



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Kamira Miksza Fragoso

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MQL COMBINADO COM AR RESFRIADO
(CAMQL) NA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 COM REBOLO DE CBN**

Bauru

2017



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”

FACULDADE DE ENGENHARIA DE BAURU
Pós-Graduação em Engenharia Mecânica

Kamira Miksza Fragoso

**APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MQL COMBINADO COM AR RESFRIADO
(CAMQL) NA RETIFICAÇÃO DO AÇO ABNT 4340 COM REBOLO DE CBN**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do *campus* de Bauru, Universidade Estadual Paulista para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica, área de Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi

Bauru
2017

Fragoso, Kamira Miksza.

Aplicação da técnica de MQL combinado com ar resfriado (CAMQL) na retificação do aço ABNT 4340 com rebolo de CBN / Kamira Miksza Fragoso, 2017

81 f.

Orientador: Eduardo Carlos Bianchi

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

1. CAMQL. 2. Retificação. 3. Rebolo de CBN. I. Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II. Título.




UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Bauru




ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE KAMIRA MIKSZA FRAGOSO, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 14 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. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Faculdade de Engenharia de Bauru, Prof. Dr. LEONARDO ROBERTO DA SILVA do(a) Departamento de Engenharia Mecânica / Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, sob a presidência do primeiro, a fim de proceder a arguição pública da DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de KAMIRA MIKSZA FRAGOSO, intitulada **APLICAÇÃO DA TÉCNICA DE MQL COMBINADA COM AR RESFRIADO (CAMQL) NA RETIFICAÇÃO DO AÇO AISI 4340 COM REBOLO DE CBN**. Após a exposição, a discente foi arguida 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. LUIZ EDUARDO DE ANGELO SANCHEZ



Prof. Dr. LEONARDO ROBERTO DA SILVA

DEDICATÓRIA

À minha mãe Neide Maria que sempre me forneceu apoio incondicional e lutou por todos os meus sonhos junto comigo. Aos amigos e familiares que me auxiliaram nesta longa caminhada.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, por me permitir manter firme em busca de um sonho, pois sem Ele nada é possível.

À minha mãe, que sempre esteve ao meu lado, me apoiando, me incentivando, e que jamais me deixou desistir dos meus sonhos, que mesmo a distância sempre esteve junto a mim em todos os momentos.

Aos meus familiares e amigos que sempre torceram por mim, e me deram todo suporte necessário.

Ao meu orientador Prof. Dr. Eduardo Carlos Bianchi por acreditar no meu potencial, por me auxiliar em todas as etapas do desenvolvimento desta pesquisa, por todas as conversas, direcionamentos e compreensão em todo o tempo da realização deste trabalho.

Aos alunos de graduação e pós-graduação Alan Polato Francelin e José Claudio Lopes, pelo auxílio durante a realização dos ensaios e na análise de dados.

Ao técnico Hamilton José de Mello, do Laboratório de Materiais, e ao técnico Hélio Aparecido de Souza pelo suporte durante toda a realização deste trabalho.

Agradeço também à Faculdade de Engenharia da Universidade Estadual Paulista - UNESP, em especial ao programa de Pós-graduação em Programa em Engenharia Mecânica pela oportunidade e a todos os professores que me auxiliaram.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e à Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho *campus* Bauru pelos recursos financeiros, materiais e equipamentos necessários ao desenvolvimento desta pesquisa.

À empresa NIKKON, do Grupo Saint Gobain, pela doação do rebolo de CBN utilizado no desenvolvimento deste trabalho e por todo o suporte técnico que nos foi oferecido.

Às empresas ITW Chemical Products Ltda e Quimatic Tapmatic do Brasil pela doação de todo o fluido utilizado para a realização desta pesquisa.

À empresa Emugue-Franken, que através do Alexandre Araújo Lodi acreditou no desenvolvimento do presente trabalho e nos doou o tubo de vórtice utilizado para o desenvolvimento desta pesquisa.

“A crise é a melhor benção que pode ocorrer com as pessoas, porque a crise traz progresso. A criatividade nasce da angústia, como o dia nasce da noite escura. É na crise que nascem as invenções, os descobrimentos e as grandes estratégias. Quem supera a crise, supera a si mesmo sem ficar superado. Quem atribui à crise seus fracassos, violenta seu próprio talento e respeita mais os problemas do que as soluções. A verdadeira crise é a crise de incompetência. Sem crise não há desafios. Sem desafios a vida é uma rotina, uma lenta agonia. Sem crise não há mérito. É na crise que se aflora o melhor de cada um.”

(Albert Einstein)

FRAGOSO, K. M.. **Aplicação da técnica de MQL combinado com ar resfriado (CAMQL) na retificação do aço ABNT 4340 com rebolo de CBN.** 2017, 81p. (Mestre em Engenharia Mecânica na área de processos de fabricação) - UNESP, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017.

RESUMO

O processo de retificação é um processo de acabamento, e, portanto, possui características como bom acabamento superficial e alta precisão dimensional e geométrica. As peças usinadas por este processo possuem um alto valor agregado, pois as mesmas já passaram por outros processos de usinagem e/ou tratamentos térmicos e revenimento. Um fator limitador do processo de retificação é a quantidade de calor gerada durante o mesmo, energia esta que é minimizada pela aplicação de fluidos de corte durante a retificação. Porém os fluidos utilizados, na maior parte dos casos são poluentes e contém substâncias prejudiciais à saúde, além de possuir um alto custo de compra, manutenção e descarte. Visando reduzir a quantidade de fluido utilizada durante o processo de retificação o presente trabalho foi proposto, com o objetivo de melhorar a técnica da mínima quantidade de lubrificação através da aplicação combinada com ar comprimido à baixa temperatura a fim de melhorar o efeito de refrigeração e assim minimizar a geração de calor na região de corte. Para avaliar a eficácia da técnica foram escolhidas as variáveis de acabamento como a rugosidade e a circularidade, e de eficiência do processo como o desgaste do rebolo e potência consumida durante a usinagem. Estes valores foram medidos para três métodos distintos de aplicação de fluidos de corte durante o processo de retificação, a fim de compará-los, o método proposto para o presente trabalho, CAMQL (técnica de mínima quantidade de fluido combinado com a aplicação de ar comprimido resfriado), em comparação com as técnicas de aplicação de fluido convencional e a técnica de mínima quantidade de lubrificante com ar em temperatura ambiente ou MQL. Para todos os parâmetros, a proposta de redução de quantidade de fluido utilizada atingiu, em geral, resultados positivos, provando a viabilidade da mesma para a retificação do aço AISI 4340 utilizando rebolo de CBN.

Palavras-chave: Retificação, CAMQL, AISI 4340, CBN

FRAGOSO, K. M.. **Application of the MQL technique with cold air (CAMQL) in grinding of ABNT 4340 steel with CBN grinding wheel.** 2017, 81p. (Mestre em Engenharia Mecânica na área de processos de fabricação) - UNESP, Faculdade de Engenharia, Bauru, 2017.

ABSTRACT

Grinding is a finishing process, and therefore has characteristics such as good surface finish, high dimensional and geometric precision. Because it is this kind of manufacture process, the parts machined by this have a high added value, since they have already undergone other machining processes and/or heat treatments and tempering. A limiting factor of grinding process is the amount of heat generated during it; which energy is minimized by application of cutting fluids. But these fluids, in most cases are pollutants and could contain substances that are harmful to health, in addition to having a high cost of purchase, maintenance and disposal. In order to reduce the amount of fluid used during the grinding process, the present research has been proposed with the aim of improving the technique of minimum quantity of lubrication by the combined application with compressed air at low temperature in order to improve the cooling effect and thus minimize the heat in cutting zone. To evaluate the effectiveness of this technique, the finishing variables such as roughness and roundness, and process efficiency, such as grinding wheel wear and power consumed during machining, were chosen. These values were measured for three different methods of cutting fluids application during the grinding process, in order to compare them, the proposed method, CAMQL (cold air minimum quantity of lubrication) as compared to conventional fluid application (flood) and the minimum quantity lubrication with air in room temperature. For all parameters, the proposed cutting fluid reduction reached, in general, positive results, proving its feasibility for grinding of AISI 4340 steel using CBN grinding wheel.

Keywords: Grinding; CAMQL, AISI 4340, CBN

SUMÁRIO

DEDICATÓRIA.....	ii
AGRADECIMENTOS	iii
RESUMO	v
ABSTRACT	vi
Lista de figuras	ix
Lista de tabelas	x
Lista de abreviatura e símbolos	xi
1 Introdução.....	1
1.1 Objetivo	1
1.2 Justificativa	2
1.3 Estrutura e desenvolvimento	3
2 Revisão Bibliográfica.....	4
2.1 O processo de retificação.....	4
2.1.1 Retificação cilíndrica externa	5
2.2 CBN.....	7
2.3 Ligante vitrificado.....	9
2.4 Dressagem.....	10
2.5 Parâmetros de retificação	12
2.5.1 Profundidade de corte (ae)	12
2.5.2 Velocidade de corte (Vs).....	13
2.5.3 Velocidade da peça (Vw)	14
2.5.4 Relação entre velocidade do rebolo e velocidade da peça (qs)	15
2.5.5 Taxa de remoção de material (Qw) e Taxa de remoção de material específica ($Q'w$)	15
2.5.6 Espessura equivalente de corte (heq).....	17
2.6 Fluidos de corte	18
2.7 Técnicas para a redução da quantidade de fluido de corte na retificação	19
2.8 Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL).....	22
2.8.1 Equipamento utilizado e técnicas de aplicação	24
2.8.2 Aplicação de MQL na Retificação	25
2.9 Problemas na retificação com MQL	27
2.9.1 Entupimento da porosidade do rebolo	27
2.9.2 Aumento da temperatura na usinagem com MQL	29
2.9.3 Retificação com MQL e refrigeração	31

2.10	Variáveis de saída no processo de retificação	32
2.10.1	Precisão Dimensional	32
2.10.2	Rugosidade	33
2.10.3	Desgaste diametral do rebolo	34
2.10.4	Forças de corte	36
2.10.5	Potência de corte	37
2.10.6	Microdureza	38
3	Materiais e métodos	39
3.1	Equipamentos e materiais utilizados	39
3.1.1	Retificadora cilíndrica externa	39
3.1.2	Sistema de aplicação convencional de fluido.....	40
3.1.3	Sistema de MQL	40
3.1.4	Sistema de resfriamento	42
3.1.5	Sistema de CAMQL	42
3.1.6	Fluidos de corte	44
3.1.7	Corpos de prova	45
3.1.8	Rebolo	45
3.2	Sequência para a realização dos ensaios	45
3.3	Caracterização das variáveis de saída	46
3.3.1	Medição da rugosidade	46
3.3.2	Medição da circularidade	47
3.3.3	Medição do desgaste diametral do rebolo	47
3.3.4	Potência de corte	48
3.3.5	Microdureza	49
4	Resultados e discussões.....	50
4.1	Rugosidade	50
4.2	Circularidade	52
4.3	Desgaste diametral do rebolo	54
4.4	Potência de corte	56
4.5	Microdureza	58
5	Conclusões	61
6	Sugestões para trabalhos futuros	62
	Referências	63

LISTA DE FIGURAS

Figura 01: Movimento de avanço da retificação cilíndrica, adaptado de (GROOVE, 2014) .	6
Figura 02: Etapas para a preparação do rebolo, adaptado de (JACKSON e DAVIM, 2011)	11
Figura 03 : Fases de remoção de material para o processo de retificação. Adaptado de Rowe (2014)	13
Figura 04: Comportamento do desgaste em função da taxa da remoção de material, adaptado de Klocke (2013)	16
Figura 05: Custos de operação, adaptado de (WALKER, 2013).....	19
Figura 06: Sistemas de aplicação de MQL, adaptado de Walker (2013).....	25
Figura 07: Cavacos alojados na porosidade do rebolo, adaptado de Klocke (2013)	28
Figura 08: Modos de desgaste do rebolo, adaptado de Klocke (2013).....	34
Figura 09: Tipos de fratura, adaptado de Klocke (2013)	34
Figura 10 : Aplicador de MQL, fonte: Alves (2007)	41
Figura 11 : Sistema de aplicação de MQL.....	41
Figura 12: Tubo de vórtice	42
Figura 13 : Diferença de aplicação de CAMQL e MQL.....	43
Figura 14 : Bocal de CAMQL	43
Figura 15: Bocal aplicador de CAMQL montado.	44
Figura 16 : Banco de ensaios	46
Figura 17 : Medição do desgaste diametral do rebolo; (a) cilindro utilizado para a impressão de perfil; (b) posicionamento do apalpador para a medição do desgaste.....	48
Figura 18 : Perfil de desgaste diametral do rebolo.	48
Figura 19: Rugosidade média aritmética versus velocidade de avanço.....	50
Figura 20: Circularidade versus velocidade de avanço	53
Figura 21: Desgaste diametral do rebolo versus velocidade de avanço	55
Figura 22: Potência de corte versus velocidade de avanço.	56
Figura 23: Microdureza da técnica de lubri-refrigeração convencional em função da distância da superfície usinada para cada uma das velocidades de avanço.....	58
Figura 24: Microdureza da técnica de lubri-refrigeração convencional em função da distância da superfície usinada para cada uma das velocidades de avanço.....	59
Figura 25: Microdureza da técnica de lubri-refrigeração convencional em função da distância da superfície usinada para cada uma das velocidades de corte.....	60

LISTA DE TABELAS

Tabela 01: Composição química do aço AISI 4340, fonte: Alves (2007)	45
Tabela 02: Propriedades mecânicas do corpo de prova, fonte: Nunes e Kreischer (2010)	45

LISTA DE ABREVIATURA E SÍMBOLOS

- a_e : Profundidade de corte
 a_s : Avanço por volta
 Al_2O_3 : Óxido de alumínio
 b_w : Largura de retificação
 CBN : Nitreto de boro cúbico
 d_s : Diâmetro do rebolo
 d_w : Diâmetro da peça
 e_c : Energia específica de retificação
 F_x : Força de corte paralela ao eixo do rebolo
 F_y : Força radial de corte
 F_z : Força de corte ou força tangencial de corte
 FFG : Processo de retificação para acabamento
 G : Razão de retificação ou razão G
 h_{eq} : Espessura de cavaco equivalente
LADAPS: Laboratório de processamento e análise de sinais
LUA: Laboratório de usinagem por abrasão
 L_c : Comprimento de amostragem
 L_m : Comprimento de medição
 n_s : Rotação do rebolo
 n_w : Rotação da peça
 n : Números de picos do perfil de rugosidade
 P : Potência de corte
 q'' : Fluxo de calor transferido por convecção
 Q : Taxa de remoção de material
 Q' : Taxa de remoção de material específica
 R_a : Rugosidade média aritmética
 R_t : Rugosidade pico-ao-vale
 SiC : Carboneto de silício
 SRG : Processo de retificação para desbaste
 V_f : Velocidade de avanço
 v_s : Volume total de material do gasto do rebolo

V_s : Velocidade do rebolo

v_w : Volume total de material removido

V_w : Velocidade da peça

T_s : Temperatura da superfície onde ocorre o escoamento

T_∞ : Temperatura do fluido

τ : Tensão de cisalhamento

v : Deformação de corte

1 INTRODUÇÃO

A retificação é um processo normalmente utilizado para acabamento, portanto possui alto valor agregado. Pois ela se realiza após outros processos de usinagem, como por exemplo, torneamento, fresamento, furação, entre outros, e/ou após a realização de tratamentos térmicos, como por exemplo, têmpera, revenimento, entre outros. A usinagem é realizada pela interação dos grãos abrasivos do rebolo e a peça para a remoção de material. Normalmente, as peças fabricadas por este processo exigem uma alta precisão dimensional, bom acabamento, tudo isso em materiais de elevada dureza e que possuem critérios de aplicação bastante rigorosos.

Portanto, este processo precisa de um bom entendimento, já que o mesmo é complexo graças ao tipo de remoção de material, que ocorre pela interação das arestas dos grãos abrasivos com a peça. Devido ao elevado atrito que ocorre entre os grãos e a peça durante a retificação, o calor gerado, e conseqüentemente elevação da temperatura, na região de corte, limita a produtividade do processo.

Para controlar o calor gerado durante o processo de retificação, se faz necessário à utilização de fluidos de corte. Os quais, na maior parte das vezes são extremamente prejudiciais, tanto para o operador como para o meio ambiente. Além disso, eles possuem um custo elevado, tanto para compra e manutenção como para descarte. Assim, há uma grande tendência no meio científico e industrial para que a utilização de fluídos de corte, durante a usinagem, seja reduzida ou até mesmo eliminada.

Existem diversas formas de se reduzir ou eliminar a quantidade de fluido de corte utilizado na retificação e elas vão desde a completa eliminação até a aplicação otimizada.

1.1 Objetivo

O objetivo do desenvolvimento do presente trabalho foi analisar a utilização da técnica de mínima quantidade de lubrificação combinada com ar comprimido resfriado. O estudo foi realizado em comparação com os métodos de mínima quantidade de lubrificação (MQL) e com o método de lubri-refrigeração convencional (inundação). Esta comparação foi realizada a fim de verificar a viabilidade desta técnica para a retificação de aço endurecido.

Com o intento de evitar os problemas acarretados para a retificação utilizando o método de mínima quantidade de fluido, o presente trabalho propõe a utilização de ar comprimido resfriado. Para isso, também conta-se com o desenvolvimento e montagem do sistema de resfriamento do ar comprimido utilizado na presente pesquisa.

Para avaliar a qualidade dos resultados obtidos, foram analisados os parâmetros de rugosidade da superfície usinada, circularidade, desgaste diametral do rebolo e potência de corte consumida durante a usinagem. Estas variáveis foram obtidas em função das velocidades de avanço utilizadas para a realização do presente estudo para todos os métodos de lubri-refrigeração testados. Também foi analisada a microdureza em função da distância da superfície usinada.

Espera-se com isso alcançar resultados positivos a fim de se obter peças de alta qualidade no processo de retificação utilizando o sistema de lubri-refrigeração com mínima quantidade de fluido de corte.

1.2 Justificativa

Na retificação, o uso de fluidos de corte é a estratégia mais comum para gerar lubri-refrigeração. Porém, a introdução de fluidos de corte muitas vezes produz névoa, fumo e outros particulados no ar. Estes produtos trazem preocupações com o ambiente, saúde do operador e segurança durante o processo de usinagem. (HADAD *et al.*, 2012)

A quantidade de fluido de corte consumida pela União Europeia, em 2015, foi de 32.000 T/ano. Cerca de 30% desse fluido de corte, estima-se, é perdida em furos de circuitos, nos processos de limpeza das peças, entre outros. Portanto, os processos de remoção e tratamento dos fluidos são ineficientes e a contaminação causada pelos fluidos de corte acaba dentro da cadeia alimentar através da poluição da água e do solo. (PEREIRA *et al.*, 2015)

No mundo, há cerca de 1,2 milhões de trabalhadores expostos aos efeitos prejudiciais dos fluidos de corte. Adicionalmente, o uso de fluidos de corte na indústria automotiva supõe um impacto de cerca de 17% dos custos totais de fabricação. Além disso, o seu tratamento após a vida útil é entre 2 a 4 vezes seu preço de compra. Por todas essas razões o uso do fluido de corte é ineficiente econômica e ambientalmente. (PEREIRA *et al.*, 2015)

O uso de fluidos de corte envolve alguns inconvenientes, tais como seus elevados custos, o risco para a saúde dos operadores e as preocupações ambientais. Estes

inconvenientes fazem necessário o desenvolvimento e aplicação de novos sistemas de lubri-refrigeração como alternativa aos métodos tradicionais. (RUBIO *et al.*, 2015)

Nota-se durante as operações de retificação, sem o uso de fluidos de corte suficiente, que há a ocorrência de danos térmicos e inexatidão dimensional na superfície das peças, e os métodos de mínima quantidade de lubrificação ou a seco na retificação não tem tido sucesso em aplicações industriais. (HADAD e SADEGHI, 2012). De acordo com o estudo desenvolvido por Hadad e Sadeghi (2012) apesar de bons resultados com a aplicação de MQL para o processo de retificação, ele não satisfaz as exigências quando comparado com a lubri-refrigeração convencional.

1.3 Estrutura e desenvolvimento

O presente trabalho conta com a sua estrutura dividida em capítulos, cada qual abordando temas específicos referentes ao mesmo.

O capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica referente ao processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, a técnica de mínima quantidade de lubrificação e sua combinação com o ar frio, e também pesquisas relacionadas com os temas aqui analisados, bem como dos parâmetros de análise do processo de retificação. Os assuntos abordados neste capítulo são de fundamental importância para entender o objetivo e o desenvolvimento do presente trabalho.

O capítulo 3 trata dos materiais utilizados para a realização dos testes, bem como equipamentos envolvidos, tipos de amostras e métodos usados para a coleta de dados inerentes a análise dos resultados obtidos.

