

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

FELIPE AMARAL OLIVEIRA

ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE DIFERENTES FLUIDOS
DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

BELO HORIZONTE

2014

FELIPE AMARAL OLIVEIRA

ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE DIFERENTES FLUIDOS DE
CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em 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 da Silva

BELO HORIZONTE

2014

FELIPE AMARAL OLIVEIRA

**ESTUDO COMPARATIVO DO COMPORTAMENTO DE DIFERENTES FLUIDOS
DE CORTE NO PROCESSO DE RETIFICAÇÃO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado no curso de Graduação em 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: 27/08/2014

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Leonardo Roberto da Silva – Orientador

Prof. Dra. Elaine Carballo Siqueira

Prof. Msc. Antônio Romero de Paula

RESUMO

O processo de retificação é caracterizado pela sua complexidade, sendo empregado na fabricação de componentes que requerem excelente qualidade dimensional e geométrica especificados em projeto. O desempenho deste processo depende muito das condições de lubri-refrigeração, que são utilizadas para amenizar os problemas que afetam a integridade superficial das peças, como a queima, danos microestruturais e minimizar os efeitos de tensões residuais indesejáveis. Por outro lado, os fluidos de corte são uma das fontes mais problemáticas na manufatura, pois são produtos nocivos ao meio ambiente e a saúde humana, além disso, se não bem monitorados podem comprometer a eficiência do processo, uma vez que a contaminação por bactérias pode afetar a qualidade da peça. Sendo assim, torna-se essencial que se faça estudos em busca de fluidos alternativos visando à redução destes problemas, mas sempre priorizando as propriedades primárias dos fluidos que são a refrigeração e lubrificação que propiciam ao componente usinado a qualidade superficial exigida. Este trabalho visa identificar o desempenho operacional de um fluido de corte emulsionável e um fluido integral a base de óleo mineral parafínico em comparação com formulações biodegradáveis no processo de retificação do aço ABNT 4340 com dureza média de 52 HRc. Os parâmetros de saída avaliados foram: Integridade superficial (Rugosidade, Microestrutura e Microdureza) e o desgaste do rebolo. Os resultados viabilizaram a utilização de formulações biodegradáveis de fluidos de corte, proporcionando melhoria na eficiência do processo e contribuindo para uma produção mais sustentável.

Palavras chave: Retificação, danos térmicos, integridade superficial, fluidos de corte, produção mais sustentável.

ABSTRACT

The grinding process is characterized by its complexity, being employed in the manufacture of components requiring excellent dimensional and geometric quality specified in the project. The performance of this process depends very much on the lubrication cooling, which are used to mitigate the problems affecting the superficial integrity of the parts, such as burning, microstructural damage and minimize the undesirable effects of residual stresses. Moreover, cutting fluids are one of the most troublesome sources in manufacture, since they are products harmful to the environment and human health, in addition, is not well monitored can compromise the efficiency of the process, since bacteria contamination can affect part quality. Thus it becomes essential monitoring and control in order to reduce their disposal, which can be through their recovery or reformulation and always prioritizing the primary properties of the fluids that are cooling and lubrication that provide the component machined surface quality required. This coursework aims to identify the operational performance of a commercial cutting fluid and an integral base paraffinic mineral oil compared to biodegradable formulations in the grinding process of the ABNT 4340 steel with approximately 52 HRC hardness.. Output parameters evaluated were: Surface integrity (Roughness, Microstructure and Microhardness) and wheel wear. The results enabled the use of of biodegradable formulations cutting fluids, providing improvement in process efficiency and contributing to a more sustainable production.

Keywords: Grinding, thermal damage, surface integrity, grinding wheel wear, more sustainable production.

LISTA DE FIGURAS

Figura 01 - Processo de retificação em uma abordagem de sistema.	13
Figura 02 - Ilustração do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.....	14
Figura 03 - Classificação dos Fluidos de corte.....	15
Figura 04 - Parâmetro de Rugosidade R_a	20
Figura 05 - Parâmetro de Rugosidade R_t	20
Figura 06 - Esquema do microscópio eletrônico de varredura.....	22
Figura 07 - Dimensões dos corpos de prova.	25
Figura 08 - Retificadora cilíndrica universal utilizada nos experimentos.....	25
Figura 09 - Montagem para medição da Rugosidade.....	29
Figura 10 - Equipamento utilizado para microdureza	30
Figura 11 - Representação da amostra para medição de microdureza.	31
Figura 12 – Padronização da medição de microdureza	30
Figura 13 – Vista lateral da amostra.....	30
Figura 14 - Rugosidade R_a obtidos nas três condições de usinagem.....	33
Figura 15 - Rugosidade R_t obtidos nas três condições de usinagem.	35
Figura 16 - Valores de desgaste diametral do rebolo nas três condições de usinagem.....	36
Figura 17 - Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte emulsionável sob as diferentes condições de usinagem (1000x).....	38
Figura 18 - Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte mineral sob as diferentes condições de usinagem (1000x).	39
Figura 19 - Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do óleo de soja sob as diferentes condições de usinagem (1000x).....	40
Figura 20 - Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do óleo de milho sob as diferentes condições de usinagem (1000x).....	41
Figura 21 - Micrografia obtidas da sub-superfície de amostras não retificadas, temperada e não temperada respectivamente.....	42
Figura 22 - Valores de microdureza obtidas na primeira condição de usinagem.....	43
Figura 23 - Valores de microdureza obtidas na segunda condição de usinagem.	43
Figura 24 - Valores de microdureza obtidas na terceira condição de usinagem.	44

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 4340 em %	24
Tabela 2 - Parâmetros de corte utilizados.....	27
Tabela 3 - Valores médios do desvio padrão para as três condições de usinagem.....	34
Tabela 4 - Valores médios do desvio padrão para as três condições de usinagem.....	35
Tabela 5 – Valores médios do desgaste do rebolo para os fluidos de corte.	37

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. OBJETIVOS	11
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	12
3.1. Processo de Retificação	12
3.2. Fluidos de Corte	14
3.2.1. Classificação dos Fluidos de Corte	15
3.2.1.1 Fluidos de Corte solúveis em água	16
3.2.1.2 Gases	16
3.2.1.3 Fluidos de Corte puros	16
3.2.1.3.1 Óleos minerais	17
3.2.1.3.2 Óleos vegetais	17
3.2.1.3.2.1 Óleo de soja	18
3.2.1.3.2.2 Óleo de milho	18
3.2.2. Efeitos sobre a Saúde do Operador e Aspectos Ecológicos dos Fluidos	18
3.3. Caracterização dos Corpos de Prova	19
3.3.1. Rugosidade	19
3.3.2. Análise Microestrutural	21
3.3.3. Ensaio de Microdureza	22
3.3.4. Desgaste do Rebolo	23
4. METODOLOGIA	24
4.1. Material	24
4.2. Banca de Ensaio	25
4.2.1. Ferramenta de Corte	26
4.2.2. Fluido de Corte	26
4.2.3. Dressagem	26
4.2.4. Parâmetros de Corte	27
4.3. Execução dos Ensaio de Retificação	27
4.4. Caracterização	28
4.4.1. Rugosidade	28
4.4.2. Análise Microestrutural	29
4.4.3. Microdureza	30
4.4.3.1. Preparação das amostras	30

4.4.4. Medição do desgaste do rebolo	32
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES	33
5.1. Rugosidade	33
5.1.1. Parâmetro R_a	33
5.1.2. Parâmetro R_t	34
5.2. Desgaste Diametral do Rebolo	36
5.3. Microestrutura	37
5.4. Microdureza	42
6. CONCLUSÕES.....	45
REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFIA.....	46

1.INTRODUÇÃO

O processo de retificação é um processo de fabricação mecânica, voltado para o acabamento final do produto, proporcionando excelente acabamento superficial, tolerâncias dimensionais reduzidas e eliminação de irregularidades superficiais, provocadas por processos anteriores, envolve parâmetros como velocidade de corte, velocidade de avanço, tipo de rebolo e aplicação de fluidos de corte (OLIVEIRA; ALVES, 2006).

Durante o processo de retificação a interação dos grãos abrasivos e da peça é intensa e se não bem monitoradas podem vir a comprometer a integridade superficial da peça. Quando esta interação ocorre, e somada à alta e constante velocidade de corte, temperaturas elevadas são geradas na interface peça/rebolo, resultando em danos térmicos como a queima e as tensões residuais. Estes fatores são determinantes para a funcionalidade e qualidade final do produto usinado (MALKIN, 1989). A qualidade do produto depende rigorosamente do controle destes parâmetros e do fluido de corte que exerce funções de refrigeração e lubrificação da região de corte, limpeza da superfície do rebolo, remoção de impurezas na região do corte e proteção contra a corrosão. Entretanto, pode prejudicar a saúde do trabalhador e poluir o meio ambiente (OLIVEIRA; ALVES, 2006).

Pelos motivos citados e de acordo com Silva et al., (2011) os fluidos de corte devem ser melhor gerenciados e sua escolha deve ser feita com base no custo benefício e nas exigências ambientais. O fluido de corte precisa ser constantemente monitorado em suas propriedades e possuir características que propiciem o melhor rendimento das ferramentas, melhor acabamento das peças e durabilidade das máquinas e equipamentos.

Os fluidos de corte já não podem mais ser descartados indiscriminadamente. Antes deve ser assegurado que os mesmos não causarão danos ambientais quando de sua disposição final, atendendo, assim, à legislação vigente de controle ambiental. À medida que as formulações e fluidos tornam-se mais sofisticadas, será cada vez mais necessário que o futuro usuário, antes de usar o fluido de corte, investigue cuidadosamente a maior ou menor facilidade de descarte do mesmo (BIANCHI, et al., 2003).

Somado ao controle e monitoramento do fluido, El Baradie (1996b) cita que os fluidos de corte necessitam de tratamento. Uma alternativa seria sua recuperação ou mesmo reformulação com componentes menos agressivos ao meio ambiente, sendo que suas propriedades primárias devem ser no mínimo mantidas semelhantes, para que a eficiência do processo seja a mesma, embora com os benefícios de uma produção mais limpa.

Uma outra alternativa seria a aplicação de óleos vegetais na forma de fluidos de corte que é interessante devido ao seu poder lubrificante e devido a matéria prima abundante que possui o Brasil na produção de soja, milho, amendoim, algodão, babaçu e palma (RUNGE; DUARTE, 1990). A maioria dos trabalhos relatados, mencionam os óleo de soja, milho e de mamona como possíveis candidatos. Há um enorme potencial para a utilização de óleos vegetais como fluidos de corte no setor de fabricação (SINGH, 2006).

Esse presente trabalho visa identificar o desempenho operacional dos óleos de soja e milho em comparação a um fluido emulsionável (emulsão em água com 6% de óleo mineral) e a um fluido de corte integral a base de óleo mineral parafínico no processo de retificação. A fim de viabilizar diferentes alternativas proporcionando uma melhora do processo, além de contribuir para uma manufatura ecologicamente correta.

2. OBJETIVOS

A realização deste trabalho tem como principal objetivo avaliar o comportamento dos fluidos de corte comerciais e de alguns fluidos biodegradáveis no processo de retificação, analisando a eficiência destes em manter bons níveis de produção. Para isto foi verificado o desempenho dos fluidos em relação à integridade superficial da peça (rugosidade, microestrutura, microdureza) e do desgaste do rebolo.

Dentre outros objetivos e metas que norteiam este trabalho visando avaliar a viabilidade destes fluidos reduzindo o impacto ambiental e conservando a integridade superficial da peça, pode-se citar.

- Estudar os mecanismos de caracterização microestruturais dos materiais retificados.
- Analisar o comportamento dos possíveis danos causados na integridade superficial da peça por meio das solicitações térmicas e mecânicas quando da utilização de diferentes fluidos de corte.
- Avaliar o desempenho de fluidos biodegradáveis no processo de retificação.

Sendo assim, por meio dos resultados foi possível determinar a viabilidade do uso destes fluidos de corte alternativos na operação de retificação cilíndrica externa de mergulho, de maneira a contribuir para uma melhora no processo e para uma manufatura ecologicamente correta.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processo de Retificação

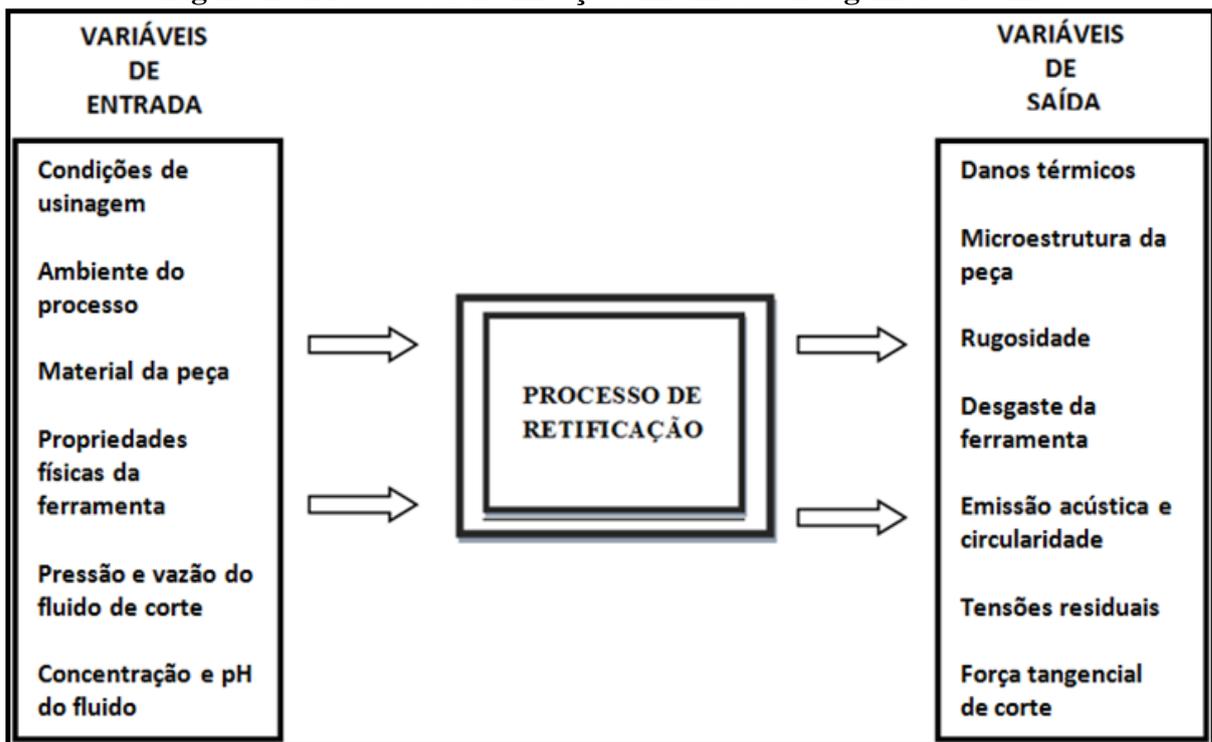
A usinagem é o processo no qual uma ferramenta de corte remove material a partir da superfície de um corpo menos resistente, por meio de uma relativa aplicação de força e movimento (AGGARWAL et al., 2008). Dentre as operações de usinagem, a retificação é um dos métodos mais tradicionais e importantes por conferir à peça a qualidade superficial e dimensional adequada, os quais de acordo com Bianchi et al., (2011) são fatores de extrema importância quanto ao desempenho gerado pelo processo.

