

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS
CURSO DE ENGENHARIA DE MATERIAIS

MARIANA FACCIO MATTOS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE
DE LUBRIFICANTE - MQL NOS PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO E FURAÇÃO**

BELO HORIZONTE

2013

MARIANA FACCIO MATTOS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE
DE LUBRIFICANTE - MQL NOS PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO E FURAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
no Curso de Engenharia de Materiais do Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Orientador: Leonardo Roberto Silva

BELO HORIZONTE

2013

MARIANA FACCIO MATTOS

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DA TÉCNICA DE MÍNIMA QUANTIDADE
DE LUBRIFICANTE - MQL NOS PROCESSOS DE RETIFICAÇÃO E FURAÇÃO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado no
Curso de Engenharia de Materiais do Centro
Federal de Educação Tecnológica de Minas
Gerais como requisito parcial para obtenção do
título de Bacharel em Engenharia de Materiais.

Aprovado em 05 de abril de 2013

BANCA EXAMINADORA

Prof. Leonardo Roberto Silva - Orientador

Profa. Elaine Carballo Siqueira Corrêa

Prof. Antônio Romero de Paula

RESUMO

Na retificação e na furação existem diversos parâmetros de entrada, entretanto, pouca atenção tem sido prestada à forma e quantidade de fluido de corte aplicada aos processos. Desta forma, esse trabalho pretende explorar o conceito da mínima quantidade de lubrificante (MQL) no processo de retificação e de furação. O presente trabalho objetiva analisar o comportamento da técnica de MQL, desenvolvendo uma metodologia otimizada de aplicação de fluido através de confecção de bocais especiais, para ambos os processos, onde uma quantidade mínima de óleo de origem vegetal é pulverizada em um fluxo de ar comprimido. Neste trabalho foram utilizados fluidos de corte derivados de origem vegetal biodegradável, sendo estes classificados como substâncias inofensivas à saúde e não-cancerígena, visando atender também os requisitos ambientais. O desempenho da técnica de MQL foi comparado com a condição de lubri-refrigeração convencional no processo de retificação cilíndrica de mergulho do aço ABNT 4340 temperado e revenido (50 - 52 HRc). O desempenho da aplicação de lubri-refrigeração foi avaliado através da integridade superficial (rugosidade, microestrutura e microdureza) e do desgaste do rebolo. Além disso, este trabalho visa apresentar uma avaliação do comportamento do desgaste de brocas helicoidais de aço rápido com e sem revestimento processo de furação utilizando diferentes métodos de lubri-refrigeração em dois tipos de aço carbono (ABNT 1020 e 1045). Os ensaios foram decorridos nas condições de aplicação de emulsão de fluidos de corte, a seco e com a utilização da técnica de MQL. A avaliação da aplicação dos diferentes métodos de lubri refrigeração no processo de furação consistiu na análise dos mecanismos de desgaste nas brocas helicoidais, rugosidade da peça nas regiões de furos e vida das ferramentas através do número de furos. Os resultados permitiram mostrar que o método e a quantidade de lubri-refrigeração são fatores que exercem fortes influências nos processos de retificação e furação. Como conclusão, percebeu-se que a técnica de MQL proporciona características muito semelhantes ao método de aplicação de fluido de corte convencional, e que pode ser utilizado na indústria, viabilizando tecnicamente o processo de usinagem com significativa redução no custeio de despesas de descarte do fluido.

Palavras chave: “Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL”. Retificação. Furação.

ABSTRACT

In the grinding and drilling processes there are several input parameters, however, little attention has been paid to the form and amount of cutting fluid applied to the process. This monograph explores the concept of the minimum quantity lubricant (MQL) in grinding and drilling process. This monograph analyzes the behavior of the minimum quantity lubricant (MQL) technique and compares it with the conventional cooling method, developing optimized fluid application methods, for both processes, using specially designed nozzles through which a minimum amount of oil is sprayed in a compressed air flow. This work used biodegradable fluids, which can be classified as harmless substances to health and non-carcinogenic, and also to meet environmental requirements. The performance of the MQL technique was compared with the conditions of lubrication and cooling in the conventional cylindrical grinding process of ABNT4340 quenched and tempered steel with a hardness of 50-52 HRC. The performance of the MQL technique in the grinding process was evaluated based on an analysis of the surface integrity (roughness, microstructure and microhardness) and wear grinding wheel. Furthermore, this paper presents a review of the behavior of twist drills wear in drilling process using different methods of lubrication and cooling in two types of carbon steels. The tests happened with the application conditions of emulsion cutting fluids, dry and using the technique of Minimum Quantity of Lubricant (MQL). The evaluation of the application of different cooling systems in drilling process consisted of the analysis of the mechanisms of wear in the twist drills, roughness, tool life through the number of holes. The holes were performed on samples of carbon steel (ABNT 1020 and 1045) with steel burs fast-coated and uncoated. The results show that the method and the quantity of lubricant are factors that exert strong influences on the grinding and drilling process. As a result, it was realized that the MQL technique provides very similar characteristics to conventional process and can be applied in industry, technically allowing the machining process with a significant reduction in funding costs of disposing of the fluid.

Keywords: "Minimum Quantity of Lubricant". Grinding. Drilling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Diagrama Esquemático de um Sistema de MQL	22
Figura 2 - Seis Elementos Básicos Envolvidos na Retificação	23
Figura 3 - Corpo de Prova de aço ABNT 4340	28
Figura 4 - Equipamento Accu-Lube para controle do MQL	29
Figura 5 - Projeto do bocal utilizado na retificação com a técnica de MQL.....	30
Figura 6 - Medidor de Vazão de ar SVTG	30
Figura 7 - Desenho dos bocais para aplicação de MQL na furação	33
Figura 8 – Corpos de prova de aços ABNT 1020 e ABNT 1045.....	34
Figura 9 - a) Banco de ensaios; b) Disposição dos bocais no CNC.....	35
Figura 10 – a) Desenho do corpo de prova. b) Corpo de prova de aço ABNT 1020 após a furação	36
Figura 11 – a) Broca sem revestimento. b) Broca revestida.	36
Figura 12 – Shimadzu SSX-550 Superscan Scanning Electron Microscope.....	37
Figura 13 – Banco de medição de rugosidades	38
Figura 14 - Rugosidade (R_a) utilizando rebolo de óxido de alumínio após 5 ciclos de 1 mm nas diversas condições de lubri-refrigeração (Ar: m/s e Lub: mL/h) e a seco	40
Figura 15 - Variação da microdureza na profundidade de 70 μ m da superfície das peças nas diversas condições de lubri-refrigeração após 5 ciclos de 1 mm	41
Figura 16 - Microscopia óptica subsuperficiais nas diversas condições de lubri-refrigeração após 5 ciclos de 1mm - 400x.....	43
Figura 17 - Micrografias da subsuperfície do aço ABNT 4340 temperado e revenido nas diversas condições de lubri-refrigeração após 5 ciclos de 1mm - MEV 1000x	45
Figura 18 - Resultado do desgaste diametral após 5 ciclos de 1 mm nas diversas condições de lubri-refrigeração (Ar: m/s e Lub: mL/h).....	46
Figura 19 – Rugosidade R_a e R_y para condição de Jorro e MQL na broca sem revestimento do aço ABNT 1045	49
Figura 20 – Rugosidade R_a e R_y para condição de Jorro e MQL na broca com revestimento do aço ABNT 1045	50
Figura 21 – Rugosidade R_a e R_y para condição a Seco, Jorro e MQL na broca sem revestimento do aço ABNT 1020	52
Figura 22– Rugosidade R_a e R_y para condição a Seco, Jorro e MQL na broca com revestimento do aço ABNT 1020	53

Figura 23 – Microscopia eletrônica de brocas utilizadas no processo de furação..... 54

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Matriz de experimentos na realização dos ensaios definitivos com rebolo de (Al₂O₃)	31
--	-----------

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas
- MEV Microscopia Eletrônica de Varredura
- MQL Mínima Quantidade de Lubrificante

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. OBJETIVOS	13
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	14
3.1 Caracterização do problema.....	14
3.2 Fluidos de corte.....	15
3.2.1 <i>Generalidades</i>	15
3.2.2 <i>Tipos de fluidos de corte</i>	16
3.2.2.1 <i>Fluidos de corte gasosos</i>	16
3.2.2.2 <i>Fluidos de corte aquosos</i>	17
3.2.2.3 <i>Fluidos de corte integrais ou aditivados</i>	18
3.3 Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL.....	18
3.3.1 <i>Definições da Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante</i>	19
3.3.2 <i>Sistemas com Mínima Quantidade de Lubrificante</i>	21
3.4 Processos de Usinagem.....	22
3.4.1 <i>Retificação</i>	22
3.4.2 <i>Furação</i>	23
3.5 Parâmetros dos Processos	24
3.5.1 <i>Rugosidade</i>	24
3.5.2 <i>Microdureza</i>	26
3.5.3 <i>Microestrutura (Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV)</i>	26
3.5.4 <i>Desgaste do Rebolo</i>	26
3.5.5 <i>Desgaste do Flanco</i>	27
4. MATERIAIS E MÉTODOS	28
4.1 Retificação	28
4.2 Furação.....	32
5. RESULTADOS	39
5.1 Retificação	39

5.1.1	<i>Rugosidade</i>	39
5.1.2	<i>Microdureza</i>	41
5.1.3	<i>Microestrutura</i>	42
5.1.3.1	<i>Microscopia óptica</i>	42
5.1.3.2	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV</i>	44
5.1.4	<i>Medição do Desgaste Diametral do Rebolo</i>	46
5.2	<i>Furação</i>	47
5.2.1	<i>Aspectos Gerais</i>	47
5.2.1.1	<i>Furação a seco</i>	47
5.2.1.1	<i>Furação sob emulsão</i>	48
5.2.1.1	<i>Furação com MQL</i>	48
5.2.2	<i>Rugosidade</i>	49
5.2.2.1	<i>Aço 1045</i>	49
5.2.2.2	<i>Aço ABNT 1020</i>	51
5.2.3	<i>Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV</i>	54
6.	CONCLUSÃO	55
6.1	<i>Retificação</i>	55
6.2	<i>Furação</i>	55
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	57

1. INTRODUÇÃO

O meio ambiente tornou-se um dos assuntos mais comentados no mundo, pois a sua deterioração implica em danos para a população. Além disso, o consumo de energia, a poluição do ar e o descarte de resíduos industriais têm despertado uma atenção peculiar por parte de grandes autoridades. Nos últimos anos observa-se o aumento da legislação relacionada a aspectos ambientais, onde se pretende proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos.

Os fluidos de corte baseados em emulsão ainda são usados em grande quantidade na indústria de processamento metal-mecânica, o que causa prejuízos ambientais e gera elevados custos de consumo e de descarte. Além disso, o fluido afeta a saúde do trabalhador, podendo causar doenças dermatológicas e respiratórias. Por outro lado, percebe-se o aumento da demanda por peças com melhor acabamento superficial e dimensional, com custo baixo e sem afetar o meio-ambiente.

Nos processos de usinagem, porém, ainda torna-se necessário a utilização de fluidos de corte, para melhor acabamento da peça e não diminuir a vida útil da ferramenta. Como alternativa, foi introduzida a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL, que combina a funcionalidade da refrigeração (ar comprimido) com um consumo extremamente baixo de fluido.

Dentro desse contexto, esse trabalho visa analisar a influência da técnica de MQL nos processos de retificação e furação. Essa técnica pode permitir uma lubri-refrigeração eficiente, sem depreciar a qualidade final da peça e sem causar prejuízos ao meio ambiente.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho objetiva analisar o comportamento da técnica de MQL quando comparada com a lubri-refrigeração convencional em diferentes processos de retificação e furação. Dentre os principais objetivos que norteiam este trabalho pode-se citar:

- Avaliação do desempenho da tecnologia de mínima quantidade de lubrificante no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho a fim de atender requisitos ambientais.
- Avaliação do comportamento do desgaste em brocas helicoidais no processo de furação sob diferentes condições de lubri-refrigeração.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Caracterização do problema

A proteção ambiental e a diminuição dos riscos para a saúde do trabalhador são alvos de grandes pesquisas no intuito de criar tecnologias que minimizem ou evitem a produção de resíduos que possam agredir o meio ambiente. A pressão dos órgãos ambientais mobilizou as autoridades públicas a elaborar leis cada vez mais rigorosas no sentido de proteger o meio ambiente e preservar os recursos energéticos, uma vez que a deterioração destes causará um prejuízo inestimável à população.

Os fluidos de corte baseados em emulsão ainda são utilizados em grande escala nos processos de usinagem. O descarte desses fluidos que ocorria diretamente no meio ambiente, com a tendência de preocupação ambiental, passou a gerar um elevado custo para as indústrias.

A Associação Brasileira de Normas Técnicas – ABNT classifica o óleo lubrificante usado como resíduo perigoso por apresentar toxicidade e considera como alternativa de gestão ambiental para esse produto a reciclagem. Desta forma, todo fluido lubrificante usado ou contaminado deve ser recolhido, coletado e possuir destinação final, de modo a não afetar negativamente o meio ambiente e proporcionar a máxima recuperação dos constituintes neles obtidos. Fica proibido, então, o descarte desses fluidos usados ou contaminados em solos, águas interiores, ou nos sistemas de esgoto (MICARONI, 2006). Todo esse processo de reciclagem e descarte do óleo torna-se oneroso para a indústria.

Segundo Bennett (1983) e Howes et al (1991), os fluidos de corte utilizados pelas indústrias são considerados como fatores de risco para o ambiente mas também principalmente para os trabalhadores, onde na maioria dos casos os danos advindos do contato do trabalhador com tal substância são ligados à danos dermatológicos e respiratórios alarmantes aos olhos dos especialistas em saúde. Os dermatológicos podem ser observados de duas maneiras: irritação da pele, denominada dermatite de contato, onde há prurido intenso e descamação da pele, totalizando 50 a 80% de todos os casos, e efeitos alérgicos, constatados através de extensas manchas vermelhas no tecido, correspondendo 20 a 80% de todos os casos. Todos esses danos advêm do contato constante e prolongado com os fluidos de corte. A alergia é ocasionada pela intolerância da pele diante das substâncias químicas presentes nos fluidos (principalmente as derivadas de petróleo), onde não consegue eliminar a alergia de

forma definitiva, a não ser pela extinção do contato do trabalhador com o fluido, o que é totalmente inviável, já que o processo depende da presença do trabalhador.