O capítulo 4 apresenta dos resultados obtidos nos ensaios e sua comparação em termos de diferentes parâmetros como rugosidade, circularidade, desgaste do rebolo e potência de corte. E por fim o capítulo 5 traz as conclusões do presente trabalho, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta toda a revisão teórica necessária para o entendimento do processo e da metodologia aplicada para a realização dos ensaios. Nele foram abordados temas como o processo de fabricação por retificação e parâmetros de usinagem, fluidos de corte e aplicações de mínima quantidade de lubrificação, técnicas de refrigeração e variáveis de saída do processo de retificação. Bem como uma sinopse de trabalhos desenvolvidos nas áreas de interesse para a presente pesquisa.

2.1 O processo de retificação

A retificação tem sido empregada na fabricação de peças e utensílios por mais de mil anos, onde as primeiras práticas podem ser rastreadas do período neolítico. A retificação é um processo de remoção de material que se realiza pela interação das partículas abrasivas com a peça. Estas partículas estão aglomeradas em uma ferramenta denominada por rebolo que rotaciona em uma velocidade muito maior em relação a outros processos de usinagem. Estando, tipicamente entre 20 m/s a 45 m/s, podendo chegar, em processos de retificação à alta velocidade, a 140 m/s. Diferente de outros processos utilizando ferramentas de corte com geometria definida, os grãos abrasivos tem uma distribuição irregular e aleatória das arestas de corte em uma visão macroscópica, porém em uma escala muito menor que a rugosidade, eles também tem uma geometria regular. (MARINESCU *et al.*, 2004) (MARINESCU *et al.*, 2007); (BELENTANI *et al.*, 2014); (GROOVE, 2014)

Retificação é a designação mais comum para definir processos de usinagem que fazem o uso de partículas abrasivas para promover a remoção de material. É tradicionalmente considerado um processo de acabamento, sendo capaz de promover a redução da rugosidade e tolerâncias geométricas e dimensionais estreitas. (BIANCHI *et al.*, 2010)

A retificação, assim como qualquer processo de usinagem por abrasão, difere significativamente dos processos de corte tradicionais. Neste processo a remoção de material envolve uma grande quantidade de deformação plástica, uma vez que os grãos abrasivos atacam a peça com um ângulo de inclinação muito negativo. (BABIC *et al.*, 2005)

Seis elementos básicos estão envolvidos para que a remoção de material no processo de retificação se realize: a retificadora, o rebolo, a peça, o fluido, a atmosfera e o cavaco. (MARINESCU *et al.*, 2007)

O rebolo é a ferramenta de corte do processo e executa a usinagem da peça, processo que causa um desgaste inevitável do mesmo. O cavaco é composto pelo material retirado da peça a ser usinada, misturado com fluido de corte proveniente dos processos de lubrificação e partículas abrasivas que estão presentes graças ao desgaste do rebolo. Já o fluido é necessário para promover a lubrificação do processo de usinagem (redução de atrito e de desgaste do rebolo), também sendo requerido para o arrefecimento e para a retirada do cavado e de detritos da região de corte. (MARINESCU *et al.*, 2004); (MARINESCU *et al.*, 2007)

A maior parte dos metais, quando usinados, apresenta um aumento da reatividade química. Como consequência, óxidos e outros compostos são formados rapidamente no cavaco e nas novas superfícies da peça usinada. Esta formação ajuda a lubrificar o processo, o que acaba diminuindo a força de retificação, porém ela também pode deteriorar a qualidade superficial das peças produzidas. (MARINESCU *et al.*, 2004)

O processo de retificação é realizado por partículas abrasivas refratárias com uma geometria relativamente descontrolada. Este processo produz vários cavacos pequenos a uma velocidade muito alta, quando comparada com a velocidade de usinagem dos processos de corte com o uso de ferramentas de geometria definida (processos convencionais de usinagem). (SAHW, 1996)

O presente trabalho se focará apenas nos processos de retificação cilíndrica externa de mergulho.

2.1.1 Retificação cilíndrica externa

A retificação cilíndrica externa, também chamada de retificação entre centros, é realizada de forma semelhante ao torneamento. As máquinas usadas para esta operação se assemelham a um torno, onde o porta-ferramentas foi substituído por um motor de alta rotação a fim de conferir rotação ao rebolo. A peça de formato circular gira presa entre dois pontos de apoio (placa e contraponto) e o rebolo, rotacionando, proporciona o corte. A peça gira a uma velocidade na faixa de 0,3 a 0,5 m/s, e o rebolo na gama de 20 a 33 m/s. (GROOVE, 2014)

A retificação cilíndrica possui algumas características específicas como rebolo geralmente largo, com eixos rígidos e tempo de *spark-out* (também chamado de faíscamento, representa o tempo em que o rebolo realiza a usinagem sem realizar avanço e é utilizado para corrigir deflexões e deformações na máquina ferramenta) relativamente pequeno. O comprimento de contato entre a peça e o rebolo também é relativamente pequeno. (SHAW, 1996)

Para este processo, a velocidade de avanço (V_f) é normalmente muito menor que a velocidade da peça (V_w), enquanto essa velocidade é menor que a velocidade do rebolo (V_s). O resultado disso é que o rebolo remove uma camada de material em forma de espiral a partir da peça. No entanto, a profundidade de corte é normalmente tão pequena que a espiral só pode ser detectada por uma interrupção súbita do processo. (MARINESCU *et al.*, 2004)

No caso deste tipo de retificação existem dois tipos de movimentos de avanços possíveis: o lateral e o de mergulho, conforme a figura 01 (a) e (b), respectivamente. No avanço lateral, o rebolo avança paralelo ao eixo de rotação da peça, já no avanço de mergulho, ele avança radialmente ao encontro da peça usinada. (GROOVE, 2014)

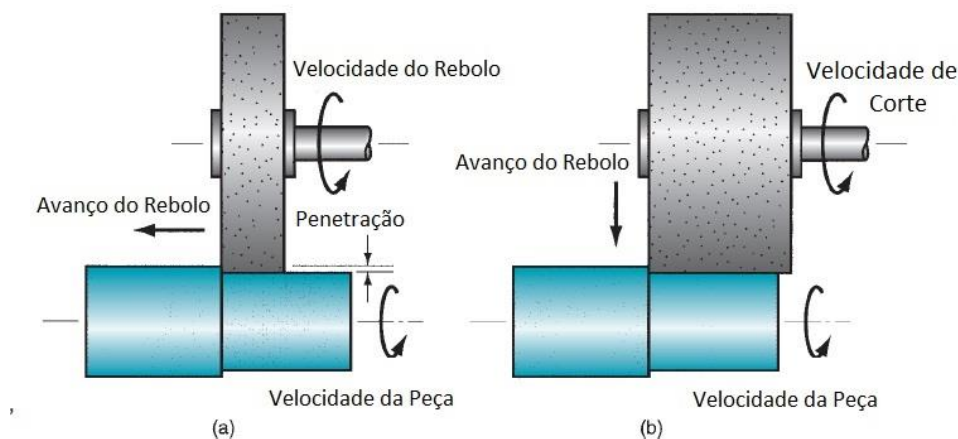


Figura 01: Movimento de avanço da retificação cilíndrica, adaptado de (GROOVE, 2014)

Esse processo de fabricação normalmente é utilizado para dar acabamento às peças que foram usinadas em dimensões aproximadas da dimensão final estipulada pelo projeto e tratadas termicamente. Este processo também é capaz de fornecer boas tolerâncias geométricas e dimensionais. As peças podem ser eixos, virabrequins, eixos-árvores, rolamentos e buchas e rolos para laminadores. (GROOVE, 2014)

2.2 CBN

O CBN é uma estrutura cristalina alotrópica derivada do nitreto de boro com a dureza quase correspondente a do diamante. O nitreto de boro cubico foi sinterizado a primeira vez em 1957. Os cristais hexagonais são obtidos a 1500°C - 2000°C com pressões de 3,45-6,2 MPA (0,5-0,9 x10⁶ *psi*), na presença de catalizadores como metais alcalinos, antimônio, estanho ou chumbo, lítio, magnésio e nitretos. A alta popularidade do CBN é devido a sua dureza, resistência térmica tão alta quanto o diamante, permitindo o trabalho em até 1900°C. Ele também possui boa resistência química com compostos de ferro. CBN é muito usado para retificação de peças de alta qualidade. (MARINESCU *et al.*, 2004)

Para a fabricação do CBN, o mesmo é sinterizado em forma de cristal a partir do nitreto de boro hexagonal, comumente chamado de grafite branco. Este composto de átomos de boro e nitrogênio, é combinado com um catalisador de lítio metálico em um ambiente com temperaturas de 1650°C e pressões acima de 6800 MPa. Um grão preto e opaco resulta desta operação. A intensa temperatura e pressão na presença de um catalisador causam ao átomo de hidrogênio a doação de um elétron ao átomo de boro que forma uma ligação química com o átomo de hidrogênio. Assim é formada uma estrutura cristalina muito forte similar ao diamante. (SALMON, 1992)

Considerando a sua natureza química, o CBN é amplamente utilizado para a retificação de aços rápidos. O CBN tem uma excelente estabilidade térmica. Sua oxidação tem início a partir de 1000°C e se torna completa em torno de 1500°C. A camada de óxido de boro formada na superfície dos grãos protege contra futuras oxidações. Portanto, altas velocidades de corte na faixa de 30,5 – 61,5 m/s podem ser empregadas. Entretanto, a afinidade química do CBN com o vapor da água, dissolve esta camada protetora e cria condições para que a hidrólise faça surgir o ácido bórico e o amônio como produtos. Assim passa ser uma desvantagem ter a lubrificação com fluidos a base de água. Na prática, a retificação com lubrificante é muito melhor que a retificação a seco. O mais eficiente refrigerante usado com abrasivos de CBN é o óleo mineral e o segundo melhor, a emulsão de óleos sulfoclorados em água com concentração mínima de 10%. (MARINESCU *et al.*, 2004)

Comparado com o óxido de alumínio e com o carbetto de silício, o CBN tem desgaste mínimo e, portanto, fica mais afiado por um longo período de tempo entre as dressagens. Um grão de CBN terá vida 100 vezes maior que um grão de oxido de

alumínio. Devido a sua inerente aspereza ele proporciona uma maior integridade superficial e melhor acabamento. (SALMON, 1992)

O custo deste abrasivo é alto se comparado aos abrasivos convencionais, entretanto os benefícios vindos da redução da quantidade de dressagem e a qualidade superficial das peças compensa este alto custo. É importante salientar que o CBN requer uma retificadora rígida com o ajuste correto e um método de dressagem empregado. O CBN mostrou um desempenho de mais sucesso com um incremento de velocidade no rebolo, promovendo altas taxas de remoção de material e desgaste mínimo do rebolo. (SALMON, 1992)

O CBN possui algumas características específicas para a sua aplicação (MARINESCU *et al.*, 2004):

- Propriedades mecânicas: a dureza do CBN em temperaturas ambientes é aproximadamente a metade do diamante e o dobro dos abrasivos convencionais. A diferença da resistência à abrasão, no entanto é muito maior. Essa diferença se traduz em uma diferença de 100-1000 vezes na resistência a abrasão, dependendo do material. Como o diamante, a chave é a total resistência a todos os processos de desgaste por atrito. Assim como o diamante, o CBN possui uma alta tenacidade à fratura, mas a diferença é que ele possui 6 ao invés de 4 planos de clivagem (propriedade física que certos corpos minerais possuem de se quebrarem/dividirem com maior facilidade seguindo planos que estão relacionados com suas estruturas atômicas (internas), produzindo superfícies planas reticulares definidas (planos de clivagem/ superfícies de clivagem e paralelas entre si.), isso acarreta em um maior controle de quebra dos grãos na forma tetraédrica típica dos grãos de CBN. A dureza do grão é geralmente muito menor que a do cubo-octaédrica do diamante. Isso fornece vantagens bastante úteis. Os rebolos de CBN podem ser dressados com sucesso através da utilização de ferramentas de diamante.
- Propriedades químicas: CBN é termicamente estável em temperaturas a baixo de 1500°C no vácuo ou em uma atmosfera rica em nitrogênio. No ar ou no oxigênio, o CBN forma uma camada passiva de B_2O_3 na superfície o que previne futuras oxidações acima de 1300°C. Entretanto esta camada é solúvel em água, ou mais precisamente vapor em temperaturas acima de 900°C e isso acarreta em uma maior oxidação dos

grãos de CBN. Essa reação é associada com a redução da vida dos rebolos com a utilização de fluidos à base de água. CBN também é reativo com óxidos alcalinos, afinal eles são usados como solventes e catalisadores na síntese do CBN. Estes óxidos são componentes comuns de ligantes vitrificados e podem tornar a reatividade extrema em temperaturas acima de 900°C. CBN não mostra nenhuma reatividade significativa com ferro, níquel, cobalto ou molibdênio até temperaturas de 1300°C. Ele mostra afinidade química com o alumínio em temperaturas acima de 1000°C, com o titânio ele reage em 1000°C para formar TiB_2 e TiN .

- Propriedades térmicas: a condutividade térmica do CBN é um pouco maior que a do diamante. Em temperaturas ambientes está na faixa de 200-1300 W/m.K, dependendo da pureza. O CBN tem difusividades térmica de 480 mm²/s e o coeficiente de expansão térmica do CBN é cerca de 20% maior que o valor característico do diamante.

2.3 Ligante vitrificado

Historicamente, a utilização de ligantes vitrificados está restrita a usos com velocidades do rebolo na faixa de 30 m/s, devido à limitação das forças de ligação do aglomerante, que manterão os grãos abrasivos presos a ele. Entretanto métodos para o reforço do ligante permitem o uso de velocidades muito maiores. A mais alta velocidade utilizada para um rebolo com ligante vitrificado está na faixa de 120 m/s. Atualmente, é possível preparar o ligante vitrificado com diferentes características, que ocasionarão no ligante desejado para a aplicação solicitada. Também é possível realizar o controle da porosidade durante a sua fabricação. (MALKIN e GUO, 2008)

O ligante vitrificado é capaz de resistir a temperaturas na faixa de 600°C até 1300°C dependendo do tipo de abrasivo e da formulação do ligante. Além da estabilidade em altas temperaturas, ele também possui uma alta rigidez e a capacidade de sustentar um alto nível de porosidade. Outro ponto importante para este tipo de ligante é o modo de fratura. O ligante deve ser forte o suficiente para segurar o grão em condições normais de trabalho, porém, sob uma maior pressão ele deve permitir que o grão se fracture de forma controlada, evitando assim que ocorra a queima. (MARINESCU *et al.*, 2007)

Segundo Klocke (2013), as características do ligante vitrificado podem ser resumidas em:

- Frágil e, portanto, sensível ao impacto;
- Alto módulo de elasticidade;
- Resistentes à temperatura, porém sensível para mudanças da mesma;
- Resistência química ao óleo e água.

No caso de ligante vitrificado para rebolos de CBN, a concentração do ligante desempenha um papel fundamental no controle da quantidade de arestas cortantes na superfície do rebolo. Para este caso específico, elas tendem a ser até 50% em volume. O grau de porosidade do ligante para um rebolo de CBN é muito mais denso que para os rebolos convencionais e eles também possuem uma melhor estabilidade térmica. Um fator importante é a combinação das características de expansão térmica do vidro com o abrasivo, isso visa à otimização da tensão relativa entre o ligante e o grão durante o processo de sinterização. (MARINESCU *et al.*, 2007)

2.4 Dressagem

Durante a retificação, devido ao desgaste dos grãos e do ligante, o rebolo está sujeito ao macro e ao micro efeito de desgaste. O macro efeito altera a forma do perfil da ferramenta, pois ele envolve o processo de perdas de grãos e desgaste do ligante. Já o micro efeito causa a mudança na topografia do rebolo o que prejudica a superfície de corte, pois ele causa alterações na forma da superfície do grão abrasivo. Assim, durante a preparação do rebolo para o uso o mesmo deve ser balanceado e condicionado. (JACKSON e DAVIM, 2011)

O condicionamento tem por objetivo produzir ou restaurar a geometria/topografia do rebolo. Este processo envolve três diferentes sub-processos: criação de perfis, afiação e limpeza. A criação de perfis e afiação aparecem sob o termo geral dressagem. A esquemática deste processo pode ser observada na figura 02. (JACKSON e DAVIM, 2011).



Figura 02: Etapas para a preparação do rebolo, adaptado de (JACKSON e DAVIM, 2011)

Nos processos de usinagem por abrasão, a vida do rebolo depende do quanto o rebolo precisa ser dressado devido ao desgaste. Existem diversas razões para que isso ocorra, incluindo: (a) forças de corte excessivas; (b) baixa integridade superficial da peça usinada (acabamento, transformações de fases e tensão residual); (c) baixa precisão dimensional devido ao excesso de temperatura ou desgaste do rebolo; (d) instabilidade, que pode levar a ondulações. (SHAW, 1996)

Segundo Marinescu *et al.*, (2007) o processo de dressagem e condicionamento do rebolo deve ser realizado por conta das seguintes razões:

- Perda da precisão dimensional do rebolo devido ao desgaste ou empastamento;
- Alto consumo de energia e consequente aumento de temperatura durante o processo de retificação;
- Perdas da qualidade superficial da peça;
- Baixa precisão de acabamento nas peças;
- Redução da produtividade.

O processo de dressagem assegura uma superfície abrasiva limpa, com a microtopografia apropriada. Em geral, apenas 10% do volume ativo do rebolo é consumido pelo desgaste, os outros 90% são consumidos pelos processos de dressagem. (MARINESCU *et al.*, 2007)

O número de peças produzidas por dressagem é crítica para a produção econômica. A vida de dressagem pode ser determinada como o número de peças produzidas a cada dressagem. (MARINESCU *et al.*, 2007)

O processo de limpeza realizado durante a dressagem visa remover detritos, a camada desgastada do rebolo e o empastamento da sua superfície. Já o processo de perfilamento, que ocorre junto da limpeza, tem por objetivo fornecer o perfil correto à camada ativa do rebolo. Este processo deve ser realizado de forma cuidadosa, pois ele é capaz de fornecer ao rebolo a forma periférica, circularidade e concentricidade. Estes fatores garantem que o rebolo se mantém balanceado e com paralelismo e perpendicularidade com os eixos da retificadora. (MARINESCU *et al.*, 2007)

2.5 Parâmetros de retificação

Este tópico aborda os parâmetros utilizados na retificação cilíndrica externa, como profundidade de corte, velocidade de corte, velocidade da peça, relação entre velocidade do rebolo e velocidade de corte, taxa de remoção de material, taxa específica de remoção de material e espessura equivalente de corte. Este tópico também conta com a definição de cada um dos parâmetros e suas respectivas equações.

2.5.1 Profundidade de corte (a_e)

No processo de retificação existem três fases de remoção do material: na primeira delas ocorre a deformação elástica, onde o grão atrita com a peça. Já na segunda ocorre deformação tanto elástica como plástica, e o atrito se dá além do grão com a peça, também há o atrito interno do material. Por fim há a remoção do material, conforme a figura 03. (ROWE, 2014)

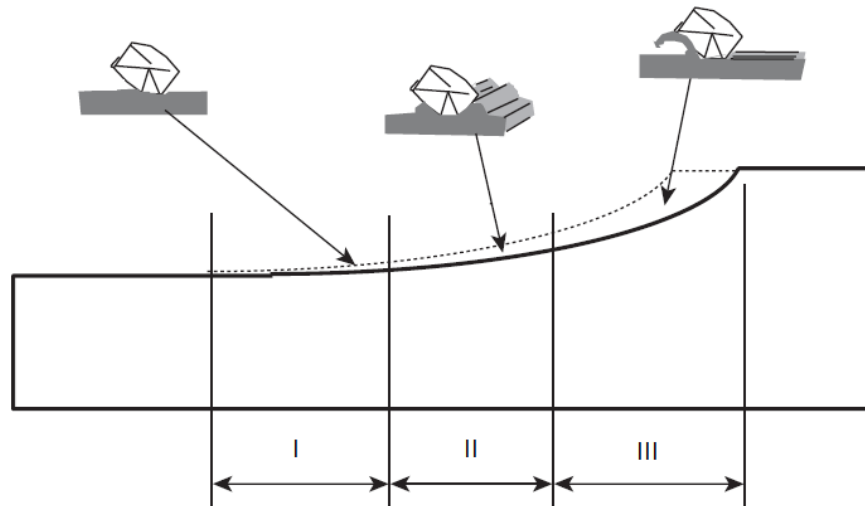


Figura 03 : Fases de remoção de material para o processo de retificação. Adaptado de Rowe (2014)

Na fase I tem-se o contato inicial do grão com a peça, que gera uma grande quantidade de atrito, calor e deformação. Já na fase II ocorre deformação plástica e escoamento lateral. Finalmente, na fase III a penetração atinge um valor crítico, ocorrendo então formação do cavaco e remoção de material. (ROWE, 2014)

Na retificação cilíndrica de mergulho, a profundidade de corte é influenciada pela rotação da peça. A profundidade de corte é dada pela equação (1).

$$a_e = \frac{\pi \cdot d_w \cdot Vf}{V_w} \quad (1)$$

Onde d_w é o diâmetro da peça, fornecido em [mm], Vf é a velocidade de mergulho do rebolo, ou velocidade de avanço, fornecida em [mm/min], e V_w é a velocidade de corte, fornecido em [m/min].