Além disso, por apresentar um grande número de variáveis e parâmetros englobados, a retificação é considerada uma das operações mais complexas do processo de usinagem já que é difícil obter não só a reprodutibilidade, embora nas mesmas condições de usinagem, mas também a relação entre os diversos parâmetros que influenciam uns aos outros (LEE; KIM, 2001). Por outro lado estas inúmeras variáveis e parâmetros devem ser compreendidas para a devida seleção das ferramentas e dos recursos de usinagem, com o objetivo de se obter produtos que satisfaçam os padrões de qualidade e que mantenham aceitáveis os custos de produção (YOUSSEF; EL HOFY, 2008).

No processo de retificação cilíndrica de mergulho, o qual foi empregado no desenvolvimento deste estudo, o rebolo em alta velocidade periférica é conduzido à superfície de uma peça também em rotação, porém em sentido contrário (MALKIN; CHIU 1993). Além disso, este processo é utilizado quando a espessura do rebolo é maior do que o comprimento a ser retificado e dispensa também o movimento da mesa de tal maneira que se trabalha somente com os avanços do rebolo que se processam sobre a peça de forma contínua (MELLO, 2011).

O processo de retificação é mostrado na Figura 1 em uma abordagem de sistema que distingue as variáveis de entrada e de saída do processo. Uma modelagem precisa do processo de retificação a fim de prever os resultados de saída é difícil devido à grande complexidade dos processos abrasivos que apresentam um grande número de variáveis (TONSHOFF; FRIELMUTH ; BECHER , 2002).

Figura 1 - Processo de retificação em uma abordagem de sistema.

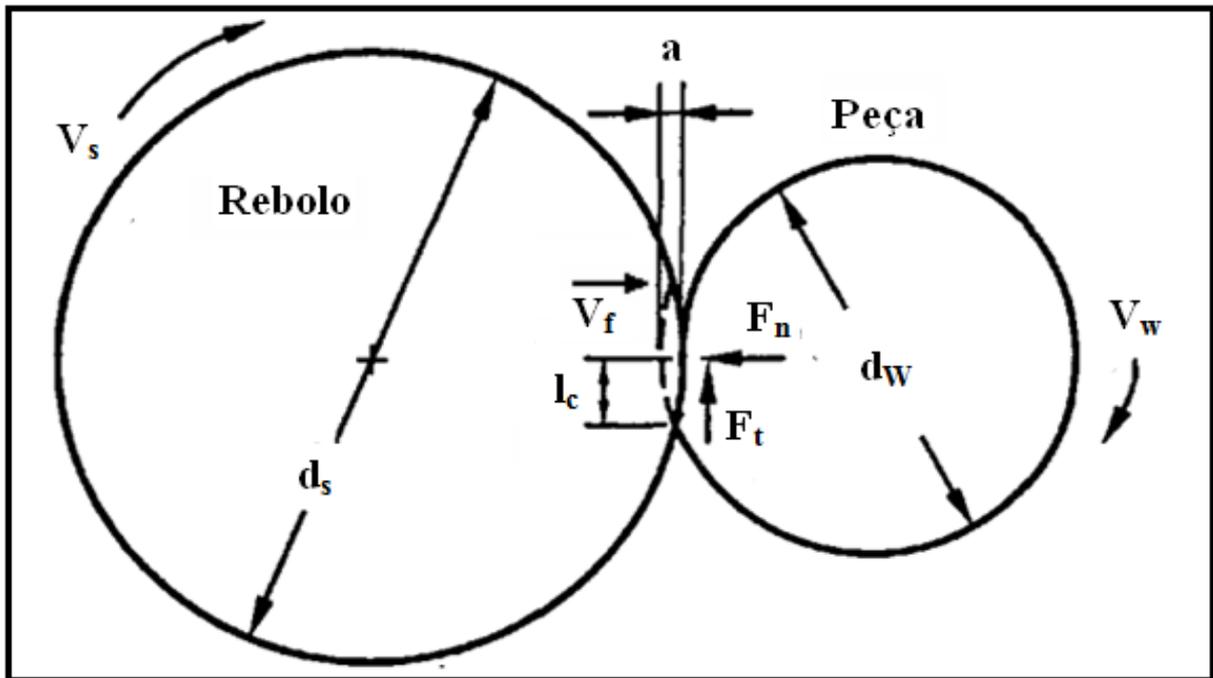


Fonte: TONSHOFF; FRIELMUTH; BECHER, 2002 (adaptada).

O sistema que compreende a ferramenta de corte, com as suas propriedades físicas, as condições de usinagem, o ambiente do processo e especialmente o líquido de refrigeração e lubrificação, bem como as propriedades da peça inacabada fornecem as entradas do processo. Demais parâmetros ou grandezas de entrada são fornecidos ao operador ou para o programa, a fim de alcançar o resultado de trabalho exigido. Já os resultados de saída do sistema são distinguidos em propriedades como microestrutura da peça, desgaste da ferramenta abrasiva e outras características da peça que mostram o resultado final do processo (TONSHOFF; FRIELMUTH ; BECHER , 2002).

A Figura 2 ilustra o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho constituído por: profundidade de corte a comprimento de contato l_c , correspondente ao final do ciclo de retificação, com velocidade de corte da ferramenta V_s , velocidade de mergulho V_f , rotação da peça V_w , diâmetro do rebolo d_s e diâmetro da peça d_w . Neste processo ainda estão envolvidas duas forças: F_n ou força normal à superfície de contato peça rebolo e F_t , ou força tangencial à superfície de contato. É, portanto, a correlação entre estes e outros parâmetros que caracterizam a operação de retificação cilíndrica externa de mergulho.

Figura 2 - Ilustração do processo de retificação cilíndrica externa de mergulho



Fonte: MALKIN; CHIU, 1993 (adaptada)

3.2 Fluidos de Corte

No final do século XIX os primeiros pesquisadores começaram a introduzir e estudar a utilização de fluidos de corte no processo de usinagem. A princípio, eles utilizaram água na região ferramenta/peça/cavaco e conseguiram bons resultados em relação à velocidade de corte. Porém, a água, apesar de reduzir o efeito da alta temperatura, trouxe desvantagens como a oxidação da peça e/ou ferramenta e a ausência de lubrificação. Logo, a necessidade de descobrir novos fluidos de corte gerou as mais variadas combinações desse produto (FOGO, 2008; TESSARO, 2008).

A capacidade de lubrificação e refrigeração durante o processo, onde o calor produzido entre a superfície da peça e ferramenta seja reduzido, são as principais funções do fluido de corte, o que proporciona um aumento da vida útil da ferramenta e garante uma maior precisão dimensional pela redução das distorções térmicas (FRANÇA, 2005). Estes fatores são primordiais para redução de danos térmicos na zona de corte além de remover os cavacos da região de corte (IRANI et al., 2005).

A considerável demanda pela aplicação de fluidos de corte nas operações de retificação é atribuída à necessidade de qualidade superficial e manutenção da vida útil da ferramenta (WEBSTER, 2002). Junto a isso, a aplicação dos fluidos de corte de forma eficaz na zona de

atrito peça/rebolo pode reduzir as forças de corte em cerca 50% sob determinadas condições (MONICI et al., 2006).

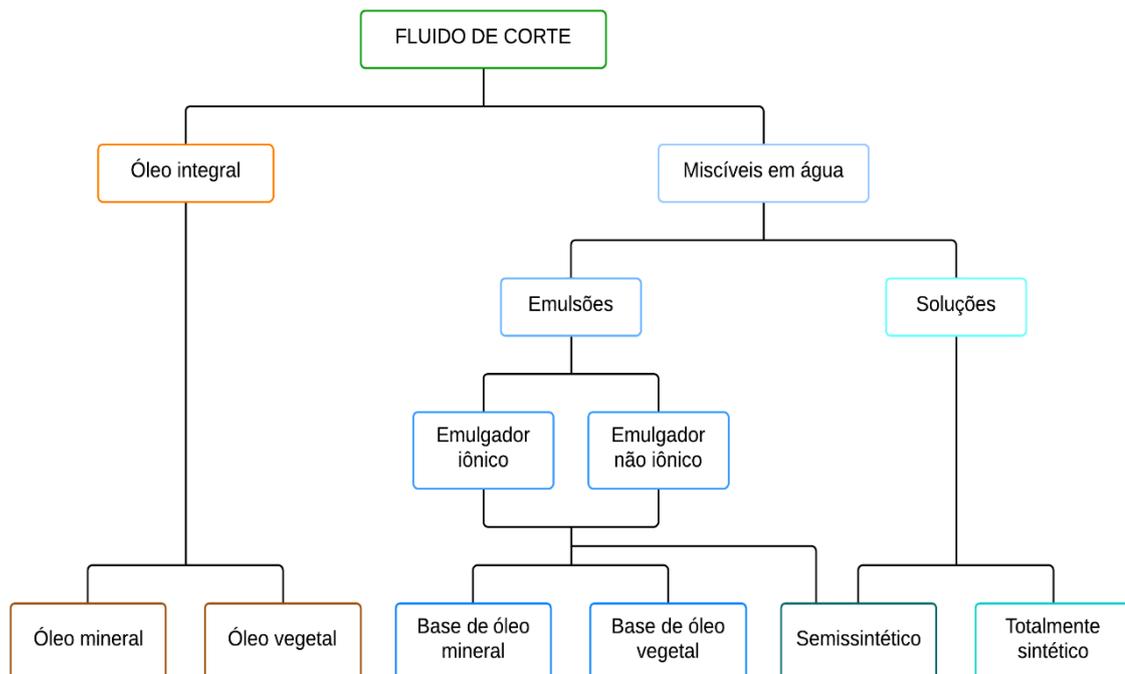
Além da refrigeração e lubrificação, outras características são apresentadas por Maia et al., 2007, as quais são:

- Redução do desgaste da ferramenta;
- Melhora no acabamento da superfície;
- Proteção contra corrosão;
- Remoção das aparas da peça por ação de lavagem;
- Redução do consumo de potência (energia).

3.2.1 Classificações dos Fluidos de Corte

Os fluidos de corte são formulados a partir de dois fluidos básicos diferentes, a água e o óleo, podendo ser dividido em dois tipos, os aquosos e os oleosos, de acordo com a Figura 3 (RUNGE; DUARTE, 1990).

Figura 3 - Classificação dos Fluidos de Corte



Fonte: GOMES; VASCONCELOS, 2005 (adaptada).

Não existe hoje no mercado um único tipo de fluido que atenda todas as necessidades operacionais. O que existe são fluidos mais versáteis que podem ser aplicados em diferentes tipos de operações (CATAI, 2004). Por outro lado, existe uma grande dificuldade em se selecionar um fluido que atenda a uma operação em particular, já que para isto seria necessário levar em conta diversos parâmetros de usinagem, tais como velocidade de corte, material da peça etc (AVILA ; ABRÃO, 2001).

3.2.1.1 Fluidos de Corte solúveis em água

Embora seja empregado o termo “óleo solúvel”, este tipo de óleo não se dissolve na água, mas forma uma emulsão (SKOLD; MISRA, 2000). Estes óleos solúveis são óleos convencionais que formam emulsões em água, sendo que o teor de óleo mineral varia entre 50% e 85%, geralmente misturado à água na proporção de 5 a 60 partes de água para uma de óleo (RUNGE; DUARTE, 1990).

Os fluidos de corte solúveis em água encontram sua aplicação em processos que necessitam de uma maior ação refrigerante e uma moderada lubrificação. Estes fluidos são misturados com água em diferentes proporções formando misturas de emulsões e soluções. Entretanto, a relação quantidade de água e óleo é dependente da operação de usinagem executada (EL BARADIE, 1996a).

3.2.1.2 Gases

O fluido gasoso mais comum é o ar e em alguns casos também são utilizados gases como Hélio e o Nitrogênio. A grande vantagem deste é a capacidade de refrigeração na região de corte, ausência de contaminantes da peça e do cavaco. Entretanto, quando o ar é usado o benefício da lubrificação do fluido é perdido (FERNANDES, 2007).

3.2.1.3 Fluidos de Corte puros

Os fluidos de corte puros não apresentam afinidade com a água. São também denominados de fluidos integrais. São encontrados numa variedade muito grande em relação a sua viscosidade e níveis de aditivação. São compostos capazes de formar películas oleosas, lubrificantes e aderentes. Em geral, apresentam-se de origem mineral, vegetal ou sintética e podem ser utilizados no estado puro ou aditivado (RUNGE; DUARTE, 1990).

Os fluidos integrais são preferencialmente empregados em operações que necessitam de boa capacidade lubrificante, estes óleos são basicamente compostos por: óleos minerais, agentes antioxidante, agentes de extrema pressão e agentes de oleosidade (LI et al., 2001).

3.2.1.3.1 Óleos Minerais

Os óleos básicos minerais são oriundos da indústria petrolífera obtidos por destilação do petróleo seguida das etapas de refino, de forma que suas propriedades dependem substancialmente da natureza do óleo cru (CARRETEIRO; MOURA, 1998). Em geral os óleos básicos minerais constituem a matéria-prima fundamental para a produção de vários tipos de produtos lubrificantes (AGGARWAL et al., 2008). Os óleos minerais podem ser classificados como parafínicos, naftênicos e aromáticos de acordo com sua estrutura química (MUNIZ, 2008).

Os óleos minerais parafínicos são constituídos predominantemente de alcanos, os minerais naftênicos predominam os compostos cíclicos não aromáticos (cicloalcanos), já os óleos minerais aromáticos apresentam-se na sua grande parte constituído por compostos aromáticos (GORANA; JAIN; LAL, 2004).

A maioria dos óleos minerais empregados é o de base parafínica, esse óleo apresenta excelentes propriedades lubrificantes, boas propriedades anticorrosivas, longa vida útil, porém tem menor poder refrigerante, quando comparado aos fluidos solúveis em água (EL BARADIE, 1996a).

3.2.1.3.2 Óleos Vegetais

A obtenção dos óleos vegetais ocorre por diferentes métodos de manipulação das sementes oleaginosas que contenham fruto. Estes óleos são submetidos a uma série de tratamentos físico e químico para seu refino (ALUYOR, 2009). Em geral, os óleos vegetais por serem ambientalmente amigáveis, renováveis, menos tóxicos e facilmente biodegradáveis, são substitutos atraentes para os óleos à base de petróleo (MATTHEW et al., 2007).

