apesar da técnica MQL+AF apresentar menor eficiência de lubrificação comparada à técnica MQL aplicado a 27°C. Devido a maior viscosidade do fluido influenciar de maneira negativa na entrega de lubrificante, piorando o efeito de lubrificação, houve maior geração de calor e maiores temperaturas na zona de retificação. Sendo assim, a peça foi mais aquecida, facilitando a formação de cavaco, reduzindo a potência consumida. A diferença percentual entre as técnicas MQL+AF e MQL, para as velocidades de mergulho 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min foram respectivamente, 8,76%, 14,65% e 16,17%.

A retificação com a utilização da técnica convencional apresentou os piores resultados de potência consumida, porém a diferença percentual entre ela e a técnica MQL não foi expressiva, sendo que essa diferença para as velocidades de mergulho 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min foram respectivamente, 5,14%, 3,32% e 3,49%. Analisando os valores de desvio padrão, na Figura 41, pode-se afirmar, que para todas as condições, a técnica MQL e a técnica convencional não apresentaram diferenças estatísticas, enquanto a retificação utilizando a técnica MQL+AF apresentou menores valores de potência de corte para todos os casos.

5. Conclusões

A partir da análise dos resultados obtidos após a retificação cilíndrica do aço ABNT 4340, com rebolo convencional de óxido de alumínio, em que foram variadas três condições de lubri-refrigeração e três severidades do processo, pode-se concluir que:

- A técnica MQL, em geral, apresentou melhor desempenho, sendo que foi superada pela técnica convencional apenas no desvio de circularidade e pela técnica MQL+AF em termos de potência de retificação.
- A técnica MQL+AF, em geral, apresentou desempenho inferior à técnica MQL, apresentando melhores resultados apenas em termos de potência de retificação, e superior à técnica convencional, apresentando piores resultados apenas em termos de desvios de circularidade. Isso aconteceu devido à viscosidade do fluido LB 1100 aumentar com a diminuição da temperatura. Com esse aumento é possível admitir que foi dificultada a capacidade de entrega do fluido até à zona de retificação. E a viscosidade do fluido sendo maior, a espessura mínima de lubrificação é aumentada, consequentemente reduzindo o efeito de lubrificação.
- Com a utilização da técnica MQL+AF, as peças foram submetidas a temperaturas mais elevadas, isso é concluído com base nos resultados obtidos, porque a técnica MQL+AF apresentou maior redução da dureza próxima à superfície e piores resultados de circularidade significando que houve maiores distorções térmicas nos corpos de prova.
- O gasto energético da técnica MQL+AF é maior comparada à técnica MQL, devido à utilização de um compressor de ar (a mais do que a técnica MQL) e de um secador de ar, então torna inviável sua utilização.
- A técnica MQL, comparada à técnica convencional, reduz o impacto ambiental, reduz os custos de utilização, reduz o risco a saúde do operador e apresentou melhores resultados. Comparada à técnica MQL+AF, tem menor custo energético e melhores resultados, então é concluída que a utilização da técnica MQL com fluido LB 1100 para retificação de aço ABNT 4340 com rebolo convencional de óxido de alumínio é viável.

6. Sugestões para futuros trabalhos

Para dar continuidade na linha de pesquisa de retificação utilizando a técnica MQL para torna-la aplicada na indústria algumas sugestões são feitas:

- Testar diferentes temperaturas do ar frio que entra no bocal e observar as mesmas variáveis de saídas empregadas neste trabalho.
- Realizar estudos com MQL em diferentes materiais, como aços de menor dureza, cerâmicas e superligas (ex. INCONEL).
- Realizar estudos de MQL com ar frio para diferentes óleos, onde a variação da viscosidade seja menor, para reforçar a ideia que a viscosidade do fluido é um fator muito importante na retificação com MQL.
- Utilizar diferentes vazões do fluido de corte empregado na técnica MQL.
- Realizar um estudo de caso, mensurando a diferenças entre os gastos das técnicas MQL, MQL+AF e convencional.
- Investigar o comportamento do MQL com ar frio em diferentes tipos de retificação, como por exemplo, a retificação plana e a centerless.

Bibliografia

ALJUWAYHEL, N.F.; NELLIS, G.F.; KLEIN, S.A. Parametric and internal study of the vortex tube using a CFD model. **International Journal of Refrigeration**, v. 28, n. 3 p. 442–450, 2005.