2.5.2 Velocidade de corte (V_s)

A velocidade de corte pode ser definida como a velocidade de corte do rebolo durante o processo de usinagem.

Se a velocidade de corte for elevada, a espessura do cavaco será menor. Pois os grãos abrasivos têm um intervalo de tempo menor para penetrar no material da peça e assim retirar uma menor quantidade de material. Conseqüentemente, o grão abrasivo será submetido a menores forças de corte e sua vida será maior. Neste tipo de situação, o

rebolo se comporta como um rebolo ‘duro’. Se a situação oposta ocorrer, os grãos abrasivos serão submetidos a maiores esforços, já que os grãos penetrarão mais no material da peça. Pois o tempo de contato é maior e o rebolo se comportará como um rebolo ‘macio’. Porém neste aumento da velocidade de corte deve ser observado o limite de resistência do ligante do rebolo utilizado. Este tipo de comportamento é chamado de dureza dinâmica do rebolo (NUSSBAUM, 1988).

A velocidade de corte pode ser definida pela equação (2).

$$V_s = \frac{\pi \cdot d_s \cdot n_s}{60000} \quad (2)$$

Onde V_s é a velocidade de corte, fornecida em [m/s], d_s é o diâmetro do rebolo, fornecido em [mm] e n_s é a rotação do rebolo, fornecida em [rpm].

2.5.3 Velocidade da peça (V_w)

A velocidade da peça é um termo utilizado tipicamente para a retificação cilíndrica, seja ela interna ou externa. O termo equivalente para a retificação plana seria a velocidade transversal ou velocidade da mesa. A velocidade da peça se refere à sua velocidade de rotação durante o processo de usinagem. (MARINESCU *et al.*, 2007)

Aumentando-se a velocidade da peça, o grão abrasivo terá uma maior penetração no material, sofrendo atrito, compressão e aumento da temperatura. A combinação destes fatores ocasiona o deslocamento do ligante, antes que ocorra o desgaste do grão abrasivo. Com a redução da velocidade da peça, enquanto mantém-se a velocidade de corte constante, a espessura do cavaco irá diminuir. Pois há uma menor área de contato entre os grãos abrasivos e a peça, as forças atuantes nos grãos abrasivos serão menores e o grão ficará mais tempo preso ao rebolo (NUSSBAUM, 1988).

A velocidade da peça pode ser definida pela equação (3).

$$V_w = \frac{\pi \cdot d_w \cdot n_w}{60000} \quad (3)$$

Onde V_w é a velocidade da peça, fornecida em [m/s], d_w é o diâmetro da peça, fornecido em [mm] e n_w é a rotação da peça, fornecida em [rpm].

2.5.4 Relação entre velocidade do rebolo e velocidade da peça (q_s)

A relação entre a velocidade do rebolo e a velocidade da peça pode ser definida pela equação (4).

$$q_s = \frac{d_s \cdot n_s}{d_w \cdot n_w} \quad (4)$$

Onde n_s e n_w são, respectivamente, a rotação do rebolo e a rotação da peça, ambos em [rpm] e, d_s e d_w são, respectivamente, o diâmetro do rebolo e o diâmetro da peça, ambos em [mm]. Esta equação pode ser reduzida em termos das velocidades do rebolo e da peça, conforme a equação (5), ambas em [m/s].

$$q_s = \frac{V_s}{V_w} \quad (5)$$

Segundo Macedo (2012), a relação de velocidades q_s é utilizada para determinar qual tipo de processo de retificação é realizado. Para relações na gama de 90 até 120, a operação é considerada de desbaste. Se o valor de q_s for de 90, a operação de retificação é considerada de semiacabamento. Por fim, se este valor estiver entre 60 e 90, a operação é classificada como de acabamento.

2.5.5 Taxa de remoção de material (Q_w) e Taxa de remoção de material específica (Q'_w)

A taxa de remoção de material, ou Q_w , equação (6), é definida como quantidade de material removido durante a usinagem por unidade de tempo. (MARINESCU *et al.*, 2007)

$$Q_w = \pi \cdot d_w \cdot a_p \cdot V_f \quad (6)$$

Sendo Q_w a taxa de remoção e sua unidade em [mm³/mm], d_w é o diâmetro da peça, em [mm], já a_p é a largura de contato, fornecida em [mm] e por fim V_f é a velocidade de avanço, fornecida em [mm/min].

Já a taxa de remoção de material específica, equação (7), é definida como a quantidade de material removida por unidade de comprimento do rebolo. (MARINESCU *et al.*, 2007)

$$Q'_w = \frac{Q_w}{a_p} \quad (7)$$

Onde Q'_w é a taxa de remoção de material específica, fornecida em [mm²/mm], Q_w é a taxa de remoção de material, em [mm³/mm] e a_p é a largura de contato, em [mm]. Ela pode ser simplificada em função do diâmetro da peça e da velocidade de avanço, conforme a equação (8).

$$Q'_w = \pi \cdot d_w \cdot V_f \quad (8)$$

Onde Q'_w é a taxa de remoção de material específica, em [mm²/mm], d_w é o diâmetro da peça, em [mm] e por fim V_f é a velocidade de avanço, fornecida em [mm/min].

Para valores muito baixos de Q' , tem-se uma predominância do fenômeno de atrito, o que acarreta em pouca remoção de material. Pois este fenômeno favorece o desgaste. Já quando o valor Q' aumenta, o mesmo acontece em proporção com a energia consumida com a formação de cavaco. Pois ocorre uma maior formação do mesmo, e conseqüentemente uma maior energia consumida durante o processo de retificação, conforme observa-se na figura 04. (MARINESCU *et al.*, 2007)

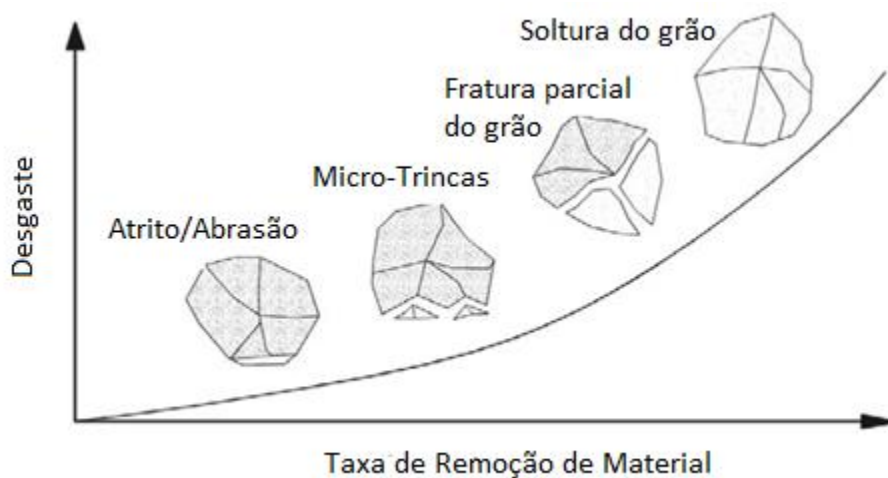


Figura 04: Comportamento do desgaste em função da taxa da remoção de material, adaptado de Klocke (2013)

Para taxas pequenas de remoção de material, ocorre a manifestação de micro mecanismos de desgastes graças às elevadas tensões térmicas e mecânicas, o que acarreta em uma diminuição da pressão na superfície do grão abrasivo. Já para taxas de remoção de material mais elevadas, o comportamento do desgaste é determinado, primeiramente, pelo aumento do esforço mecânico no grão abrasivo. Em função da taxa de remoção de material, pode ocorrer a separação dos grupos cristalinos, ruptura parcial do grão, ou ainda, no caso da força de ligação do aglomerante ser excedida, a quebra total dos grãos pode acontecer. (KLOCKE, 2013)

2.5.6 Espessura equivalente de corte (h_{eq})

Para o entendimento da formação dos cavacos, é preciso fazer algumas suposições: (a) os grãos abrasivos retiram cavacos em forma de vírgula. Apesar deles serem localizados de forma aleatória, os grãos abrasivos tem a capacidade de retirar uma camada contínua de material; (b) todos os grãos abrasivos trabalham na mesma profundidade; e (c) o sistema da máquina/rebolo/peça é considerado completamente rígido (NUSSBAUM, 1988).

Segundo Marinescu *et al.* (2004) a espessura de cavaco equivalente, equação (9), é um dos parâmetros mais utilizados para medir a profundidade de penetração do rebolo na peça. Pois em um trabalho experimental, existe a dificuldade de se determinar precisamente o espaçamento dos grãos. Ainda segundo Marinescu *et al.* (2004) a determinação deste parâmetro é importante para a determinação do desgaste do rebolo. Pois ela irá determinar a profundidade de penetração do rebolo na peça e com isso ajudar a determinar a quantidade de material gasto no rebolo para a usinagem. Além de ser utilizada como variável base para diversos experimentos.

$$h_{eq} = \frac{Q'_w}{V_s \cdot 60} \quad (9)$$

Onde h_{eq} é a espessura de cavaco equivalente [μm], Q'_w é a taxa de remoção específica de material, em [mm^2/mm], V_s é a velocidade do rebolo, em [m/s].

Este parâmetro equivale, fisicamente, à espessura de material removido pelos grãos abrasivos. O seu aumento, seja pelo aumento do avanço ou da velocidade da peça,

ou pela diminuição da velocidade do rebolo, acarreta em um crescimento dos esforços de corte, problemas no acabamento e uma diminuição da vida do rebolo. (DINIZ *et al.*, 2013)

2.6 Fluidos de corte

O fluido de corte na usinagem tem como principal função específica promover a lubrificação e a refrigeração. Assim como minimizar a produção de calor que resulta do contato. A sua redução ou completa eliminação pode levar a um drástico aumento de temperatura, causando a redução da vida do rebolo, perda de precisão dimensional e de forma, e diversas variações no comportamento térmico do equipamento. Uma função importante e diversas vezes esquecida é a habilidade do fluido de remover cavacos. Quando são usadas ferramentas abrasivas, a redução na quantidade de fluidos de corte pode resultar em uma dificuldade de manter os poros do rebolo limpos, favorecendo a formação de empastamento (*clogging*) da sua superfície de corte. Contribuindo, desta forma, para o aparecimento de diferentes fatores que deterioram a qualidade das peças obtidas pelo processo de retificação. (BIANCHI *et al.*, 2010)

Segundo Walker (2013) existem inúmeras vantagens na utilização de uma menor quantidade de fluido de corte. Do ponto de vista econômico, os custos com fluido de corte representam de 8 a 16% do custo total das operações de usinagem, conforme pode observar-se na figura 05. Já com relação ao meio ambiente e à saúde do operador, a redução da quantidade de fluido utilizada também reduz os riscos para a saúde causados pela emissão de fluido de corte tanto no ar como em contato com a pele. Ainda segundo Walker (2013), a utilização de uma grande quantidade de fluido aumenta o risco de danos aos componentes elétricos dos equipamentos, além de não manter o ambiente limpo e diminuir a vida do maquinário.

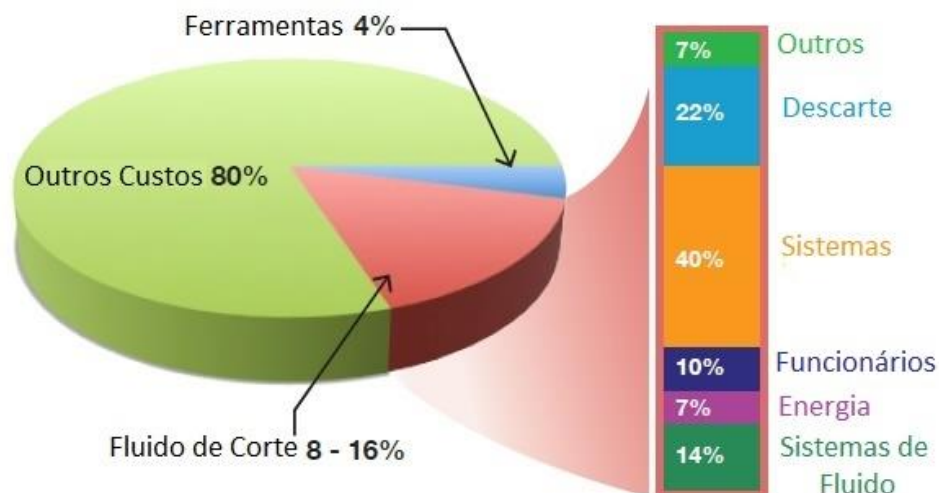


Figura 05: Custos de operação, adaptado de (WALKER, 2013)

A utilização de uma grande quantidade de fluido de corte faz com que os custos de produção sejam bastante elevados. Além do alto valor de compra, o mesmo possui um alto custo de manutenção e descarte. Além disso, em sua composição pode haver a presença de componentes químicos nocivos que prejudicam a saúde do operador. Se o seu descarte não for realizado de forma correta, estes produtos químicos também podem prejudicar o meio ambiente. Por conta disso há uma grande tendência que o uso de fluidos de corte seja gradualmente reduzido ou completamente eliminado das operações de usinagem. Assim, diferentes pesquisas com os mais diversos métodos para redução ou eliminação dos fluidos de corte vêm sendo realizadas. (WALKER, 2013)

2.7 Técnicas para a redução da quantidade de fluido de corte na retificação

Na literatura é possível encontrar diversos trabalhos com a aplicação de fluidos que favorecem a refrigeração, que serão comentados posteriormente nos tópicos seguintes, nos processos de retificação. Como exemplo, têm-se refrigerantes gasosos como CO₂ ou ar comprimido em baixa temperatura e refrigeração criogênica, combinados ou não com algum sistema de lubri-refrigeração. Este tipo de aplicação tem apresentado algum sucesso para os mais diversos tipos de materiais, condições de usinagem e tipos de rebolo.

A retificação a seco é realizada sem nenhuma presença de fluido de corte, podendo ou não ser combinada com algum método refrigerante gasoso. Nesta situação pode-se

citar o trabalho desenvolvido por Oliveira *et al.* (2015), onde realizou-se um estudo de retificação cilíndrica externa de mergulho a seco com resfriamento prévio dos corpos de prova. Os ensaios utilizaram corpos de prova de aço AISI 1045. Os mesmos receberam um banho de nitrogênio líquido, com duração de 100 segundos, antes da realização da usinagem. Este banho em nitrogênio líquido possibilitou que a mesma pudesse ser feita com a peça em baixa temperatura, potencializando o efeito de refrigeração. Avaliou-se o parâmetro de rugosidade em função do volume específico de material removido. Obtiveram-se valores na faixa de 0,30 a 0,50 μm para o método convencional de lubri-refrigeração e valores na faixa de 0,20 a 0,30 μm para as peças que sofreram um resfriamento prévio.

No trabalho de Oliveira *et al.* (2015) os resultados para a rugosidade com a aplicação do método para a retificação a seco quando comparados com o método de lubri-refrigeração convencional foram menores no intervalo estudado. Pois com o método convencional há uma maior formação de rebarbas na lateral da superfície usinada. Para a circularidade, os valores para ambas as condições de aplicação do método convencional se apresentaram dispersos, na faixa de 1 a 3 μm . Isso aconteceu, pois para a condição de lubri-refrigeração convencional, o rebolo pode ter se desbalanceado devido à ação do fluido no rebolo. Este fenômeno é causado pela penetração do óleo nas porosidades do rebolo de maneira não uniforme. Já para o método a seco com resfriamento prévio da peça, os valores se apresentaram em uma faixa de 2 a 2,50 μm . Os corpos de prova também não apresentaram danos térmicos ou trincas superficiais, porém concluiu-se que simulações devem ser realizadas antes dos testes, para que a viabilidade dos mesmos seja verificada.

Outra tendência para o desenvolvimento das técnicas de retificação a seco é a aplicação de refrigerantes gasosos, como ar em baixa temperatura ou CO_2 , como no trabalho desenvolvido por Choi *et al.* (2001), onde utilizou-se ar comprimido em baixa temperatura para o arrefecimento da retificação cilíndrica a seco. Os ensaios foram realizados utilizando os aços SCM4 e SCM21 com rebolo de CBN. A técnica proposta foi comparada com a lubri-refrigeração convencional em termos da rugosidade e da tensão residual. Para a análise do aço SCM4, o aumento da profundidade de corte trouxe uma melhora para a rugosidade. Porém a qualidade obtida com o ar comprimido em baixa temperatura ainda apresenta resultados mais elevados em comparação com a técnica de

lubri-refrigeração convencional. Isso acontece, pois, o ar comprimido não apresenta nenhuma propriedade lubrificante.

Já para os resultados obtidos de tensão residual, a tensão de compressão aumentou com o aumento da profundidade de corte. Os resultados de tensão de compressão foram maiores para o método convencional que para a retificação a seco com ar comprimido em baixa temperatura. A tensão de compressão é favorecida pelo calor gerado durante o processo de retificação. A aplicação de ar comprimido em baixa temperatura não é tão eficiente quanto o método de lubrificação convencional.

Também é possível citar o trabalho desenvolvido por Choi *et al.* (2002), onde realizou-se a aplicação de ar frio no processo de retificação cilíndrica externa a seco para o aço SCM21 de dureza 58-60 HRc. Os resultados obtidos foram comparados com processos de retificação com lubri-refrigeração convencional. Esta comparação foi realizada em termos dos parâmetros de rugosidade e tensão residual. Os experimentos realizaram-se tanto para rebolos convencionais de óxido de alumínio como para rebolos de CBN.

Para o rebolo convencional, a rugosidade aumentou com o aumento da profundidade de corte e a tensão residual alterou de compressão para tração devido ao aumento da quantidade de calor. Conforme a temperatura do ar diminuiu, o acabamento tornou-se melhor. A tensão residual de compressão aumentou com a diminuição da temperatura e com o aumento da velocidade do ar comprimido em baixa temperatura. Para ambos os rebolos a rugosidade aumentou com o aumento da velocidade do ar comprimido. A tensão residual resultante da aplicação de ar comprimido apresenta melhores resultados que àquela obtida com o método convencional de lubri-refrigeração.

Outra técnica para reduzir a quantidade de fluido de corte utilizada no processo de retificação é a refrigeração criogênica na retificação a seco. Esta técnica consiste em aplicar nitrogênio líquido na interface de corte durante o processo de retificação, sem a utilização de nenhum fluido de corte. Sobre este tipo de técnica podemos citar o trabalho realizado por Paul e Chattopadhyay (1996), onde utilizou-se corpos de prova de cinco tipos diferentes de aço (AISI 1020, AISI 1080, D2, H11, M2) na retificação plana tangencial. As técnicas propostas de criogenia foram comparadas com a aplicação da lubri-refrigeração convencional. Concluiu-se que, para todos os casos analisados, a aplicação de refrigeração criogênica reduziu a temperatura de usinagem a baixo da temperatura de transformação de fase. Este benefício aumentou com a penetração de corte durante o processo de usinagem, principalmente para aços de baixa dureza.

Outro trabalho que pode ser citado sobre refrigeração criogênica na retificação é a pesquisa desenvolvida por Ben Fredj *et al.* (2006) onde avaliou-se a integridade superficial e a usinabilidade do aço inoxidável austenítico AISI 304. O estudo foi realizado para a retificação plana sob condições de refrigeração criogênica, a seco e com lubri-refrigeração convencional. As forças de usinagem mantiveram-se em uma gama de valores próximos para todos os meios de refrigeração testados, com valores mais altos para maiores profundidades de corte. A técnica de refrigeração criogênica reduz substancialmente as temperaturas na interface de usinagem, estando esta diferença próxima da ordem de 200 °C para diferentes métodos de arrefecimento. A retificação criogênica reduziu em cerca de 40% os parâmetros de rugosidade medidos para a usinagem do aço AISI 304.

Outra técnica é a redução da quantidade de fluido na retificação como por exemplo o método de mínima quantidade de lubrificação, que visa à usinagem sustentável através do uso de uma quantidade reduzida de fluido de corte durante a usinagem.

2.8 Mínima Quantidade de Lubrificação (MQL)

A mínima quantidade de lubrificação também chamada de MQL é destinada a reduzir a quantidade de lubrificante usado durante um processo de usinagem. Segundo Marinescu *et al.* (2007) esta técnica consiste em usar uma quantidade mínima de lubrificante para reduzir o atrito entre a ferramenta e a peça que está sendo usinada.