Óleos vegetais são compostos constituídos basicamente de triglicerídeos, obtidos pela reação de três moléculas polares de ácidos graxos de cadeia longa pelos seus grupos de hidroxilas (glicerol) com uma molécula de glicerol ligada, tendo como produto o éster (FOX; STACHOWIAK, 2007).

A polaridade das moléculas dos óleos vegetais provoca uma grande afinidade química com a superfície metálica, produzindo um filme molecular lubrificantes orientados, alinhados denso e homogêneos, perpendiculares à superfície do metal, reduzindo o contato metal com metal, propiciando assim alto poder lubrificante e menor nível de desgaste (BIRESAW et al., 2011). Assim o óleo de soja e o óleo de milho apresentam características satisfatórias como fluidos lubrificantes (SHASHIDHARA; JAYARAM, 2010).

3.2.1.3.2.1 Óleo de Soja

O óleo de soja é obtido dos grãos da soja e seu emprego apresenta muitas vantagens devido ao alto conteúdo de ácidos graxos essenciais; formação de cristais grandes, que são facilmente filtráveis quando o óleo é hidrogenado e fracionado; alto índice de iodo, que permite a sua hidrogenação produzindo grande variedade de gorduras plásticas e refino com baixas perdas (SILVA; GIOIELLI, 2006). Esse óleo tem sido utilizado também na produção de biocombustível e apresenta boas propriedades lubrificantes (BELINATO, 2010).

3.2.1.3.2.2 Óleo de Milho

O milho é considerado um tipo de cereal que se transforma no maior número de produtos industrializados, sendo empregado na alimentação humana e animal. Desempenha importante papel socioeconômico, pois é a matéria prima básica para uma série de produtos industrializados, movimentando grandes complexos industriais (BALTANÁS et al., 2010).

Explorando as propriedades dos óleos vegetais, muitos estudos estão sendo realizados viabilizando a sua implantação na indústria metal-mecânica. Uma mistura de óleo de milho e dois diésteres diferentes apresenta potencial considerável para a utilização como lubrificante, melhorando o índice de viscosidade a estabilidade termo-oxidativa e superior desempenho na lubrificação (POP et al., 2008).

3.2.2 Efeitos Sobre a Saúde do Operador e Aspectos Ecológicos dos Fluidos

Embora tenham características positivas, os fluidos de corte têm também seu lado negativo impondo necessidades de soluções alternativas, para evitar resultados desagradáveis, já que estes contêm em sua composição um elevado número de componentes altamente tóxicos, sendo, portanto um potencial agressor ao meio ambiente e a saúde do operador. Dentre os

principais agravantes dos fluidos estão problemas respiratórios, epidemiológicos que afetam a saúde dos operadores, além da degradação do meio ambiente pela incorreta e às vezes prematura disposição destes fluidos (OLIVEIRA; ALVES, 2006).

Dentre a diversidade de fluidos disponíveis no mercado aquele que representa maior perigo a saúde do trabalhador é o óleo integral. Por outro lado, o que possui menor agressividade é o solúvel. Entretanto, os óleos solúveis não são totalmente isentos do risco cancerígeno já que muitos dos ingredientes presentes no óleo integral também fazem parte da composição do óleo solúvel, porém em concentrações diferentes (OLIVEIRA; ALVES, 2007).

Os fluidos de corte utilizados nas operações de usinagem ao perderem suas propriedades devem ser substituídos, contudo diante dos regulamentos rigorosos sobre a eliminação dos resíduos oleosos (considerados como perigosos) se faz necessário a redução de seu descarte. Uma opção seria reciclá-lo ou mesmo realizar a sua reformulação, desde que as propriedades do fluido sejam no mínimo mantidas semelhantes (MATTOS et al., 2008).

Ao analisar os efeitos nocivos que os fluidos trazem não só para a vida humana mais também para o meio ambiente e da necessidade de uma manufatura ecologicamente correta, os novos fluidos de corte têm que satisfazer as exigências de proteção do meio ambiente uma vez preestabelecida, seja por meio de regulamentos, normas impostas pelo Estado ou normas internacionais. Desta maneira ao se desenvolver novos fluidos de corte a qualidade deverá ser identificável tanto em termos de parâmetros de usinagem como parâmetros ecológicos. (SOKOVIC; MIJANOVIC, 2001).

3.3 Caracterização dos Corpos de Provas

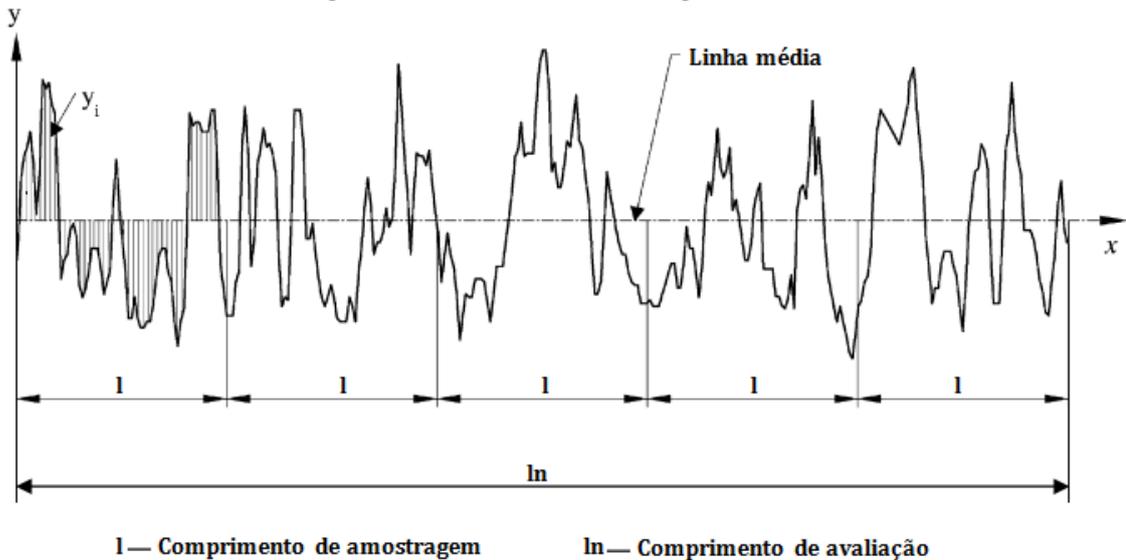
3.3.1 Rugosidade

A rugosidade é definida como o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam o acabamento superficial.

Dentre os métodos que quantificam a integridade superficial de uma peça, a rugosidade é o procedimento mais adequado, pois além de ser rápido é um método satisfatório para determinar a qualidade do acabamento superficial (ULUTAN; OZEL, 2011). Além disso, a medição da rugosidade também é empregada nos processos de fabricação como uma variável de saída, determinante para o controle estatístico dos processos e para avaliação de sua eficiência, já que qualquer alteração no processo poderá seguramente refletir sobre os valores de rugosidade (WHITEHOUSE, 2001).

A caracterização topográfica de peças utiliza principalmente os parâmetros de amplitude. O parâmetro mais comum é o parâmetro universal R_a que é definido como o desvio médio absoluto da rugosidade a partir da linha média sobre um comprimento de amostragem como é mostrado na Figura 4 (GADELMAWLA et al., 2002).

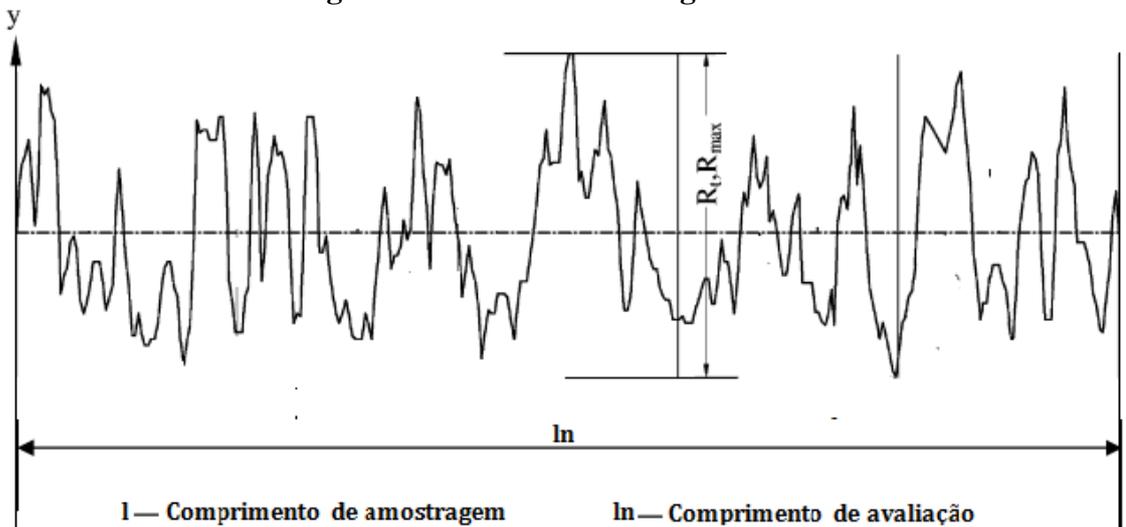
Figura 4 - Parâmetro de Rugosidade R_a



Fonte : Gadelmawla et al., 2002 (adaptada)

Outro parâmetro de amplitude muito utilizado é o parâmetro R_t que tenta fornecer a altura máxima da rugosidade. Por ser muito sensível aos picos tanto positivos quanto negativos este parâmetro é definido como a distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo do perfil avaliado conforme Figura 5 (GADELMAWLA et al., 2002).

Figura 5 - Parâmetro de Rugosidade R_t



Fonte : Gadelmawla et al., 2002 (adaptada)

Em aplicações de engenharia, muita das vezes as peças requerem características topográficas particulares, tais como capacidade de retenção de óleo, resistência ao desgaste e lubrificação, que são aspectos benéficos para determinados tipos de aplicações (DONG; SULLIVAN; STOUT 1994). A rugosidade desempenha um papel importante nestes comportamentos e está relacionada com a precisão de ajuste da máquina, condições de usinagem e com as tolerâncias de fabricação, que são especificadas de acordo com a aplicação da peça usinada.

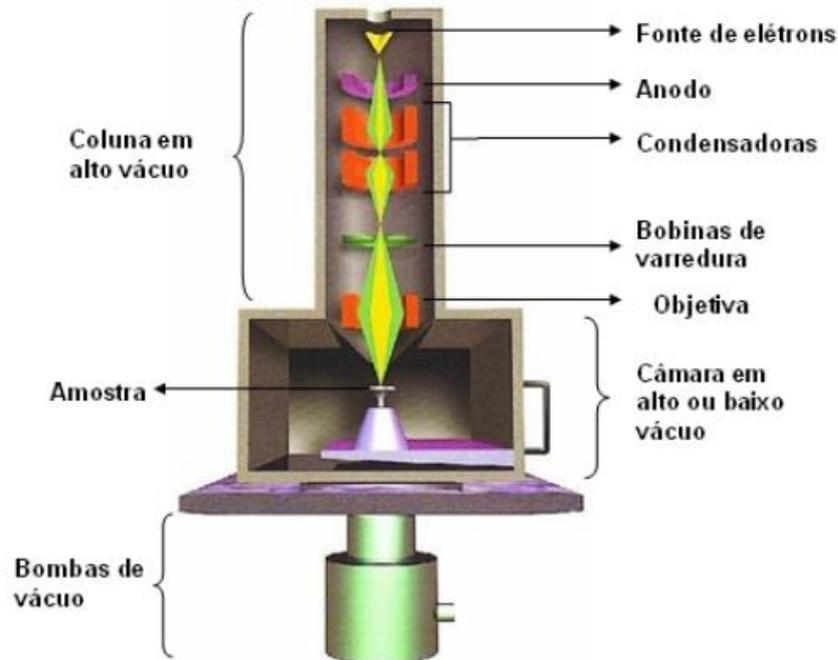
3.3.2 Análise Microestrutural

O conhecimento dos aspectos microestruturais de um material é de fundamental importância para o conhecimento das suas propriedades mecânicas. A identificação da microestrutura de um material permite um controle melhor da qualidade do mesmo. Isso é feito pela metalografia, que é o estudo das características estruturais ou da constituição dos metais e suas ligas, para assim relacioná-los com suas propriedades mecânicas, físicas ou químicas. Para se conseguir essa relação entre a estrutura observada, com auxílio de microscópio, deve-se seguir uma linha de procedimentos necessários ao exame metalográfico (COUTINHO, 1980).

Diversas são as técnicas para a realização da análise microestrutural também conhecida pelo nome de micrografia. Em geral, o exame metalográfico é composto pelo corte do material a ser estudado, pelo embutimento, pelo lixamento, pelo polimento, pelo ataque químico e pela análise ao microscópio.

Um método comumente empregado para realizar a análise da superfície de uma amostra sólida é por meio da Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (CATAI et al., 2006). O Microscópio Eletrônico de Varredura, esquematizado na Figura 6, consiste basicamente de um canhão de elétrons, de uma lente condensadora e outra objetiva, de bobinas de varredura, do detector de elétrons e detector de raios-x, este último possibilita a microanálise química dos materiais (SKONG; HOLLER; NIEMAN 2002).

Figura 6 - Esquema do microscópio eletrônico de varredura



Fonte: Fernandes, 2007 (adaptada)

Durante o ensaio, ocorre uma interação entre o feixe de elétrons e a superfície da amostra gerando vários tipos de sinais, incluindo elétrons espalhados, secundários e Auger, fótons de fluorescência de raios-x e fótons de várias energias (SKONG; HOLLER; NIEMAN, 2002). Na câmara da amostra existem vários detectores que estão localizados para capturar estes sinais e envia-lo ao CRT (tubo de raios catódidos) levando a formação da imagem da microestrutura. (FERNANDES, 2007).

3.3.3 Ensaio de Microdureza

Dureza pode ser definida, dentre outros aspectos, como sendo a resistência à deformação plástica localizada de um material. Essa resistência à deformação pode ser avaliada por vários tipos de escalas e métodos, os quais possuem a mesma concepção: um penetrador é forçado contra a superfície do material a ser testado, sob condições controladas de carga e taxa de aplicação, faz-se a medição da profundidade ou do tamanho da impressão resultante, a qual por sua vez é associada a uma escala com um índice de dureza (CALLISTER, 2002).

Quanto mais macio um material, maior será a impressão e a profundidade, e menor será o índice de dureza. Cada método possui ferramentas distintas e os respectivos índices de dureza, não sendo possível a comparação direta entre uma e outra escala de dureza.

Quando o penetrador incide numa região muito pequena fazendo com que a avaliação da dureza seja referente a áreas muito restritas de material, como por exemplo, precipitados, grãos de uma dada fase, películas de revestimentos muito delgadas, um grão específico chamamos o ensaio de microdureza.