ANDERSON, D.; WARKENTIN, A.;BAUER, R. Experimental validation of numerical thermal models for dry grinding. **Journal of Materials Processing Tecnology**, v. 204, n.1, p. 269–278, 2007.

ANON, H. S. E. Warnings for grinding coolants. **Metalworking Production**, v. 147, n. 5, p. 44, 2003.

ASTM E92 – 82 **Standard Test Method for Vickers Hardness of Metallic Materials**, 2003.

BALAN, A. S. S.; VIJAYARAGHAVAN, L.; KRISHNAMURTHY, R., KUPPAN, P.; OYYARAVELU, R. An experimental assessment on the performance of different lubrication techniques in grinding of Inconel 751. **Journal of Advanced Research**, v. 7, n. 5, p. 709-718, 2016.

BARCZAK L. M.; BATAKO A. D. L., MORGAN M. N. A study of plane surface grinding under minimum quantity lubrication (MQL) conditions. **Internationa Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 11, p. 977–985, 2010.

BARROS, B. G.; SILVA, T. D.; CANARIM, R. C.; AGUIAR, P. R. D.; BIANCHI, E. C. Utilization of teflon and aluminum oxide for wheel cleaning in Minimum Quantity Lubrication (MQL) grinding. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 23-32, 2014.

BELENTANI, R. D. M.; JÚNIOR, H. F.; CANARIM, R. C.; DINIZ, A. E.; HASSUI, A.; AGUIAR, P. R.; BIANCHI, E. C. Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel. **Materials Research**, v. 17, n. 1, p. 88-96, 2014.

BENKAI, L.; CHANGHE, L.; YANBIN, Z.; YAOGANG, W.; DONGZHOU, J.; MIN, Y. Grinding temperature and energy ratio coefficient in MQL grinding of high-temperature nickel-base alloy by using different vegetable oils as base oil. **Chinese Journal of Aeronautics**, v. 29, n. 4, p. 1084–1095, 2016.

BIANCHI, E. C.; MONICI, R. D.; NETO, L. D.; AGUIAR, A. R.; GUERMANDI, L. G. Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resinóide e vitrificado. **Cerâmica**, v. 57, p. 431–437, 2011.

BIGERELLE, M.; HAGEGE, B.; EL MANSORI, M. Mechanical modeling of micro-scale abrasion in superfinish belt grinding. **Tribology Internacional**, v. 41, n. 11, p. 992-1001, 2008.

BLENKOWSKI, K., Coolants and lubricants: part 1—the truth. **Manufacturing Engineering**, p. 90–96, march 1993.

BRINKSMEIER, E.; HEINZEL, C.; WITTMANN, M. Friction, Cooling and Lubrication in Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 48, n. 2, p.581–598, 1999.

BRUNETTI, F. **Mecânica dos Fluidos**. São Paulo: Pearson Education, 2008. 431 p.

BRUNI, C.; FORCELESE, A.; GABRIELLI, F.; SIMONCINI, M. Effect of the lubrication-cooling technique, insert technology and machine bed material on the workpart surface finish and tool wear in finish turning of AISI 420B. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 12, p. 1547-1554, 2006.

BYERS, Jerry P. **Metalworking Fluid**: Second Edition. [S.l.]: CRC Taylor & Francis, p. 480, 2006.

BYRNE, G.; SCHOLTA, E. Environmentally clean machining process - A strategic approach. **CIRP Annals**, v. 42, n. 1, p. 471–474, 1993.

CALLISTER, Willian D. **Ciência e Engenharia dos Materiais: Uma Introdução**. 7 ed. [S.l.] LTC, p. 705, 2008.

CAMERON, A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 1, p. 126–130, 2010.

CANCIAM, C. A. Efeito da temperatura na viscosidade de alguns ésteres: predição da energia de ativação viscosa. **e-xacta**, v. 5, n. 1, p. 83-97, 2012.

CANCIAM, C. A. Efeito da temperatura na viscosidade de soluções de sacarose. **Semana de tecnologia em alimentos**, v. 5, 2008.

CHOI, T. J.; SUBRAHMANYA, N.; LI, H.; SHIN, Y. C. Generalized practical models of cylindrical plunge grinding processes. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 48, n. 1, p. 61–72, 2008.