Entre outros danos pode-se citar foliculites, acne, asma, queratoses, além de evidências de que o uso prolongado de lubrificantes industriais está também associado com o aumento da incidência de câncer na laringe, reto, pâncreas, pele, escroto e bexiga (MICARONI, 2006).

Com o aumento da demanda por peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, espera-se um aumento na eficiência do processo de lubri-refrigeração. Segundo Bianchi et al (2004), os métodos convencionais de aplicação dos fluidos de corte podem ser considerados pouco eficientes, principalmente sob condições de aplicação severas. Isso pode levar a um desgaste prematuro da ferramenta de corte, acabamento superficial inadequado ou até mesmo a inutilização da peça.

Apesar dos argumentos sobre a proteção ambiental e a diminuição dos riscos para a saúde, as vantagens econômicas têm sido, naturalmente, o principal motivo para a redução ou a renúncia aos fluidos de corte (SILVA et al, 2011).

Os fatos apontados permitiram o estudo de novas técnicas de lubri-refrigeração, que vão desde a água até o corte sem fluido, passando pelo uso da técnica da mínima quantidade de lubrificante (MQL) (ARENAS MIRANDA, 2003).

3.2 Fluidos de corte

3.2.1 Generalidades

Segundo Bianchi et al (2004), atualmente, o controle dos parâmetros usualmente monitorados nos processos de usinagem não são suficientes para a otimização do processo. Em razão da melhoria da qualidade dos fluidos de corte disponíveis no mercado, a adequada utilização do fluido pode reduzir significativamente os custos de produção de certo componente ou de todo procedimento.

A seleção do fluido de corte apropriado depende de inúmeros fatores inter-relacionados, como aspectos econômicos, tipo de processo de usinagem, custos relacionados aos aspectos de descarte, tipo de sistema de circulação de fluido de corte, saúde humana e contaminação do fluido, meios de controle, método de aplicação do fluido, severidade da operação, tipos de operação, materiais usinados e a compatibilidade do metal com o fluido.

Porém, não é possível encontrar um fluido de corte capaz de atender todos os requisitos citados. Deve-se então definir os parâmetros prioritários para a operação que será desempenhada, procurando adequar o fluido a esses aspectos prioritários (BIANCHI et al, 2004).

Para atender essas exigências de acordo com Diniz et al. (2003), os fluidos de corte devem possuir as características de alta capacidade de absorção de calor, propriedades anti-fricção e anti-soldante, estabilidade durante o uso e armazenamento, ausência de odores, não causar danos a saúde, proteção contra manchas e corrosão e viscosidade adequada para cada tipo de situação. Já Arenas Miranda (2003) salienta que outra característica importante é a não apresentar tendência de formação de fumaça, o que atrapalha a visibilidade do processo de usinagem e pode causar problemas respiratórios.

As principais funções do fluido de corte são a refrigeração e lubrificação da interface peça/ferramenta e corte/cavaco, controlar os efeitos de formação da aresta postiza de corte, melhoria no acabamento da peça usinada, proteção desta contra corrosão, transporte do cavaco para fora da região de corte e redução do custo da produção por meio da redução do desgaste da ferramenta, o que implica no aumento da vida útil da mesma (ARENAS MIRANDA, 2003).

3.2.2 Tipos de fluidos de corte

Segundo Machado et al. (2009) existem diversas formas de classificar os fluidos de corte, porém não existe uma padronização. Entretanto, os fluidos podem ser basicamente divididos em:

- a) Fluidos de corte gasosos: ar;
- b) Fluidos de corte aquosos: emulsões e soluções;
- c) Fluidos de corte integrais e aditivados: óleos minerais e vegetais.

3.2.2.1 Fluidos de corte gasosos

Dentre os fluidos gasosos, o mais comum é o ar comprimido, onde gases como o gás carbônico, que possuem um baixo ponto de ebulição, podem ser comprimidos e injetados na interface do corte para promover a refrigeração. Alguns gases também podem ser utilizados, como nitrogênio, hélio e argônio para prevenir oxidação da peça e do cavaco. A maior parte

da utilização desses gases como fluido de corte está relacionada a processos em que gradientes térmicos são menores, para evitar distorções das peças e o aparecimento de tensões residuais (BIANCHI et al, 2004).

Para melhorar o desempenho desses fluidos de corte deve-se utilizar o ar comprimido com o fluxo direcionado à zona de corte, com o intuito de remover o calor mais efetivamente através da convecção forçada, também facilitando o arraste de cavaco da zona de corte (ARENAS MIRANDA, 2003).

3.2.2.2 *Fluidos de corte aquosos*

São os mais utilizados em processos em altas velocidades, por possuir maior capacidade de refrigeração nessas condições. Os fluidos de corte aquosos podem ser basicamente divididos em emulsionáveis convencionais, emulsionáveis semissintéticos e soluções, dependendo da constituição do fluido solúvel concentrado, da presença e do nível de emulgadores no concentrado (BIANCHI et al., 2004). Os emulgadores, também conhecidos como emulsificadores, são substâncias que auxiliam na redução da tensão superficial da água, o que facilita a dispersão do óleo na água, formando uma solução estável (DINIZ et al., 2003).

As emulsões são compostos formados por óleos minerais e água, em proporções que podem variar de 1:10 a 1:100 e agentes emulsificantes ou surfactantes. Segundo Machado et al (2009), a estabilidade da emulsão se deve ao desenvolvimento de uma camada elétrica na interface entre o óleo e a água. A coalescência entre a água e o óleo é evitada através das forças repulsivas entre os glóbulos de mesma carga. As emulsões combinam a característica refrigerante da água com as propriedades de lubrificação e anti-corrosão do óleo. Com isso, esses fluidos extraem melhor o calor da interface peça/ferramenta e realizam uma melhor limpeza as superfície de trabalho. Como desvantagens pode-se citar um menor poder de lubrificação, sem diminuir eficientemente o atrito entre peça e ferramenta (DAMASCENO, 2010).

Os fluidos semissintéticos são constituídos em sua maioria por compostos sintéticos, complementados por óleos emulsionáveis em água. A emulsão é translúcida e composta por pequenas partículas de óleo. Os fluidos semissintéticos combinam qualidades dos fluidos sintéticos (soluções) com os óleos emulsionáveis. Além disso, apresentam grande resistência à corrosão, ao ataque aos micro-organismos, remoção de calor mais rápida e um bom poder lubrificante.

Segundo Diniz et al. (2003) as soluções, ou fluidos sintéticos, são compostos monofásicos de óleos totalmente dissolvidos em água. São soluções químicas constituídas de sais orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, sem a presença do óleo mineral. Os compostos reagem quimicamente formando fases únicas, o que implica na ausência de necessidade de atuação de elementos emulsificadores. De acordo com Bianchi et al. (2004), dentre as principais vantagens da utilização desses fluidos cita-se que eles permitem uma dissipação de calor rápida, bom controle dimensional, elevada resistência à corrosão e boa visibilidade da região de corte. Como desvantagem, têm-se um baixo poder lubrificante, formação de compostos insolúveis e espumas para algumas operações de usinagem.

3.2.2.3 Fluidos de corte integrais ou aditivados

Na categoria de fluidos de corte integrais, ou óleos, estão inclusos os compostos que são capazes de formar películas oleosas, aderentes e lubrificantes. Usualmente esses compostos são de origem mineral, vegetal ou sintético. Esses fluidos podem ser utilizados no estado puro ou aditivado com aditivos químicos ativos ou inativos e com aditivos polares (NOVASKI & RIOS, 2004).

Em sua grande maioria, os óleos minerais apresentam base parafínica, que é composta por aromáticos policíclicos, que podem causar dermatites e câncer caso não sejam destruídos durante o processo de formação do óleo de corte através de hidrogenização (WEBSTER et al., 1995).

As vantagens desses óleos são as excelentes propriedades lubrificantes, boas propriedades anti-corrosão e longa vida útil com pouca contaminação. Porém, esses fluidos possuem um poder refrigerante baixo, quando comparados aos fluidos de corte solúveis em água, devido à baixa condutividade térmica (BIANCHI et al., 2004; DAMASCENO, 2010).

3.3 Mínima Quantidade de Lubrificante – MQL

Segundo Heisel et al. (1998), a técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) é considerada uma alternativa interessante, sendo um elo de ligação entre a usinagem a seco e os métodos de lubri-refrigeração convencionais. Tawakoli (2003) afirma que essa técnica destaca-se como uma tendência nos processos de usinagem como método de lubri-refrigeração. Vários estudos envolvendo usinagem a seco não obtiveram resultados

satisfatórios e percebeu-se que a ausência de lubrificação torna-se inviável quando se analisa a vida útil da ferramenta, os esforços da máquina e a qualidade da peça usinada. Segundo Damasceno 2010, a técnica de MQL então aparece como uma solução a esse problema ao combinar ar comprimido, responsável pela refrigeração, com uma pequena quantidade de óleo, que realiza a lubrificação da interface de contato peça-ferramenta.

3.3.1 Definições da Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante

Em busca da conformidade com a norma ISO série 14000, várias empresas veem dando maior ênfase à tecnologia na área ambiental com o objetivo de desenvolver alternativas não nocivas ao meio ambiente e ao trabalhador. O descarte dos fluidos de corte convencionais é extremamente prejudicial ao meio e também afeta a saúde do trabalhador no chão de fábrica. Por outro lado, apesar das insistentes tentativas de eliminar completamente os fluidos de corte, em muitos casos a lubri-refrigeração ainda é essencial para que se obtenham vida satisfatória de ferramentas e as qualidades superficiais requeridas. Isto é particularmente válido quando há exigência de tolerâncias estreitas e alta exatidão dimensional e de forma, ou quando se trata de usinagem de materiais de difícil usinabilidade. A técnica de mínima quantidade de lubrificante torna-se então a opção ideal para os processos de usinagem, visto que sua aplicação se baseia no princípio de utilização total, ou seja, sem resíduos, além de combinar a funcionalidade da refrigeração, através da utilização de ar comprimido, com um consumo de fluido extremamente baixo, variando de 10 até 100 mL/h a uma pressão de 4,0 a 8,0 kgf/cm² (KLOCKE & EISENBLÄTTER, 1997; HEISEL et al., 1998; DAMASCENO 2010).

Dentre as principais vantagens da técnica de MQL, quando comparada com a lubri-refrigeração convencional, listadas por Heisel et al (1998), pode-se citar:

- a) Dispensa a instalação de um sistema de circulação devido à baixa quantidade de fluido de corte utilizada;
- b) Eliminação da aplicação de biocidas e fungicidas, uma vez que a quantidade de óleo presente no reservatório é renovada constantemente, o que impede que aja tempo para a ação de microorganismos;
- c) Os fluidos de corte convencionais aumentam a necessidade de manutenção e causam grandes problemas e custos relacionados ao despejo e descarte;

d) As peças, ao final do processo, encontram-se praticamente secas, o que dispensa o processo de lavagem subsequente.

Observou-se também que a utilização da técnica de MQL impede o surgimento de gradientes térmicos, que são responsáveis por causar modificações microestruturais heterogêneas, que resulta na formação de tensões superficiais internas que degradam as propriedades mecânicas do material (HEISEL et al., 1998).

No entanto, a técnica de MQL apresenta algumas desvantagens quando comparada à lubri-refrigeração convencional. Como exemplo, Klocke et al. (2000) cita a necessidade de implantação de um sistema capaz de pressurizar o ar outros equipamentos responsáveis pela sucção de poluentes em suspensão no ar.

Diniz et al. (2003) cita como desvantagens da técnica de MQL a poluição ambiental, o consumo e o ruído. Com relação à poluição ambiental, afere-se e ssa desvantagem devido à pulverização que levanta no ambiente muitas partículas de óleo o que exige que a máquina seja completamente vedada e possua um sistema de exaustão com o controle de partículas. O consumo pode ser citado como desvantagem, pois no processo há a perda total do fluido. Assim, quando comparado a produtos sintéticos quando utilizados em concentrações normais, o consumo de fluido torna-se muito maior. As linhas de ar comprimido, que funcionam intermitentemente durante o processo, produzem ruídos normalmente com potência superior à permitida para a audição humana, o que prejudica imensamente a saúde dos trabalhadores ao redor.

Com o intuito de sanar alguns problemas, Heisel et al. (1998) recomendam o uso de óleos de elevada viscosidade com aditivos antinévoa inseridos, que são capazes de reduzir a quantidade de partículas de óleo suspensa no ar atmosférico. Os óleos utilizados devem ser também isentos de solventes e compostos que contenham flúor e, devem apresentar alta capacidade de remoção de calor. De acordo com Damasceno (2010), os principais óleos que atendem os requisitos de “ambientalmente corretos” são os de origem vegetal e por isso eles têm sido muito empregados.

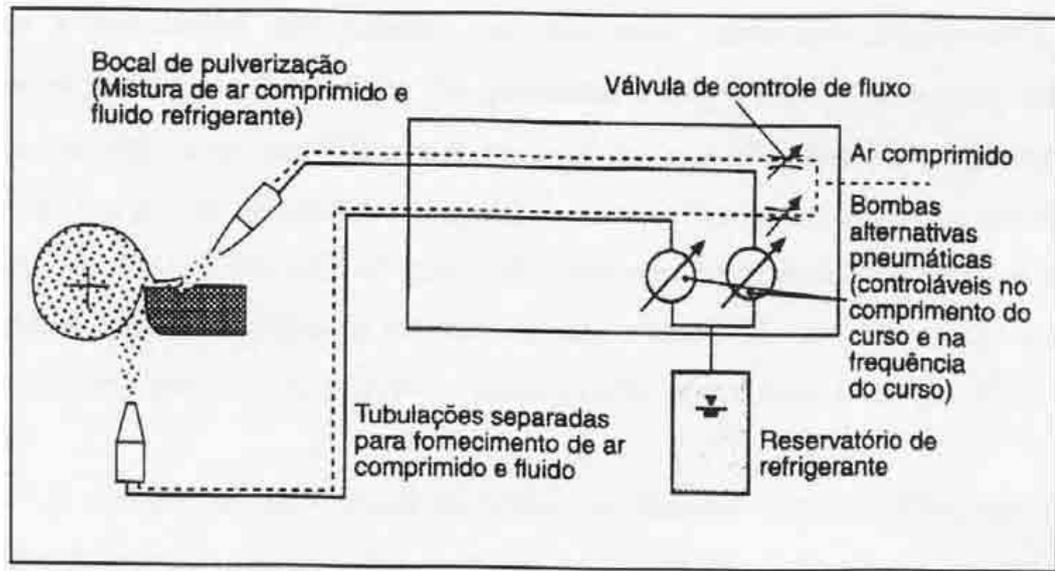
Os óleos de origem vegetal acumulam propriedades que torna ainda mais interessante a sua utilização como: biodegradabilidade, atoxicidade, fluidez, alta capacidade de diminuir atritos e desgastes, elevado ponto de fulgor e boa resistência ao cisalhamento. Na técnica de MQL comumente é usado fluido de corte integral, como ésteres vegetais (ácidos graxo) que são derivados da cultura de oleaginosos.