Segundo Machado et al. (2009), durante as operações de usinagem, submetidas a determinadas condições de corte e lubri-refrigeração, as alterações microestruturais são inevitavelmente acompanhadas por alterações de dureza, sendo muitas das vezes necessário realizar ensaios de microdureza.

3.3.4 Desgaste Diametral do Rebolo

De acordo com Ferraresi (1977), a vida de uma ferramenta corresponde ao tempo em que a mesma trabalha efetivamente, até perder sua capacidade de corte, ao atingir esse estágio a ferramenta deve ser reafiada ou substituída. Segundo Machado et al., (2009) desgastes acelerados ou frequentes levam a paradas da máquina para a troca e isso significa custos adicionais e perda da produtividade.

O tempo de vida útil e principalmente o desgaste do rebolo influenciam a variação da topografia da ferramenta de corte e esta característica afeta diretamente a qualidade das peças retificadas (HASSUI, 1997).

Segundo Malkin (1989) o desgaste do rebolo é frequentemente expressado como a perda volumétrica do material. Este desgaste de acordo com Bianchi et al., (2011) é causado por fatores mecânicos e físico químicos que por sua vez estão diretamente relacionados com a escolha adequada das condições de usinagem e das especificações do rebolo, que podem elevar sua vida útil e proporcionar maior capacidade de remoção do material.

O desgaste do rebolo é um processo complexo, devido a sua distribuição aleatória dos grãos, pois sendo assim, alguns abrasivos podem se desgastar rapidamente e formar grandes planos na superfície, influenciando no comportamento do desgaste, que irão refletir sobre as forças de corte (CHEN; LIMCHIMCHOL 2006). Além disso, os danos térmicos também podem aumentar o desgaste volumétrico do rebolo, pois estes causam maior adesão dos grãos abrasivos com as partículas metálicas da peça, originando maiores forças de corte e na deterioração da qualidade superficial da peça, podendo então levar ao aumento da perda diametral do rebolo (GOMES; CARVALHO; CAMPOS, 2009).

4. METODOLOGIA

A metodologia tem a finalidade de descrever todos os equipamentos e materiais que foram utilizados, assim como também a descrição dos planejamentos e dos procedimentos que foram utilizados durante a experimentação. O projeto foi executado principalmente no Laboratório de Retificação e no laboratório de Metalografia do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/MG.

4.1 Material

O material utilizado para realização deste trabalho foi o aço ABNT 4340 temperado e revenido com dureza média de 52 HRC. Classificado como aço para beneficiamento, possui boa combinação entre resistência e tenacidade, é empregado na confecção de dispositivos e peças sujeitas a cargas altas e periódicas, em peças aeronáuticas, eixos vibrans e em muitas outras aplicações. A composição química em percentual deste aço está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do aço ABNT 4340 em %

C	Mn	P	Si	S	Cr	Ni	Mo	Al
0,38	0,66	0,03	0,21	0,011	0,74	1,66	0,22	0,21
Cu	Co	V	Ti	Sn	N	H	Fe	
0,052	0,04	0,003	0,003	0,0012	0,72ppm	4,7ppm	Balanço	

Fonte: Lima, 2013, p. 64

A Figura 7 apresenta as dimensões do corpo de prova que foi utilizado no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho.

Figura 7 - Dimensões dos corpos de prova.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2 Banco de Ensaio

O banco de ensaios foi composto basicamente por uma retificadora cilíndrica universal, da marca TosHostivar, apresentada na Figura 8, com potência equivalente a 9kw, na qual foram realizados os experimentos.

Figura 8 - Retificadora cilíndrica universal utilizada nos experimentos.



Fonte: Arquivo Pessoal.

4.2.1 Ferramenta de corte

O rebolo que foi utilizado neste projeto é o rebolo convencional de óxido de alumínio (Al_2O_3) com as seguintes dimensões e características: (355,6 x 50,8 x 127 mm - FE 38A60KV). Este rebolo é utilizado na retificação de aços que possuem alta resistência à tração e elevada dureza.

4.2.2 Fluidos de corte

Foram utilizadas quatro formulações diferentes de fluidos de corte para a comparação dos seus resultados na eficiência da retificação. As formulações utilizadas foram:

- Fluido de corte emulsionável: O fluido de corte utilizado na primeira etapa de ensaios foi uma emulsão em água com 6% de óleo mineral *Mecafluid S 1100*, que possui as seguintes informações do fabricante: 70 a 85 % em peso de óleo naftênico, 1 a 5% em peso de bactericidas e 10 a 25% de aditivos (Tensoativos, sulfonatos e inibidores de corrosão).
- O óleo mineral utilizado neste trabalho é o *Mecafluid 14SC*, da marca *Petronas Lubrificantes do Brasil*, de base parafínica contendo aditivos sulfoclorados inativos indicados para operações de corte em geral.
- Óleo de Soja (*Glycine max*), da indústria Campestre, sem nenhum tratamento adicional.
- Óleo de Milho (*Zea mays*), da indústria Campestre, sem nenhuma tratamento adicional.

4.2.3 Dressagem

A operação de dressagem do rebolo foi realizada no início de cada ensaio. Foi utilizado um dressador conglomerado de diamante preso a um suporte, que faz parte dos acessórios da retificadora. Este processo tem como funções manter a agressividade do rebolo, eliminando os grãos abrasivos gastos e os cavacos de material incrustados entre os grãos, manter as formas geométricas (perfis) do rebolo e produzir peças dentro das dimensões e rugosidades exigidas.

4.2.4 Parâmetros de Corte

Os parâmetros de corte foram determinados após a realização de testes preliminares. O objetivo desses testes foi o de obter as melhores condições de usinagem que pudessem caracterizar o processo de retificação cilíndrica externa de mergulho utilizado nas indústrias de metal-mecânica. Todos os parâmetros selecionados estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Parâmetros de corte utilizados

PARAMETRO	MEDIDA
Rotação da peça (V_w)	95 rpm
Velocidade de mergulho (V_f)	1,2 e 0,8 mm/min
Tempo de centelhamento (t_s)	10 s e 5s
Vazão do fluido emulsionável (V_j)	16 L/min
Vazão do fluido mineral (V_j)	12,4 L/min
Vazão dos óleos de soja e milho (V_j)	11,6 L/min
Velocidade de corte (V_s)	30 m/s
Profundidade de corte (a)	0,02 e 0,013 mm
Velocidade de dressagem	2,7 mm/s
Profundidade de dressagem (a_d)	0,05 mm

Fonte: Arquivo Pessoal.

Desses parâmetros, todos foram mantidos constantes e se alterava apenas a velocidade de mergulho, a profundidade de corte e o tempo de centelhamento ou (*spark out*). Com esta variação foi possível simular as condições de acabamento no processo de retificação, além de melhor avaliar a qualidade de lubri-refrigeração de cada fluido durante diferentes situações de corte.

4.3 Execução dos Ensaios de Retificação

Os ensaios de retificação foram realizados no Laboratório de Retificação do Departamento de Engenharia de Materiais do CEFET/MG. Para as análises comparativas da eficiência dos fluidos de corte no processo de retificação foram realizados ensaios sob três condições de corte distintas:

- Condição de usinagem 1: realizado utilizando uma velocidade de mergulho de 1,2 mm/min e com posterior *spark out* de 10s ao final de cada ciclo de 60 segundos.
- Condição de usinagem 2: realizada com velocidade de mergulho de 0,8mm/min e com posterior *spark out* de 10s ao final de cada ciclo de 60 segundos.
- Condição de usinagem 3: realizada com uma velocidade de mergulho de 1,2mm/min e com posterior *spark out* de 5s a cada ciclo de 10 segundos.

Foram realizados 6 ensaios por condição de usinagem para cada fluido utilizados. Os ensaios de cada condição de usinagem foram constituídos por ciclos de retificação, sendo que para a condição 1 foram realizados 6 ciclos com duração de 60 segundos cada e com uma penetração de 1,2 mm por ciclo. As únicas mudanças para a condição 2 foram a velocidade de corte de 1,2mm/min para 0,8mm/min e a quantidade de ciclos que variou de 6 para 9. Já na condição de usinagem 3 cada ciclo teve duração de 10 segundos e em cada ciclo a penetração do rebolo foi de 0,2 mm durante 36 ciclos de retificação. O sobre metal de 0,2 mm foi escolhido devido às condições de utilização no meio industrial, fazendo-se uma simulação do processo de fabricação. Dessa maneira, em todas as condições de usinagem foi possível obter uma redução média de 7,2 mm no diâmetro de cada corpo de prova. Foram então retificadas 36 peças, com sobre metal de 0,2 mm em cada corpo de prova.

4.4 Caracterização

4.4.1 Rugosidade

A rugosidade foi definida pelos parâmetros de amplitude (R_a e R_t) de acordo com a norma JIS 2001. Para esse fim foi utilizado o rugosímetro *Mitutoyo*, modelo SJ-301, apresentado na Figura 9. O comprimento de amostragem “*cut-off*” foi de 0,8mm. Quanto aos corpos de provas, estes foram limpos e preparados em uma superfície de apoio para melhor utilização do apalpador. Foram realizadas 4 medições equidistantes de 90° aproximadamente.

Figura 9 – Montagem para medição da Rugosidade



Fonte: Arquivo Pessoal.

4.4.2 Análise Microestrutural

A análise da microestrutura foi realizada no Laboratório de Metalografia e no Laboratório de Caracterização do Departamento de Engenharia de Materiais. O objetivo dessa análise foi verificar os possíveis danos na superfície do material causados pelas solicitações térmicas e mecânicas ocorridas para cada condição de lubri-refrigeração investigada.

O microscópio óptico usado foi o da marca *Fortel* com câmara acoplada e o Microscópio Eletrônico de Varredura utilizado foi um aparelho da *Shimadzu*, modelo SSX 550, *Superscan* onde foram realizadas ampliações de 1000 vezes.

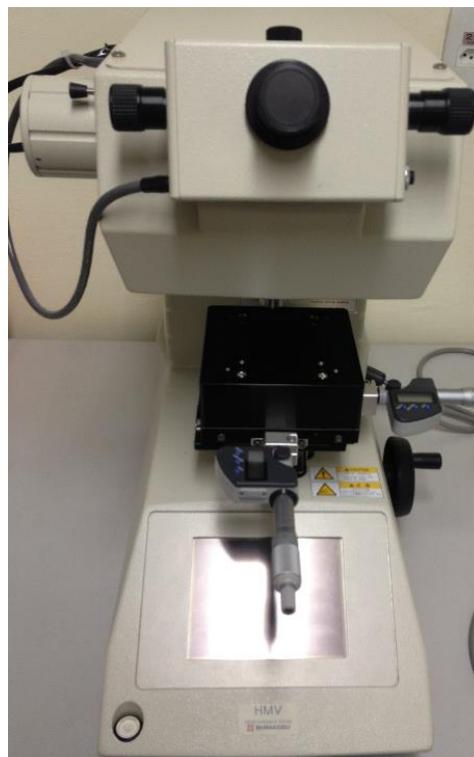
Os ensaios metalográficos foram realizados nas seguintes condições: embutimento a frio de uma amostra cortada com uso de resina de poliéster. Em seguida, o material embutido foi lixado em diferentes granulometrias (#320, #400 e #600). A próxima etapa consistiu no polimento da amostra com os panos de polimento de 3 μ m e de 9 μ m com uso de pasta de diamante para polimento metalográfico.

Entre os panos de polimento foi feita a limpeza da amostra com uso de água e detergente para evitar o acúmulo de sujeira entre um pano e outro. Em seguida, foi feita a secagem da amostra embutida com o auxílio de álcool etílico. O ataque químico foi realizado com uso do reativo químico Nital 5% (100ml de álcool etílico + 5ml de ácido nítrico) para evidenciar as características microestruturais do aço 4340 temperado e revenido.

4.4.3 Microdureza

Os ensaios de microdureza foram realizados no Laboratório de Microdureza do Departamento de Engenharia de Materiais (DEMAT), do CEFET-MG Campus I. O equipamento empregado é da marca *Shimadzu*, modelo HMV, com disponibilidade de carga: 0,01Kgf; 0,025Kgf; 0,05Kgf; 0,1Kgf; 0,2Kgf; 0,3kgf; 0,5Kgf; 1Kgf e 2kgf. O equipamento pode ser visto na Figura 10.

Figura 10 - Equipamento utilizado para microdureza.



Fonte: Arquivo Pessoal.

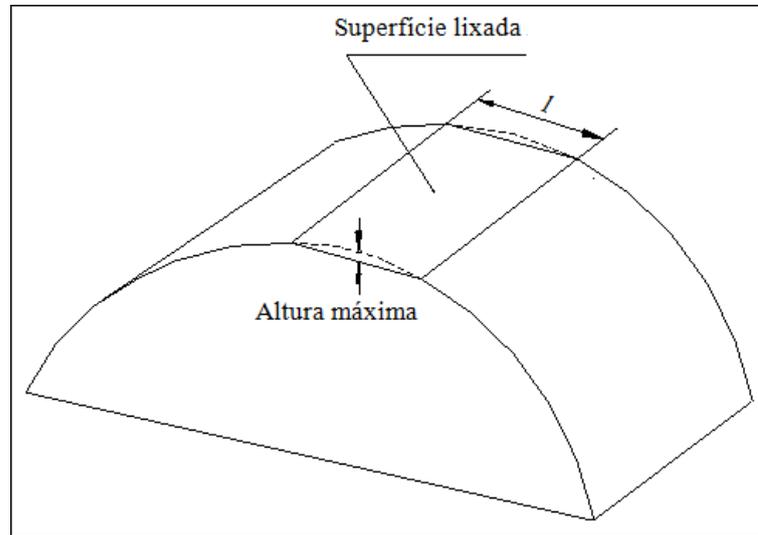
A carga aplicada em cada teste foi de 0,2kgf por um período de 15s. Durante os ensaios foram realizadas 10 medições em 3 regiões distintas da amostra, de forma a obter valores de microdureza em diferentes profundidades respeitando sempre as normas.

4.4.3.1 Preparação das amostras

As amostras foram cuidadosamente lixadas usando lixas de diferentes granulometrias (#400 e #600) e polidas em uma máquina politriz com pasta de diamante para polimento metalográfico com os seguintes tamanhos de partículas: 3 μ m e 9 μ m. Sendo assim, foi possível

se formar um plano com comprimento (l) entre 3,5 a 4,2 mm, conforme Figura 11, de modo a tornar a superfície perpendicular ao penetrador do microdurômetro.