Não existe um consenso sobre a quantidade exata de lubrificante que deve ser utilizada para a técnica de MQL. Segundo Su *et al.* (2007) a quantidade varia entre 6 a 100 mL/h, já segundo Belentani *et al.* (2014) essa quantidade é de 100 mL/h, aplicados a uma pressão de 4,0 a 6,0 kgf/cm². Hadad e Sadeghi (2013) afirmam que esta quantidade varia de 5 mL/h ao máximo de 500 mL/h, com pressão de 2 a 8 bar. Por fim, segundo Walker (2013) estes valores variam, por exemplo, valores usuais de 50 mL/h e em casos excepcionais usa-se 150 mL/h, ou valores em torno 500 mL/h. Não importa qual norma é adotada, a faixa utilizada é bem menor que 30.000 – 60.000 mL/h, valores tipicamente utilizados para aplicações convencionais (WALKER, 2013)

De acordo com o Walker (2013), a técnica de MQL pode ser aplicada em diferentes tipos de máquinas, como por exemplo, em máquinas abertas, máquinas usadas de maneira intermitente, micro usinagem, usinagem de alta velocidade e usinagem em geral. Ainda de acordo com Walker (2013), o MQL é comumente chamado de sistema de

névoa, e ele apresenta uma emissão menor que o sistema de lubri-refrigeração convencional.

A lubrificação é assegurada pelo óleo e a refrigeração principalmente pelo jato de ar comprimido. Como este processo utiliza uma quantidade muito pequena de fluido de corte, este é bastante próximo da retificação a seco. Consistindo em uma mistura de ar e óleo chamada de névoa que é pulverizada na zona de corte durante a usinagem. Com o auxílio de ar sob pressão, esta névoa de lubri-refrigerante é direcionada para a superfície do rebolo. Idealmente um filme fino de fluido de corte cobre a superfície do rebolo, prioritariamente entrando em contato com a zona de corte. (TAWAKOLI *et al.*, 2010); (WALKER, 2013); (BELENTANI *et al.*, 2014)

O MQL combina a funcionalidade da refrigeração com um consumo extremamente baixo de fluido de corte. Esta mínima quantidade de fluido é, muitas vezes suficiente para reduzir o atrito com a ferramenta e prevenir a aderência de material na mesma. Em outras palavras, as limitações das operações a seco podem ser superadas, em vários casos, com a aplicação desta técnica. (HADAD e SADEGHI, 2013)

Segundo Oliveira *et al.* (2012) a lubrificação com MQL é colocada diretamente na zona de corte. O ar carrega o óleo, o que provou ser um método eficiente de lubrificação. O aerossol do MQL é formado por micropartículas de óleo biodegradável, de modo que qualquer toxicidade é evitada. (PEREIRA *et al.*, 2015)

O sistema de MQL normalmente usa fluidos de corte não solúveis em água, especialmente os óleos minerais. Isso deve ser considerado, pois devido à redução da quantidade de lubrificantes usada, não há o impedimento de usar composições de alta tecnologia no campo de óleos de base e aditivos. Não é recomendado o uso de fluidos designados para a aplicação convencional, em virtude da ocorrência de atomização e vaporização, o que é prejudicial para a saúde humana. Velocidades de corte mais altas fazem o uso de óleos básicos, que possuem a viscosidade mais alta, com aditivos anti-névoa indispensáveis. (BIANCHI *et al.*, 2010)

Segundo Bianchi *et al.* (2010), há várias vantagens da aplicação da técnica de MQL quando comparada com o processo convencional:

- A razão entre a quantidade de fluido usada e o volume de peças usinadas é muito maior que na lubri-refrigeração convencional;
- Baixo consumo de fluido e a eliminação de um sistema para a sua circulação;

- Materiais de filtragem e dispositivos de reciclagem juntamente com a manutenção podem ser evitados;
- Baixa quantidade de óleo nos cavacos;
- As partes das peças usinadas são feitas quase a seco, assim, em vários casos não é necessário à limpeza da peça após a usinagem;
- A aplicação de biocidas e preservativos pode ser eliminada já que a quantidade de fluído usada é mínima.

2.8.1 Equipamento utilizado e técnicas de aplicação

Existem quatro partes principais que compõem o sistema de aplicação de MQL. A primeira delas é o bico aplicador que determina a quantidade de ar e de fluido serão aplicados. A seguinte é o tipo de saída, mangueiras, câmaras e bicos ou orifícios de saída determinarão onde o lubrificante será liberado para a atmosfera. O ferramental vem em terceiro lugar, e aqui se incluem os porta-ferramentas e as próprias ferramentas. E por fim tem-se a máquina, e, se for o caso, qualquer programação que controle o MQL é incluída aqui. (WALKER, 2013)

2.8.1.1 Bico aplicador

Qualquer sistema de MQL atomiza o lubrificante dentro de um fluxo de ar. Isto pode ser feito no próprio aplicador ou pouco antes da névoa ser entregue na saída. O primeiro tipo, onde a mistura ocorre no aplicador, é tipicamente chamado de sistema de canal único. Isso, pois a mistura desce por uma única mangueira ou canal. Quando o lubrificante e o ar são transportados separadamente, é chamado de sistema de canal duplo. Este é o sistema preferido na maior parte dos casos, já que ele apresenta maior uniformidade no tamanho das gotículas e no padrão de pulverização. (WALKER, 2013)

De acordo com a figura 06, pode-se verificar a diferença entre os dois tipos de sistema de aplicação para o sistema de MQL. O sistema está ilustrado para um processo de corte com ferramenta de geometria definida. Para o processo de retificação, a aplicação acontece de forma similar, sendo o porta-ferramenta e a ferramenta substituídos pelo bocal aplicador.

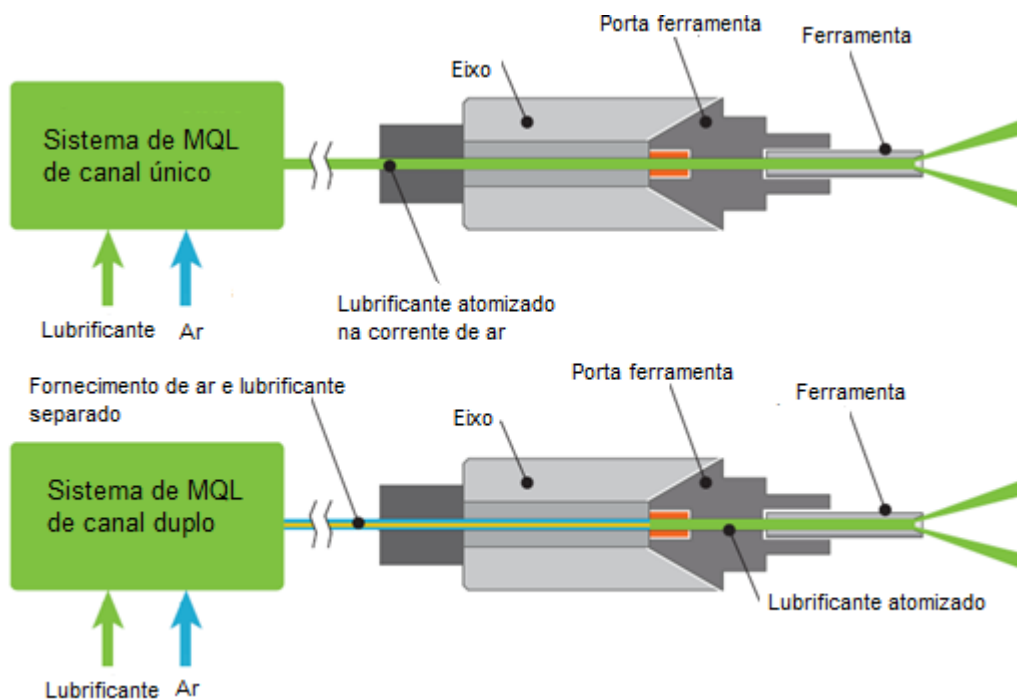


Figura 06: Sistemas de aplicação de MQL, adaptado de Walker (2013).

2.8.1.2 Aplicação

A eficiência do método de MQL depende de como o lubrificante chega até a interface de corte. Em algumas situações, somente o bico externo é suficiente, em outras, como quando a interface é de difícil acesso, se faz necessária a aplicação interna de fluido, ou através da ferramenta. (WALKER, 2013).

Entender essa diferenciação é importante devido aos custos e a dificuldade da total implementação do sistema interno. Ela também representa a eficácia de aplicação do método. No caso do método para o processo de retificação, a aplicação sempre é realizada de forma externa, com o bocal direcionado para a região de corte.

2.8.2 Aplicação de MQL na Retificação

A aplicação da mínima quantidade de lubrificação (MQL) no processo de retificação tem sido realizada relativamente com sucesso em pesquisas, porém ela ainda não é aplicada em escala industrial devido a alguns problemas que serão abordados no próximo tópico.

Sobre as técnicas de mínima quantidade de lubrificação pode-se citar o trabalho desenvolvido por Hadad *et al.* (2012) que consistiu em monitorar a temperatura durante o processo de retificação plana tangencial para um aço endurecido (AISI 100Cr6, com 50

HRc). Os métodos de lubri-refrigeração analisados foram o convencional, MQL e a seco, tanto para rebolo de óxido de alumínio vitrificado como para rebolo de CBN resinoide. O monitoramento da temperatura mostrou que a técnica convencional de lubri-refrigeração apresenta os menores valores, pois o resfriamento é promovido pelo volume de fluido utilizado. Já a retificação a seco apresentou valores mais elevados, pois não há nenhum método de arrefecimento presente. Para a aplicação de MQL, as temperaturas máximas são em torno de 50-115° menores para o rebolo convencional e 18-23° menores para o rebolo de CBN. Isso acontece, pois, os efeitos de lubri-refrigeração promovidos pela névoa de MQL reduzem tanto a força como a energia de corte. Além de uma parte do calor ser eliminada pela convecção das gotículas de óleo do MQL.

Concluiu-se que, sob condições específicas do tipo de fluido, posição do bocal aplicador e parâmetros de usinagem, é possível que a técnica de MQL seja competitiva com a técnica de lubri-refrigeração convencional. Também concluiu-se que o rebolo de CBN transfere uma menor quantidade de energia para a peça durante o processo. Ficando estes valores em 52% na retificação a seco, 46% para MQL e 14% para o método convencional. Enquanto o rebolo convencional transfere uma maior quantidade de energia, 82% para a retificação a seco, 73%-77% para o MQL e 36% com a técnica convencional.

A pesquisa de Tawakoli *et al.* (2010) realizou o estudo da posição do bico aplicador de MQL para a retificação do aço 100Cr6 com dureza de 50 ± 2 HRc. Concluiu-se que a posição do bico aplicador influencia muito a eficácia da penetração da névoa de MQL na camada limite de ar em torno do rebolo. Também provou-se que a distância do bocal aplicador é crítica para a penetração da névoa na zona de contato. Os melhores resultados foram obtidos quando o bico aplicador estava posicionado angularmente (10°-20°) com relação à posição do rebolo.

A pesquisa desenvolvida por Morgan *et al.* (2012) monitorou o desempenho da retificação de acabamento com o uso de diferentes técnicas de lubri-refrigeração com rebolos de óxido de alumínio. Realizou-se o estudo retificando três tipos de aço diferentes, EN31, M2 e EN8. Concluiu-se que o desempenho da técnica de MQL é bastante próxima à lubri-refrigeração convencional. A análise foi realizada em termos da temperatura durante o processo de retificação, com melhores resultados de análise térmica para a técnica de MQL aplicada na retificação do aço EN31.

Uma técnica foi desenvolvida por Belentani *et al.* (2014) para reduzir a quantidade de borra formada pelo método de MQL. Esta técnica consistiu em utilizar emulsão (óleo

dissolvido em água) com diferentes concentrações. Para avaliar o desempenho da mínima quantidade de lubrificação, foi realizada a comparação com a técnica de lubri-refrigeração convencional. O estudo foi efetuado para a retificação cilíndrica externa de mergulho do aço AISI 4340 utilizando rebolo de CBN com ligante vitrificado. Utilizou-se óleo vegetal nas concentrações 1:1, 1:3 e 1:5 e sem diluição na técnica de MQL e óleo solúvel semi-sintético para o método convencional.

O aumento da quantidade de água na técnica de mínima quantidade de lubrificação melhorou o parâmetro de rugosidade, atingindo valores próximos ao método convencional de lubrificação. Os valores mensurados para a circularidade seguiram o mesmo padrão dos resultados obtidos para a rugosidade. Os resultados do desgaste diametral do rebolo foram maiores para a lubri-refrigeração convencional, e menores com adição de água. Por fim as forças de retificação apresentaram os menores resultados para a técnica de MQL. Concluiu-se que a técnica de mínima quantidade de lubrificação com a adição de água é melhor do que quando se utiliza óleo puro, porém, ela ainda perde em qualidade para a técnica de lubri-refrigeração convencional.

É possível notar que as pesquisas com MQL para processos de retificação, sejam estes processos quais forem, tem se desenvolvido bastante, com resultados positivos. Porém ainda não é suficiente para que a técnica de lubri-refrigeração convencional seja superada e o MQL aplicado em processos de retificação na indústria de forma rentável e produtiva. Isso acontece por conta de alguns problemas que serão descritos nos tópicos seguintes.

2.9 Problemas na retificação com MQL

O processo de retificação com a aplicação da técnica de MQL apresenta dois problemas cruciais que impedem que ela seja aplicada com sucesso na indústria: Entupimento do rebolo ou empastamento; e acúmulo de calor na região de contato entre a ferramenta e a peça, o que acarreta em altas temperaturas de usinagem. Estes dois problemas são detalhados nos tópicos a seguir.

2.9.1 Entupimento da porosidade do rebolo

Cada um dos grãos abrasivo retira um cavaco que cujas dimensões são em função do tamanho da porosidade do rebolo. Estes cavacos ficam alojados nos poros, conforme

a figura 07, sendo removidos pelo sistema de limpeza (seja o jato refrigerante ou sistema independente de limpeza). Porém se o cavaco possui um tamanho maior que o poro do rebolo, ele será comprimido contra o mesmo, incrustando-se na superfície do rebolo, de tal maneira, que o jato responsável pela limpeza não conseguirá remove-lo. Isso pode provocar diversos problemas, como perda da capacidade de corte do rebolo, aumento da rugosidade, entre outros. (NUSSBAUM, 1988)

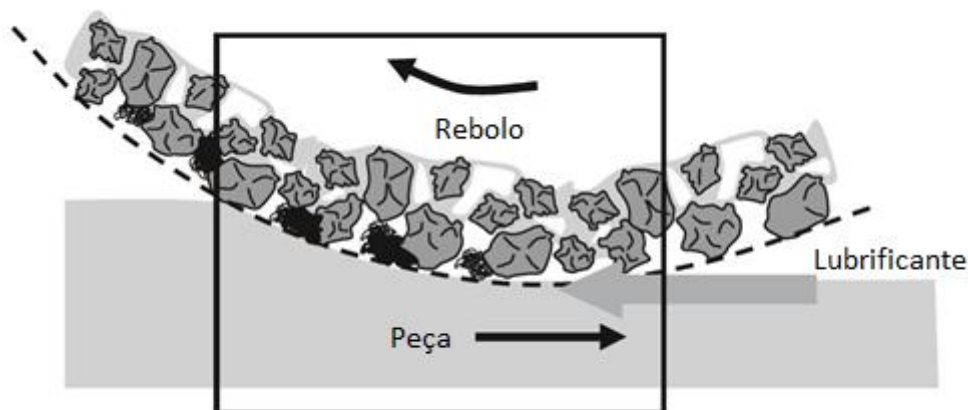


Figura 07: Cavacos alojados na porosidade do rebolo, adaptado de Klocke (2013)

Quando se utiliza a técnica de lubri-refrigeração com MQL na retificação, uma borra de óleo e cavaco pode se formar ao longo da superfície de corte do rebolo. Isso acontece, pois, os cavacos gerados no processo não são removidos de forma eficaz. Os mesmos misturam-se com o fluido de corte (formando uma borra) que acumula-se nas porosidades do rebolo. Essa borra é responsável por arranhar as peças, e piora tanto a rugosidade como os erros de circularidade, além de aumentar o consumo de potência e gerar maiores forças de corte para que a usinagem aconteça. Pois ela não permite que a quantidade de líquido que entra na zona de contato seja suficiente para a lubri-refrigeração eficaz do processo. (CAMERON *et al.*, 2010); (BELENTANI *et al.*, 2014)

A técnica de MQL não fornece a quantidade de fluido com pressão e vazão suficientes para que os cavacos formados durante a usinagem não fiquem alojados na porosidade do rebolo. E esta ineficiência faz com que a qualidade das peças obtidas utilizando esta técnica de lubri-refrigeração seja inferior aos outros métodos já consolidados na indústria de fabricação.

2.9.2 Aumento da temperatura na usinagem com MQL

A energia mecânica é introduzida no processo de retificação pelo movimento relativo entre o rebolo e a peça. Esta energia é transformada quase totalmente em calor, levando ao aumento de temperatura na região de contato entre a peça e a ferramenta. A transformação de energia mecânica em energia térmica se dá pelo atrito e pela deformação. (MARINESCU *et al.*, 2007)

Os processos de retificação requerem uma alta quantidade de energia por unidade de volume de material removido. Virtualmente, essa quantidade de energia é convertida em calor que se concentra na região de corte. As altas temperaturas produzidas podem causar diferentes tipos de danos térmicos às peças produzidas. (MALKIN e GUO, 2008)

O uso de lubrificantes influencia o controle de calor gerado no processo de duas formas: a primeira delas é reduzindo o atrito entre as partes em movimento durante a usinagem, impedindo assim que mais calor seja gerado. Pelo efeito refrigerante retirando o calor já gerado da interface de corte, impedindo que ele se acumule. (MARINESCU *et al.*, 2007)

Assim, se a quantidade de lubrificante não for suficiente, seja para reduzir o atrito, seja para retirar o calor gerado pelo corte, uma alta temperatura pode ser gerada na região de corte. Esta favorece danos térmicos, problemas de precisão dimensional, entre outros. A técnica de mínima quantidade de lubrificação não fornece meios para a retirada do calor gerado. Para evitar que este calor deteriore o produto usinado, se faz necessário o uso de técnicas adicionais para a refrigeração do processo.

2.9.2.1 Danos térmicos no processo de retificação

A interação entre os grãos abrasivos e a peça é bastante intensa. A energia total gerada pelo processo fica em torno de 2 a 20 vezes mais que os outros processos de usinagem convencionais. Isso faz com que a energia requerida por unidade de material removido seja completamente transformada em calor, o qual fica restrito a zona de corte. As temperaturas geradas podem ser deletérias, causando danos térmicos tanto na superfície da peça retificada como na sub-superfície, acarretando a têmpera e a re-têmpera não desejadas. Também pode ocorrer a formação de martensita revenida, e a geração de tensões residuais não desejadas de tração o que reduz a resistência à fadiga do componente. (BIANCHI *et al.*, 2010); (DINIZ *et al.*, 2013)

Para a retificação, o aspecto mais importante da integridade superficial está associado aos danos térmicos causados pelo excesso de temperatura na usinagem. (MALKIN e GUO, 2008)

De maneira geral, cerca de 85% do calor gerado pelo processo de retificação é absorvido pela peça. Toda essa quantidade de calor pode acarretar em alterações estruturais, erros de forma, geométricos e dimensionais. Isso é problemático, pois em geral a retificação é um processo de acabamento, e nesta etapa da fabricação a peça já passou por processos de fabricação e recebeu tratamento térmico, possuindo um alto valor agregado. (DINIZ *et al.*, 2013)

Também chamada de descoloração, a queima visível ou oxidação pode ser detectada com um exame visual simples. Este problema acontece devido à oxidação da superfície da peça quando exposta a altas temperaturas. Entretanto, a ausência de descoloração não implica, necessariamente, que a superfície não tenha sido aquecida excessivamente. A peça pode ter sofrido com o superaquecimento sem apresentar nenhum sinal visível de queima. A presença deste dano térmico pode ser detectada através de análises da tensão residual presente ou da análise da microdureza da superfície da peça. (ANON, 2003)

A remoção da camada oxidada causada pela queima na retificação cilíndrica ocorre pelo *spark-out* no final de cada ciclo de avanço de retificação. Porém a remoção da camada superficial e seu efeito cosmético não implicam na remoção da queima que ocorreu no interior na peça retificada. (MALKIN e GUO, 2008)

As medições de microdureza em regiões onde a queima ocorreu mostram que este fator é acompanhado da re-austenitização da superfície, seguido pela formação de uma camada endurecida, de martensita revenida como resultado do revenimento. A camada de martensita pode ser identificada como uma fase branca, que usualmente ocorre de forma fragmentada. (ANON, 2003)

A ocorrência de queima nos aços pode ser mostrada como virtualmente coincidente à temperatura de usinagem da peça. Quando é excedida a temperatura de austenitização do material, ocorre a queima do material. É importante para a vida do componente evitar que esse tipo de fenômeno aconteça pois ele pode afetar o seu desempenho durante a aplicação. (ANON, 2003)

O excesso de temperatura durante a retificação também pode ocasionar transformações de fase no material. Exemplos disso são a formação de têmpera (amolecimento) ou de martensita revenida (endurecimento), se a temperatura for elevada

o suficiente e esta elevação durar o tempo necessário para que ocorra a re-austenitização do material. A formação de martensita revenida é consequência do resfriamento brusco do material que está passando pela fase de re-austenitização. Já a têmpera ocorre pelo processo de difusão dos átomos de carbono devido ao calor à que a peça está exposta. (MALKIN e GUO, 2008)

2.9.3 Retificação com MQL e refrigeração

Para contornar o excesso de calor causado pelas dificuldades de refrigeração (arrefecimento) durante a aplicação da técnica de MQL algumas técnicas foram estudadas e serão comentadas a seguir.