3.3.2 Sistemas com Mínima Quantidade de Lubrificante

De acordo com Brockhoff & Walter (1998); Heisel et al. (1998) e Klocke et al. (2000), existem três tipos de sistemas de mínima quantidade de lubrificante. Um deles são os sistemas de pulverização de baixa pressão, que se diferenciam por um fluxo volumétrico de fluido de corte de 0,5 a 10 L/h. Nesse sistema o fluido de corte é aspirado por uma corrente de ar e levado à superfície ativa com uma mistura. Suas principais aplicações são para refrigeração com emulsão e produzem uma notável otimização e só podem ser dosados de forma grosseira. Outro tipo de sistema utiliza bombas dosadoras com alimentação pulsatória de uma determinada quantidade de lubrificante para a superfície ativa, sem ar. As taxas de fluxos variam numa faixa de 0,1 a 1 mL por ciclo, podendo até 260 ciclos por minuto. As principais utilizações desse tipo de sistema são em processos intermitentes. O terceiro tipo de sistema da quantidade mínima de lubrificante é o de pressão, onde o fluido de corte é bombeado para o bocal através de uma tubulação de suprimento em separado e, no bocal ocorre uma mistura com o ar comprimido que é fornecido separadamente, de tal forma que as quantidades de lubrificante e de ar comprimido são independentemente ajustadas. Essa mistura coaxial de fluido e ar comprimido no bocal previne eficientemente a nebulosidade. Esse sistema é o mais utilizado, pois combina a funcionalidade da refrigeração com um baixo consumo de fluido, que variam na faixa de 10 a 100 mL/h.

A Figura 1 mostra um diagrama esquemático de um sistema de mínima quantidade de lubrificante apresentado por Heisel et al. (1998) com o princípios de pressão e seis componentes ilustrados.

Figura 1 - Diagrama Esquemático de um Sistema de Mínima Quantidade de Lubrificante



Fonte: Heisel et al., 1998

Os sistemas de mínima quantidade de lubrificante são facilmente integrados com as máquinas, por requererem um espaço pequeno para sua instalação, o que permite uma variedade de posições para sua fixação, possibilitando instalar válvulas de controle para uma melhor integração. A técnica de MQL por ser um sistema flexível para aplicações torna-se vantajoso para principais processos de corte (Heisel et al., 1998 ; Klocke et al., 2000 e Füsse, 2005).

3.4 Processos de Usinagem

3.4.1 Retificação

Com a tendência mundial de produzir peças cada vez mais sofisticadas e elevada qualidade superficial, dimensional ou geométrica, a retificação torna-se um processo extremamente inserido. Esse processo encontra-se no estágio final da produção e é o responsável para solucionar problemas relacionados à qualidade de toda sequência de fabricação (ALVES et al., 2009).

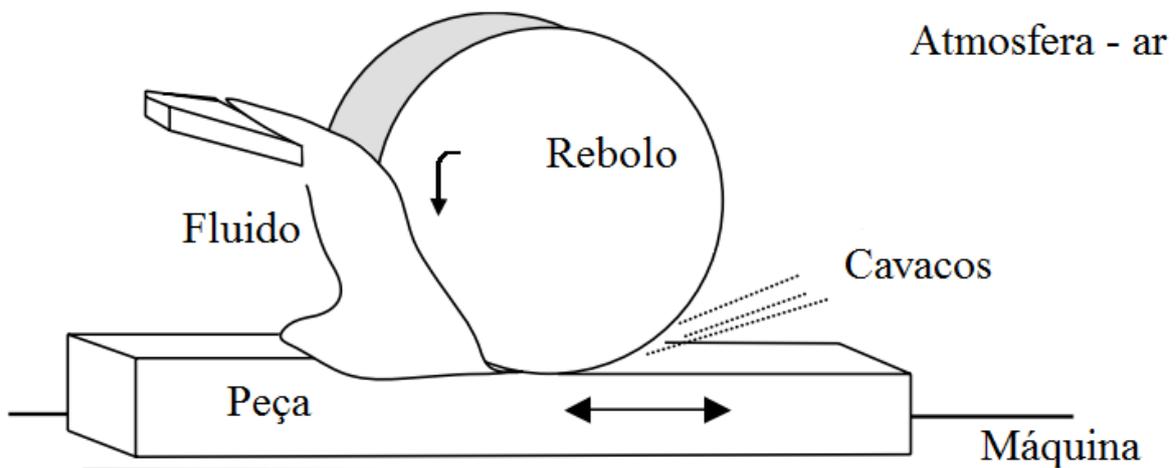
Segundo Marinescu et al. (2007), a retificação é uma operação de usinagem que emprega um rebolo girando em alta velocidade com o objetivo de remover material a partir de um mais duro. Na indústria, a tecnologia de retificação é altamente desenvolvida de acordo com os requisitos do produto e do processo. Além disso, esse processo vem sendo aprimorado

com ao longo dos anos com o intuito de definir os parâmetros importantes para a obtenção de valores de rugosidade reduzidos e bons índices de tolerância dimensional.

De acordo com Malkin (1989), a retificação é um processo de fabricação que utiliza como elemento de corte partículas abrasivas de elevada dureza. Como esse procedimento pode ser influenciado por variáveis sensíveis a pequenas alterações, ele se torna de grande complexidade. Segundo Alves et al. (2009), essa complexidade está associada também ao fato de que o desempenho de tal operação está intimamente relacionado à sensibilidade do operador, à dressagem do rebolo e às condições de usinagem.

Marinescu et al. (2007) considera como elementos principais envolvidos no processo de retificação a máquina, o rebolo, a peça, o fluido de corte, a atmosfera e os cavacos originados pelo processo. A Figura 2 ilustra o processo de retificação baseado nesses seis elementos.

Figura 2 – Seis Elementos Básicos Envolvidos na Retificação



Fonte: Marinescu et al., 2007.

3.4.2 Furação

Segundo Ferraresi (2006), a furação é um processo mecânico de usinagem que para a obtenção de um furo cilíndrico em uma peça, utiliza uma ferramenta geralmente multicortante. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e simultaneamente a ferramenta ou a peça se desloca segundo uma trajetória retilínea, coincidente ou paralela com o eixo principal

de rotação da máquina. A ferramenta destinada a esse processo denomina-se broca. O processo de furação pode ser dividido em operações de furação em cheio, escareamento, furação escalonada, trepanação e furação de centros.

A operação de furação possui características intrínsecas, assim como todos os outros processos de usinagem, e muitas destas características são consideradas fatores complicadores do processo que merecem destaque:

- a) O processo de geração do cavaco ocorre dentro do furo, escondido, e existe um espaço limitado nos canais para a remoção dos cavacos, o que normalmente dificulta o transporte dos mesmos para fora da região de corte;
- b) A velocidade de corte não é uniforme, variando desde zero, no centro do furo, até um máximo na periferia, sendo isto um grande problema que pode implicar em variações de forças atuantes na ponta da ferramenta, no cisalhamento de material da peça, e consequentemente, podendo prejudicar o acabamento superficial;
- c) A lubrificação/refrigeração da região de corte é comprometida, já que o fluido de corte encontra dificuldade (ou não chega) para alcançar a região de corte, devido principalmente ao movimento de rotação da broca que tende a expulsar o fluido;
- d) Há uma distribuição inadequada de calor na região de corte e isso pode afetar a integridade superficial da peça e/ou diminuir a resistência mecânica da broca;
- e) O atrito e desgaste ocorrem de maneira mais acentuada nas quinas com cantos vivos da ferramenta.

A furação tem importância nos processos de usinagem, pois, de acordo com levantamentos realizados, representa aproximadamente 33% do número e aproximadamente 25% do tempo de todas as operações de usinagem (TÖNSHOFF & GRABNER,1984). As ferramentas (brocas) utilizadas nos últimos anos têm tido melhorias sensíveis, que permitem hoje a usinagem com baixo fluido de corte, devido especialmente a revestimentos como o TiAlN que apresenta baixa absorção térmica, alta dureza à quente e baixo coeficiente de atrito.

3.5 Parâmetros dos Processos

3.5.1 Rugosidade

Catai (2004) define rugosidade como microirregularidades geométricas que são decorrentes do processo de fabricação. A mensuração dessa grandeza pode ser feita com base

nos parâmetros de largura e altura dessas irregularidades. A qualidade superficial é diretamente dependente da profundidade de corte empregada, do avanço, da velocidade e da dureza do material que está sendo usinado.

A rugosidade das superfícies da maioria das peças usadas em aplicações industriais é definida entre 0,025 e 1,5 μ m. A qualidade da superfície gerada pode ser capaz de avaliar características da peça e da operação, como eficácia do método de lubrificação, mínimas tolerâncias, condições da ferramenta e transmissão de calor e vibração da máquina (BISCIONI, 2010).

Segundo Hecker e Liang (2003) um eficiente método de medir a qualidade da superfície produzida é por meio do parâmetro definido como rugosidade, que é representado em função da distância entre os vales e picos que existem na superfície. O valor de rugosidade então pode ser obtido pela média dos valores dessa distância, no caso da rugosidade Ra, pelo valor máximo dessa distância, rugosidade Rt, ou ainda pelo valor quadrático médio da mesma como na rugosidade Rq.

No processo de retificação, a superfície típica é isenta de sinais de corte ou ranhuras. Porém, vários microdefeitos podem ser encontrados ao fazer uma análise minuciosa da superfície do material usinado, sendo os principais defeitos crateras provocadas pelas fraturas dos grãos abrasivos e trincas provenientes de bruscas variações térmicas. A rugosidade no processo está relacionada ao tempo de retificação e ao aumento da área de contato do topo do grão que causa uma elevação na temperatura, o que amolece o material e faz com que ele possa aderir mais facilmente aos poros do rebolo, o que gera vários riscos na peça (HECKER e LIANG, 2003).

Com relação ao processo de furação, de acordo com Braga (2001), no início da operação, quando a broca ainda se encontra nova, a rugosidade apresenta-se maior. Após a compensação das diferenças geométricas entre as cunhas de corte, que são geradas pelo desgaste da broca, normalmente a rugosidade tende a diminuir. Alguns cuidados devem, portanto, ser tomados para que se possa garantir a simetria das cunhas e arestas de corte da broca, pois a assimetria entre elas e os desgastes podem comprometer o produto quando à tolerância do diâmetro, concentricidade e circularidade.

3.5.2 Microdureza

A dureza superficial de um material está relacionada com a resistência que um material apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente, quando pressionado por outro material.

O ensaio de dureza normalmente é realizado através da aplicação de uma carga a um indentador sobre a superfície de um material. O valor da dureza é obtido pela divisão do valor da carga aplicada pela calota proveniente da deformação iniciada. Existem vários métodos qualitativos para a análise da dureza de um material, como Rockwell, Brinell, Vickers e microdureza Knoop. No caso da microdureza Vickers, utiliza-se carga menor que 1kgf e o penetrador piramidal de base quadrada que possui um ângulo de 136° entre as faces opostas (BISCIONI, 2010)

3.5.3 Microestrutura (Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV)

A microscopia eletrônica de varredura permite a visualização de superfícies de amostras. É amplamente utilizada no setor metalúrgico por possuir boa resolução e profundidade de foco. O microscópio eletrônico de varredura apresenta uma resolução de cerca de 0,003 μm , enquanto que um microscópio óptico pode chegar a aproximadamente 0,1 μm . O MEV é também capaz de realizar ampliações de até 300.000 vezes, cerca de 300 vezes mais que um microscópio óptico (DAMASCENO, 2010).

3.5.4 Desgaste do Rebolo

O desgaste do rebolo é considerado um processo complexo, devido à existência de vários eventos que podem provocar o desgaste entre os grãos e a peça. Os mecanismos de desgaste dos rebolos são: por desgaste abrasivo, fratura das pontes ligantes, pela variação térmica e fratura na interface entre o grão abrasivo e a ponte ligante ou fratura dos grãos devido ao impacto de carga mecânica. A causa do desgaste do rebolo pode estar relacionada com os parâmetros de retificação, com o tipo da peça ou do fluido refrigerante usado. Além disso, o desgaste pode ser causado por ataque químico de componentes do fluido de corte, por danos térmicos do processo abrasivo ou por atrito (DAMASCENO, 2010).

De acordo com Silva et al. (2007), o desempenho do rebolo pode ser avaliado através da relação G , que pode ser definida como a relação entre volume de metal removido Z_w (mm^3) e volume de rebolo gasto Z_s (mm^3).

3.5.5 Desgaste do Flanco

Existem vários fatores que determinam a fixação de um determinado desgaste, e consequentemente a vida da ferramenta (FERRARESI, 2006): o desgaste da superfície de saída da ferramenta atinge proporções tão elevadas, que se receia uma quebra da aresta cortante; os desgastes chegam a valores, cuja temperatura da aresta cortante se aproxima da temperatura, na qual a ferramenta perde o fio de corte; devido ao desgaste da superfície de folga da ferramenta, não é mais possível manter as tolerâncias exigidas na peça; o acabamento superficial da peça usinada não é mais satisfatório; o aumento da força de usinagem, proveniente dos desgastes elevados da ferramenta, interfere no funcionamento da máquina.