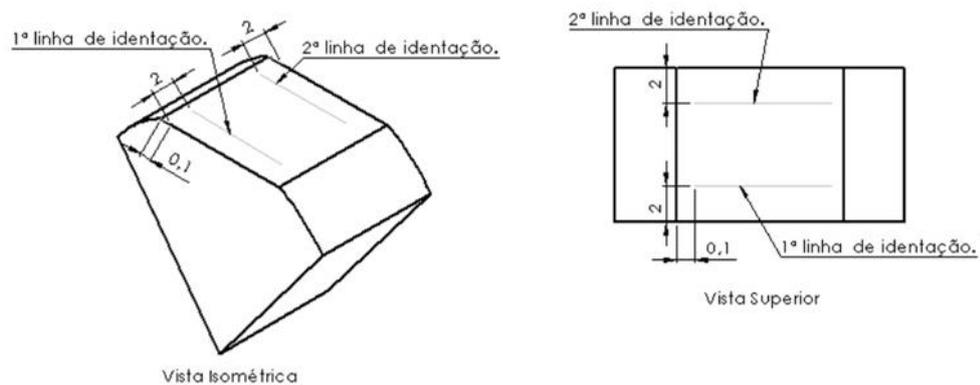
Figura 11 - Representação da amostra para medição da microdureza.



Fonte: Arquivo Pessoal

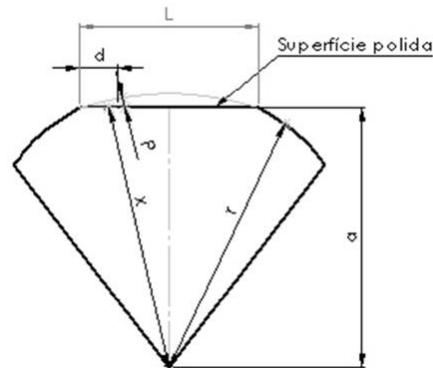
A primeira linha de indentação foi feita com uma distância de 2,0mm de uma das extremidades da amostra e a segunda com a mesma distância da outra extremidade. As dez indentações em cada linha foram feitas com uma distância de 0,1mm entre uma e outra e 0,1mm da borda do plano criado no polimento, conforme mostra o esquema da Figura 12.

Figura 12 - Padronização da medição de microdureza.



Fonte: Arquivo Pessoal.

A Figura 13 mostra a vista lateral do plano feito no polimento.

Figura 13 - Vista lateral da amostra

Fonte: Arquivo Pessoal.

Na Figura 13, p é a profundidade e d a distância entre a indentação e a borda do plano.

Pelo teorema de Pitágoras, tem-se (Equação 1):

$$x^2 = \left(a^2 + \left(\frac{L}{2} - d\right)^2\right) \quad (1)$$

Observando a figura 13, tem-se que (Equação 2):

$$p = R - x \quad (2)$$

Através das equações 1 e 2, e considerando o valor do raio das peças padronizado como 15mm e o plano criado com comprimento de 4mm, foi possível calcular a profundidade (distância da superfície original) onde foi realizada cada medição. O valor da profundidade das medições variou de $0\mu\text{m}$ a $93,2\mu\text{m}$.

4.4.4 Medição do desgaste do rebolo

Para a medição do desgaste do rebolo, o mesmo foi posicionado de forma que sua extremidade esquerda ficasse fora da peça, não executando corte e nem sofrendo desgaste. Posteriormente foi utilizado um corpo de prova cilíndrico retificado de aço ABNT 1020 que foi fixado na própria retificadora, de tal forma a obter a marcação do perfil desgastado do rebolo. Esta operação foi realizada após o fim de cada ensaio de retificação.

O desgaste foi medido utilizando o parâmetro P do rugosímetro *Mitutoyo* (SJ 301). Este parâmetro é uma representação do perfil real da superfície. Deve-se ressaltar que foram realizadas 4 medições em posições distintas de cada material onde foi “impresso” o patamar equivalente ao respectivo desgaste. Deste modo, foi calculada a média aritmética das 4 medições para cada condição de retificação.

5.RESULTADOS E DISCUSSÕES

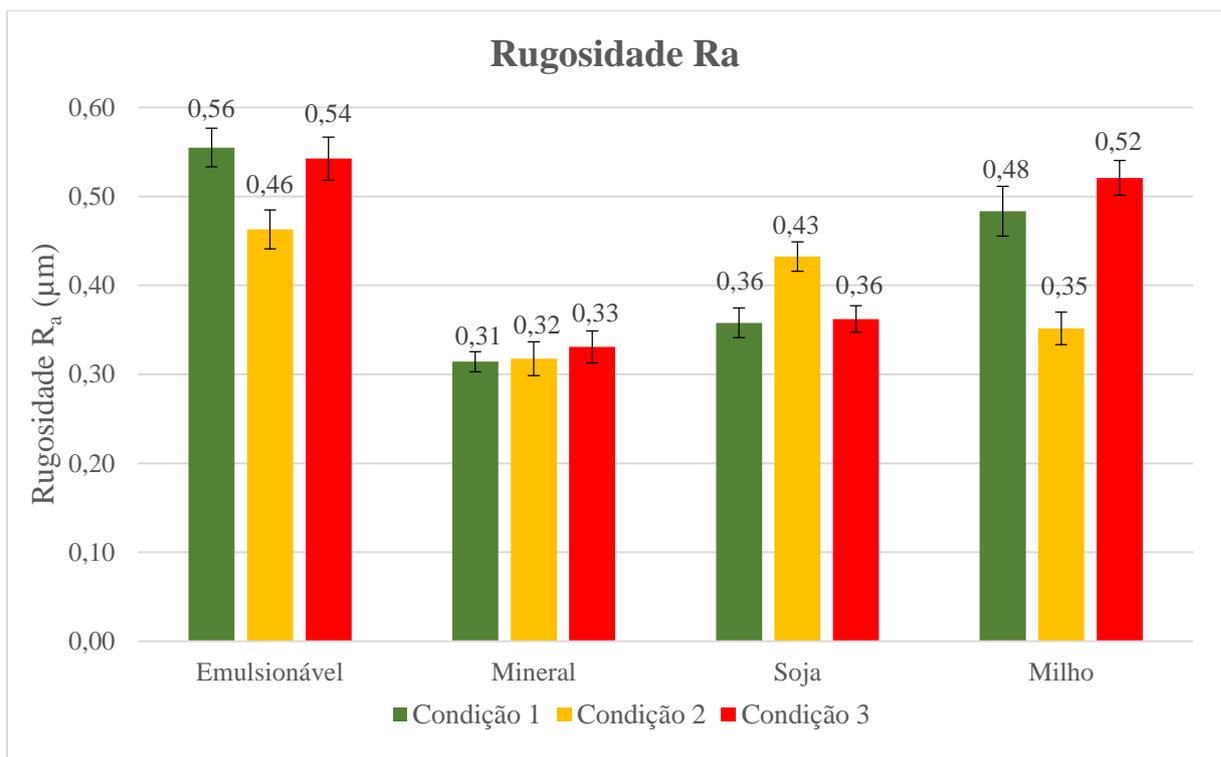
Os resultados do desempenho dos quatro diferentes fluidos de corte usados na retificação cilíndrica externa de mergulho foram apresentados para algumas técnicas de caracterização de materiais, como rugosidade, desgaste diametral do rebolo, microestrutura e microdureza.

5.1 Rugosidade

5.1.1 Parâmetro R_a

A Figura 14 apresenta os valores médios de rugosidade para os parâmetros de amplitude R_a para cada condição de usinagem e para cada fluido utilizado.

Figura 14 - Rugosidade R_a obtidos nas três condições de usinagem.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Observando os resultados, constata-se que os valores médios de rugosidade nas três condições de lubri-refrigeração e para todas as situações de corte, obtidas durante os ensaios de retificação, foram relativamente semelhantes para o fluido mineral e o óleo de soja. O fluido emulsionável apresentou os maiores valores deste parâmetro provavelmente devido à sua

grande quantidade de água (94%) na composição, que possui grande poder refrigerante mas um menor poder lubrificante. Já os corpos de prova retificados com óleo de milho apresentaram valores superiores em relação ao dos óleos mineral e de soja, entretanto, na condição de usinagem 2, os valores de rugosidade na retificação com óleo de milho foram próximos aos demais.

Um aspecto importante para uma superfície usinada é que ela apresente o maior grau de uniformidade possível, não possuindo variações dimensionais que possam comprometer aplicações futuras (controle do processo de fabricação). Dessa forma, é importante avaliar a rugosidade quanto ao desvio padrão, obtido durante as diferentes condições de usinagem. Assim a Tabela 3 exibe os valores médio do desvio padrão para as três condições de usinagem e para os fluidos de corte.

Tabela 3 - Valores médios do desvio padrão para as três condições de usinagem.

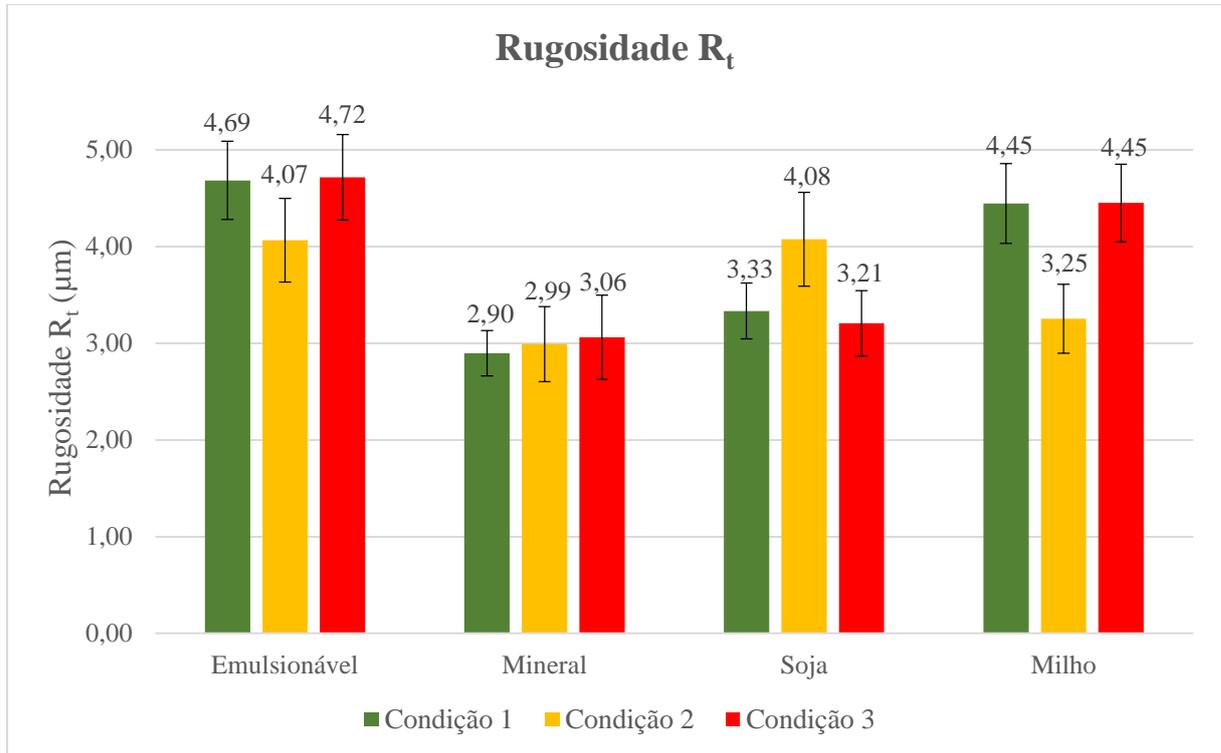
Condições de Usinagem	Fluido Emulsionável	Fluido Mineral	Óleo de Soja	Óleo de Milho
1	± 0,02 µm	± 0,01 µm	± 0,02 µm	± 0,03 µm
2	± 0,02 µm	± 0,02 µm	± 0,02 µm	± 0,02 µm
3	± 0,02 µm	± 0,02 µm	± 0,01 µm	± 0,02 µm

Fonte: Arquivo Pessoal.

Esta análise mostra que o desvio padrão para todas as condições e todos os fluidos de corte apresentaram valores de desvio padrão muito próximos e baixos o que mostra que todos os ensaios proporcionaram uma superfície muito uniforme, aspecto este importante para operações de retificação que requerem superfícies com alta precisão geométrica.

5.1.2 Parâmetro R_t

A Figura 15 apresenta os valores médios de rugosidade para os parâmetros de amplitude R_t para cada condição de usinagem e para cada fluido utilizado.

Figura 15 - Rugosidade R_t obtidos nas três condições de usinagem.

Fonte: Arquivo Pessoal.

Ao analisar os resultados referentes ao parâmetro de rugosidade R_t , nota-se que os valores médios de rugosidade em todas as condições são relativamente semelhantes. Cada fluido apresentou valores muito parecidos em todas as condições. Assim, o fluido emulsionável apresentou de forma geral os maiores valores e o fluido mineral apresentou os menores valores. Já os fluidos com formulações biodegradáveis apresentaram valores intermediários de rugosidade R_t .

É importante realizar uma análise comparativa a partir do desvio padrão médio, para assim poder identificar a superfície usinada que apresenta o maior grau de uniformidade. Assim, a Tabela 4 exibe os valores médios do desvio padrão para as três condições de usinagem e para os fluidos de corte.

Tabela 4 - Valores médios do desvio padrão para as três condições de usinagem.

Condições de Usinagem	Fluido Emulsionável	Fluido Mineral	Óleo de Soja	Óleo de Milho
1	$\pm 0,40 \mu\text{m}$	$\pm 0,23 \mu\text{m}$	$\pm 0,29 \mu\text{m}$	$\pm 0,41 \mu\text{m}$
2	$\pm 0,43 \mu\text{m}$	$\pm 0,39 \mu\text{m}$	$\pm 0,49 \mu\text{m}$	$\pm 0,36 \mu\text{m}$
3	$\pm 0,44 \mu\text{m}$	$\pm 0,44 \mu\text{m}$	$\pm 0,34 \mu\text{m}$	$\pm 0,40 \mu\text{m}$

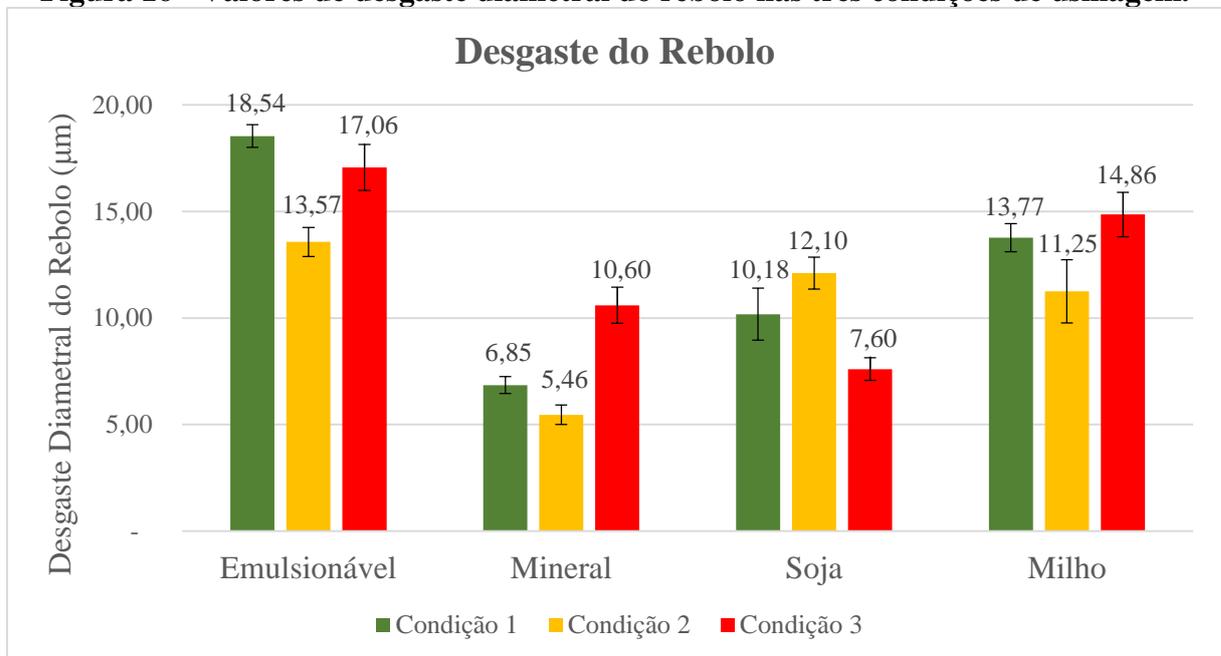
Fonte: Arquivo Pessoal.