DE METER, E. C.; HOCKENBERGER, M. J. The application of tool path compensation for the reduction of clamping-induced geometric errors. **International Journal of Production Research**, v. 35, n. 12, p. 3415–3432, 1997.

DHAR, N. R.; KAMRUZZAMAN, M.; AHMED, M. Effect of minimum quantity lubrication (MQL) on tool wear and surface roughness in turning AISI-4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 172, n. 2, p. 299-304, 2006.

DÖRR, J.; SAHM, A. The minimum quantity lubricant evaluated by the users. **Machines and metals magazine**, v. 418, p. 20-39, 2000.

EBBRELL, S.; WOOLLEY, N. H.; TRIDIMAS, Y. D.; ALLANSON, D. R.; ROWE, W. B. The effects of cutting fluid application methods on the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 40, n. 2, p. 209–223, 2000.

EL BARADIE, M.A. Cutting Fluids: Part I. Characterisation. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 56, n. 1-4, p.786–797, 1996.

EVERSHEIM, W.; KÖNIG, W.; PFEIFER, T.; WECK, M. **Manufacturing Excellence: The Competitive Edge** Chapman and Hall, London, , 1994.

GAO, C. M.; BOSSCHAART, K. J.; ZEEGERS, J. C. H.; DE WAELE, A. T. A. M. Experimental study on a simple Ranque – Hilsch vortex tube. **Cryogenics**, v. 45, n. 3, p.173–183, 2005.

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

GRANJEIRO, A. A.; QUEIROZ, A. J. M.; FIGUEIRÊDO, R. M. F.; MATA, M. E. R. M. C. Viscosidades de polpas concentradas de figo-da-Índia. **Revista Brasileira de Agrociência**, v.13, n.2, p. 219-224, 2007.

GRATÃO, A. C. A.; BERTO, M. I.; JÚNIOR, V. S. Reologia do açúcar líquido invertido: influência da temperatura na viscosidade. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 24, n. 4, p. 652-656, 2004.

GU, R.; SHILLOR, M.; BARBER, G.; JEN, T. Thermal analysis of the grinding process. **Mathematical and Computer Modelling**, v. 39, n. 9–10, p. 991–1003, 2004.

GUO, C.; MALKIN, S. Energy Partition and Cooling During Grinding. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 2, n. 3, p. 151-157, 2000.

HADAD, M.; SADEGHI, B. Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 63, p. 1-15, 2012.

HASSUI, Amauri. **Estudo da vibração durante o corte e centelhamento na retificação cilíndrica de mergulho**. 2002. 179 p. Tese (Doutorado Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

HECKER, R. L.; LIANG S. Y. Predictive modeling of surface roughness in grinding. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, v. 43, n. 8 p. 755–761, 2003.

HEINZEL, C.; BLEIL, N. The use of the size effect in grinding for work-hardening. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, p. 327–330, 2007.

INASAKI, I.; OKAMURA, K. Monitoring of dressing and grinding processes with acoustic emission signals. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 34, n. 1, p. 277-280, 1985.

IRANI, R. A.; BAUER, R. J.; WARKENTIN, A. A review of cutting fluid application in the grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 15, p. 1696-1705, 2005.

ISO 1101:2012. **Geometrical Product Specifications (GPS) – Geometrical tolerancing – Tolerances of form, orientation, location and run-out**. Geneva Switzerland, p. 103, 2012.

JACKSON, M. J.; DAVIM, J. P. **Machining with abrasives**. Boston, MA: Springer US, v. 1, 2011.

JACKSON, M. J.; KHANGAR, A.; CHEN, X.; ROBINSON, G. M.; VENKATESH, V. C. DAHOTRE, N. B. Laser cleaning and dressing of vitrified grinding wheels. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 185, n. 1, p. 17–23, 2007.

JĘDRZEJEWSKI, J.; MODRZYCKI, W. Intelligent supervision of thermal deformations in high precision machine tools. In: **Proceedings of the Thirty-Second International Matador Conference**. Macmillan Education UK, 1997. p. 457-462.

JEGATHEESAN, V., LIOW, J. L., SHU, L., KIM, S. H., & VISVANATHAN, C. The need for global coordination in sustainable development. **Journal of Cleaner Production**, v.17, n. 7, p.637–643, 2009.