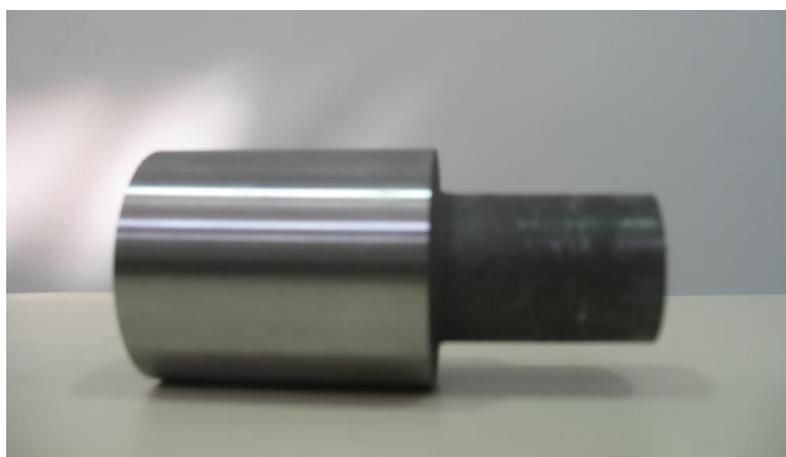
Segundo Arenas Miranda (2003), o mecanismo dominante de desgaste de flanco a baixas velocidades é do tipo abrasivo, quando essa velocidade aumenta, o desgaste passa a ser predominantemente por adesão e, em velocidades mais altas, a difusão torna-se o mecanismo de desgaste predominante.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Retificação

Para o desenvolvimento do trabalho foram confeccionados corpos de prova de aço ABNT 4340 (Figura 3), com diâmetro externo de 36 mm e comprimento retificado de 42 mm, enviados para tratamento térmico (têmpera) em banho de sais, e revenidos à 127°C, com dureza média de 50-52 HRc.

Figura 3 - Corpo de Prova de aço ABNT 4340.



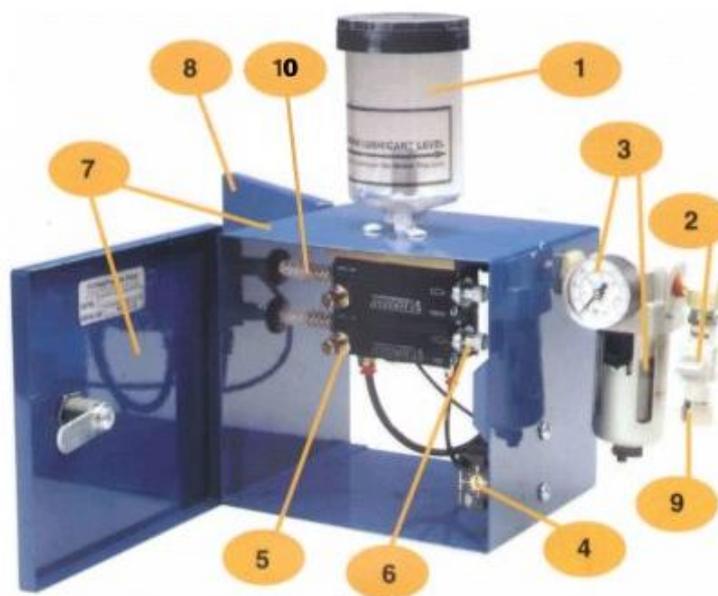
Fonte: Autora.

O rebolo utilizado foi um de óxido de alumínio (Al_2O_3), com as seguintes características: (355,6 x 50,8 x 127 – FE 38A60KV), em uma retificadora cilíndrica universal TosHostivar na operação de mergulho externo, com velocidade periférica do rebolo de 30m/s e utilização de fluido de corte sintético da marca Castor, e do Accu-Lube LB 1000, um lubrificante natural e biodegradável, para fins de comparação.

O equipamento utilizado para o controle da mínima quantidade de lubrificante (MQL) foi o *Accu-lube*, da empresa *ITW Chemical Products Ltda* (Figura 4), o qual usa sistema pulsante de fornecimento de óleo e permite a regulagem da vazão de ar comprimido e lubrificante de maneiras separadas. A confecção do bocal (Figura 5) permitiu uma velocidade do ar comprimido próxima à velocidade periférica do rebolo (30m/s). Tal velocidade é necessária de forma que a mistura (lubrificante + o ar comprimido) penetre na região de contato entre ferramenta e peça agindo de forma favorável à lubri-refrigeração do processo. Para efetuar a medição com precisão da vazão de ar comprimido foi adquirido um

medidor de vazão de ar comprimido tipo turbina 1/2" - gás SVTG com indicador de vazão ligado à unidade distribuidora de fluido de corte (Figura 6).

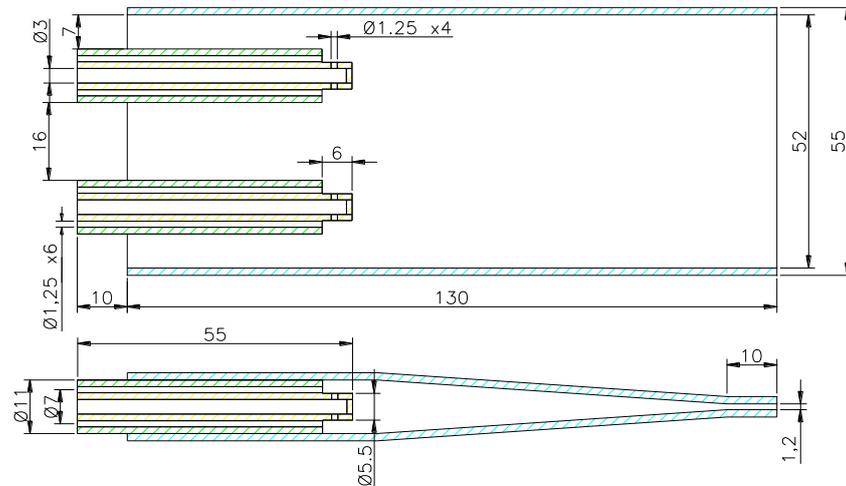
Figura 4 - Equipamento Accu-Lube para controle do MQL



1. Reservatório 300 ml;
2. Registro de acionamento;
3. Manômetro e filtro de ar (deve atuar entre 80 e 150 psi ou 5,6 e 10,5 kgf/cm²);
4. Gerador de frequência (sentido horário aumenta frequência);
5. Bomba pneumática de ajuste individual;
6. Ajuste do fluxo de lubrificante;
7. Caixa metálica;
8. Furos de montagem ou bases magnéticas para fixação rápida;
9. Entrada de ar (mínimo 80 psi ou 5,6 kgf/cm²);
10. Saída para o bocal aplicador.

Fonte: Autora.

Figura 5 - Projeto do bocal utilizado na retificação com a técnica de MQL.



Fonte: Autora.

Figura 6 - Medidor de Vazão de ar SVTG.



Fonte: Autora.

Um banco de ensaios foi instalado no Laboratório de Retificação (retificadora cilíndrica externa) no Departamento de Engenharia de Materiais. Para os ensaios definitivos foram estabelecidos as seguintes condições de usinagem: velocidade de mergulho (v_f) de 1mm/min, velocidade de corte (v_s) de 33 m/s, rotação da peça (v_w) de 155 rpm, penetração do rebolo na peça (a) de 0,1 mm, tempo de centelhamento (t_s) igual a 12 segundos, largura de

retificação de 42 mm, profundidade de dressagem (*ad*) de 0,04mm. A operação de dressagem foi mantida constante, na qual se utilizou dressador de ponta única, não influenciando as variáveis de saída do processo. Os ensaios foram constituídos por ciclos de retificação, os quais foram responsáveis pela penetração de 1 mm do rebolo durante cinco etapas, totalizando uma redução de 5 mm no diâmetro do corpo de prova. Com os parâmetros de corte definidos, pôde-se planejar a matriz de experimentos para os testes definitivos utilizando rebolo de óxido de alumínio (Al_2O_3) conforme mostra a Tabela 1.

Tabela 1. Matriz de experimentos na realização dos ensaios definitivos com rebolo de (Al_2O_3).

Ensaio	Vazão de lubrificante LB 1000 - (mL/h)	Velocidade do jato de ar comprimido (m/s)	Vazão do jato de fluido de corte (L/min)
1	20	26,40	-
2	20	19,80	-
3	40	26,40	-
4	40	19,80	-
5	60	26,40	-
6	60	19,80	-
7	80	26,40	-
8	80	19,80	-
9	-	-	11

Para alcance de confiabilidade na análise dos resultados, foram realizadas 2 repetições para cada condição de lubri-refrigeração, para se utilizar 3 diferentes vazões de ar comprimido, para fins de análise da melhor combinação vazão de ar – vazão de óleo que proporciona o melhor acabamento à peça.

Em seguida, a medição da rugosidade foi realizada ajustando o rugosímetro da marca *Mitutoyo*, para o comprimento de amostragem (*cut-off*) de 0,8mm. No fim de cada ensaio, mediu-se os valores da rugosidade média R_a em oito posições distintas e equidistantes a 45° aproximadamente.

Após a realização do tratamento térmico e do processo de retificação, amostras de todas as condições foram submetidas a procedimentos metalográficos. As peças foram cortadas através de sistema de corte a disco refrigerado, onde foi retirada uma seção transversal de cerca de 2mm de espessura de cada amostra, cilindro esse que foi posteriormente cortado em 4 pedaços de 90° cada. Em seguida, as peças foram embutidas a frio com acrílico autopolimerizável, lixadas com lixas de granulometria #240, #280, #400 e #600 e polidas com panos revestidos com pastas diamantadas de 9 μ m, 3 μ m e 1 μ m, até que se obtivesse uma

superfície espelhada, sem riscos e arranhões, que possibilitasse a análise de boa qualidade através de microscopia ótica.

A preparação das peças foi conduzida de maneira usual e o reagente empregado foi o Nital 2%. As imagens foram obtidas em um microscópio óptico Fortel. Nessas imagens, foi possível ver a eficiência ou ineficiência de cada ensaio realizado, e fazer uma previsão de qual deles de encaixa melhor em âmbito industrial.

Em seguida, as amostras foram levadas à Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), foram realizadas em microscópio JEOL JSM-840A SEM com ampliação de 1.000, 2.000 e 4.000X. onde foram realizadas as últimas análises dos corpos de prova. O MEV detalhou a microestrutura de cada amostra e permitiu estabelecer precisamente quais os melhores parâmetros de ar e óleo lubrificante a serem utilizados na indústria, para que esta obtenha um produto de excelente qualidade e ecologicamente correto.

As peças foram também preparadas para a medição da microdureza, que permitiu a avaliação do efeito da lubri-refrigeração nas propriedades mecânicas do material. Os valores da microdureza foram obtidos usando um microdurômetro digital Leitz, com carga de 200g e tempo de aplicação de 30s, a uma distância de 70 μ m da superfície das peças.

4.2 Furação

Para se aplicar a técnica de MQL foi necessário construir um bocal específico para tal aplicação. O bocal deve otimizar a mistura entre o óleo lubri/refrigerante e o ar comprimido. Tomando como base alguns artigos sobre furação com aplicação de MQL, foi definido o desenho final do bocal. O material escolhido para a confecção do bocal (Figura 7) foi o latão, pelo fato deste material apresentar boa usinabilidade. O bocal foi usinado em torno mecânico e em um centro de usinagem, e os corpos de prova foram seccionados de barras por uma serra automática. Os corpos de prova utilizados foram de aço ABNT 1020 e aço ABNT 1045 (Figura 8) possuem formas retangulares com as seguintes dimensões: comprimento de 95mm, largura de 50mm e espessura de 5/8".

Figura 8 - Corpos de prova antes da furação: aços ABNT 1020 e ABNT 1045



Fonte: Autora.

Os experimentos foram executados em um centro de usinagem CNC (*Romi Discovery 560*), portanto, foi necessária a elaboração de um programa CNC para que os experimentos fossem realizadas.

Para a montagem da unidade de ar comprimido foi construído um cavalete com a finalidade de acoplar o medidor de vazão de ar comprimido facilitando o transporte do mesmo. O equipamento utilizado para o controle da mínima quantidade de lubrificante (MQL) foi o *Accu-lube*, da empresa *ITW Chemical Products Ltda*, o mesmo do processo de retificação. O banco de ensaios foi montado com o acoplamento do equipamento de MQL ao medidor de vazão e ao centro de usinagem (Figura 9).

Figura 9 - a) Banco de ensaios; b) Disposição dos bocais no CNC.



(a)



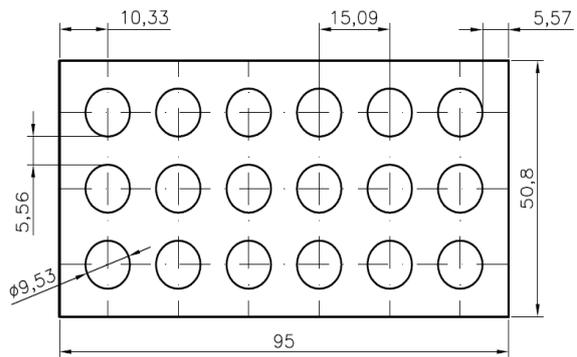
(b)

Fonte: Autora.

Os valores de velocidade de corte e de avanço da ferramenta foram escolhidos por meio de pré-testes e com o auxílio de referências bibliográficas. Os parâmetros avaliados foram a medição da rugosidade, a análise por meio de MEV e a medição do desgaste do flanco das brocas.

Antes de se iniciar os experimentos foram realizados pré-testes para obter parâmetros (velocidade de corte e avanço da ferramenta) necessários para os processos de furação. Os furos executados nos pré-testes e nos ensaios foram passantes. Utilizando de referências bibliográficas, foram avaliados três valores para a velocidade de corte (20 m/min, 25m/min, 30 m/min) e três para o avanço da ferramenta (0,08 mm, 0,12 mm, 0,18 mm). Para os pré-testes a condição de lubri-refrigeração foi a emulsão de fluido de corte por jorro. Três (03) corpos de prova de aço ABNT 1020 foram utilizados para avaliar os parâmetros: para o primeiro fixou-se a velocidade de 20m/min e variou-se o avanço, para cada avanço um segmento de furos (Figura 10); da mesma forma aplicou-se no segundo e terceiro corpo de prova, mas com velocidades de corte de 25m/min e 30m/min, respectivamente. Com o aço ABNT 1045, foi utilizado um (01) corpo de prova, fixou-se o valor de velocidade de corte de 30m/min e variaram-se os valores do avanço. Os valores mais altos de velocidade de corte e avanço foram analisados na condição a seco, um ambiente bem severo para o processo.