Os desvios padrões para este parâmetro de rugosidade também apresentaram valores muito próximos e baixos o que mostra que os ensaios proporcionaram uma superfície muito uniforme, evidenciando o não comprometimento do desempenho do processo.

5.2 Desgaste Diametral do Rebolo

O desgaste diametral do rebolo é uma outra variável muito importante na avaliação do desempenho das operações de retificação. A Figura 16 apresenta o desgaste do rebolo em função das diferentes condições de usinagem e diferentes fluidos de corte.

Figura 16 - Valores de desgaste diametral do rebolo nas três condições de usinagem.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Os diferentes fluidos de corte levaram a resultados distintos em termos de desgaste diametral do rebolo. Em relação ao fluido emulsionável o seu melhor desempenho foi apresentado na condição de usinagem 2 com um desgaste médio equivalente a 13,57 µm, enquanto o pior resultado foi apresentado na condição de usinagem 1 com um desgaste médio equivalente a 18,54 µm.

Para o fluido mineral o melhor desempenho foi apresentado na condição de usinagem 2 apresentando um desgaste médio igual a 5,46 µm enquanto o pior resultado foi obtido durante a condição de usinagem 3 com valor médio igual a 10,60 µm.

Para o óleo de soja o menor resultado em relação ao desgaste foi na condição de usinagem 3 que apresentou valor equivalente a 7,6 μm , o maior valor apresentado foi igual a 12,1 μm que foi resultado da condição de usinagem 2.

Já em relação ao óleo de milho o melhor resultado foi obtido na condição de usinagem 2 com desgaste médio equivalente a 11,25 μm e o pior resultado foi obtido na condição de usinagem 3 com desgaste médio equivalente a 14,86 μm .

A Tabela 5 a seguir apresenta os valores médios de desgaste diametral do rebolo para fluido de corte para as três condições de usinagem.

Tabela 5 - Valores médios do desgaste do rebolo para os fluidos de corte.

Fluido de Corte	Desgaste médio do rebolo (μm)
Emulsionável	16,39 μm
Mineral	7,64 μm
Soja	9,96 μm
Milho	13,29 μm

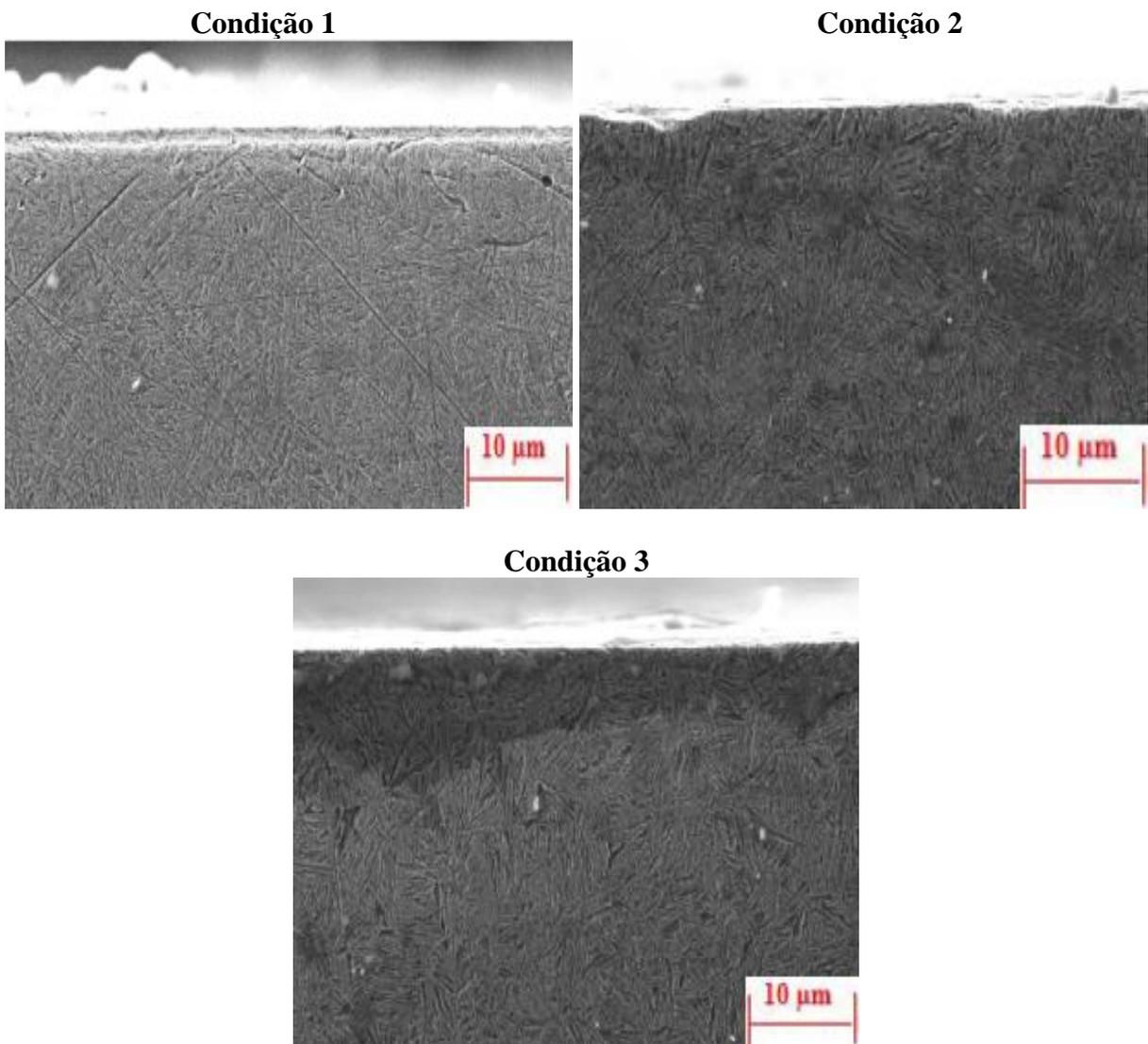
Fonte: Arquivo Pessoal.

Pelos resultados, percebe-se que o fluido mineral apresentou de forma geral a melhor resposta em relação ao desgaste diametral do rebolo e o fluido emulsionável apresentou o pior desempenho. Já os fluidos de formulações biodegradáveis apresentaram valores intermediários.

5.3 Microestrutura

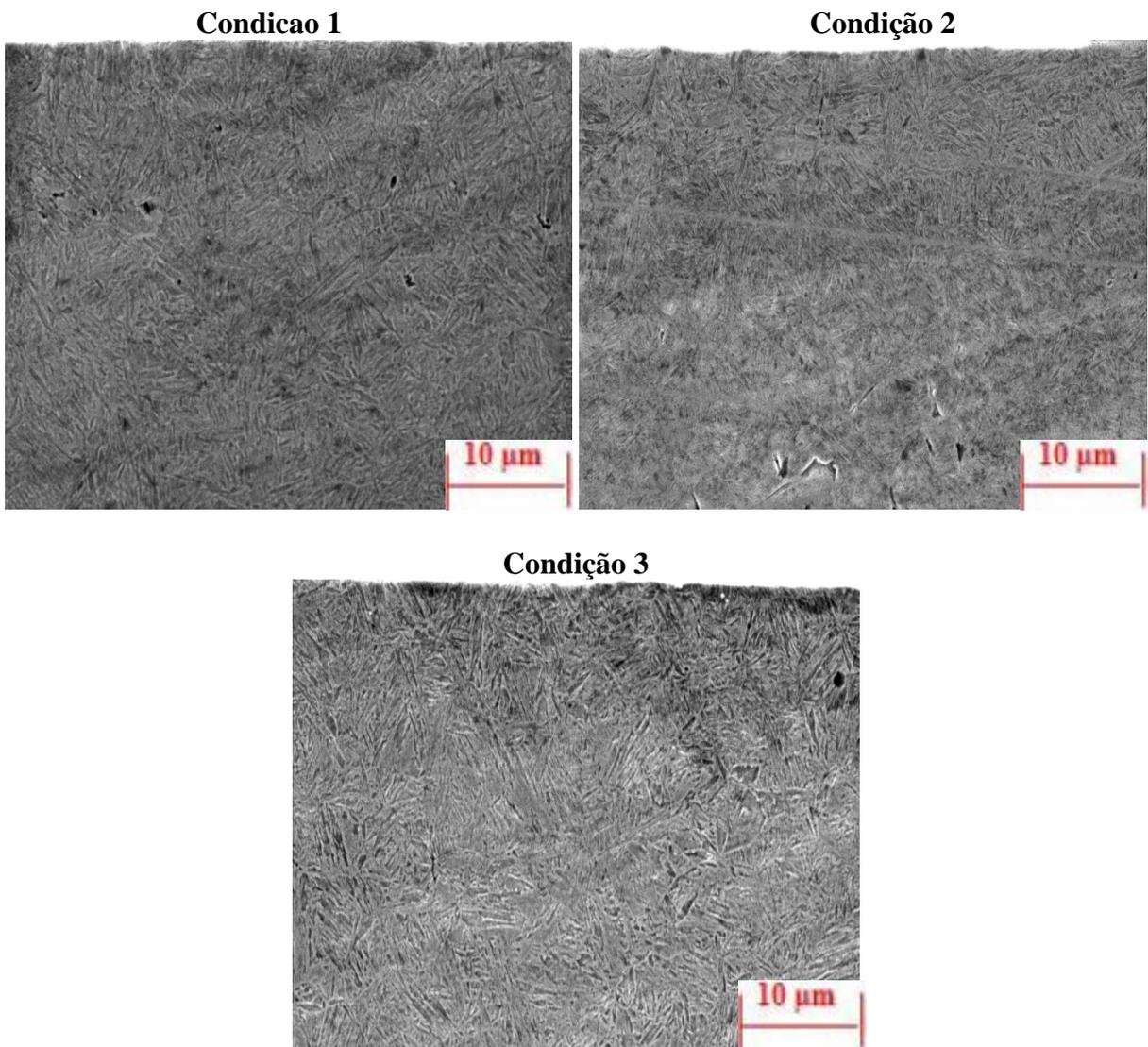
As Figuras 17, 18, 19 e 20 representam as microestruturas das amostras analisadas por meio da microscopia eletrônica de varredura, com o intuito de verificar possíveis danos causados na sub-superfície do material por meio das solicitações térmicas e mecânicas as quais foram submetidas. Alterações na velocidade de corte, vazão do fluido de corte, forma de aplicação e geometria do bocal alteram as solicitações mecânicas e térmicas durante o processo.

Figura 17 - Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte emulsionável sob as diferentes condições de usinagem (1000x).



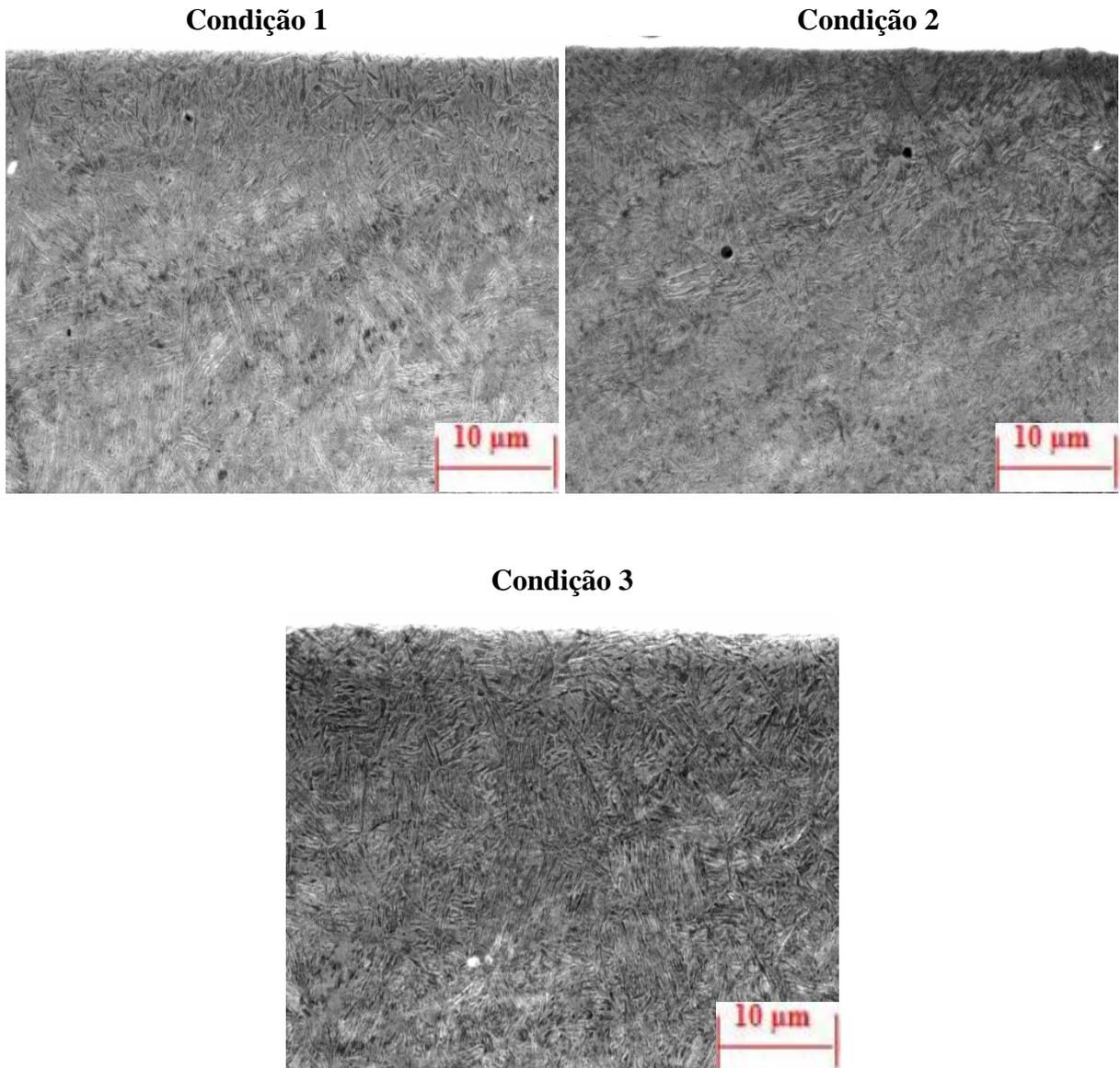
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 18 - Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do fluido de corte mineral sob as diferentes condições de usinagem (1000x).