Uma alternativa para este problema é a aplicação combinada do MQL com fluidos gasosos em baixa temperatura, conforme o trabalho desenvolvido por Sanchez *et al.* (2010), que consistiu na aplicação de CO₂ em baixa temperatura com o MQL aplicados simultaneamente em bocais separados. A técnica proposta foi estudada na retificação plana do aço AISI D2 utilizando rebolos de óxido de alumínio. O método foi comparado com o MQL utilizando emulsão. A análise da eficácia foi realizada em termos do desgaste do rebolo, forças de retificação, rugosidade e temperatura. Obtiveram-se ótimos resultados para o desgaste do rebolo utilizando o sistema combinado proposto, com a relação G na faixa de 3-4 para diferentes condições de usinagem, principalmente para condições severas de usinagem. A qualidade superficial se manteve ligeiramente melhor para o método proposto e as forças de retificação se mantiveram próximas para ambas as situações estudadas. Concluiu-se que as temperaturas em ambas as situações se mantiveram em níveis aceitáveis e não foi detectada a presença de danos térmicos, mostrando que a técnica proposta apresenta melhores resultados que o método tradicional de MQL.

Há também a técnica desenvolvida por Saberi *et al.* (2016) que consistiu na aplicação de MQL com ar comprimido em baixa temperatura em um mesmo bocal. Esta técnica também é chamada de CAMQL. Aplicou-se esta técnica para a retificação plana do aço de médio carbono CK45 utilizando rebolos de óxido de alumínio. O método proposto foi comparado com as técnicas de lubri-refrigeração convencional e a seco em termos de rugosidade e forças de corte.

Foi possível concluir que as forças de retificação foram menores para o método de CAMQL proposto para o trabalho, exceto em uma condição específica. O acabamento

do método de CAMQL foi inferior ao método de lubri-refrigeração convencional, apresentando resultados de rugosidade mais altos que aqueles obtidos com a lubrificação convencional. No geral, concluiu-se que a técnica de CAMQL pode ser aplicada com sucesso para a retificação de aços dúcteis.

2.10 Variáveis de saída no processo de retificação

Este tópico apresenta as variáveis de saída que foram utilizadas no presente trabalho, como circularidade, rugosidade, desgaste e relação G, forças e potência de corte e microdureza. O tópico conta com a definição de cada um dos itens e equacionamento, quando houver.

2.10.1 Precisão Dimensional

A retificação é capaz de gerar uma boa precisão dimensional e tolerâncias apertadas podem ser obtidas para o tamanho, forma e textura da superfície. Após o processo de retificação, as peças podem apresentar diferenças de tamanho. Isso pode acontecer devido às forças de retificação, deflexões térmicas ou mecânicas, desgaste do rebolo e temperatura de contato. (ROWE, 2014)

As forças geradas durante a retificação causam deformações elásticas e deflexões na máquina, no rebolo e na peça. As deflexões levam a imprecisões dimensionais, como é o caso da circularidade. As imprecisões dimensionais também podem ser causadas pelas vibrações. (MALKIN e GUO, 2008)

A deflexão na direção de avanço do rebolo tende a causar alterações na forma das peças, entretanto boa parte deste erro pode ser corrigida com a utilização do tempo de *spark-out*. Já a deflexão elástica no ciclo de retificação está sujeita a um período de tempo, do qual depende o tempo de *spark-out* para a minimização da deflexão e consequentemente dos erros dimensionais. (MALKIN e GUO, 2008)

A deflexão periódica causada pela vibração é outro fator que pode afetar a precisão dimensional do processo de retificação. Nos processos de retificação existem dois tipos diferentes de vibração: a forçada e a auto excitada. A vibração forçada é causada por distúrbios periódicos externos ao processo de corte, como por exemplo rebolos mal balanceados, motores elétricos, sistemas hidráulicos, entre outros. Já a vibração auto

excitada pode ser associada aos modos de vibração natural das estruturas das máquinas. Ambos os tipos de vibração causam perdas dimensionais. (MALKING e GUO, 2008)

Para mensurar estas perdas dimensionais é preciso mensurar a precisão dimensional das peças fabricadas através de parâmetros que avaliem a forma da peça usinada, e a circularidade é um meio para realizar esta medição.

2.10.2 Rugosidade

Rugosidade e tolerância geométrica e dimensional estão intimamente ligadas, e, geralmente é necessário especificar um acabamento mais suave, a fim de manter uma tolerância mais fina na produção. (MALKIN e GUO, 2008)

A qualidade da superfície pode ser considerada consistente em dois aspectos: integridade superficial e topografia de superfície. A integridade superficial está associada com alterações mecânicas e metalúrgicas da camada superficial devido à usinagem. Já a topografia da superfície se refere à geometria da superfície usinada, que é usualmente caracterizada pela rugosidade. Existem outros parâmetros para caracterizar a geometria da superfície, como por exemplo, o perfil da superfície, que também podem ser de interesse. (MALKIN e GUO, 2008)

Existe uma diferença entre qualidade e acabamento de superfície. O acabamento é caracterizado por ser uma condição geométrica, enquanto o termo qualidade refere-se também ao estado físico da camada superficial. Este implica na sua dureza, queimas locais, recozimento local, trincas, alterações na estrutura cristalina devido às tensões que surgem como resultado da remoção de material, entre outras razões. (GHENIS *et al.*, 1967)

O estado físico geométrico da superfície é caracterizado por graus de rugosidade (micro irregularidades) da superfície após a usinagem. A altura das irregularidades depende da forma da aresta de corte da ferramenta, da velocidade de avanço, do tamanho do grão no rebolo, velocidade de corte, vibração da ferramenta, entre outros. (GHENIS *et al.*, 1967)

Para se distinguir entre ondulações (comprimento de onda longa) e rugosidade (comprimento de onda curta), os valores de saída são filtrados para remover a variação do comprimento de ondas longas quando se deseja a rugosidade, ou inversamente se o objetivo é medir as ondulações. (SHAW, 1996)

Dos três perfis de rugosidade, a média aritmética R_a é a mais usada, pois é de mais fácil interpretação. (SHAW, 1996)

2.10.3 Desgaste diametral do rebolo

Existem três mecanismos principais de desgaste do rebolo: (a) fratura do ligante, levando à perda completa dos grãos abrasivos; (b) fratura de grãos ou fratura de parte dos grãos, deixando uma parte razoavelmente nítida (afiada) do grão mantida no rebolo; e, (c) desgaste por atrito dos grãos, processo pelo qual um plano de desgaste é formado sobre a superfície do grão, conforme ilustra-se nas figuras 08 e 09. (SHAW, 1996)

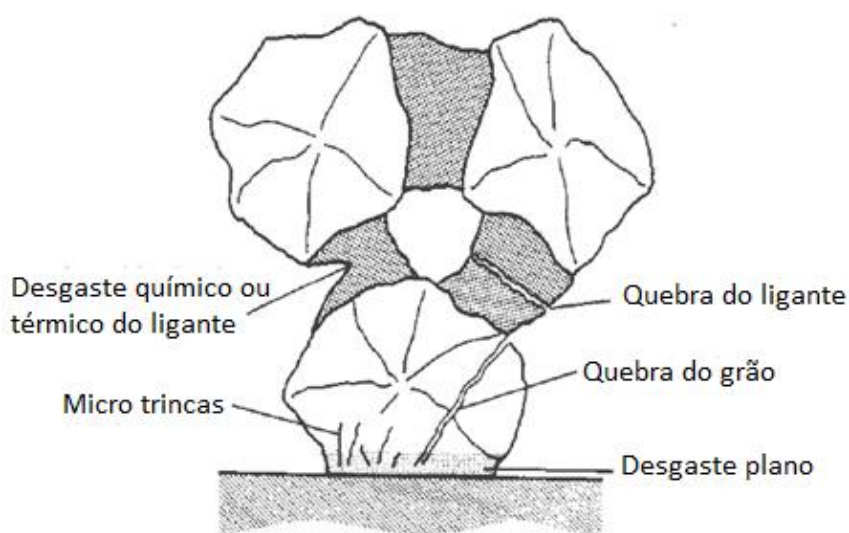


Figura 08: Modos de desgaste do rebolo, adaptado de Klocke (2013)

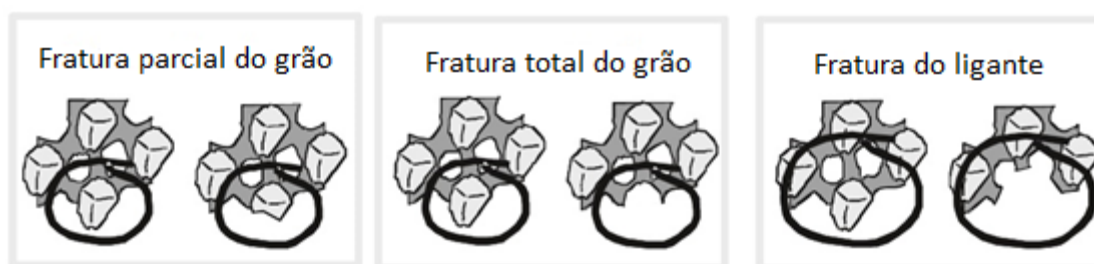


Figura 09: Tipos de fratura, adaptado de Klocke (2013)

O desgaste causado pelo atrito é aquele que ocorre ‘átomo por átomo’ devido às interações dos grãos com a peça. Estas interações são tanto físicas como químicas e podem ser bastante complexas. Podem envolver fraturas mecânicas (abrasão) em escala microscópica e deformação plástica. O calor gerado pelo atrito do processo de retificação

e a formação de cavaco durante o mesmo podem levar a uma difusão localizada, degradação química e decomposição dos grãos e até mesmo ao seu derretimento. A dureza do grão é um fator chave para o controle no desgaste causado pelo atrito. (JACKSON e DAVIM, 2011)

Considerando que a dureza do rebolo fornece uma medida para a tendência de desgaste do grão em escala atômica, a tenacidade à fratura (ou seu termo inverso ‘friabilidade’) fornece uma medida para a perda de abrasivo devido à ruptura por fratura ou estilhaçamento, tanto por micro-fratura como por macro-fratura. O grau de friabilidade depende das propriedades do grão, tais como tamanho, morfologia cristalina, impurezas, inclusões e trincas pré-existentes e também a sua forma. Este grau também depende da natureza das forças aplicadas aos grãos durante o processo. (JACKSON e DAVIM, 2011)

Idealmente o grão deve se fraturar perdendo um pequeno volume de abrasivos, processo chamado de micro-fratura. A porção restante do grão que não foi fraturada deve manter-se afiada e com capacidade de corte. Se o grão for muito duro em relação ao ligante ou a força de interação da retificação com o grão for extremamente elevada, então o grão pode sofrer quebra total sem fazer nenhum trabalho útil. No caso do ligante ser suficientemente forte para reter o grão, mas as forças de retificação forem muito altas ou se o grão for grande, então a fratura é mais uma perda grosseira dos grãos por macro-fratura. (JACKSON e DAVIM, 2011)

Por outro lado, se o grão for menos duro que o ligante e/ou sujeito a um desgaste mecânico elevado, ocorre então um processo chamado de *glazing*, que pode ser definido como um fenômeno quando há uma falha nos grãos abrasivos para realizar a auto-afiação (processo onde ocorrem micro e macro fraturas nas arestas cortantes do grão abrasivo, promovendo assim a criação de novas arestas de corte, mantendo o grão afiado) e com essa falha os grãos sofrem um desgaste plano. Este desgaste eleva as forças de retificação e aumenta as temperaturas na interface de corte. Ele também pode aumentar as vibrações e acarretar em empastamento da superfície do rebolo. Este processo pode ser caracterizado pelo aumento da reflexão luminosa da superfície no rebolo. (MARINESCU *et al.*, 2004); (JACKSON e DAVIM, 2011)

Uma típica sequência de desgaste de grãos descrita por Jackson e Davim (2011) envolve o embotamento dos grãos devido ao atrito para depois recuperar a sua afiação através da fratura até que a falha do ligante libere o grão do rebolo.

O desgaste geralmente é mensurado pela diminuição do raio do rebolo depois de um determinado período de usinagem. Para processos de retificação é inaceitável que

ocorra a queima da peça, resultante da formação de planos de desgaste. Para que isso seja evitado, é necessário dresser o rebolo frequentemente durante a operação. O estado ideal para o desgaste do rebolo é uma quantidade limitada de desgaste controlado por micro-fraturas. Para rebolos de CBN, a área desgastada deve ser no máximo 4-5% da área superficial do rebolo, este valor é alto devido à sua alta difusividade térmica ou habilidade de remover calor da região de corte. (SHAW, 1996); (JACKSON e DAVIM, 2011)

O comportamento da fratura também é importante em termos da reação dos grãos ao impacto durante a dressagem. Isto é especialmente verdadeiro para rebolos de CBN com ligante vitrificado para alta produção. (JACKSON e DAVIM, 2011)

Um índice de desempenho normalmente usado para caracterizar a resistência ao desgaste é chamado de razão de retificação ou relação G, conforme a equação (10), que é a razão entre o volume de material removido da peça, pelo volume de rebolo gasto para realizar esta operação. (JACKSON e DAVIM, 2011)

$$G = \frac{v_w}{v_s} \quad (10)$$

Onde G é a razão de retificação, v_w é o volume total de material removido e v_s é o volume total de material gasto do rebolo.

Se o desgaste por fratura do rebolo é o mecanismo de desgaste predominante, após um determinado tempo de usinagem, o rebolo deve ser fixado em uma posição diferente para evitar que ele perca a sua precisão durante o processo de fabricação. O rebolo nunca se desgasta de forma homogênea, ficando sempre ovalado, o que acarreta em perda de precisão dimensional nas peças que estão sendo fabricadas. No caso da perda de afiação (grãos arredondados) ser o fenômeno predominante, e os grãos não conseguirem se desprender do ligante, o rebolo poderá causar danos térmicos à peça se ele não for dresser corretamente. (DINIZ *et al.*, 2013)

2.10.4 Forças de corte

A força de corte (F_t), também chamada de força tangencial, atua na direção tangente à circunferência do rebolo. Ela representa a força de reação da peça que está sendo usinada, oferecendo resistência ao movimento rotativo do rebolo. Já a força radial (F_y) é

determinada pela profundidade do mergulho do rebolo em cada passe. Esta força faz com que os grãos abrasivos atuem contra a peça, retirando assim o cavaco pelo processo de abrasão. Por fim temos a força paralela ao eixo do rebolo (F_x), que é responsável pela potência necessária para o avanço transversal (NUSSBAUM, 1988).

De acordo com Jackson e Davim (2011) as forças de corte são alteradas pelo desgaste do rebolo e este padrão de alteração pode ser dividido em quatro fases:

- A primeira fase ocorre quando há um aumento abrupto das forças até um pico, então elas retornam para o valor de estado inicial. Esta fase é caracterizada por uma taxa de desgaste elevada, devido aos efeitos da dressagem;
- Na segunda fase as forças são constantes e o fluxo de calor para os grãos e para a peça também é constante. Esta fase coincide com a auto-afiação do rebolo. A ruptura do ligante normalmente não acontece nesta fase, porém a força da ligação desempenha um papel importante. Pois ela determina a magnitude da carga que o grão pode suportar sem fraturar;
- Na terceira fase há um acúmulo progressivo na energia e forças de retificação. Os mecanismos decorrentes da fase II fazem com que o grão assuma uma geometria estável e uma forma que é difícil de fraturar, fazendo assim com que o rebolo fique embotado. Neste ponto os grãos estão propensos ao superaquecimento e o processo se torna ineficiente. À medida que o grão perde a capacidade de corte e o atrito entre os grãos e a peça aumenta e a taxa de remoção de material permanece constante, a componente normal da força de retificação aumenta a uma taxa muito mais elevada que a componente tangencial;
- Por fim, as taxas de alterações das forças se tornam menores e os efeitos da vibração se tornam evidentes. Nesta fase as taxas de desgaste são prejudiciais à um processo economicamente viável.

2.10.5 Potência de corte

A potência de corte (P) pode ser estimada a partir da equação (11).

$$P = F_t \cdot V_s \quad (11)$$

Onde P é a potência de corte, em [W], F_t é a componente tangencial da força de corte, em [N] e V_s é a velocidade de corte, em [m/s].

2.10.6 Microdureza

Segundo Rowe (2014) os danos térmicos de re-endurecimento da superfície ocorrem quando as temperaturas de retificação excedem a faixa de 750 °C. Este tipo de dano térmico é potencialmente grave, pois uma camada de martensita não revenida de elevada dureza e quebradiça é formada na superfície da peça. A presença desta camada endurecida aumenta a resistência ao desgaste, porém a fadiga força estas partículas endurecidas a se separarem. Isto pode acarretar uma falha catastrófica no material.

Marinescu *et al.* (2007) define o re-endurecimento da superfície como o aquecimento de uma superfície já endurecida, até a transformação da mesma seguido de têmpera. Este tipo de dano aumenta a dureza superficial da peça para valores não desejados.

Uma maneira da identificação deste problema é a medida da microdureza da superfície da peça. Segundo Marinescu *et al.* (2007) a microdureza é a medição da dureza com a utilização de um indentador muito pequeno.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para a realização dos ensaios, bem como a obtenção das variáveis de saída utilizadas para a análise do processo (rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo e potência de corte).

Também comenta-se sobre os parâmetros de usinagem utilizados, bem como a montagem do banco de ensaios, a sequência em que os testes foram realizados, equipamentos e materiais utilizados.

3.1 Equipamentos e materiais utilizados

Este tópico se destina a descrever os equipamentos utilizados para a realização dos ensaios bem como suas partes constituintes e os parâmetros de usinagem utilizados. Ele também descreve todos os materiais utilizados para a realização de todos os testes.

3.1.1 Retificadora cilíndrica externa

O processo utilizado para o desenvolvimento do presente estudo foi o de retificação cilíndrica externa de mergulho. Realizado utilizando-se a retificadora CNC da marca Sulmecânica modelo RUAP 515H, que conta com comando numérico no eixo de avanço do rebolo. A retificadora possui todo o sistema de monitoramento e aquisição dos dados elétricos (potência de corte, emissão acústica e vibração) gerados pelos ensaios. Este sistema foi desenvolvido pelo Laboratório de Processamento e Análise de Sinais (LADAPS) em parceria com o Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA) ambos da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, UNESP, *campus* Bauru.

A retificadora também possui o sistema de aplicação de fluido de corte convencional que é constituído de bocal aplicador, mangueiras, bomba e reservatório. A retificadora possui um motor elétrico responsável pela rotação tanto da peça como do rebolo. O sistema de dressagem utilizado também é parte do equipamento.

A operação de retificação foi realizada variando a velocidade de avanço do rebolo em 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min para diferentes testes. Já a velocidade de corte foi mantida em 33 m/s para todos os ensaios realizados. O tempo de *spark-out* foi

mantido em 7,5 s e a usinagem foi realizada em 70 passes de 100 μm cada, removendo assim um volume de 8884 mm^3 de cada uma das amostras.

Estes parâmetros foram escolhidos com base em trabalhos anteriores realizados pelo Grupo de Pesquisa de Usinagem por Abrasão da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, *campus* Bauru. A velocidade de avanço do rebolo foi variada para que fosse possível analisar diferentes condições de usinagem, de branda a severa, e analisar a influência deste parâmetro nos resultados obtidos.

A dressagem foi realizada após cada teste para garantir a integridade de rebolo, e não ter desgaste excessivo, prejudicando assim a qualidade final das amostras. A dressagem do rebolo foi realizada utilizando um dressador conglomerado em 20 passes, de 2 μm até completar 40 μm , sempre com lubri-refrigeração abundante, para evitar danos ao dressador e ao rebolo. Estes valores garantem a remoção do desgaste do rebolo e permitem que todos os testes sejam realizados com a mesma condição da ferramenta de corte.

3.1.2 Sistema de aplicação convencional de fluido

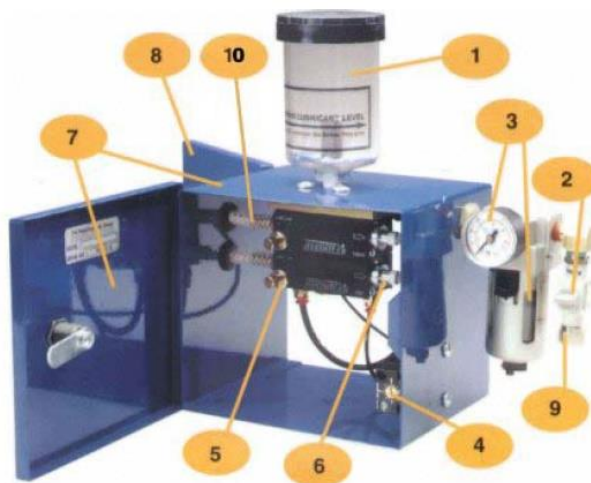
O sistema de aplicação convencional de fluido de corte está presente no equipamento e é constituído por dois bocais circulares de 6,3 mm de diâmetro cada. As mangueiras são flexíveis e permitem o posicionamento ideal em cada um dos ensaios.