Figura 10 – a) Desenho do corpo de prova. b) Corpo de prova de aço ABNT 1020 após a furação.



(a)



(b)

Fonte: Autora.

Após a análise dos parâmetros foi determinado que os experimentos fossem realizados sob velocidade de corte de 25m/min e avanços de 0,12mm\rev e 0,18mm\rev.

Para o jorro de fluido de corte utilizou-se óleo sintético *Syntilo 9902 Castrol* possuindo concentração de 5%, este foi vazado com 3,33L/min por cada bico. O óleo e o ar comprimido vazavam a 15mL/h em cada bico na técnica de MQL, com velocidade de aproximadamente 122m/s, utilizando fluido da *Accu-lube LB 1000*. A pressão exercida pelo equipamento de MQL foi de 6,5kgf/cm.

As brocas utilizadas sem e com revestimento foram as do fabricante Dormer, com 3/8"; e o revestimento foi com TiN (Nitreto de Titânio) (Figura 11).

Figura 11 – a) Broca sem revestimento. b) Broca revestida.



(a)



(b)

Fonte: Autora.

Os experimentos com o aço ABNT 1020 foram realizados sob as três condições: a seco, jorro de fluido de corte e MQL. Já para o aço ABNT 1045 realizaram-se sob jorro de fluido de corte e MQL. Os dois valores de avanços foram utilizados em cada condição dos dois aços. Em todos os corpos de prova foram executados dezoito (18) furos. Para cada valor de avanço utilizou-se seis (06) corpos de prova totalizando 108 furos. Primeiro utilizou-se o avanço de 0,12mm e, em seguida, o de 0,18mm. O mesmo foi feito com brocas helicoidais não revestidas e com as revestidas.

Os corpos de prova foram armazenados de forma que a ordem deles e de seus furos (primeiro corpo de prova usinado até o sexto e o primeiro e último furo executado em cada corpo de prova) foi assinalada para a análise de rugosidade.

Terminados os experimentos, realizaram-se as imagens das brocas para verificar o desgaste. As imagens foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV), o equipamento utilizado foi o *Shimadzu SSX-550 Superscan Scanning Electron Microscope* (Figura 12). O aumento utilizado em todas as imagens foi de 20 vezes.

Figura 12 – Shimadzu SSX-550 Superscan Scanning Electron Microscope.



Fonte: Autora.

A etapa seguinte foi a medição de rugosidade dos furos dos corpos de prova. O rugosímetro utilizado foi o *Mitutoyo Surftest SJ-201P*. Analisaram-se os primeiros e últimos furos de cada corpo de prova. Quatro (04) medições foram realizadas em cada furo (Figura

13). Os parâmetros de rugosidade escolhidos para o estudo foram Ra (rugosidade média) e Ry (rugosidade máxima). Os dados coletados foram dispostos em gráficos.

Figura 13 – Banco de medição de rugosidades.



Fonte: Autora.

5. RESULTADOS

Através da montagem da bancada de experimentos, realização dos pré-testes e testes definitivos, adquiriu-se os conhecimentos necessários relacionados a processos de tratamentos térmicos (têmpera e revenimento) de peças utilizadas após o processo de retificação, além de conhecimentos relacionados à otimização da utilização de fluidos de cortes convencionais e biodegradáveis.

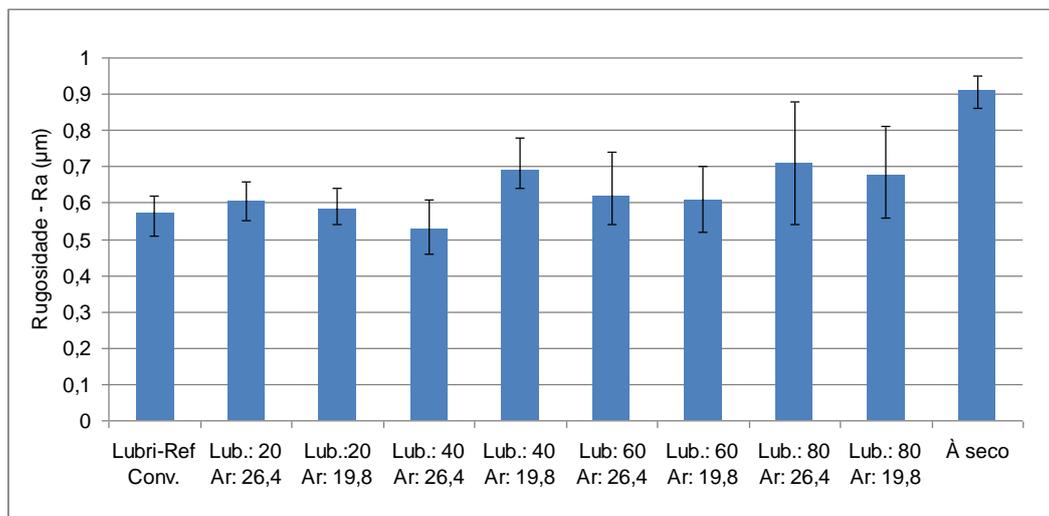
Através de revisão bibliográfica, pode-se comparar a utilização de vários fluidos de corte, tanto os convencionais utilizados na indústria, quanto os fluidos biodegradáveis e ambientalmente corretos, propostos na utilização da MQL como aplicação na retificação e na furação.

5.1 Retificação

5.1.1 Rugosidade

Ao serem submetidos a ciclos de fadiga, a rugosidade pode afetar de forma significativa a resistência de componentes. Várias propriedades do material como: desgaste, coeficiente de atrito, lubrificação, resistência mecânica e condutividade térmica estão diretamente relacionadas com o acabamento superficial das peças. A Figura 14 apresenta os resultados médios do parâmetro R_a (μm) de peças que foram submetidas à condição de lubri-refrigeração convencional (por jorro), técnica de MQL e na condição a seco.

Figura 14 - Rugosidade (R_a) utilizando rebolo de óxido de alumínio após 5 ciclos de 1 mm nas diversas condições de lubri-refrigeração (Ar: m/s e Lub: mL/h) e a seco.



Fonte: Autora.

Já é bastante conhecido que vários fatores podem influenciar a rugosidade de uma peça retificada, especialmente as condições de lubri-refrigeração, a taxa de remoção do material, o tamanho do grão abrasivo, as condições de dressagem e o tempo de centelhamento. Ao analisar os valores de rugosidade encontrados para as condições de lubri-refrigeração percebe-se que para várias condições de vazão de óleo biodegradável combinado com uma velocidade de ar comprimido, que a técnica de MQL apresenta valores de R_a correspondente a condição de lubri-refrigeração convencional, o que atesta a eficácia da técnica de MQL no parâmetro R_a .

O desempenho da técnica de MQL similar ao da lubri-refrigeração convencional pode ser explicado pela lubrificação e refrigeração efetiva na interface peça-rebolo. Devido a essa lubrificação eficiente, o cavaco pode deslizar na face da ferramenta permitindo um melhor acabamento superficial. A condição de lubri-refrigeração da técnica de MQL que apresentou melhores resultados foi a de ar comprimido de 26,4 m/s e vazão de lubrificante de 40 mL/h. Segundo Silva et. al. (2011) a emulsão apresenta como característica básica sua eficaz retirada de calor da peça, porém com uma baixa lubrificação do sistema afetando o valor da rugosidade.

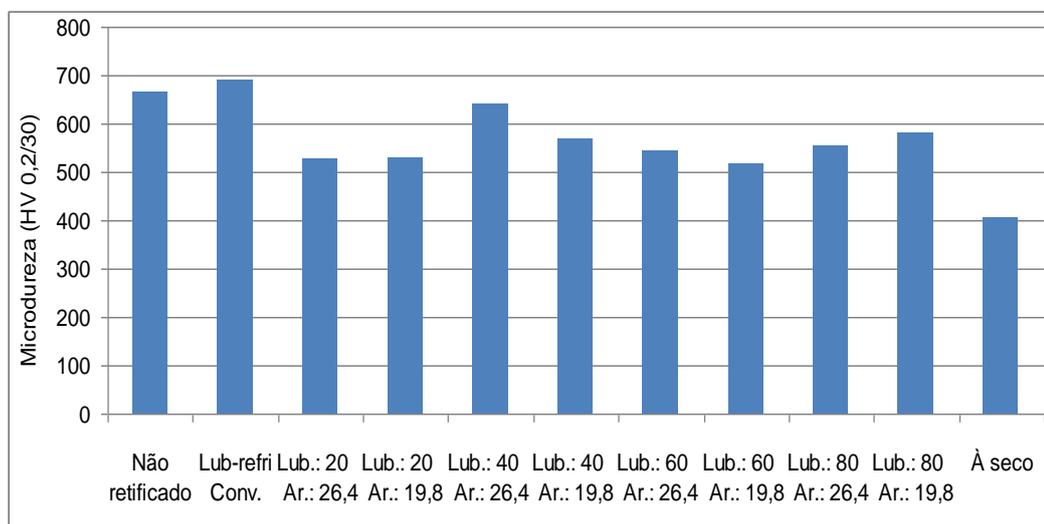
A condição de retificação a seco apresentou os maiores valores de rugosidades encontrados, quando comparado aos das diversas condições de lubri-refrigeração. Isso ocorreu devido à adesão de material na superfície do rebolo e ao entupimento na sua porosidade o que proporcionou um pior acabamento. A peça submetida à condição a seco, ao final do processo de retificação, apresentou uma temperatura elevada, não sendo possível sua

retirada sem proteção. Como a retificação é geralmente utilizada para proporcionar tolerâncias dimensionais apertadas, a elevação excessiva da temperatura pode comprometer essa função, uma vez que ocasiona dilatação térmica da peça, o que leva a imprecisões no diâmetro da mesma e alterações subsuperficiais.

5.1.2 Microdureza

A Figura 15 apresenta os valores encontrados de microdureza para as diversas condições de lubri-refrigeração. Para avaliar a influência do processo de retificação na microdureza mediu-se uma amostra que passou apenas pelo tratamento térmico, sem passar pelo processo de retificação. Percebe-se que os valores encontrados para microdureza para a peça apenas tratada termicamente se assemelha ao encontrado na condição de lubri-refrigeração convencional. Para as condições de MQL e a seco, verificou-se uma queda no valor da microdureza devido ao aquecimento proveniente do processo de retificação seguido de resfriamento lento.

Figura 15 - Variação da microdureza na profundidade de 70 μ m da superfície das peças nas diversas condições de lubri-refrigeração após 5 ciclos de 1 mm.



Fonte: Autora.

Ao analisar o gráfico percebe-se que o valor de microdureza associado à condição de vazão de ar comprimido com velocidade de 26,4 m/s e vazão de óleo de 40 mL/h é o que se assemelha com o da condição de lubri-refrigeração convencional e da peça tratada

termicamente, resultado compatível com os parâmetros encontrados para a medida da rugosidade.

Segundo Silva et al. (2011), durante o processo de retificação, a elevada temperatura de corte pode causar certo amolecimento na peça na região próxima à superfície retificada. Esse processo de perda da dureza superficial é um fenômeno complexo, pois está associado a um possível revenimento da estrutura martensítica e com difusão de carbono, mostrando-se dependente da temperatura e do tempo envolvido no corte.

A condição de refrigeração a seco apresentou valores de dureza menores que as demais condições, o que é prejudicial à resistência ao desgaste. A alta temperatura na região do corte, sem a presença da refrigeração, transfere uma grande quantidade de calor à peça. Como o resfriamento seguido é lento, a possibilidade de um “revenimento” é mais efetiva, o que resulta em valores de microdureza menores.

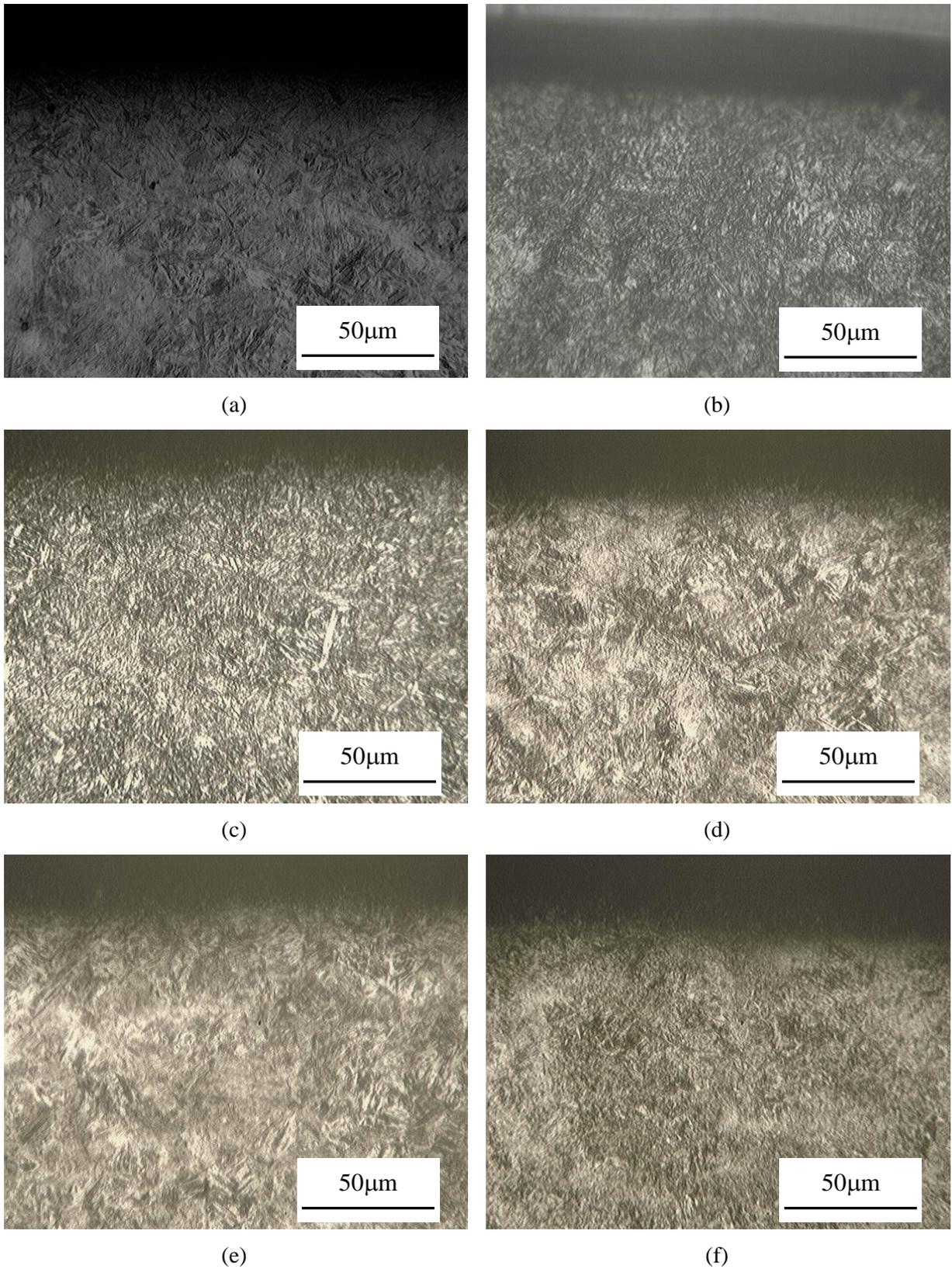
Malkin (1989) refere que na prática a combinação do comportamento em relação ao revenimento com a análise térmica a fim de prever a queda de dureza na peça, é interessante. Resultados experimentais demonstram que temperaturas mais altas e tempos mais longos em que a peça fica exposta a essas temperaturas, com velocidades da peça menores, ou comprimentos de contato mais longos, resultando em maior perda de dureza da peça.