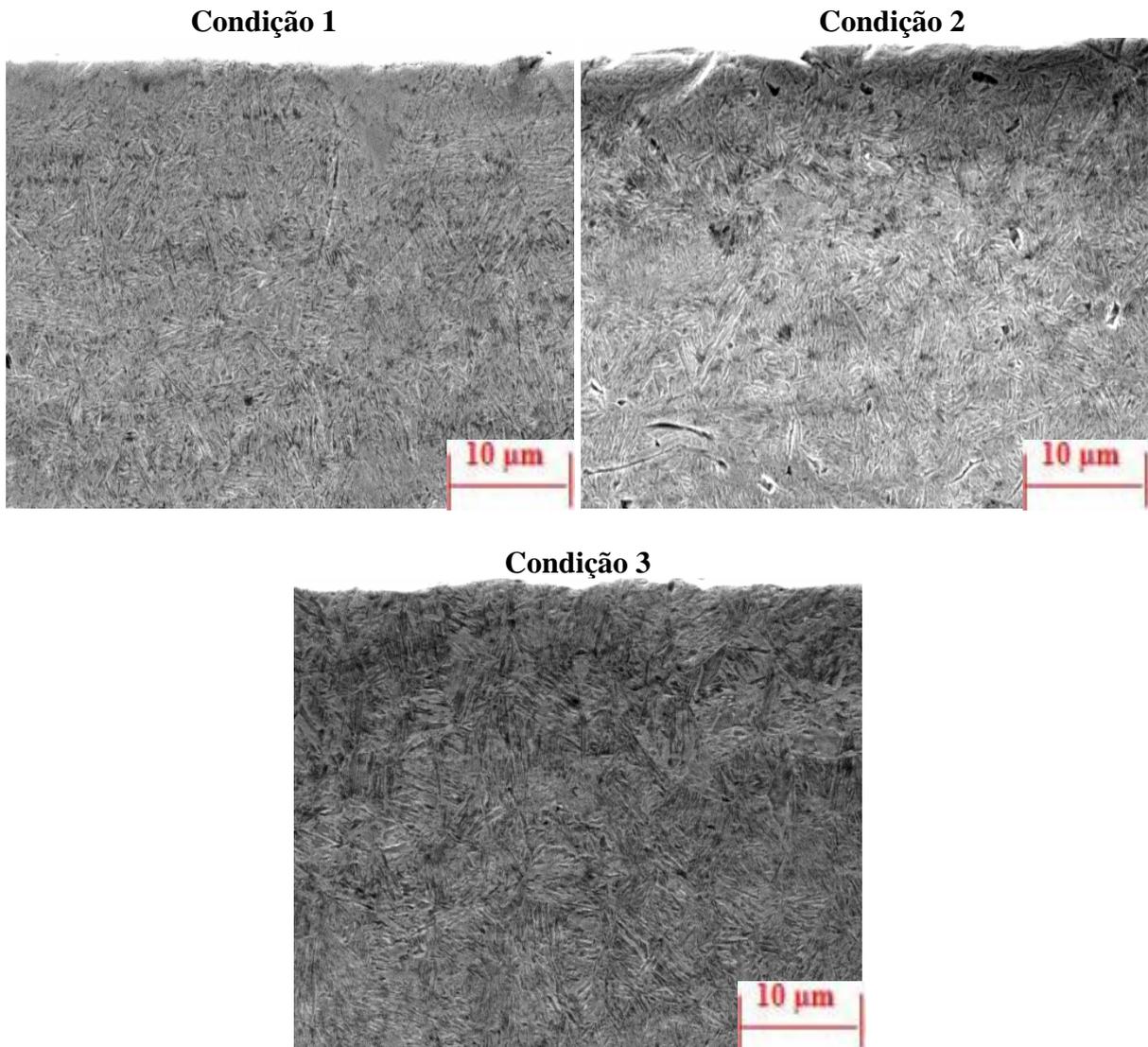
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 19 - Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do óleo de soja sob as diferentes condições de usinagem (1000x).



Fonte: Arquivo Pessoal.

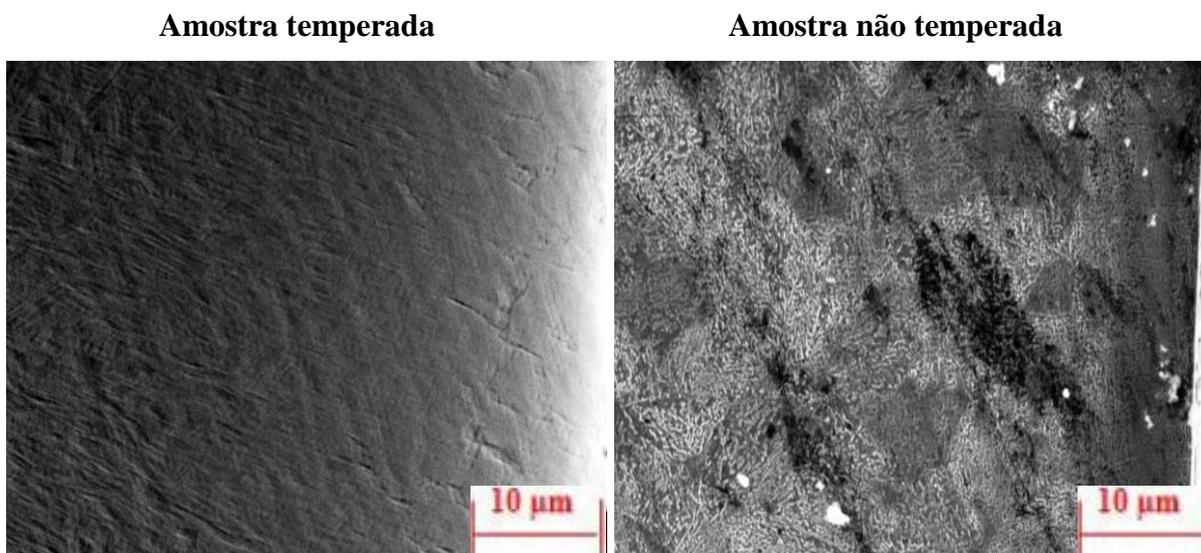
Figura 20 - Micrografia eletrônica de varredura com a utilização do óleo de milho sob as diferentes condições de usinagem (1000x).



Fonte: Arquivo Pessoal.

A Figura 21 mostra as micrografias da sub-superfície das amostras sem retificação com têmpera e sem têmpera.

Figura 21 - Micrografias obtidas da sub-superfície de amostras não retificadas, temperada e não temperada respectivamente.



Fonte: Arquivo Pessoal.

A grande presença de martensita explica a elevada dureza que esse material apresenta. Esta microestrutura é observada em todas as micrografias para todos os fluidos de corte sob as distintas condições de usinagem.

Durante a operação de retificação a temperatura da região de corte é muito elevada (1100°C) superando a temperatura de austenitização, assim ao resfriar ocorre transformação de fase martensítica. Logo supõem-se que amostras retificadas apresentam uma quantidade superior de martensita em relação as amostras não retificadas, e a amostra não retificada com têmpera apresenta ainda algumas trincas superficiais.

Assim todos os fluidos de corte estudados conseguiram uma eficaz lubri-refrigeração no processo, possibilitando uma manutenção da integridade superficial das amostras, reduzindo assim a ocorrência de danos térmicos e de alteração da microestrutura.

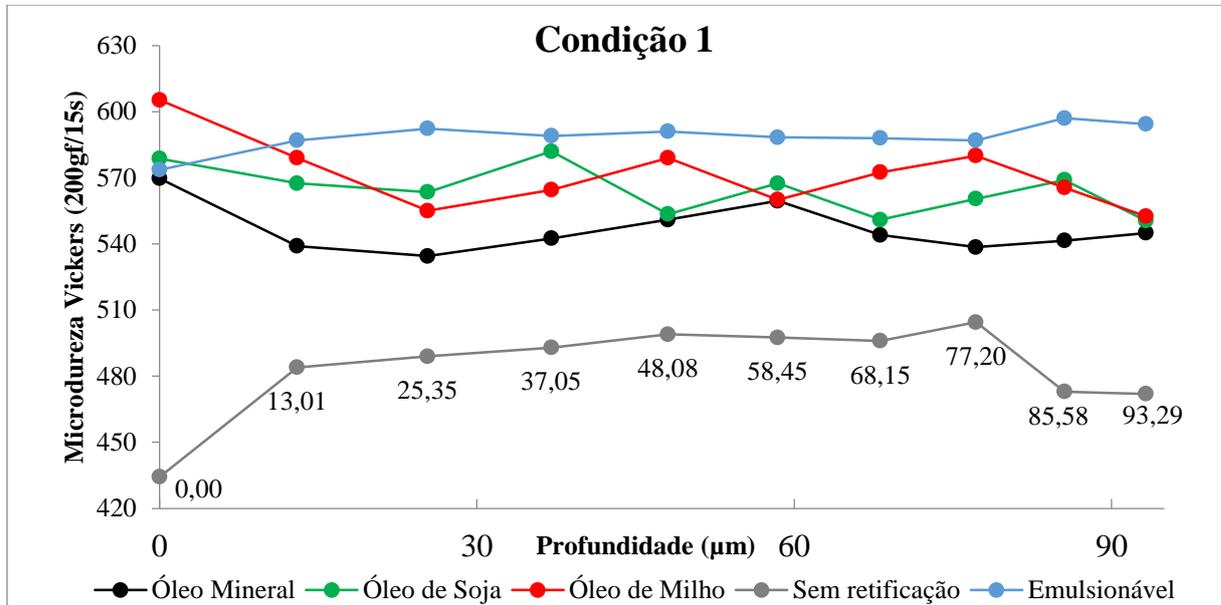
5.4 Microdureza

Os valores de microdureza encontrados estão associados à capacidade de dissipação de calor e velocidade de resfriamento dos corpos de prova, pois a temperatura e modo de resfriamento são fatores determinantes na definição da microestrutura obtida.

As Figuras 22, 23 e 24 apresentam os gráficos de Microdureza x Profundidade para as três condições de usinagem utilizando fluido de corte emulsionável, óleo mineral, óleo de soja

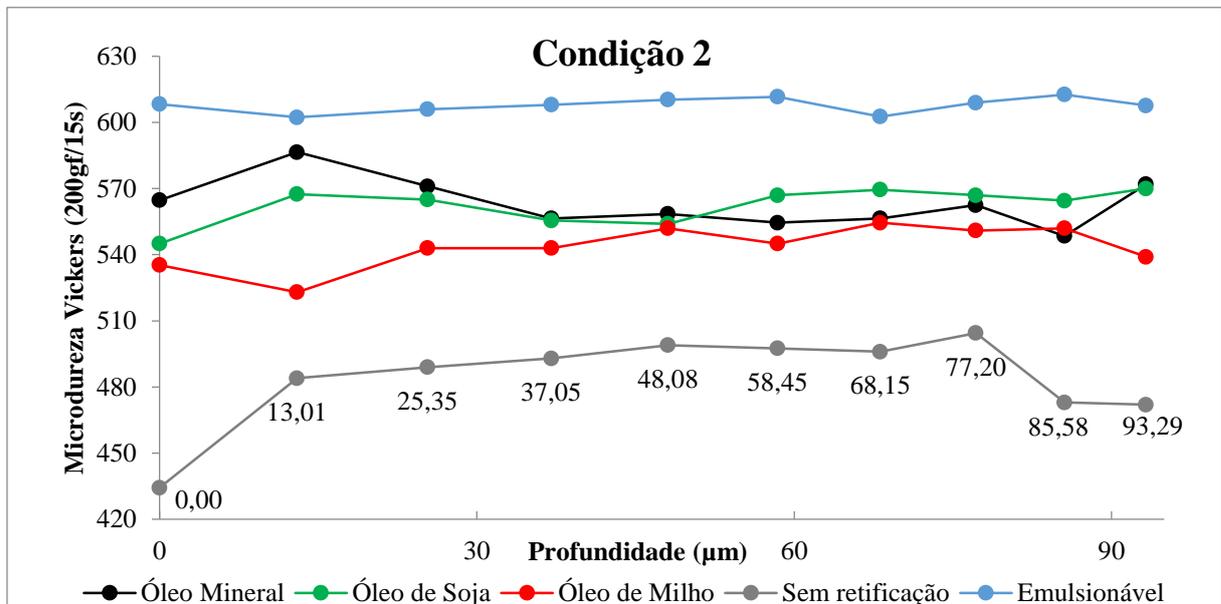
e óleo de milho. Algumas medidas de microdureza foram feitas na amostra não retificada para verificação da influência da retificação nos valores de microdureza.

Figura 22 - Valores de microdureza obtidos na condição de usinagem 1.