O sistema também conta com um reservatório onde o fluido utilizado para a aplicação convencional ficou armazenado durante toda a realização dos ensaios. Este reservatório possui um sistema de canaletas para o armazenamento dos detritos sólidos presentes no fluido de corte. A aplicação do fluido é possível através da ação da bomba responsável por levar o fluido de corte do reservatório até os bocais aplicadores.

Para a aplicação convencional do fluido de corte, utilizou-se uma vazão de 550 L/h. Os bocais ficaram sempre direcionados para a interface de corte a fim de se obter uma performance ideal do fluido durante a aplicação.

3.1.3 Sistema de MQL

A aplicação de fluido de corte foi realizada pelo aplicador de MQL Accu-Lube 79053D, que pode ser visto de forma detalhada na figura 10.



- 1 – Reservatório do fluido (300 ml);
- 2 – Registro de acionamento;
- 3 – Manômetro e filtro de ar;
- 4 – Gerador de frequência para emissão do fluido;
- 5 – Bomba pneumática para ajuste individual (duas saídas de ar comprimido);
- 6 – Ajuste do fluxo de fluido;
- 7 – Estrutura metálica;
- 8 – Base para fixação;
- 9 – Entrada de ar comprimido;
- 10 – Saída de ar comprimido e fluido (separadamente) para o bocal.

idows

Figura 10 : Aplicador de MQL, fonte: Alves (2007)

Para realizar a aplicação, foi desenvolvido um bocal específico para isto. O qual conta com suporte próprio e está direcionado para a interface de corte, como pode ser visto na figura 11.

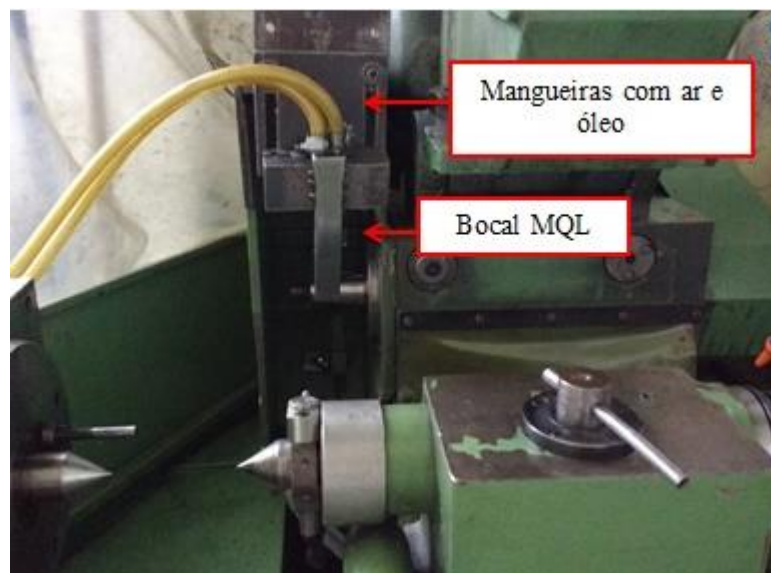


Figura 11 : Sistema de aplicação de MQL

A aplicação de fluido através do método de mínima quantidade realizou-se com vazão de 120 mL/h, ajustado diretamente no aplicador, com pressão de 6 bar na saída do bocal.

3.1.4 Sistema de resfriamento

Para o desenvolvimento do sistema de resfriamento utilizado no sistema CAMQL, alguns testes preliminares foram realizados. O primeiro deles consistiu na utilização de pastilhas de peltier para o resfriamento do ar comprimido. Porém a utilização deste sistema não satisfaz as exigências para a aplicação do sistema de CAMQL devido às limitações físicas.

Em seguida, testou-se um sistema de trocador de calor imerso em um fluido de água e álcool, com concentração de 30%. Este sistema foi colocado em uma atmosfera de -17°C . Porém a configuração da tubulação do trocador de calor utilizado permitia que a umidade condensada do ar se acumulasse nas curvas do trocador. Acarretando assim o congelamento e posterior obstrução do sistema.

Para solucionar este problema optou-se pela utilização de um tubo de vórtice, que pode ser visto na figura 12, como sistema de resfriamento do ar comprimido. Porém, durante os testes preliminares com o mesmo, também verificou-se que a umidade do ar congelava à saída do bocal. Portanto, optou-se pela utilização de um secador de ar comprimido antes da entrada do tubo de vórtice.



Figura 12: Tubo de vórtice

3.1.5 Sistema de CAMQL

O sistema de aplicação de CAMQL é o mesmo utilizado para o sistema de MQL, as suas únicas diferenças são o bocal, o tubo de vórtice que resfria o ar comprimido, e a presença de um secador de ar da marca Metalplan conforme ilustrado na figura 13.

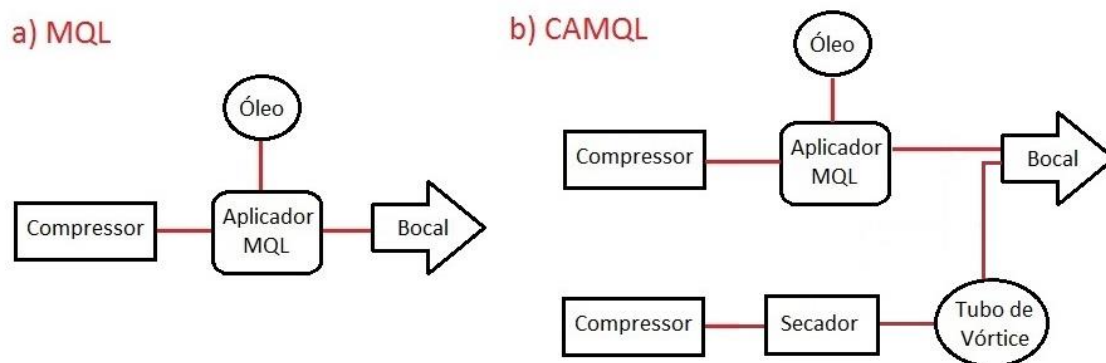


Figura 13 : Diferença de aplicação de CAMQL e MQL.

O bocal utilizado para a aplicação de CAMQL é responsável pela mistura do ar comprimido em baixa temperatura com a névoa proveniente do sistema de MQL. O bocal pode ser visto na figura 14.

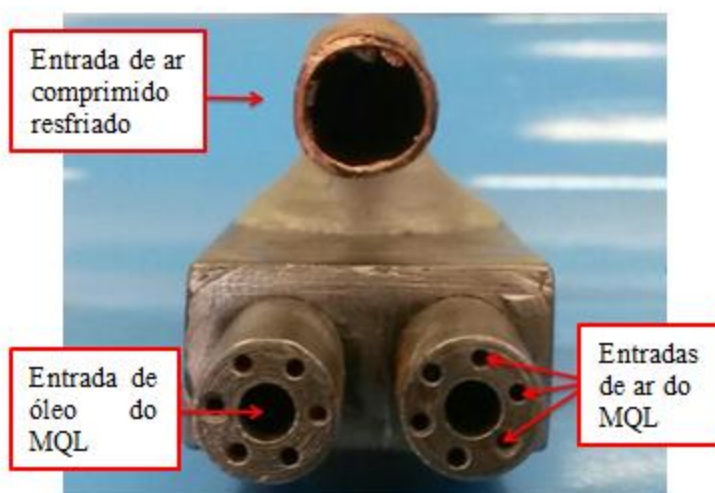


Figura 14 : Bocal de CAMQL

O bocal também conta com suporte, além de isolamento térmico para evitar que a mistura se aqueça antes de ser pulverizada na região de corte, conforme a figura 15.

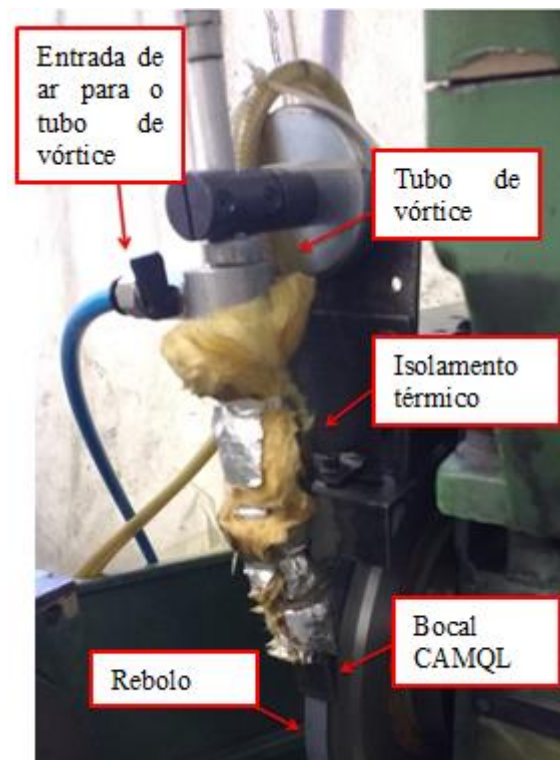


Figura 15: Bocal aplicador de CAMQL montado.

Foi utilizado um secador de ar antes da entrada do tubo de vórtice a fim de se evitar o congelamento da umidade do ar em algum ponto do sistema. Para a aplicação da técnica de mínima quantidade de fluido combinado com ar comprimido resfriado utilizou-se a pressão de 6 bar e vazão de 120 mL/h na saída do bocal aplicador. O bocal foi direcionado para a interface de corte durante toda a realização dos ensaios. A temperatura de saída do sistema foi mantida em 0°C, pois nesta temperatura não há congelamento ou obstruções na saída do bocal aplicador.

3.1.6 Fluidos de corte

Para a aplicação de fluido convencional foi utilizado o óleo emulsionável semi-sintético QUIMATIC ME-1, em emulsão de 2,5% em água. Este óleo possui alta lubricidade, com uma vida prolongada, possui uma ótima resistência ao apodrecimento, não ataca os componentes do equipamento. Ele também é pré-emulsionado, possui boas propriedades de refrigeração, tem propriedades anticorrosivas e é isento de nitrito, boro, cloro e enxofre. O fluido foi cedido pela empresa Quimatic Tapmatic do Brasil.

Já para a aplicação de MQL e CAMQL foi utilizado o fluido Accu-Lube LB 1100, produto adequado para metais ferrosos e não ferrosos, possui base vegetal e aumenta a vida da ferramenta. O fluido foi cedido pela empresa ITW Chemical Products Ltda.

3.1.7 Corpos de prova

Os corpos de prova foram confeccionados de aço AISI 4340, com dureza de 54 ± 2 HRc, em formato anelar, com 54 mm de diâmetro externo, 30 mm de diâmetro interno e 4 mm de espessura. A composição química do aço utilizado se encontra na tabela 01 e as suas propriedades na tabela 02.

Tabela 01: Composição química do aço AISI 4340, fonte: Alves (2007)

C	0,4%	S	0,011%	Al	0,016%
Mn	0,77%	Cr	0,81%	Cu	0,18%
P	0,026%	Ni	1,71%	Co	0,04%
Si	0,30%	Mo	0,22%	Fe	Balanço

Tabela 02: Propriedades mecânicas do corpo de prova, fonte: Nunes e Kreischer (2010)

Limite de resistência à tração [MPa]	Limite de escoamento [MPa]	Ductilidade em % de alongamento para 50 mm	Aplicações típicas
980-1960	895-1570	21-11	Buchas, tubulações em aeronaves.

3.1.8 Rebolo

O rebolo utilizado para os ensaios foi de CBN com ligante vitrificado do tipo 14A1, de liga com dureza R, granulometria de 100 mesh, considerado de granulometria fina, com 350 mm de diâmetro externo, 127 mm de diâmetro interno, 15 mm de largura e 5 mm de camada. O rebolo de código SNB151Q12VR2 foi doado pela Nikkon Ferramentas de Corte Ltda.

3.2 Sequência para a realização dos ensaios

Foram realizados 27 ensaios, sendo 9 deles para o método de lubri-refrigeração convencional, com velocidades de avanço de 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min.

Foram feitas 2 repetições para cada uma das amostras. Outros 9 ensaios para o método de lubri-refrigeração com mínima quantidade de lubrificação, com velocidades de avanço de 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min, com 2 repetições cada. Por fim, 9 ensaios para o método de lubri-refrigeração de CAMQL, com velocidades de avanço de 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min, com 2 repetições para cada ensaio.

A seguir, tem-se uma ilustração esquemática da sequência de realização dos ensaios na figura 16.

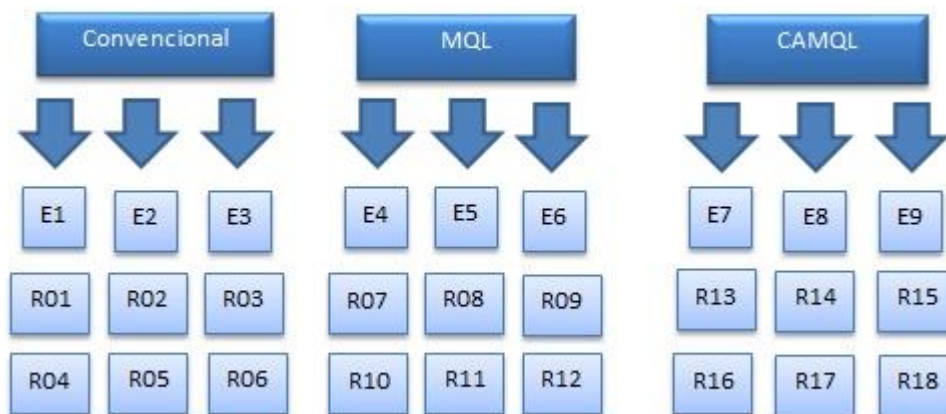


Figura 16 : Banco de ensaios

3.3 Caracterização das variáveis de saída

Este tópico descreve como foram realizadas as medições das variáveis de saída e também os equipamentos e metodologia utilizada para a aquisição destes dados.

3.3.1 Medição da rugosidade

A rugosidade média aritmética ou Ra foi escolhida para a análise da qualidade superficial das amostras obtidas através dos ensaios realizados com diferentes condições de usinagem. A quantificação deste parâmetro foi realizada utilizando um rugosímetro Surtronic 3+ da marca Taylor Hobson, disponível no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia de Bauru.

Para a análise foram realizadas cinco medições em cada uma das amostras, medidas estas tomadas com uma distância de aproximadamente 70° umas das outras. Foi utilizado um cut-off ou comprimento de amostragem de 0,25 mm, esse valor foi utilizado devido à largura das amostras, a qual impossibilitou a utilização de um maior valor de

cut-off, e um comprimento de medição (L_m) de 1,25 mm. Em seguida os dados obtidos passaram por uma análise estatística para a verificação da repetibilidade dos dados amostrais e estão ilustrados no capítulo 4 do presente trabalho.

3.3.2 Medição da circularidade

A circularidade foi escolhida como parâmetro de análise de forma das amostras. As medidas foram realizadas utilizando um circularímetro Tayround 31C da marca Taylor Hobson, disponível no Laboratório de Usinagem por Abrasão da Faculdade de Engenharia de Bauru.

A fim de verificar a repetibilidade das medidas, elas foram tomadas em três posições diferentes, com uma distância de 0,5 mm uma da outra. O software que acompanha o equipamento fornece um perfil da forma real da peça em escala micrométrica, acompanhado de outros parâmetros.

3.3.3 Medição do desgaste diametral do rebolo

O desgaste diametral do rebolo foi escolhido como parâmetro para a verificação da eficiência do processo em termos de aproveitamento e vida da ferramenta e foi realizado com a técnica de impressão de perfil, a qual consiste em desgastar um cilindro maciço de material dúctil e de fácil usinagem, com um volume fixo de material removido a fim de que o desgaste do rebolo fique marcado no corpo de prova. Para o presente trabalho o material do corpo de prova para o desgaste do rebolo foi o AISI 1020. O desnível que foi impresso no cilindro é então medido com o auxílio do rugosímetro, utilizando o próprio apalpador do rugosímetro e não um perfilometro, já que o anel de borracha presente no apalpador não causa erros durante a medição, conforme a figura 17, e tem o perfil de desnível ilustrado conforme a figura 18. Nela, a diferença “a” é a medida do desgaste do rebolo.

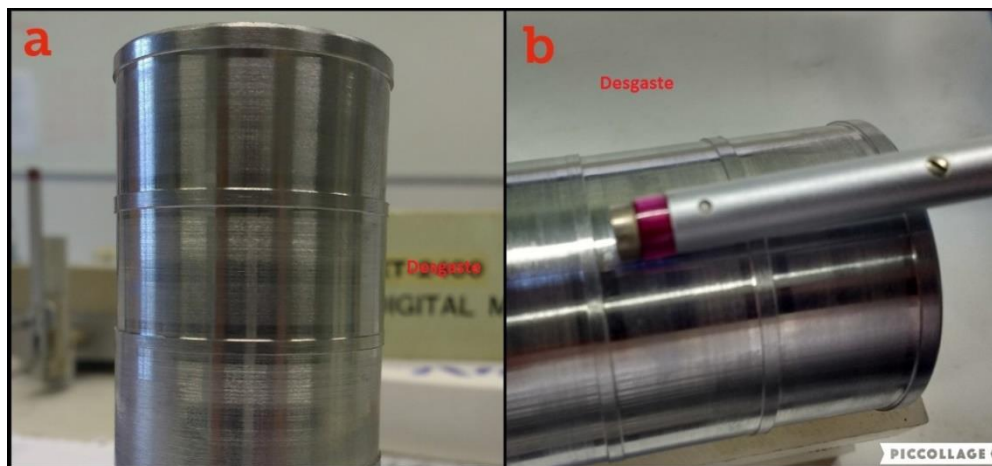


Figura 17 : Medição do desgaste diametral do rebolo; (a) cilindro utilizado para a impressão de perfil; (b) posicionamento do apalpador para a medição do desgaste.

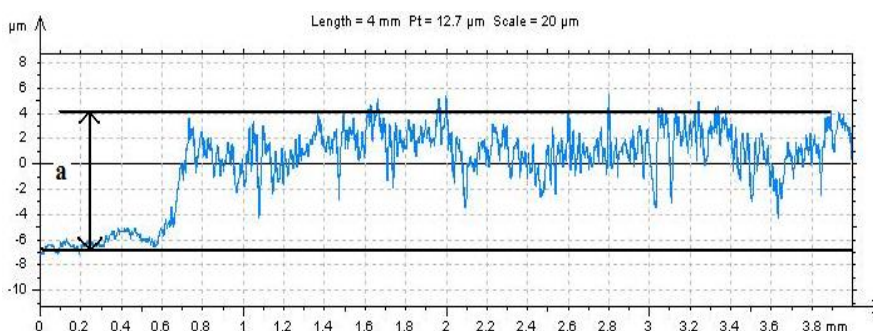


Figura 18 : Perfil de desgaste diametral do rebolo.

3.3.4 Potência de corte

Por fim tem-se o parâmetro selecionado para o monitoramento e avaliação do processo de retificação investigado no presente estudo. Assim, foi selecionada a potência de corte durante o processo de usinagem. Para tanto foi utilizado um sistema de aquisição da potência elétrica consumida pelo motor de acionamento da retificadora. Este sistema de aquisição foi desenvolvido pelo Laboratório de Aquisição e Processamento de Sinais (LADAPS), em parceria com o Laboratório de Usinagem por Abrasão (LUA), ambos grupos de pesquisa da Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, campus Bauru. O processo de aquisição e tratamento de sinais foi realizado pelo software LabView 6.1® da empresa National Instruments.

Os valores de corrente elétrica e tensão provenientes do motor elétrico da retificadora CNC foram transformados através de um circuito eletrônico, chamado

Curvopower, em sinais de tensão compatíveis com uma placa de aquisição de dados para que os mesmos pudessem então ser manipulados em valores de potência.

3.3.5 Microdureza

Para a realização dos ensaios de microdureza, as peças foram cortadas em um equipamento para corte metalográfico e embutidas em baquelite. Para que as amostras já cortadas fossem preparadas para a medição de microdureza, foi realizado o lixamento das mesmas. A sequência de lixas utilizada foi: 80, 120, 220, 320, 400, 500 e 600 mesh. Posteriormente, realizou-se o polimento utilizando alumina de granulometria de 1 μm .