5.1.3 Microestrutura

5.1.3.1 Microscopia óptica

A análise da microscopia óptica (Figura 16) permite observar que foram obtidas estruturas martensíticas revenidas em todas as condições testadas, evidenciando o resultado de microdureza demonstrado pela Figura 15. Foi concluído que as características microestruturais do material não foram afetadas pelo método de lubri-refrigeração, proporcionado uma ótima combinação de alta dureza e resistência mecânica, aliadas a comportamento dúctil e tenaz do material, ideais para muitas aplicações industriais.

Figura 16 - Microscopia óptica subsuperficiais nas diversas condições de lubri-refrigeração após 5 ciclos de 1mm - 400x. (a) tratamento térmico, (b) lubri-refrigeração convencional, (c) a seco, (d) lub:40ml/ ar: 25,2 m/s, (e) lub.:20mL/h ar: 25,2 m/s (f) lub.: 60mL/h ar: 25,2 m/s.



5.1.3.2 *Microscopia Eletrônica de Varredura - MEV*

Afim de conhecer melhor a microestrutura após o processo de retificação foi realizada a análise da microestrutura através da Microscopia Eletrônica de Varredura.

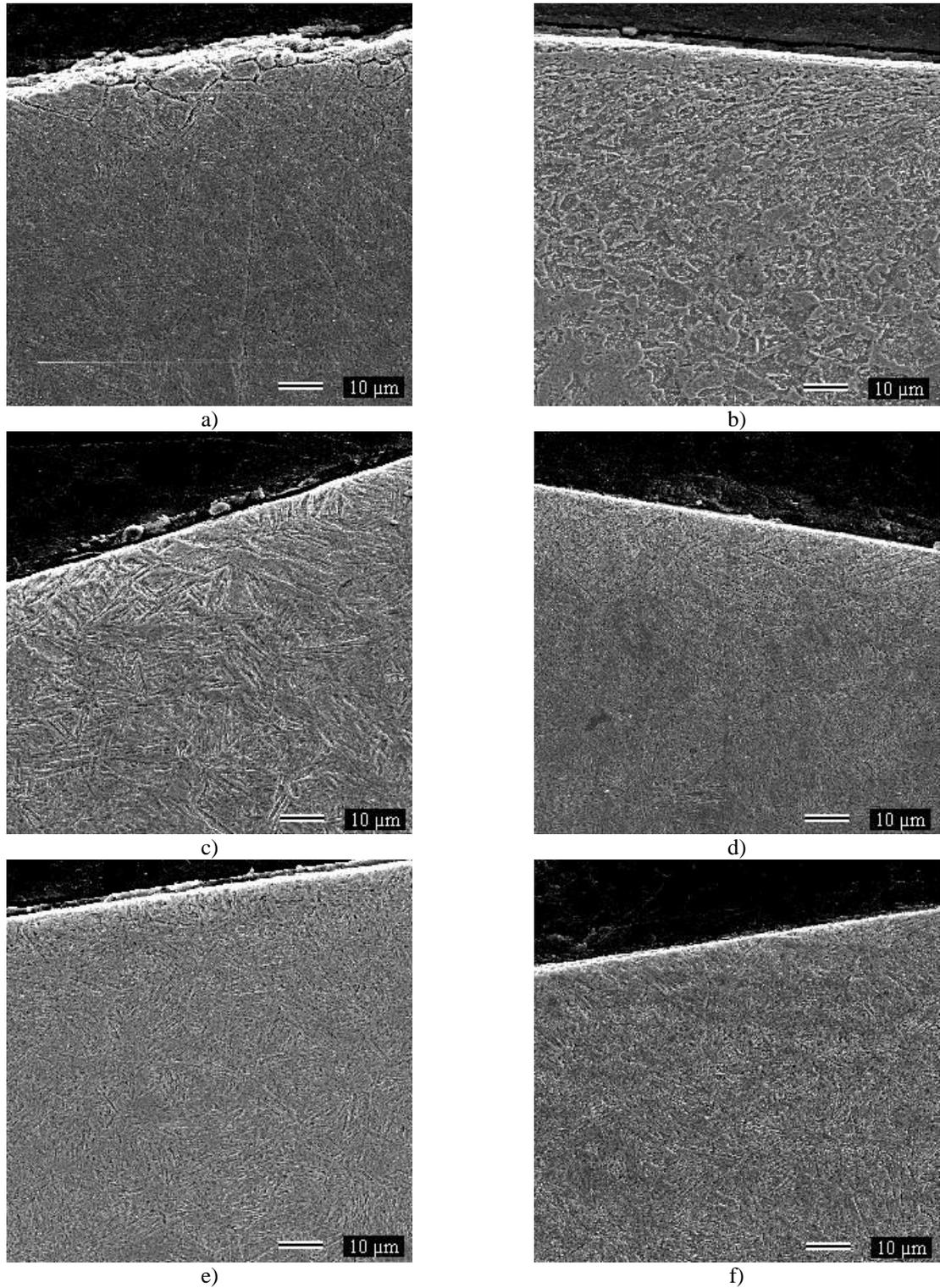
As solicitações térmicas e mecânicas da peça podem ser influenciadas por vários fatores como a forma de aplicação, a velocidade, a vazão do fluido de corte e a geometria do bocal. Devido à elevada dureza do material, a planicidade das amostras submetidas ao MEV não foi a adequada para a ampliação desejada, pois encontrou-se certa dificuldade durante o lixamento e polimento manual.

A Figura 17 apresenta os resultados referentes às observações de alterações subsuperficiais das amostras produzidas sob condição a seco, lubri-refrigeração convencional, da peça tratada termicamente e das peças com as melhores condições da técnica de MQL.

O surgimento de danos à integridade superficial de uma peça pode alterar a resistência à abrasão e à corrosão, levar à aceleração do processo de fadiga da peça e provocar o surgimento e propagação de trincas. Nota-se que as diferentes condições de lubri-refrigeração quando comparadas entre si não apresentaram grandes alterações superficiais, não havendo diferenças significativas.

Ao analisar a microestrutura das diferentes amostras, pode-se relacioná-las com os valores encontrados para a microdureza. Considerando apenas o material submetido à têmpera seguida de revenimento, podem ser observadas agulhas de martensita com plaquetas de bainita (Fig. (17a)). Na condição de lubri-refrigeração convencional (Fig. (17c)), nota-se a presença forte de martensita, o que explica o aumento da dureza do material na subsuperfície. Na condição a seco (Fig. (17b)), percebe-se uma alteração da microestrutura, com a presença de martensita revenida com ligeira deformação no sentido de conformação da peça, além da alteração da fase, o que permitiu provavelmente uma maior difusibilidade do carbono. Nas demais microestruturas percebem-se a presença de martensita, se assemelhando com a condição de lubri-refrigeração convencional.

Figura 17 - Micrografias da subsuperfície do aço ABNT 4340 temperado e revenido nas diversas condições de lubri-refrigeração após 5 ciclos de 1mm - MEV 1000x. a) não retificada; b) a seco; c) lubri-refrigeração convencional; d) lub: 40ml/h ar: 26,4 m/s; e) lub.: 20mL/h ar: 26,4m/s; f) lub.: 60mL/h ar: 26,4m/s.

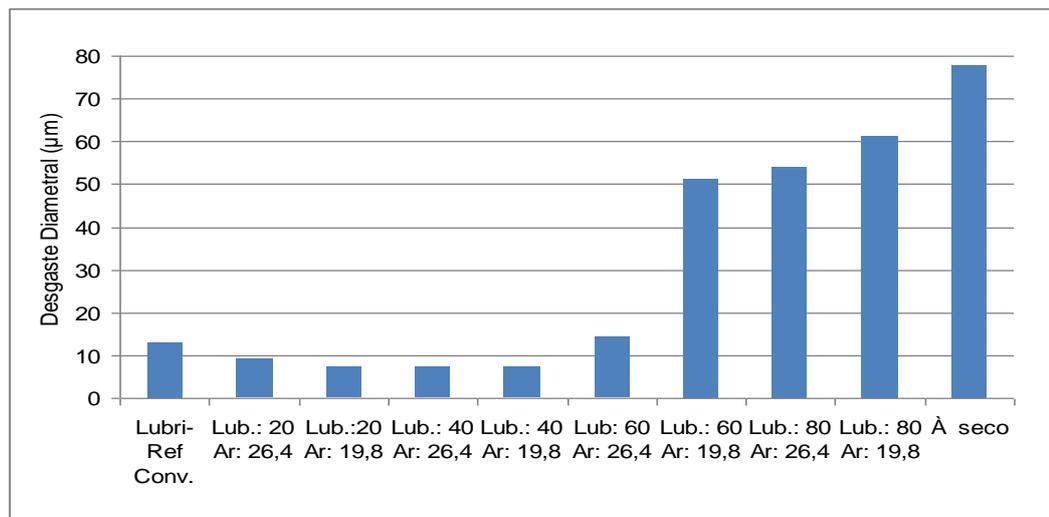


Fonte: Autora.

5.1.4 Medição do Desgaste Diametral do Rebolo

A retificação nos corpos de prova foi realizada utilizando apenas 42 mm da largura total do rebolo (50,8mm). Dessa forma, o restante não utilizado no ensaio foi escolhido como referência para a medição da perda diametral do rebolo. A Figura 18 mostra a comparação entre os valores do desgaste diametral para as diversas condições de lubri-refrigeração. Os valores de desgaste foram obtidos após cinco ciclos de retificação, totalizando uma remoção de 5 mm no diâmetro da peça. Através da análise do gráfico é possível verificar a eficiência da aplicação da técnica de MQL quando comparada com a lubri-refrigeração convencional, devido a sua excelente capacidade de lubrificação na região de contato rebolo-peça. Nota-se que a aplicação de MQL em várias condições apresentou melhor desempenho do que a lubri-refrigeração convencional.

Figura 18 - Resultado do desgaste diametral após 5 ciclos de 1 mm nas diversas condições de lubri-refrigeração (Ar: m/s e Lub: mL/h).



Fonte: Autora.

O atrito entre os grãos abrasivos e a peça ocasionam fenômenos como o desgaste do rebolo. As diferentes condições de lubri-refrigeração levaram a diferentes resultados de desgaste diametral do rebolo. Quanto maior o poder lubrificante do fluido, menor o desgaste do rebolo, pois ocorre uma redução do atrito grão-peça e do atrito cavaco-ligante, permitindo que os grãos abrasivos permaneçam por mais tempo ao ligante ocasionando menor desgaste da ferramenta.

Como já dito anteriormente, provavelmente ao entupimento na porosidade do rebolo e adesão de material na superfície do rebolo na condição a seco também afetou o desgaste do rebolo, mostrando um valor maior em relação às demais. Por outro lado, nesta condição temos na interface rebolo-peça uma maior geração de calor o que proporciona uma menor resistência do material ligante do rebolo e conseqüentemente maior desgaste do rebolo.

Novamente, a condição de lubri-refrigeração 40mL/h e 26,4 m/s proporcionaram um melhor desempenho na avaliação do desgaste do rebolo.

5.2 Furação

5.2.1 Aspectos Gerais

5.2.1.1 Furação a seco

A furação a seco se mostrou um processo severo que pode diminuir muito o tempo de vida da ferramenta. As brocas utilizadas e os cavacos retirados apresentaram mudança de coloração (cor azul ou até mesmo ocorrência de queimaduras) devido às altas temperaturas que foram submetidos. À medida que se aumentava o avanço, o calor no processo também aumentava, tornando a coloração da broca azulada. Com o avanço de 0,18mm foi observado a ocorrência de faíscas a partir do segundo corpo de prova, o que comprova a severidade do processo a seco. O alto calor também provocou a deposição de material fundido na broca, fato que impede a boa execução do processo de furação. Os cavacos na furação a seco se apresentaram descontínuos/quebrados/curtos.

Segundo Machado et al. (2009), a quebra de cavacos tem origem a partir de tensões geradas na interface ferramenta/cavaco que propiciam trincas nos cavacos e, por conseguinte, facilitando os seus rompimentos. A furação a seco, por não possuir fluido de corte, apresenta altos valores de atrito entre a ferramenta e a peça, que geram altas tensões de cisalhamento e, portanto, elevadas temperaturas, tais fatores levam as características obtidas dos cavacos nesta condição de furação.