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

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLATTER, G.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; POHLS, M. Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding. In: **Proceeding of the 12th International Colloquium Industrial and Automotive Lubrification, Technische Akademie, Esslingen**, p. 11-13, 2000.

KÖNIG, W.; MESSER, J. Planing of Conventional Grinding Disks With Polycrystalline Diamond. **Ind. Anz.**, v. 102, n. 46, p. 35–38, 1980.

LIAO, Y. S.; LUO, S. Y.; YANG, T. H. A thermal model of the wet grinding process. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 101, n. 1, p. 137-145, 2000.

LIU, J.; CHOU, Y. K. On temperatures and tool wear in machining hypereutectic Al–Si alloys with vortex-tube cooling. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 3, p. 635-645, 2007.

MAKIYAMA, T. Advanced Near Dry Machining System, **4th Annual NCMS Fall workshop Seriese**, Dear-born, NCMS at a Glance October, 2000.

MALKIN, S.; GUO, C. **Grinding technology: theory and application of machining with abrasives**. 2° ed. New York, NY: Industrial Press, 2008.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W. B.; INASAKI, I. **Handbook of machining with grinding wheels**. [s.l.] CRC Press, 2007.

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

MONICI, R. D.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; DE AGUIAR, P. R., Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 46, n. 2, p. 122-131, 2006.

NGUYEN, T. A.; BUTLER, D. L. Simulation of precision grinding process, part 1: Generation of the grinding wheel surface. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 45, n. 11, p. 1321–1328, 2005.

OLIVEIRA, D. D. J. **Aprimoramento da técnica da mínima quantidade de lubrificante (mql) no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho de aços endurecidos**. Dissertação (Mestrado Ciência e Tecnologia dos Materiais) – Faculdade de Ciências, Universidade Estadual Paulista, Bauru-SP, 2011.

OLIVEIRA, J. F. G.; PURQUERIO, B. M.; COELHO, R. T.; BIANCHI, E. C.; Grinding process dominance by means of the dressing operation. In: **Proceedings of the Twenty-Ninth International Matador Conference**. Macmillan Education UK, 1992. p. 547-550.

POMBO, I.; CEARSOLO, X.; SÁNCHEZ, J. A.; CABANES, I. Experimental and numerical analysis of thermal phenomena in the wear of single point diamond dressing tools. **Journal of Manufacturing Processes**, v. 27, p. 145-157, 2017.

POURARIA, H.; KIA, S. M.; PARK, W. G.; MEHDIZADEH, B. Modeling the cooling performance of vortex tube using a genetic algorithm-based artificial neural network. **Thermal Science**, v. 20, n. 1, p. 53-65, 2016.

PROFITO, Francisco José. **Modelagem unidimensional do regime misto de lubrificação aplicado a superfícies texturizadas**. 2010. 193 p. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PUERTO, P.; FERNÁNDEZ, R.; MADARIAGA, J.; ARANA, J.; GALLEGO, I. Evolution of surface roughness in grinding and its relationship with the dressing parameters and the radial wear. **Procedia Engineering**, v. 63, n. 1996, p. 174–182, 2013.

RABIEI, F.; RAHIMI, A. R.; HADAD, M. J.; ASHRAFIJOU, M. Performance improvement of minimum quantity lubrication (MQL) technique in surface grinding by modeling and optimization. **Journal of Cleaner Production**, v. 86, p. 447-460, 2015.

RAMESH, K.; YEO, S.H.; ZHONG, Z.W.; SLIM, K.C. Coolant shoe development for highefficient grinding. **Journal of Material Process Technology**, 114, p.240-245, 2001.

ROWE, W.B. **Principles of Modern Grinding Technology**, 2° ed., Kindlinton, U.K., Willian Andrew, 2013.

SABERI, A.; RAHIMI, A. R.; PARSA, H.; ASHRAFIJOU, M.; RABIEI, F. Improvement of surface grinding process performance of CK45 soft steel by minimum quantity lubrication (MQL) technique using compressed cold air jet from vortex tube. **Journal of Cleaner Production**, v. 131, p. 728-738, 2016

SADEGHI, M. H.; HADDAD, J.; TAWAKOLI, T.; EMAMI, M. Minimal quantity lubrication-MQL in grinding of Ti-6Al-4V titanium alloy. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 44, n. 5–6, p. 487–500, 2009.