Após as amostras preparadas, foi realizada a medição de microdureza utilizando um microdurômetro Mitutoyo, modelo HM-200. O equipamento conta tanto com o indentador para a medição de dureza Knoop como para a dureza Vickers. Também conta-se com lentes objetivas de 10 e 50x de ampliação. A medição foi realizada com carga de 200 g e 60s de aplicação.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados obtidos do presente estudo em termos de rugosidade, circularidade, desgaste diametral do rebolo e potência de corte. Todos estes resultados são apresentados em função da velocidade de avanço para cada uma das técnicas de lubri-refrigeração estudadas.

Este tópico também apresenta os resultados mensurados de microdureza Vickers para cada uma das condições de lubri-refrigeração analisadas. Além disso, apresenta-se uma discussão a respeito dos resultados obtidos para as técnicas convencional, MQL e CAMQL.

4.1 Rugosidade

Os dados obtidos para a rugosidade em função da velocidade de avanço, para todas as condições de lubri-refrigeração avaliadas se encontram na figura 19. Como pode-se observar, houve um aumento da rugosidade com o aumento da velocidade de avanço. Conforme esperado, a usinagem se torna mais severa com o aumento da velocidade de avanço e, conseqüentemente há uma elevação na taxa de remoção de material. Esta elevação aumenta a geração de cavacos e, assim há uma diminuição da qualidade superficial das peças. O que é caracterizado por uma maior rugosidade.

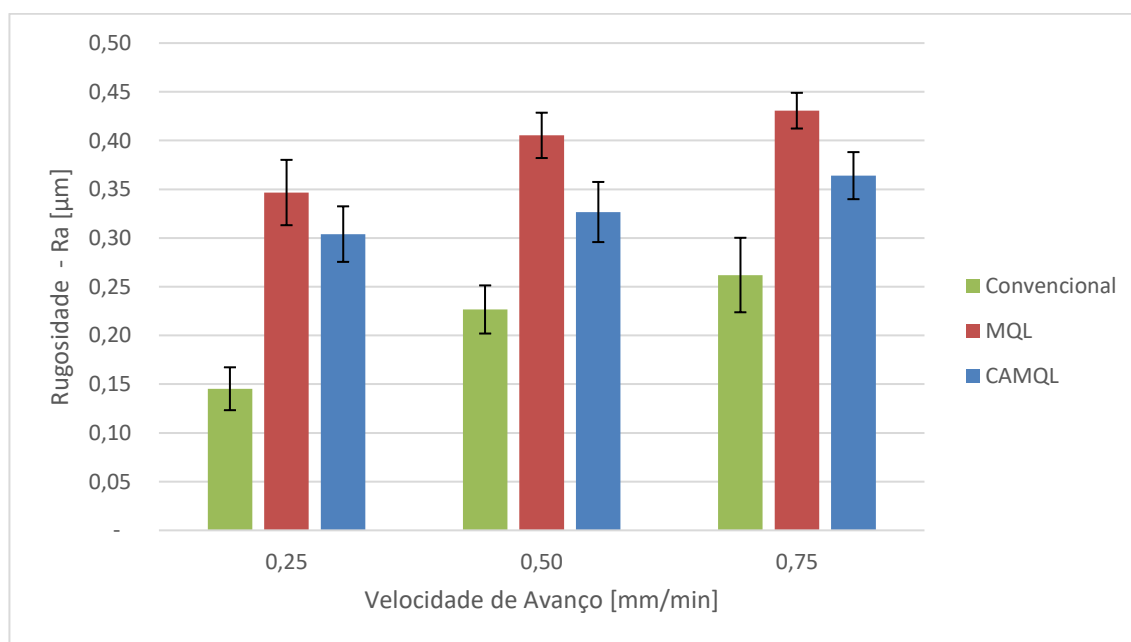


Figura 19: Rugosidade média aritmética *versus* velocidade de avanço.

O aumento da velocidade de avanço também reduz o tempo total de usinagem. A quantidade de material removida por ciclo de usinagem é fixa, conforme o item 3.1.1. Esta diminuição no tempo de usinagem também é característica de um processo de retificação mais agressivo, consequentemente com maior geração de calor.

A usinagem utilizando a técnica de lubri-refrigeração convencional fornece os melhores resultados de rugosidade: 0,15 μm para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min; 0,23 μm para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min e 0,26 μm para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min. A lubri-refrigeração convencional tem a maior capacidade, entre os métodos testados, para remover cavacos da região de corte. Isso acarreta que a superfície do corpo de prova não é arranhada durante o processo de retificação. Tudo isso leva ao melhor desempenho do processo, como pode ser observado na figura 19.

Esta técnica fornece uma boa característica de refrigeração. Pois uma grande quantidade de fluido de corte está presente na interface rebolo/peça, o que impede que a temperatura se eleve nesta região. Outro fator importante a ser considerado sobre a refrigeração é o tipo de fluido aplicado nesta técnica de lubri-refrigeração. Segundo Debnath *et al.* (2014) a presença de água na emulsão aumenta sua capacidade de refrigeração, enquanto o óleo reduz a tendência de oxidação das peças.

A usinagem com MQL fornece os maiores resultados obtidos para a rugosidade: 0,35 μm para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min, 0,41 μm para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min e 0,43 μm para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min. Segundo Belentani *et al.* (2014) a técnica de MQL não promove refrigeração suficiente quando se compara com o método convencional. A técnica de MQL acarreta em um aumento da quantidade de calor gerada e transferida para a peça durante a usinagem. Em diversos estudos citados constataram que o aumento da quantidade de calor no processo reduz de forma significativa o acabamento das peças. Ainda segundo Belentani *et al.* (2014) técnica de MQL promove a formação de uma borra, constituída por óleo e cavaco na superfície de corte do rebolo, o que acarreta, entre outros fatores, o aumento da rugosidade.

A combinação da alta geração de calor na interface com acúmulo de detritos na superfície de corte do rebolo favorece uma deterioração da qualidade superficial na peça. Isso é caracterizado pela elevação na rugosidade, conforme pode ser observado na figura 19.

Por fim a técnica de CAMQL fornece resultados intermediários: 0,30 μm para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min, 0,33 μm para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min e 0,36 μm para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min. É possível notar que, os resultados para a retificação na condição mais suave forneceram dados próximos para as técnicas de MQL e CAMQL, 0,35 μm e 0,30 μm , respectivamente. Pois com a utilização de uma velocidade de avanço mais baixa, há uma menor quantidade de material removido por ciclo de avanço durante o processo de usinagem, o que caracteriza um processo mais brando. Assim, há uma menor geração de calor na interface de corte, portanto a falta da característica de refrigeração, principal diferença entre os dois métodos não é evidente. Com isso há um acabamento bastante próximo para as duas técnicas de aplicação do MQL. Porém para as outras duas condições estudadas, os resultados se mantiveram com uma maior diferença, já que a técnica de CAMQL promove uma melhor refrigeração do processo.

Com a aplicação do CAMQL, o ar em baixa temperatura é capaz de manter a quantidade de energia gerada no processo, que se transforma em calor concentrado na região de corte sob controle, acarretando em um melhor acabamento. Porém quando se compara seus resultados com a técnica de lubri-refrigeração convencional, é possível notar que os mesmos são mais elevados. Isso acontece pois, a técnica de CAMQL também gera uma borra na superfície de corte do rebolo, constituída por fluído de corte e cavacos, o que compromete o acabamento das peças usinadas, o que é delineado por uma elevação nos valores de rugosidade.

4.2 Circularidade

A figura 20 ilustra os resultados obtidos para a circularidade em função da velocidade de avanço para todos os tipos de lubri-refrigeração analisados. É possível observar que os dados de circularidade apresentam a mesma tendência dos dados da rugosidade. Porém os resultados de MQL e CAMQL para as duas primeiras velocidades de avanço foram bastante similares.

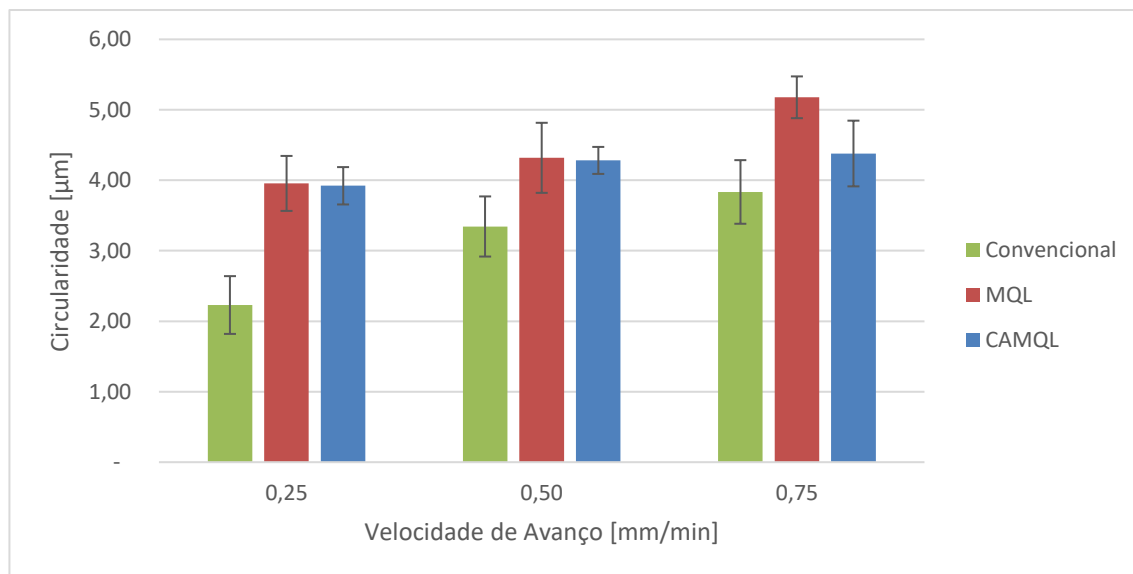


Figura 20: Circularidade *versus* velocidade de avanço

Para a técnica de MQL, os resultados de circularidade foram: 3,96 μm , 4,32 μm e 5,18 μm para as respectivas velocidades de avanço de 0,25 mm/min; 0,50 mm/min e 0,75 mm/min. Estes foram os mais elevados resultados obtidos, pois, esta técnica não apresenta refrigeração suficiente para compensar a geração de calor. A peça sofre distorções térmicas durante o processo de usinagem e suas dimensões acabam comprometidas, apresentando um conseqüente aumento dos valores de circularidade.

Já para a técnica de CAMQL a circularidade apresentou resultados de: 3,92 μm para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min, 4,28 μm para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min e 4,38 μm para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min. Os resultados para as duas primeiras velocidades de corte se mantiveram próximos para as técnicas de lubri-refrigeração de MQL e CAMQL, 3,96 μm e 3,92 μm ; 4,32 μm e 4,28 μm , respectivamente. Já para a condição mais severa analisada, a velocidade de avanço de 0,75 mm/min, os resultados destas duas técnicas mencionadas apresentam uma maior variação devido à maior quantidade de calor presente na técnica de MQL. De acordo com Adibi *et al.* (2014) isso acontece, pois conforme a retificação acontece e o conseqüente empastamento do rebolo toma forma, as incrustações de cavacos nas porosidades do rebolo aumentam. Este crescimento acaba ligando o material empastado aos grãos adjacentes. O fenômeno se repete até que o grão esteja desgastado ou até que as forças de retificação sejam suficientes para a remoção do grão e do material aderido a ele. Conforme se tem um processo mais severo, caracterizado por uma maior velocidade de avanço do rebolo, as forças de usinagem se tornam maiores. Conseqüentemente, a

potência de corte também aumenta, fazendo com que as incrustações citadas possam ser removidas com mais facilidade. Ou seja, a dificuldade dessa remoção acontece em situações de usinagem mais branda, como é o caso das duas primeiras velocidades de avanço, o que compromete a qualidade dimensional da peça.

Para a técnica de lubri-refrigeração convencional, os resultados obtidos para a circularidade foram: 2,23 μm para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min, 3,34 μm para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min e 3,83 μm para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min. Estes foram os menores resultados obtidos para o parâmetro de forma e isso acontece pois, a lubri-refrigeração convencional tem uma maior capacidade de lubrificação. Além de ser capaz de manter a região de corte livre de detritos, o que ocasiona em uma mais alta precisão dimensional. Ela também previne que distorções térmicas ocorram durante o processo, já que esta técnica é capaz de manter a temperatura estável durante todo o processo. Fazendo assim com que a peça obtida apresente uma boa precisão dimensional.

4.3 Desgaste diametral do rebolo

A figura 21 apresenta os resultados obtidos para o desgaste diametral do rebolo para todos os métodos de lubri-refrigeração analisado em função das velocidades de avanço. Todos os resultados apresentados para o desgaste diametral do rebolo ficaram abaixo de 4 μm , o que é condizente com a aplicação do rebolo de CBN de acordo com a faixa de dureza do mesmo. Os resultados para o desgaste da técnica de lubri-refrigeração convencional foram de 2,54 μm , 2,67 μm e 2,73 μm para as velocidades de avanço 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min.

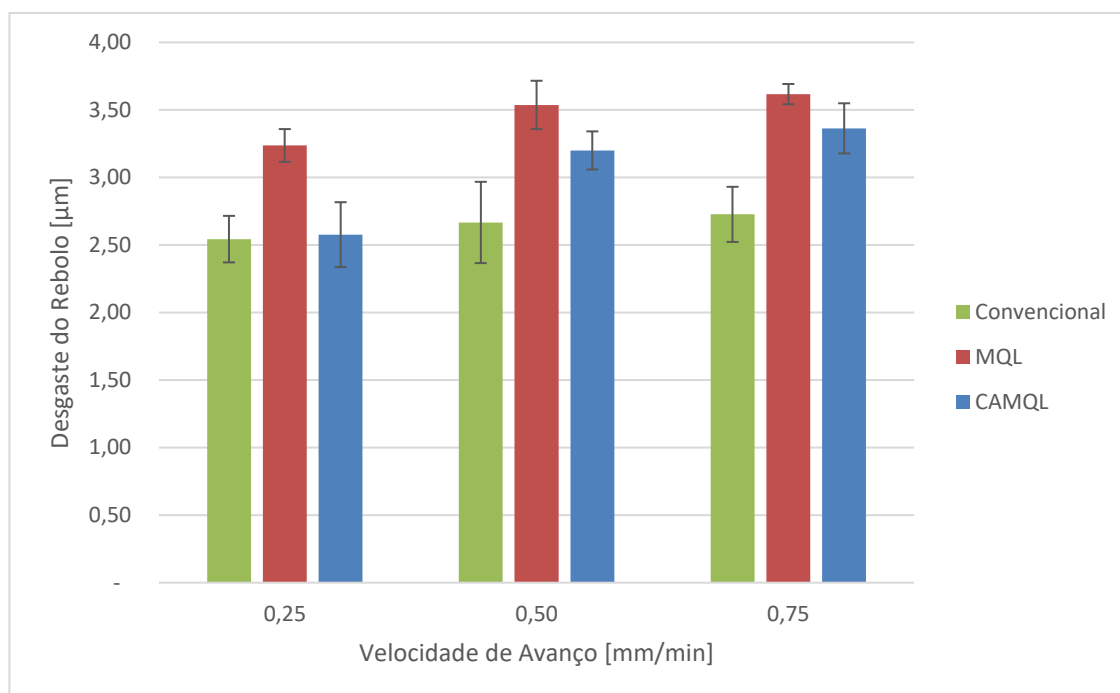


Figura 21: Desgaste diametral do rebolo *versus* velocidade de avanço

Para o método de MQL os resultados foram os mais elevados obtidos, sendo de 3,24 μm para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min, 3,54 μm para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min e 3,62 μm para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min. Por fim temos os valores intermediários da técnica de CAMQL ou mínima quantidade de lubrificação com ar comprimido frio, os quais foram 2,58 μm , 3,20 μm e 3,36 μm para as respectivas velocidades de avanço.

Observando estes valores é possível notar que o desgaste diametral do rebolo para a técnica de CAMQL ficou bastante próximo do resultado para o método convencional, sendo respectivamente 2,58 μm e 2,54 μm , para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min. Isso pode ser justificado pela combinação de dois fatores distintos. A condição de corte mais branda com a alta refrigeração do método de CAMQL.

O desgaste pode acontecer pela alta quantidade de calor presente na interface de corte que causa a degradação térmica do rebolo. Por não haver essa concentração graças às razões expostas acima, as duas técnicas apresentaram resultados bastante próximos. A velocidade de avanço mais baixa também gera menores forças de corte, o que mantém os grãos presos ao ligante por mais tempo, diminuindo o desgaste do rebolo.

O resultado da técnica de CAMQL ficou próximo da técnica de MQL para a condição mais severa de usinagem, a velocidade de avanço de 0,75 mm/min, com valores de desgaste de 3,36 μm e 3,62 μm respectivamente, o que pode ser explicado pela

condição mais severa de corte. Há uma maior geração de calor e conseqüentemente um maior acúmulo de energia na região de corte, o que leva à degradação térmica dos grãos e ligante, prejudicando a força de adesão entre estes dois elementos. Para as técnicas de mínima quantidade de lubrificação, há a formação de borra na superfície do rebolo, e isso contribui para que seja necessária uma maior força para a remoção de material, pois com a presença de borra os grãos têm menor contato com o material. Assim é necessária uma maior força de usinagem e isso favorece o maior desgaste, já que este aumento da força de usinagem pode superar a força de ligação entre os grãos abrasivos e o ligante.

4.4 Potência de corte

A figura 22 ilustra os dados obtidos para a potência de corte consumida durante o processo de retificação em função das velocidades de avanço utilizadas para todos os métodos de lubri-refrigeração. Como é possível notar, a figura apresenta a mesma tendência que todos os outros dados anteriores. Aumento dos valores com o aumento da velocidade de avanço. A usinagem mais severa aumenta a profundidade de corte, e há um conseqüente aumento do cavaco gerado pelo processo de retificação. Quando isso ocorre há um aumento da área de desgaste plano e da profundidade de corte de cada um dos grãos, por isso uma maior energia é necessária para a remoção de material. (SABERI *et al.*, 2016)

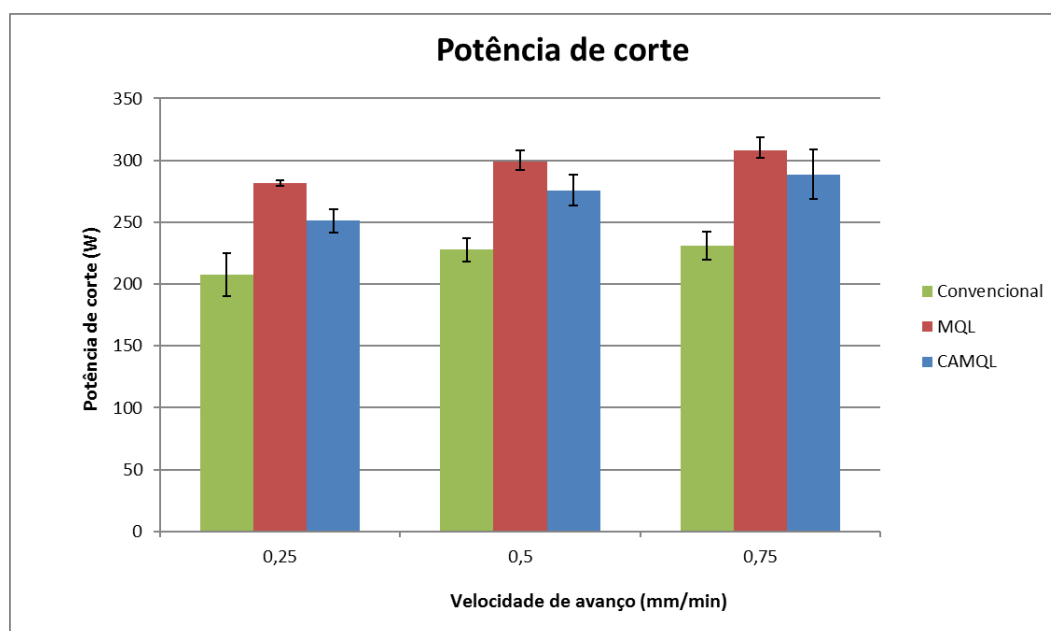


Figura 22: Potência de corte *versus* velocidade de avanço.

Nota-se que os valores de potência para a técnica de lubri-refrigeração convencional foram os menores obtidos: 207,33 W para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min, 227,67 W para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min e 230,71 W para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min. Este método fornece a melhor lubrificação de todos os métodos estudados, também fornece uma boa refrigeração. O que permite que o corte seja realizado de forma mais fácil, sendo necessária menos energia para remover a mesma quantidade de material. Também deve-se levar em consideração que a geração de calor permanece sob controle com a aplicação deste método, e a combinação destes fatores leva a uma menor potência requerida durante o corte.

Segundo Saberi *et al.* (2016) os filmes de fluido presente na interface de corte impedem que as micro trincas causadas pela usinagem se fechem. A presença destas microfissuras faz com que essa região seja uma área de concentração de tensões. Assim é necessário menos energia para que o corte aconteça. Isto é chamado de efeito Rebinder.