Percebe-se o surgimento de rebarba na furação a seco, as rebarbas eram contínuas (calotas esféricas localizadas sobre os furos, onde as brocas terminavam a execução destes). Machado et al (2009), afirma que quanto mais calor é gerado no processo de usinagem, a peça

pode se tornar mais dúctil em algumas regiões, esta ductilidade dificulta a quebra do material gerando, conseqüentemente, as rebarbas contínuas.

5.2.1.1 Furação sob emulsão

As brocas na furação sob emulsão de fluido de corte não apresentaram características diferentes de antes da utilização perceptíveis a olho nu, devido à condição não ser severa em relação à peça e ferramenta. Os cavacos eram parcialmente contínuos e helicoidais, eles possuíram estas peculiaridades devido ao fluido em abundância aplicado. A propagação de trincas em cavacos proporcionadas pelo cisalhamento criado entre peça/ferramenta/cavaco é interrompida pela diminuição de contato entre a ferramenta e o cavaco causada pelo fluido (MACHADO et al, 2009). A usinagem sob emulsão de fluido de corte gerou pequena quantidade de rebarbas.

5.2.1.1 Furação com MQL

A furação sob MQL demonstrou características diferentes das outras duas condições de usinagem. As peças e as brocas sofreram aumento de calor considerável, menor que na furação a seco. A técnica de MQL é uma condição mais severa que a por emulsão de fluido devido a quantidade baixa de fluido para executar a refrigeração e lubrificação da ferramenta e da peça; porém é uma condição mais branda que a usinagem a seco, pois esta última não apresenta a capacidade de refrigeração e lubrificação. Os cavacos obtidos na furação com MQL se apresentaram parcialmente contínuos e mais longos que os da usinagem por emulsão. Como a sollicitação térmica com MQL é maior que por emulsão, nesta técnica torna-se o material (peça) mais dúctil (MACHADO *et al*, 2009), dificultando, assim, a quebra de cavacos.

Na furação com MQL não foi necessário o armazenamento do fluido utilizado após o processo, como é realizado na lubri-refrigeração convencional, em que o fluido restante é estocado em tambores para a sua reutilização, o que proporciona problemas com espaço. Como a quantidade de fluido na técnica de MQL é baixa e a sollicitação térmica deste processo, que é relativamente alta, causa evaporação do fluido, gerando névoa que não se mostrou densa e ficou presente, principalmente, no interior do centro de usinagem. Portanto, a

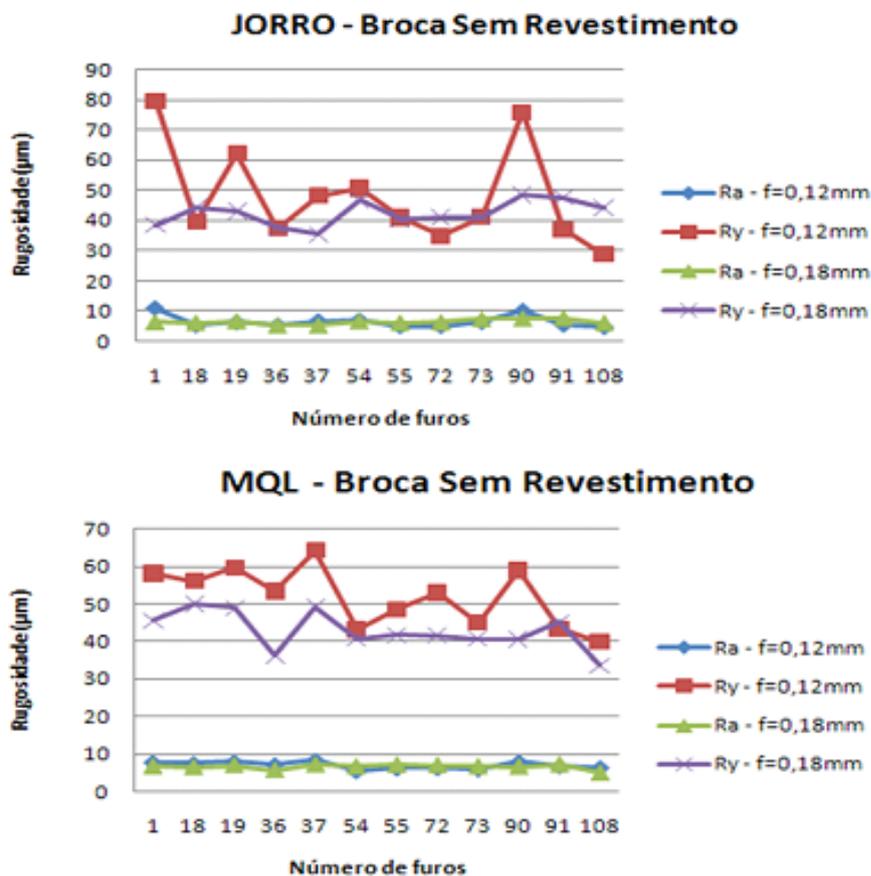
técnica de MQL se mostrou mais adequada aos requisitos ambientais e da saúde do operador que o processo convencional de lubri-refrigeração.

5.2.2 Rugosidade

5.2.2.1 Aço 1045

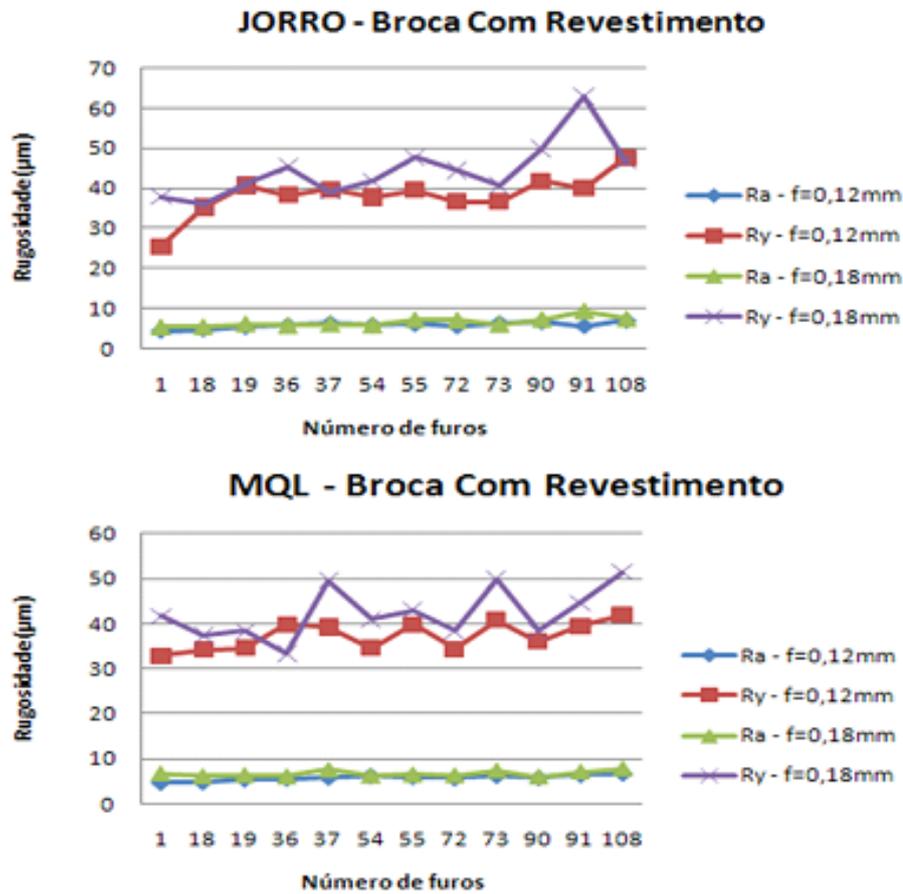
Os resultados das medições das rugosidades nos furos do aço 1045 são mostrados a seguir nas Figuras 19 e 20, relacionando-se as duas condições de lubri-refrigeração, presença de revestimento nas brocas e os dois valores de avanço utilizados (0,12mm/rev e 0,18mm/rev). Os valores apresentam as médias de Ra e Ry originadas das quatro (04) medições realizadas em cada furo (primeiro e último de cada corpo de prova).

Figura 19 – Rugosidade Ra e Ry para condição de Jorro e MQL na broca sem revestimento do aço ABNT 1045



Fonte: Autora.

Figura 20 – Rugosidade Ra e Ry para condição de Jorro e MQL na broca com revestimento do aço ABNT 1045.



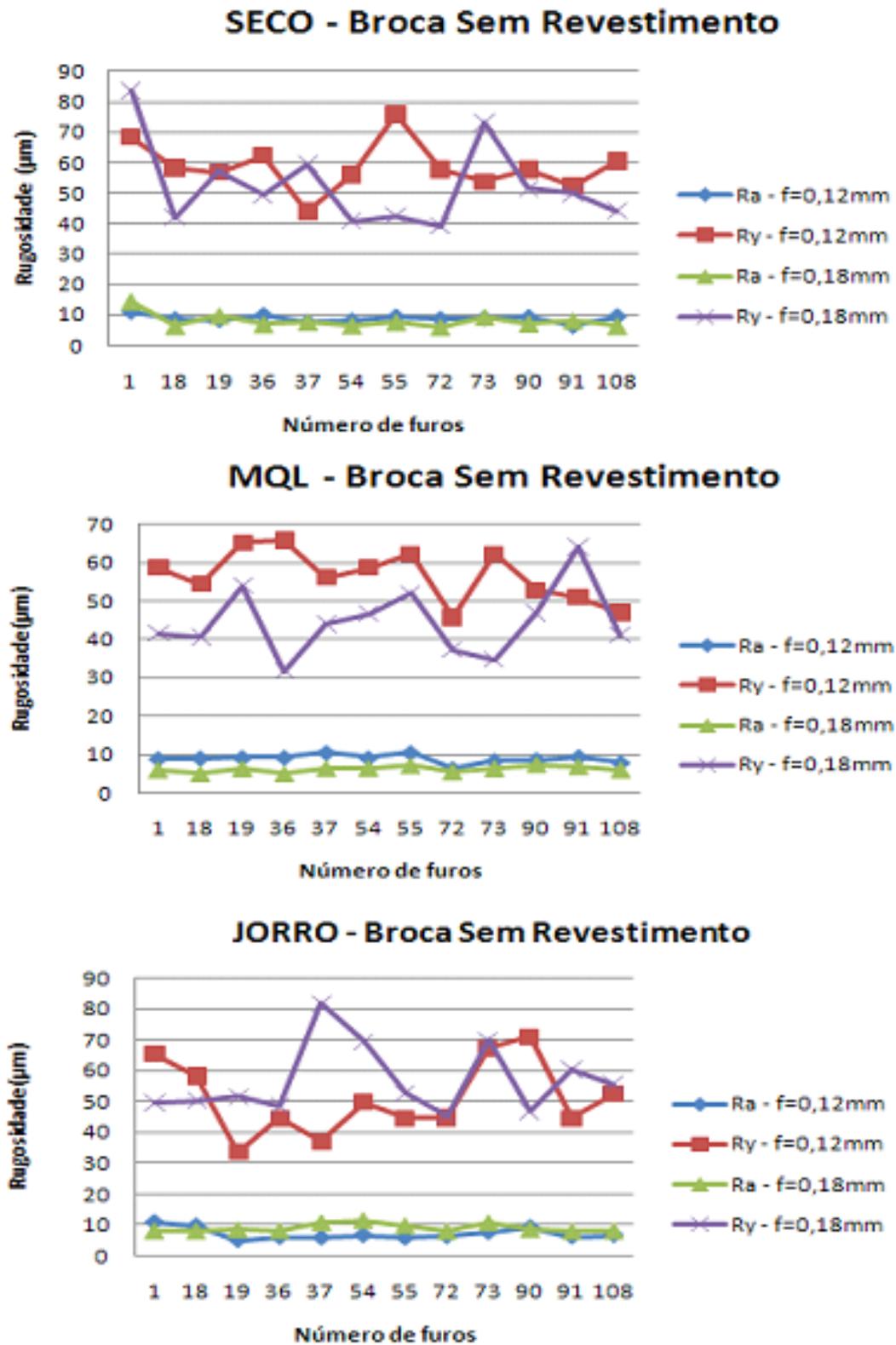
Fonte: Autora.

De acordo com a análise dos gráficos, os valores de Ra não apresentaram variações significativas relacionando-se a lubrificação convencional e a aplicação de MQL. Os valores para Ra mantiveram-se, em sua maioria, abaixo de $10\mu\text{m}$. O mesmo não ocorreu com as médias de Ry. Os valores de Ry com a MQL se apresentaram mais uniformes que com jorro de fluido de corte, que mostrou os maiores e os menores valores de Ry. Tal fato pode ter ocorrido devido a técnica de MQL proporcionar a existência de um microfilme de lubrificação sobre o gume das brocas, o que inibe um desgaste superficial rápido da ferramenta e, portanto, não alterando muito a rugosidade dos furos em quanto são executados. O revestimento nas brocas favoreceu a diminuição dos valores de Ry, que se apresentam maiores para as brocas sem revestimento. A utilização de revestimentos em ferramentas de usinagem é indicada para aplicações onde solicitações térmicas são elevadas e mecanismos de adesão são predominantes, e esses mecanismos de adesão interferem prejudicialmente no acabamento superficial da peça.