SALMON, S. C. **Modern grinding process technology**. [s.l.] McGraw-Hill, 1992.

SANCHEZ, J. A.; POMBO, I.; ALBERDI, R.; IZQUIERDO, B.; ORTEGA, N.; PLAZA, S.; MARTINEZ-TOLEDANO, J. Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology. **Journal of Cleaner Production**, v. 18, n. 18, p. 1840-1849, 2010.

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, n. 1, p. 51–59, 2003.

SHARMA, A. K.; TIWARI, A. K.; DIXIT, A. R. Effects of Minimum Quantity Lubrication (MQL) in machining processes using conventional and nanofluid based cutting fluids: A comprehensive review. **Journal of Cleaner Production**, v. 127, p. 1-18, 2016.

SHAW, M. C. Energy Conversion in Cutting and Grinding. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 45, n. 1, p. 101–104, 1996.

SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; CATAI, R. E.; FUSSE, R. Y.; FRANCA, T. V.; AGUIAR, P. R. Study on the behavior of the minimum quantity lubricant-MQL technique under different lubricating and cooling conditions when grinding ABNT 4340 steel. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 27, n. 2, p. 192-199, 2005.

SILVA, L. R.; BIANCHI, E. C.; FUSSE, R. Y.; CATAI, R. E.; FRANCA, T. V.; AGUIAR, P. R. Analysis of surface integrity for minimum quantity lubricant—MQL in grinding. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 2, p. 412-418, 2007.

SOHAL, N.; SANDHU, C. S.; PANDA, B. K. Analyzing the Effect of Grinding Parameters on MRR and Surface Roughness of EN24 and EN353 Steel. **Mechanica Confab**, v. 3, n. 5, p. 1–6, 2014.

STEMMER, C.E. **Ferramentas de corte II**. Florianópolis, Brasil, Editora: UFSC, 2008. 314 p.

SU, Y.; HE, N.; LI, L.; IQBAL, A.; XIAO, M. H.; XU, S.; QIU, B. G. Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 47, n. 6, p. 927–933, 2007.

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 and Manufacture**, v. 49, n. 12, p. 924-932, 2009.

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**, v. 19, n. 17, p. 2088-2099, 2011.

TAWAKOLI, T.; HADAD, M.J.; SADEGHI, M.H. Influence of oil mist parameters on minimum quantity lubrication – MQL grinding process. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v. 50, n. 6, p.521–531, 2010.

WALKER, Tim. **The MQL Handbook: A Guide To Machining With Minimum Quantity Lubrication**. [S.l.]: Unist, Inc., 2013. 43 p.

WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK, R. B.; LINDSAY, R., Grinding fluid application system design. **CIRP Annals-Manufacturing Technology**, v. 44, n. 1, p. 333-338, 1995.

ZITT, U.; SCHAEFER, L. Nozzles and grinding wheel concepts for optimization of cooling in high performance grinding. **Abrasives**, p. 31-37, October/November 1998.

Apêndice A – Programa utilizado para os experimentos

Programa em código “G” inserido no CNC para retificação do corpo de

prova.

N000	X 680
N001	G 00; 71
N002	X "Valor medido na peça + 0,2 mm"
N003	G 91
N004	G 01
N005	M 01
N006	G 01; 71
N007	F 1
N008	G 04; 02; 00
N009	X -0,2
N010	G 04; 02; 00
N011	X -0,1
N012	G 04; 07,50
N013	X 0,01
N014	X -0,11
N015	G 04; 07,50
N016	X 0,01
N017	G 25 N 14.16.48
N018	G 00; 71
N019	X 10,000
N020	M 02
N021	M 30

Apêndice B - Programa utilizado para as impressões dos perfis do rebolo

Programa em código “G” inserido no CNC para impressão do perfil desgastado do rebolo.

N033	X 680
N034	G 00; 71
N035	X "Valor medido na peça + 0,2 mm"
N036	G 91
N037	G 61
N038	M 01
N039	G 01; 71
N040	F 1
N041	G 04; 02,00
N042	X 0,5
N043	M 02
N044	M 30