Já o método de MQL fornece os mais altos resultados para a potência de corte: 281,74 W, 298,96 W e 308,40 W para as velocidades de avanço de 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min, respectivamente. A refrigeração fornecida por esta técnica não é suficiente para que o desempenho do corte seja obtido satisfatoriamente. A falha de refrigeração faz com que seja mais difícil para os grãos abrasivos removerem o material da peça e assim a potência de corte atinge valores elevados. Outro ponto importante é a alta geração de calor que esta técnica de lubri-refrigeração não pode controlar, e este fator favorece o desgaste plano dos grãos abrasivos o que aumenta a energia requerida para que ocorra a remoção de material.

Por fim, o método de CAMQL apresenta resultados melhores que a técnica de MQL, com valores de 251,09 W, 257,75 W e 288,62W para as respectivas velocidades de avanço 0,25 mm/min, 0,50 mm/min e 0,75 mm/min. Em comparação com a técnica de MQL, o presente método é capaz de controlar melhor a quantidade de calor acumulada na região de corte. Facilitando, desta forma, a remoção de material e consequentemente gerando menos energia. Porém esta técnica não é capaz de fornecer lubrificação suficiente para o corte, por isso seus valores de potência ficam mais elevados que o método convencional de lubri-refrigeração.

4.5 Microdureza

A figura 23 apresenta os resultados obtidos para a medição da microdureza Vickers em função da distância da superfície usinada para a condição de lubri-refrigeração convencional. A figura 23 (a) trata da dureza Vickers para a velocidade de avanço de 0,25 mm/min, e apresenta 701,95 HV em 60 μm da superfície, 704,03 HV em 120 μm de profundidade, 697,96 HV em 180 μm , 698,06 HV em 240 μm e 696,56 HV.

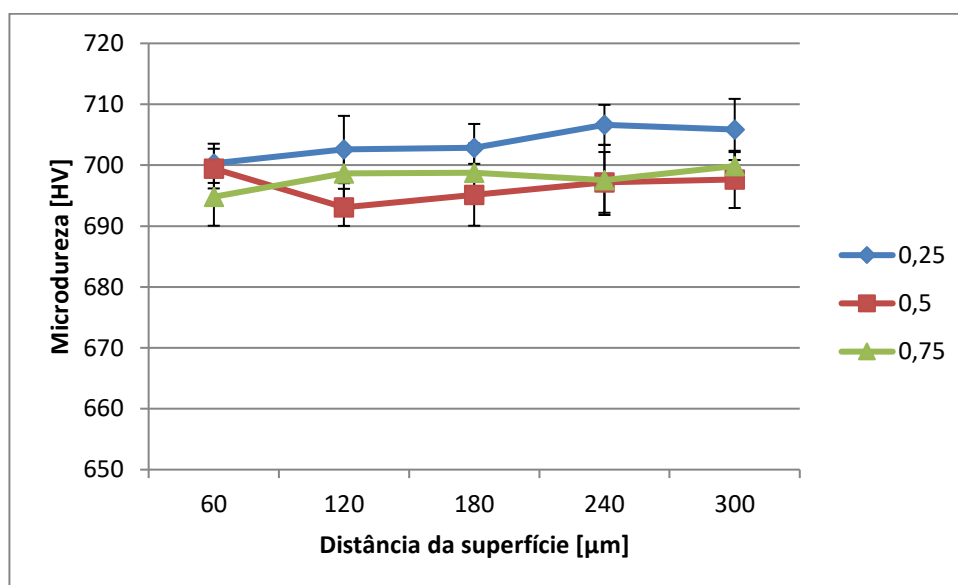


Figura 23: Microdureza da técnica de lubri-refrigeração convencional em função da distância da superfície usinada para cada uma das velocidades de avanço.

Já a figura 23 (b) apresenta os valores da dureza Vickers para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min para a lubri-refrigeração convencional, com 698,21 HV em 60 μm , 700,26 HV em 120 μm , 697,16 HV em 180 μm , 701,56 HV em 240 μm e 703,16 HV em 300 μm .

Por fim, a figura 23 (c) trata dos valores de dureza Vickers para a lubri-refrigeração convencional com velocidade de 0,75 mm/min, com 702,65 HV em 60 μm , 703,86 HV em 120 μm , 695,66 HV em 180 μm , 701,73 HV em 240 μm e 697,16 HV em 300 μm .

A figura 24 apresenta os resultados obtidos para a medição da microdureza Vickers em função da distância da superfície usinada para a condição de lubri-refrigeração MQL. A figura 24 (a) mostra os valores da microdureza Vickers em função da velocidade de avanço de 0,25 mm/min para a condição de lubri-refrigeração de MQL, com valor de 704,12 HV para a profundidade da superfície de 60 μm , 693,66 HV para a

profundidade de 120 μm , 699,36 HV em 180 μm , 701,96 HV para 240 μm e 703,47 HV em 300 μm .

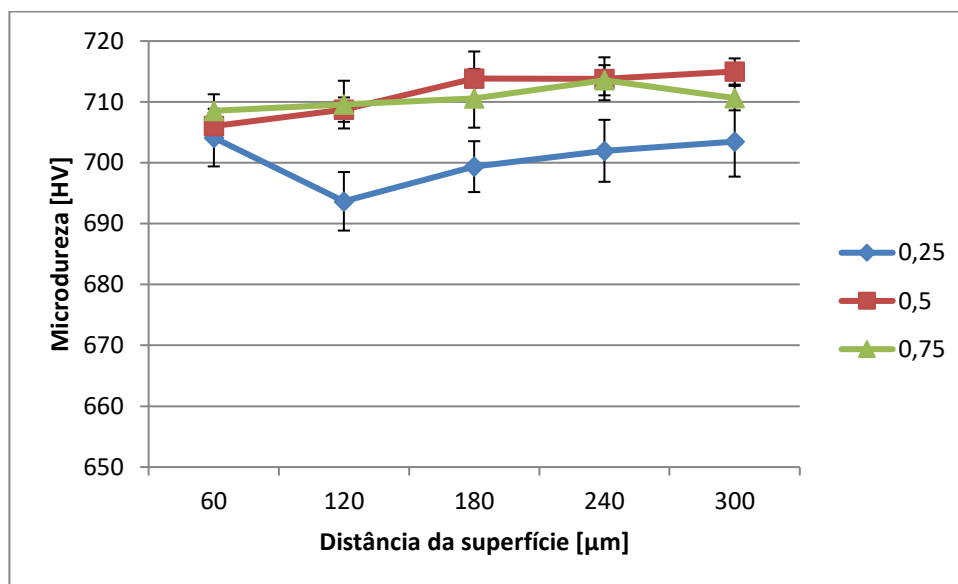


Figura 24: Microdureza da técnica de lubri-refrigeração MQL em função da distância da superfície usinada para cada uma das velocidades de avanço.

A figura 24 (b) ilustra, para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min, a dureza Vickers obtidas nas amostras usinadas sob a condição de MQL com 706,03 HV em 60 μm , 708,73 HV em 120 μm , 713,86 HV em 180 μm , 713,80 HV em 240 μm e 715,00 HV em 300 μm . por fim, a figura 24 (c) mostra os resultados para a microdureza Vickers, na condição de MQL para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min com 708,54 HV em 60 μm , 709,56 HV em 120 μm , 710,59 HV em 180 μm , 713,56 HV em 240 μm e 710,62 HV em 300 μm .

A figura 25 apresenta os resultados obtidos para a medição da microdureza Vickers em função da distância da superfície usinada para a condição de lubri-refrigeração CAMQL. A figura 25 (a) ilustra os resultados para a técnica de CAMQL com velocidade de avanço de 0,25 mm/min da microdureza obtida, com 700,30 HV em 60 μm , 702,56 HV em 120 μm , 702,83 HV em 180 μm , 706,62 HV em 240 μm e 705,86 HV em 300 μm .

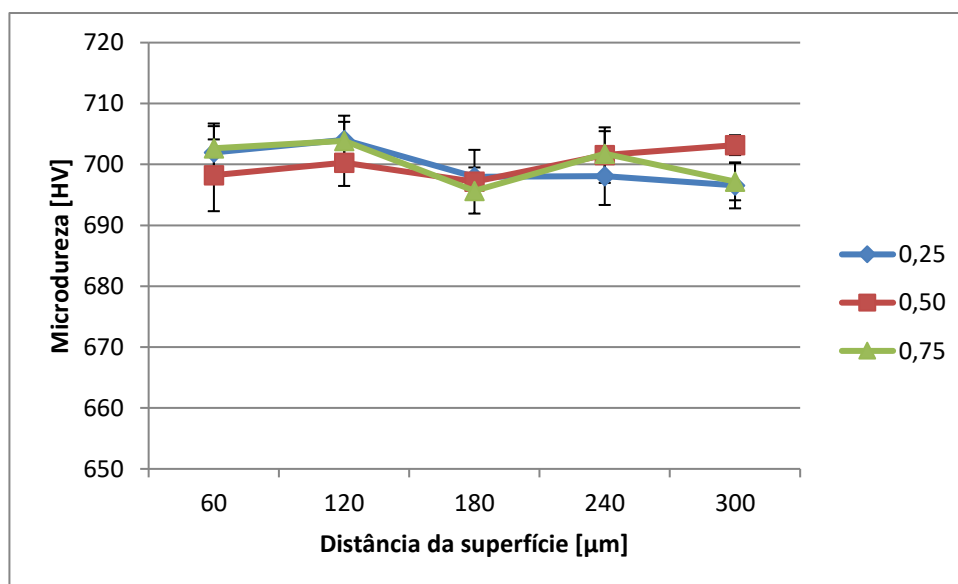


Figura 25: Microdureza da técnica de lubri-refrigeração convencional em função da distância da superfície usinada para cada uma das velocidades de corte.

A figura 25 (b) mostra os resultados de microdureza para a velocidade de avanço de 0,50 mm/min da técnica de CAMQL com 699,43 HV em 60 μm, 693,07 HV em 120 μm, 695,13 HV em 180 μm, 697,17 HV em 240 μm e 697,66 HV em 300 μm. Por fim, a figura 25 (c) mostra os resultados para a técnica de CAMQL da microdureza para a velocidade de avanço de 0,75 mm/min com 694,80 HV em 60 μm, 698,63 HV em 120 μm, 698,77 HV em 180 μm, 697,56 HV em 240 μm e 699,85 HV em 300 μm.

Como é possível observar a partir das figuras 23, 24 e 25 não houve um aumento da dureza superficial, o que caracteriza a ausência de queima na superfície. Segundo Malkin e Guo (2008) quando há a ocorrência de queima superficial na retificação de aços endurecidos é possível notar um aumento da dureza superficial dos mesmos. Isso é a caracterização da formação de uma camada branca de martensita não revenida de elevada dureza.

A variação entre os valores mensurados de dureza foi muito pequena. Com isso pode-se considerar que os valores de dureza se mantiveram em uma faixa que não apresenta alterações significativas.

5 CONCLUSÕES

Através da realização do presente estudo de retificação do aço AISI 4340, temperado e revenido com rebolo de CBN, é possível obter as seguintes conclusões:

- A técnica de lubri-refrigeração convencional fornece os melhores resultados para todos os parâmetros estudados. Isso ocorre, pois, a mesma apresenta uma melhor capacidade de controlar a geração de calor na interface de corte e retirar o calor gerado durante a usinagem. Ela também apresenta a capacidade de manter limpa a região onde o corte acontece. Tudo isso graças ao alto volume de fluido de corte fornecido por esta técnica;
- A técnica de lubri-refrigeração por mínima quantidade de lubrificação apresenta os piores resultados obtidos, pois ela não possuiu uma boa capacidade de refrigeração. Também não é capaz de manter a superfície do rebolo limpa e sem incrustações. Isso acaba acarretando em uma maior quantidade de calor durante o processo, bem como na presença de borra na superfície do rebolo;
- Apesar da técnica de lubri-refrigeração de mínima quantidade de fluido combinado com ar comprimido em baixa temperatura apresentar resultados piores que a técnica de lubri-refrigeração convencional. Ela ainda se manteve melhor que a técnica de lubri-refrigeração por mínima quantidade de lubrificação, isso acontece, pois, o CAMQL apresenta uma melhor capacidade de refrigeração graças à aplicação de ar frio, que aumenta a capacidade de trocas térmicas da técnica de refrigeração;
- Como o objetivo do presente estudo era propor uma técnica para a redução da quantidade de fluido de corte sem uma perda significativa na qualidade das peças obtidas. É possível concluir que a técnica de CAMQL atinge estes objetivos e é viável para a aplicação durante a retificação cilíndrica externa do aço AISI 4340 utilizando rebolo de CBN;
- A técnica de lubri-refrigeração proposta no presente estudo se traduz como um passo em direção à aplicação efetiva da técnica de mínima quantidade de lubrificação na indústria com produtividade e sem perdas na qualidade.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Com a intenção de dar continuidade na pesquisa com aplicação de ar frio combinado à aplicação de MQL, segue algumas sugestões para trabalhos futuros:

- Monitoramento da temperatura durante a aplicação da técnica de CAMQL em comparação com a técnica de MQL;
- Análise térmica, com modelagem para aplicação de CAMQL em comparação com os métodos de lubri-refrigeração convencional e MQL;
- Desenvolvimento e modelagem de um novo bocal aplicador para a técnica de CAMQL;
- Aplicação da técnica de CAMQL para a retificação de outros tipos de materiais metálicos;
- Aplicação da técnica de CAMQL para a retificação de materiais não metálicos;
- Utilização da técnica de CAMQL para outros tipos de rebolo.

REFERÊNCIAS

- Adibi, H., Rezaei, S. M. and Sarhan, A. A. D. (2014) 'Investigation on using high-pressure fluid jet in grinding process for less wheel loaded areas', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 70(9–12), pp. 2233–2240. doi: 10.1007/s00170-013-5471-2.
- Alves, M. C. de S. (2007) *Influência dos métodos de lubri-refrigeração na retificação do aço ABNT 4340 usando rebolo de CBN*. Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências.
- ANON, H. S. E. (2003) 'Warnings for grinding coolants', *Metalworking Production*, 147(5), p. 44.
- Babic, D., Murray, D. B. and Torrance, A. A. (2005) 'Mist jet cooling of grinding processes', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 45(10), pp. 1171–1177. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2004.12.004.
- Belentani, R. de M. *et al.* (2014) 'Utilization of minimum quantity lubrication (MQL) with water in CBN grinding of steel', *Materials Research*, 17(1), pp. 88–96. doi: 10.1590/S1516-14392013005000165.
- Bianchi, E. C. *et al.* (2010) 'Application of Minimum Quantity Lubrication in Grinding', in Davim, P. J. (ed.) *Sustainable Manufacturing*. 1st edn. London: Wiley, p. 246.
- Cameron, A., Bauer, R. and Warkentin, A. (2010) 'An investigation of the effects of wheel-cleaning parameters in creep-feed grinding', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier, 50(1), pp. 126–130. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2009.08.008.
- Choi, H. Z., Lee, S. W. and Jeong, H. D. (2001) 'A comparison of the cooling effects of compressed cold air and coolant for cylindrical grinding with a CBN wheel', *Journal of Materials Processing Technology*, 111(1–3), pp. 265–268. doi: 10.1016/S0924-0136(01)00531-3.
- Choi, H. Z., Lee, S. W. and Jeong, H. Do (2002) 'The cooling effects of compressed cold air in cylindrical grinding with alumina and CBN wheels', *Journal of Materials Processing Technology*, 127(2), pp. 155–158. doi: 10.1016/S0924-0136(02)00117-6.
- Debnath, S., Reddy, M. M. and Yi, Q. S. (2014) 'Environmental friendly cutting fluids and cooling techniques in machining: A review', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 83, pp. 33–47. doi: 10.1016/j.jclepro.2014.07.071.

- Diniz, A. E., Marcondes, F. C. and Coppini, N. L. (2013) *Tecnologia da Usinagem dos Materiais*. 8th edn. São Paulo: MM Editora.
- Ben Fredj, N., Sidhom, H. and Braham, C. (2006) 'Ground surface improvement of the austenitic stainless steel AISI 304 using cryogenic cooling', *Surface and Coatings Technology*, 200(16–17), pp. 4846–4860. doi: 10.1016/j.surfcoat.2005.04.050.
- Ghenis, B., Doktor, L. and Tergan, V. (1967) *Cylindrical Grinding Practice*. Edited by G. Isserlis. Moscow: MIR Publishers.
- Groove, M. P. (2014) *Introdução aos processos de fabricação*. 1st edn. Rio de Janeiro: LTC.
- Hadad, M. J. *et al.* (2012) 'Temperature and energy partition in minimum quantity lubrication-MQL grinding process', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier, 54–55, pp. 10–17. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2011.11.010.
- Hadad, M. and Sadeghi, B. (2012) 'Thermal analysis of minimum quantity lubrication-MQL grinding process', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier, 63, pp. 1–15. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2012.07.003.
- Hadad, M. and Sadeghi, B. (2013) 'Minimum quantity lubrication-MQL turning of AISI 4140 steel alloy', *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 54, pp. 332–343. doi: 10.1016/j.jclepro.2013.05.011.
- Jackson, M. J. and Davim, P. J. (eds) (2011) *Machining with abrasives*. New York: Springer. doi: 10.1007/978-1-4419-7302-3.
- Klocke, F. (2013) *Manufacturing Processes 2. Grinding, Honing, Lapping, Journal of Chemical Information and Modeling*. doi: 10.1017/CBO9781107415324.004.
- Macedo, C. V. (2012) *Análise da influência dos parâmetros de retificação cilíndrica na rugosidade média (Ra) da luva externa para cardan*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul.
- Malkin, S. and Guo, C. (2008) *Grinding Technology: Theory and Applications of Machining with Abrasives*. 2nd edn. New York: Industrial Press.
- Marinescu, I. D. *et al.* (2004) *Tribology of Abrasive Machining Process*. Norwich: William Andrew, Inc.
- Marinescu, I. D. *et al.* (2007) *Handbook of Machining with Grinding Wheels*. Boca Raton: CRC Press.
- Morgan, M. N., Barczak, L. and Batako, A. (2012) 'Temperatures in fine grinding with minimum quantity lubrication (MQL)', *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60(9–12), pp. 951–958. doi: 10.1007/s00170-011-3678-7.

- Nunes, L. de P. and Kreischer, A. T. (2010) *Introdução à metalurgia e aos materiais metálicos*. Editora Interciência.
- Nussbaum, G. C. (1988) *Rebolos e Abrasivos: Tecnologia Básica*. São Paulo.
- Oliveira, D. D. J. *et al.* (2012) ‘Improving minimum quantity lubrication in CBN grinding using compressed air wheel cleaning’, *Journal of Materials Processing Technology*. Elsevier B.V., 212(12), pp. 2559–2568. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2012.05.019.
- Oliveira, F. G. *et al.* (2015) ‘CIRP Annals - Manufacturing Technology Dry grinding process with workpiece precooling’, 64, pp. 329–332. doi: 10.1016/j.cirp.2015.04.098.
- Paul, S. and Chattopadhyay, A. B. (1996) ‘Determination and control of grinding zone temperature under cryogenic cooling’, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 36(4), pp. 491–501. doi: 10.1016/0890-6955(95)00053-4.
- Pereira, O. *et al.* (2015) ‘The Use of Hybrid CO₂+MQL in Machining Operations’, *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 132, pp. 492–499. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.524.
- Rowe, W. B. (2014) *Principles of Modern Grinding Technology*. 2nd edn. William Andrew, Inc.
- Rubio, E. M. *et al.* (2015) ‘Cooling Systems Based on Cold Compressed Air: A Review of the Applications in Machining Processes’, *Procedia Engineering*. Elsevier B.V., 132, pp. 413–418. doi: 10.1016/j.proeng.2015.12.513.
- Saberi, A. *et al.* (2016) ‘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*, 131, pp. 728–738. doi: 10.1016/j.jclepro.2016.04.104.
- Salmon, S. C. (1992) *Modern Grinding Process Technology*. Mc-Graw-Hill Professional Publishing.
- Sanchez, J. A. *et al.* (2010) ‘Machining evaluation of a hybrid MQL-CO₂ grinding technology’, *Journal of Cleaner Production*. Elsevier Ltd, 18(18), pp. 1840–1849. doi: 10.1016/j.jclepro.2010.07.002.
- Shaw, M. C. (1996) *Principles of Abrasives Processing*. New York: Oxford University Press.
- Su, Y. *et al.* (2007) ‘Refrigerated cooling air cutting of difficult-to-cut materials’, *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 47(6), pp. 927–933. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2006.07.005.
- Tawakoli, T., Hadad, M. J. and Sadeghi, M. H. (2010) ‘Influence of oil mist parameters

on minimum quantity lubrication - MQL grinding process', *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. Elsevier, 50(6), pp. 521–531. doi: 10.1016/j.ijmachtools.2010.03.005.

Walker, T. (2013) *The MQL Handbook*. Unist, Inc.