5.2.2.2 Aço ABNT 1020

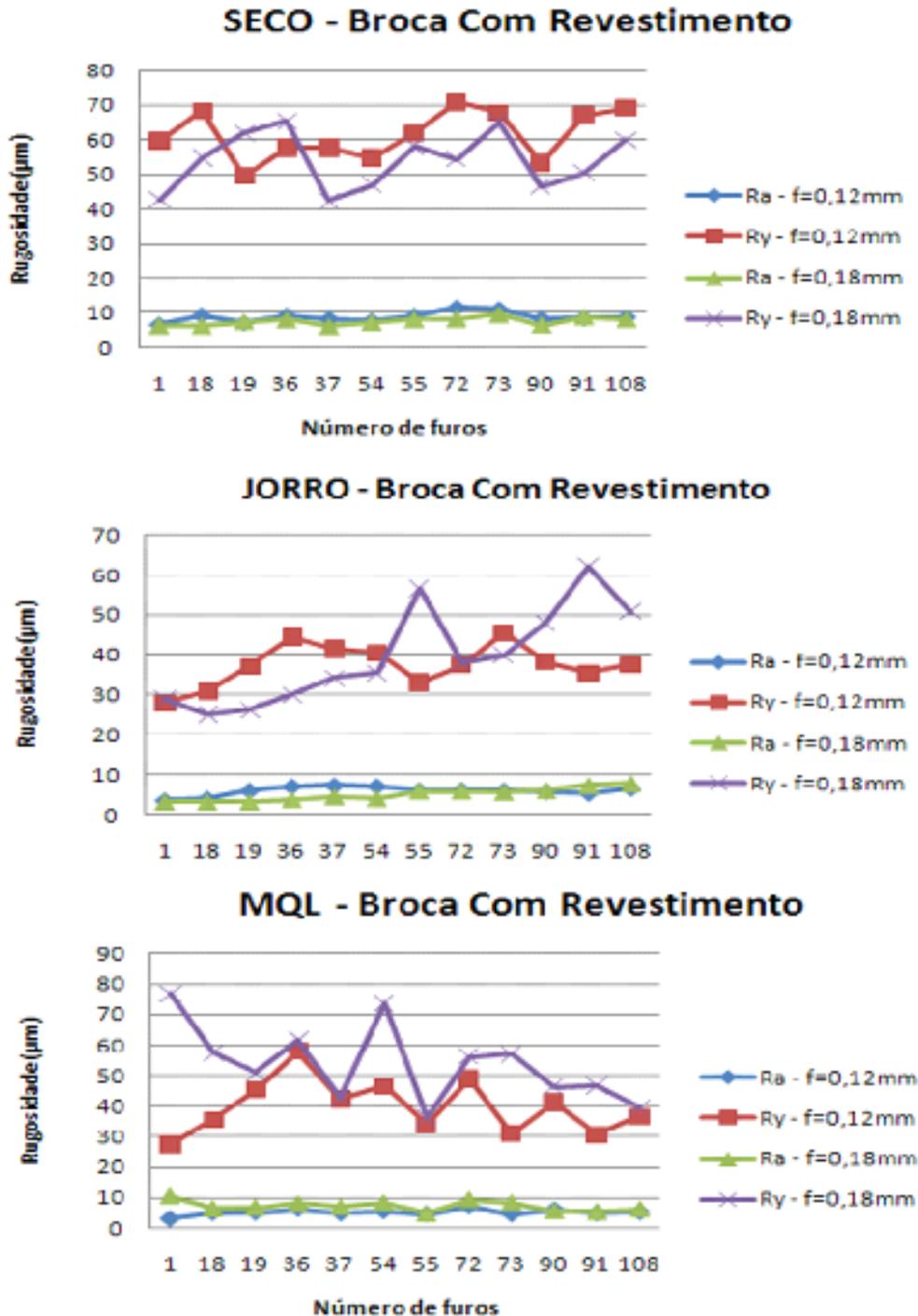
Os resultados das medições das rugosidades nos furos do aço ABNT 1020 são apresentados nas Figuras 21 e 22, relacionando-se as três condições de lubri-refrigeração, presença de revestimento nas brocas e os dois valores de avanço (0,12mm/rev e 0,18mm/rev). Os valores apresentam as médias de Ra e Ry originadas das quatro (04) medições realizadas em cada furo (primeiro e último de cada corpo de prova).

Figura 21 – Rugosidade Ra e Ry para condição a Seco, Jorro e MQL na broca sem revestimento do aço ABNT 1020.



Fonte: Autora.

Figura 22– Rugosidade Ra e Ry para condição a Seco, Jorro e MQL na broca com revestimento do aço ABNT 1020.



Fonte: Autora.

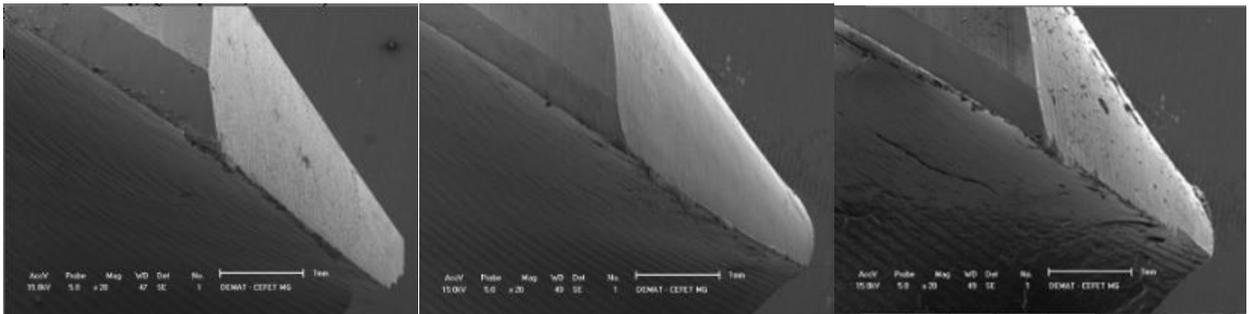
As Figuras 21 e 22 indicam que independente do tipo de aço (aço ABNT 1020 ou 1045) utilizado os valores da rugosidade variam da mesma forma em relação à forma de lubrificação ou presença de revestimento em brocas. Isto demonstra, ainda, que a usinagem a seco, gera valores de Ry maiores que as demais condições de lubri-refrigeração. Estes altos valores podem ser originados devido às brocas serem expostas a maior atrito, nesta condição

de lubri-refrigeração, pois não há refrigeração/lubrificação, o que gera altas temperaturas facilitando a adesão de material à ferramenta. Fatores que aumentam o atrito entre a broca e peça (aumento de velocidade de corte ou eliminação de lubrificação), contribuem para o aumento de temperatura e tornam o acabamento superficial dos furos pior.

5.2.3 Microscopia Eletrônica de Varredura – MEV

A Figura 23 mostra a microscopia de algumas brocas utilizadas após o experimento, obtidas através de microscopia eletrônica de varredura com o aumento de 20x.

Figura 23 – Microscopia eletrônica de brocas utilizadas no processo de furação. a) Broca com revestimento em furação a seco no aço ABNT 1020 com avanço de 0,18mm. b) Broca sem revestimento em furação sob jorro de fluido de corte no aço ABNT 1020 com avanço de 0,18mm. c) Broca sem revestimento em furação sob MQL no aço ABNT 1020 com avanço de 0,12mm.



(a)

(b)

(c)

Fonte: Autora.

A partir das imagens obtidas, constatou-se que não houve desgaste considerável sobre as arestas de corte das brocas, independente da condição de lubri-refrigeração, da presença ou não de revestimento sobre a broca e do avanço utilizado. Possíveis causas para a não ocorrência de desgastes nas ferramentas são: distância furada por cada broca (1714,5mm) e/ou a velocidade de corte utilizada (25m/min), ambos os fatores, provavelmente, foram de valores relativamente baixos para que ocorresse grandes desgastes sobre as brocas utilizadas. Aumento de velocidade de corte propicia elevação da temperatura do processo (aumentando o calor sobre as ferramentas e peças), o que gera maior ocorrência de mecanismos de desgaste. Segundo, Ferraresi (2006), com o aumento da velocidade de corte alcança-se valores máximos de desgaste de ferramentas.

6. CONCLUSÃO

6.1 Retificação

Através da análise dos resultados obtidos, pode-se perceber que técnica MQL pode ser utilizada com bom nível de eficiência no processo de retificação, apresentando ganhos ecológicos e tecnológicos se comparado a aplicação de fluido de corte convencional. A propriedade de lubricidade pode ser ratificada no uso da técnica de MQL, devido aos valores de Ra e do desgaste diametral que foram reduzidos com a utilização dessa técnica.

O melhor desempenho global quando da utilização da técnica de MQL foi fornecido pela condição de lubri-refrigeração (ar = 26,4 m/s e lubrif. = 40 mL/h). Além disso, o uso da técnica MQL não apresentou resultados negativos quanto a análise da integridade superficial.

A porosidade do rebolo não sofreu entupimento significativo na aplicação de MQL e a visualização da operação foi facilitada, pois não houve disseminação de névoa nas vazões utilizadas para se fazer os testes. Este ponto contribui para aspecto ambiental no uso da técnica MQL.

Tanto a aplicação de fluido de corte convencional quanto a MQL não apresentaram modificações subsuperficiais expressivas.

Pode-se perceber com os resultados obtidos com as diversas análises feitas que o método utilizado e a quantidade de lubri-refrigeração utilizada é um fator influenciador no processo de retificação.

6.2 Furação

O desenvolvimento do bocal permitiu a correta aplicação da técnica MQL de lubri-refrigeração. Pode-se perceber a mistura entre o óleo lubrificante e o ar comprimido.

As arestas de corte das brocas não sofreram desgaste observáveis, devido provavelmente à pequena distância perfurada por cada uma das brocas utilizadas. Outro fator que pode ter contribuído para este fato é a baixa velocidade de corte utilizadas.

A análise do acabamento superficial dos furos, através da medição de rugosidade, apresentou melhores resultados em peças que foram trabalhadas pelo método MQL, utilizando-se brocas helicoidais revestidas que furação sem fluido de lubri-refrigeração (à

seco). Os resultados mostraram um processo desabrido em relação ao anterior com furos apresentando alto valor de rugosidade.

O fluido lubri-refrigerante utilizado na técnica de MQL possui uma grande adequação às necessidades ambientais, pois além de não ser necessária a estocagem, o descarte também não é uma necessidade constante como em óleos utilizados na técnica convencional de furação.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, M. C. S.; BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R. de; CATAI, R. E. **Influência na qualidade final de metais retificados através da variação da velocidade de mergulho.** *Rem: Rev. Esc. Minas.* 2009, v. 62, n.1, pp. 65-71. ISSN 0370-4467.

ARENAS MIRANDA, **Uma contribuição ao Processo de Furação sem Fluido de Corte com Broca de Metal Duro Revestida com TiAlN.** 2003. Tese (Doutorado) – Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BENNETT, B. **Cutting Fluids and Superabrasives Applications.** Cincinnati Milacron, AES Magazine, p-12, 1983. Dunlap, C. Should you try dry? *Cutting Tool Engineering.* 1997, v. 49, n.1, p. 22-33.

BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; PIUBELI, B. A. **Aplicação e Utilização dos Fluidos de Corte nos Processos de Retificação.** 1 ed. São Paulo: *Artliber Editora Ltda*, 2004. 110p.

BISCIONI, R. P. **Comparação entre os métodos convencional e com bocal modificado de aplicação de fluido de corte no processo de retificação cilíndrica interna.** 2010. 80f. Dissertação (Mestrado) – Engenharia mecânica, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

BRAGA, D. U. **A Técnica de Mínima Quantidade de Fluido de Corte Aplicada no Processo de Furação de uma Liga de Alumínio-Silício.** 2001. 178f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BROCKHOFF, T.; WALTER, A. **Fluid minimization in cutting and grinding.** *Abrasives Magazine.* 1998, p.38-42.

CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho.** 2004. Tese (Doutorado) – Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

DAMASCENO, R. F. **Análise da influência da profundidade de corte e de diferentes métodos de lubri-refrigeração na retificação plana de aço ABNT 4340.** 2010. 165f. Dissertação (Mestrado) - Engenharia mecânica, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: *MM Editora.* 2003, 242 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem de metais.** São Paulo: Edgard Blucher, 2006.

FUSSE, R. Y. **Estudo comparativo entre a lubri-refrigeração convencional e a mql no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.** 2005. Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, UNESP, Bauru.

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

HEISEL, U.; LUTZ, D.; WASSMER, R.; WALTER, U. **A técnica da quantidade mínima de fluidos e sua aplicação nos processos de corte.** Revista Máquinas e Metais 1998, n.386, p. 22-38.

HOWES, T.D.; TOENSCHOFF, H.K., Heuer, W. **Environmental Aspects of Grinding Fluids.** CIRP Grinding STC Keynote Paper, August ,1991.

KLOCKE, F.; BECK, T.; EISENBLÄTTER, G.; FRITSCH, R.; LUNG, D.; PÖHLS, M. **Applications of minimal quantity lubrication (MQL) in cutting and grinding.** Institute of Machine Tools and Production Engineering, University of Technology, 2000.

KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G. **Dry cutting.** Annals of the CIRP, v. 46, n.2, p.519-526, 1997.

KLOCKE, F.; SCHULZ, A.; GERSCHWILER, K.; REHSE, M. **Clean manufacturing technologies: The competitive edge of tomorrow?.** The Internacional Journal of Manufacturing Science & Production. 1998, v.1, n.2, p.77-86.

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

MALKIN, S. **Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives.** 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989.

MARINESCU, I. D.; HITCHINER, M.; UHLMANN, E.; ROWE, W.B.; INASAKI, I. **Handbook of Machining with Grinding Wheels.** CRC Press. New York, 2007.

MICARONI, R. **Influência do fluido de corte sob pressão no torneamento do aço ABNT 1045.** 2006. 167f. Tese (Doutorado) – Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

NOVASKI, O.; RIOS, M. **Introdução teórica e vantagens de uso na usinagem de aços-liga.** Revista Máquinas e Metais, Ano XL. 2004, nº 460, p. 214-223.

PAULA, A. R.; **Estudo da usinabilidade do aço ABNT 4340 endurecido no torneamento com alta velocidade de corte sob diferentes condições de lubrificação.** 2012. Dissertação (Mestrado) – Engenharia de Materiais, CEFET-MG, Belo Horizonte.

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

SILVA, L. R.; MATTOS, M. F.; AMARAL, L. V. **Manufatura Ecologicamente Correta: Análise do Comportamento da Mínima Quantidade de Lubrificante - MQL no Processo de Retificação Cilíndrica Externa de Mergulho.** In: 6º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 2011.

TAWAKOLI, T. **Minimum coolant lubrication in grinding.** Industrial Diamond Review. 2003, n.1, p. 60-65.

TÖNSHOFF, H. K.; GRABNER, T. **Cylindrical and Profile Grinding with Boron Nitride Wheels** Proceedings of the 5th International Conference on Production Engineering, Tokyo. 1984, p.326-343.

WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK Jr. R. B. **Grinding fluid application system design.** In: Annals of the CIRP. 1995, vol. 44, p. 333-338.