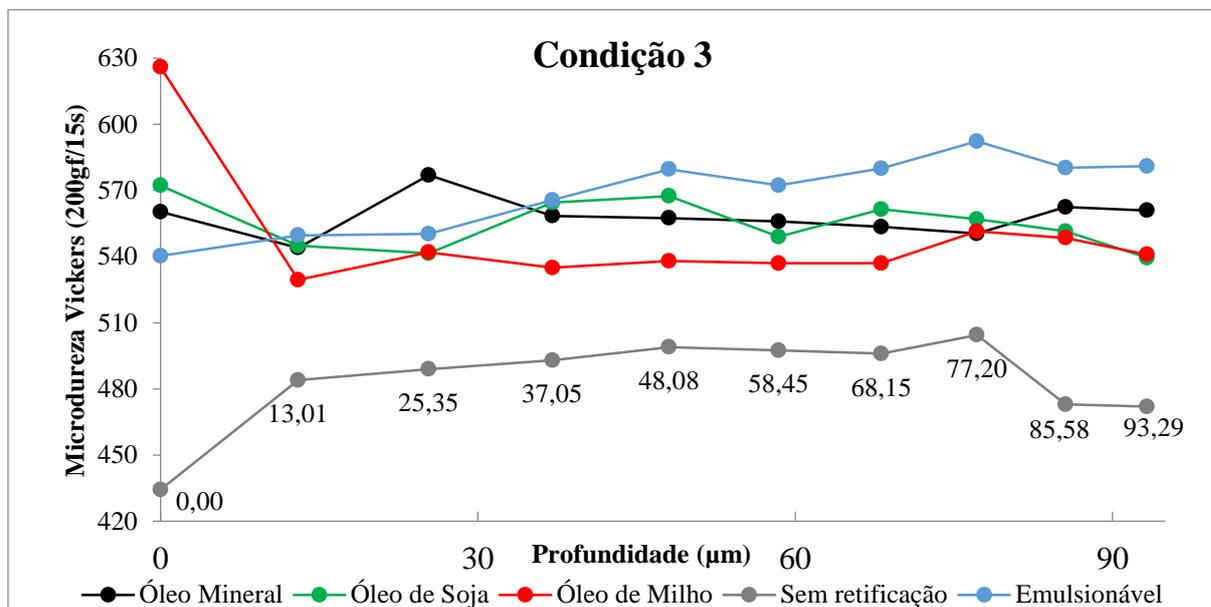
Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 23 - Valores de microdureza obtidos na condição de usinagem 2.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Figura 24 - Valores de microdureza obtidos na terceira condição de usinagem.



Fonte: Arquivo Pessoal.

Os resultados mostram que após o processo de retificação houve um aumento considerável em todas as condições de usinagem nos valores de microdureza, propriedade relacionada com a resistência ao desgaste do material.

Observa-se uma considerável variação de microdureza entre a superfície (profundidade 0) e a sub-superfície das amostras considerando os quatro fluidos de corte e as três condições de usinagem. A superfície, na maioria das amostras, apresentou os maiores valores de microdureza, comportamento esperado uma vez que na superfície ocorre maior transformação martensítica.

Na amostra não retificada o comportamento observado foi contrário. A superfície apresentou valores de dureza inferiores aos da sub-superfície, esse comportamento pode ser explicado pelo lixamento das amostras que provoca a transformação martensítica por deformação plástica, assim na profundidade zero provavelmente a deformação foi mais suave, ocorrendo uma menor alteração de fase. Já na subsuperfície, as variações de microdureza foram relativamente pequenas em todas as amostras analisadas.

De uma maneira geral, as amostras retificadas com fluido emulsionável apresentaram os maiores valores de microdureza, esse comportamento provavelmente está relacionado com o elevado poder refrigerante deste fluido o que favorece a transformação martensítica durante os ensaios, assim uma maior quantidade de martensita gera maiores valores de microdureza.

6. CONCLUSÕES

Pelos estudos e análises comparativas propostas neste trabalho no processo de retificação cilíndrica de mergulho com diferentes fluidos de corte (emulsionável, mineral, soja e milho) pode se concluir:

A retificação com óleo mineral e óleos de formulações biodegradáveis proporciona valores de rugosidade próximos, estes valores foram inferiores em relação ao fluido de corte emulsionável. Além disso, os óleos de soja e milho proporcionaram uma pequena variação dos valores, o que indica uma grande uniformidade nas superfícies dos corpos de prova.

A utilização dos fluidos de corte emulsionável proporcionou um maior desgaste diametral do rebolo. Por outro lado, o desgaste com a utilização do fluido mineral e dos óleos de soja e milho foram menores e em média muito semelhantes não comprometendo o desempenho do processo quando comparado ao fluido de corte emulsionável.

Os resultados de microscopia eletrônica de varredura estão dentro do esperado e demonstraram que não ocorreram alterações microestruturais diferentes das já esperadas no processo de retificação quanto ao emprego dos fluidos de corte de origem vegetal.

Os resultados de microdureza foram semelhantes para todos os fluidos de corte analisados, apresentando em geral uma queda nos valores da superfície para a sub-superfície e mantendo os valores próximos na sub-superfície.

De maneira geral observa-se, com os resultados obtidos, que os óleos vegetais, principalmente o óleo de soja, apresentam elevado potencial como fluido de corte no processo de retificação, pois apresentou bom desempenho no processo, no que diz respeito às variáveis analisadas mostrando que estas foram compatíveis com os resultados do fluido emulsionável e do óleo mineral, fluidos de corte amplamente utilizados na indústria. Além disto, o óleo de origem vegetal possui custo menos elevado e é biodegradável.

Estes resultados sinalizam a viabilidade do uso de óleos vegetais como alternativa ao uso de óleos minerais. Características significativas como menor toxicidade, fontes renováveis e biodegradáveis, vem a somar sua utilização no processo de retificação, contribuindo assim para uma manufatura ecologicamente correta e sustentável.

Este trabalho colabora com todos que utilizam o processo de retificação para obterem um processo menos tóxico e ambientalmente correto.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGGARWAL, A; SINGH, H.; KUMAR, P.; SINGH, M. Optimization of multiple quality characteristics for CNC turning under cryogenic cutting environment using desirability function. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 205, p. 42-50, Aug. 2008.

ALUYOR, E. O.; KESSINGTON, O. O.; MUDIACHEOGHENE. Biodegradation of vegetable oils: a review. **Scientific Research and Essay**, v. 4, n. 6, p. 543-548, June, 2009.

AVILA, R. F; ABRÃO, A.M. The effect of cutting fluids on the machining of AISI 4340 steel. **Journal of Materials Processing Technology**, n.119. p. 21-26, 2001.

BALTANÁS, M.A, CAMPANELLA, A.; RUSTOY, E.; BALDESSARI, A.; Lubricants from chemically modified vegetable oils. **Bioresource Technology**, v. 101, p. 245 - 254. 2010.

BELINATO, G. **Estudo da oxidação dos óleos de soja e dendê aditivado com antioxidantes, para uso em tratamento térmico em têmpera**. 2010. 160f. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Instituto de Física de São Carlos, Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo – São Carlos, 2010.

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

BIANCHI, E. C.; AGUIAR, P. R.; PIUBELI, B. A. **Aplicação e Utilização dos Fluidos de Corte nos Processos de Retífica**. Artliber. 1ª Edição São Paulo, 2003.

BIRESAW, G.; MITTAL, K.L. **Surfactants in tribology**. Bosa Roca (United States): CRC Press Inc, v. 2, ISBN 1439840644, 2011.

CALLISTER, W. D, **Ciência e engenharia de materiais: uma introdução**. 5ed. Salt Lake City, Salt Lake City, LTC editora, 2002 589p.

CARRETEIRO, R.P.; MOURA, C.R.S. **Lubrificantes e lubrificação**. 2 ed. São Paulo: Makro Books, 1998.

CATAI, R.E.; BIANCHI, E.C.; AGUIAR, P.R.; SILVA, L.R da. Análise da influência do processo de retificação nas circularidades, tensões residuais e na microestrutura do aço VC 131 mediante a variação do tipo de fluido de corte, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS DOS MATERIAIS, 17. Foz do Iguaçu. **Anais...** Foz do Iguaçu: CBECIMAT, 2006. p. 7181-7192

CATAI, R. E. **Otimização das condições de refrigeração/lubrificação no processo de retificação cilíndrica de mergulho**. 2004. 205f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá.

CHEN, X; LIMCHIMCHOL, T. Monitoring grinding wheels redress-life using support vector machines. **International Journal of Automation and Computing**, Nottingham, p. 56-62, 2006.

COUTINHO, T. A. **Metalografia de Não-Ferrosos**. São Paulo: Edgard Blucher, 1980.

DONG, W. P; SULLIVAN. P. J; STOUT, K. J. Comprehensive study of parameters for characterising three III: parameters for characterising amplitude and some functional properties. **Wear**, Birmingham, n.178, p.29-43, Dec, 1994.

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: part I. characterization. **Journal of Material Processing Technology**, Dublin, n. 56 p. 786-797, 1996a.

EL BARADIE, M. A. Cutting fluids: part II. recycling and grinding machining. **Journal of Material Processing Technology**, Dublin, n. 56 p. 798-806, 1996b.

FERNANDES, B. U de. **Análise de métodos de lubri-refrigeração aplicados no processo de retificação cilíndrica interna de mergulho em aços endurecidos**. 2007. 163f. Tese (Doutorado) – Ciência e Tecnologia dos Materiais, Universidade Estadual Paulista, Bauru.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. 11 ed. São Paulo, Edgard Blucher. 1977. 751p.

FOGO, F. C. **Avaliação e critérios de eficiência nos processos de tratamento de fluido de corte por eletroflotação**. 2004. 103f. Dissertação (mestrado)- Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2008.

FOX, NJ , STACHOWIAK, GW. Vegetable oil based lubricants– a review of oxidation. **Journal Tribology International**, v. 40, p.1035–46, 2007.

GADELMAWLA, E. S. et al. Roughness parameters. **Journal of Material Processing Technology**, v.123, p. 133-145, Apr. 2002.

GOMES, J. O; CARVALHO, V. M; CAMPOS, L. A. Qualidade de engrenagens e de rebolos com o uso de óleos minerais integrais, **Revista Máquina e Metais**, São Paulo, n.472, p. 112-125, Jun. 2009.

GORANA, V. K; JAIN, V. K; LAL, G. K. Experimental investigation into cutting forces and active grain density during abrasive flow machining. **International Journal of Machine Tools and Manufacturing**, v. 44, p. 201-211, Feb. 2004.

GOMES, J. O; VASCONCELOS, M.C. **Manual de gerenciamento de fluido de corte**. São José dos Campos: Instituto Tecnológico de Aeronáutica, 2005.

HASSUI, A. **Comparação sobre a utilização de diferentes sensores no monitoramento do processo de retificação**. 1997. 102f. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

LEE, E. S.; KIM, N. H. A study on the machining characteristics in the external plunge grinding using the current signal of the spindle motor. **Journal of Machine Tools e Manufacture**, v.41, n.7, p. 937-951, 2001.

LI, J. Tribological behavior of three phosphate esters containing the benzo- triazole group as additives in rapeseed oil. **Journal Synthetic Lubrication**, v.18, p.225–31, 2001.

LIMA, V. T. **Análise do Comportamento do Fluido de Corte Recuperado/ Reformulado no Processo de Retificação**. 2013. 112f. Dissertação (Mestrado) – Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MACHADO, A.R.; COELHO, R. T.; ABRÃO, A. M.; SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. 1. ed. São Paulo: Edgard Blucher. 2009. 371p.

MAIA, D. A. S et al. Fluidos de corte: novas formulações e recuperabilidade. In: PDPETRO, 4. Campinas. **Anais...** Campinas: PDPETRO, p. 1-10, 2007.

MALKIN, S. **Grinding Technology**: Theory and applications of machining with abrasives. 1.ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, 1989, 275p.

MALKIN, S.; CHIU, N. Computer simulation for cylindrical plunge grinding. **Annals of the CIRP**. v.42, p.383-387, Jan. 1993.

MATTHEW T. S, NADER S, BIGYAN A, LAMBERT A.D. Influence of fatty acid composition on the tribological performance of two vegetable-based lubricants. **Journal Synthetic Lubrication**, v. 24, p. 101–10, 2007.

MATTOS, M. et al. Recycling of oily ultrafiltration permeates to reformulate O/Wemulsion. **Colloids and surfaces a: physicochemical and engineering aspects**, n.331, p. 8-5, 2008.

MELLO, N. **Retificação e afiação**: princípios de retificação e afiação na indústria metal mecânica. 1. ed. São Paulo: Copyright. 2011. 322p.

MONICI, R. D. et al. Analysis of the different forms of application and types of cutting fluid used in plunge cylindrical grinding using conventional and superabrasive CBN grinding wheels. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.46, p. 122-131, 2006.

MUNIZ, C. A. S. **Novas formulações de fluido de corte**: otimização, propriedades e recuperação do óleo usado. 2008. 177f. Tese (Doutorado). Centro de Ciências Exatas e da Terra. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2008.

OLIVEIRA, J. F. G. de; ALVES, S. M. Novos fluidos de corte adequado ao desempenho mecânico da retificadora e ao meio ambiente. **Maquinas e Metais**, p. 28-43, jan. 2006.

OLIVEIRA, J. F. G. de; ALVES, S. M. Adequação dos processos de usinagem utilizando produção mais limpa como estratégia de gestão ambiental. **Produção**, v. 17, n. 1, p. 129-138, jan. 2007.

POP, L et al. Basestock oils for lubricants from mixtures of corn oil and synthetic diesters. **Journal American Oil Chemistry Society**, Timisoara, v. 85, p. 71-76, 2008.

RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. **Lubrificantes nas indústrias – produção, manutenção e controle**. Cotia, SP, Brasil, Triboconcept Edições Técnicas, 1990, 323p.

SHASHIDHARA Y.M.; JAYARAM,S.R. Vegetable oils as a potential cutting fluid - an evolution, **Tribology International**, v. 43 p.1073-1081, 2010.

SILVA, R. C.; GIOIELLI, L. A. **Propriedades físicas de lipídeos estruturados obtidos a partir de banha e óleo de soja**. Revista Brasileira de Ciências Farmacêuticas, São Paulo, abr./jun. 2006.

SILVA, L. R da.; MATTOS, M. F.; AMARAL, L. V.; CORRÊA, E. C. S.; BRANDÃO, J. R.; ÁVILA, R. F de. Manufatura Ecologicamente Correta: Análise do Comportamento da Mínima Quantidade de Lubrificante-MQL no processo de retificação cilíndrica externa de mergulho, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, 6. Caxias do Sul, 2011. **Anais...** Caxias do Sul: ABCM, 2011. p. 1-10.

SINGH AK, et al. Metal working fluids from vegetable fluids. **Journal Synth Lubr**, p.123-76, 2006.

SKOLD, R.O, MISRA, S.K. Lubrication studies of aqueous mixtures of inversely soluble components. **Colloids and Surfaces. A: Physico Chemical and Engineering Aspects**, v.170, p. 91, 2000.

SKONG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise instrumental**. Porto Alegre: Bookman, 2002. 836 p.

SOKOVIC, M.; MIJANOVIC, K. Ecological aspects of the cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes. **Journal of Materials Processing Technology**, v.109, p.181-189, 2001.

TESSARO, E. P. **Avaliação de processos oxidativos para o tratamento ambientalmente adequado de fluidos de corte**. 2008. 82f. Dissertação (Mestrado) – Química, Universidade de São Paulo, São Carlos.

TONSHOFF, H. K.; FRIELMUTH, T.; BECKER, J. C. Process monitoring in grinding. **Annal of the CIRP**, v.51, p. 551-571, 2002.

ULUTAN, D.; OZEL, T. Machining induced surface integrity in titanium and nickel alloys: a review. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.51, p. 250-280, 2011.

WEBSTER, J. et al. Assessment of grinding fluid effectiveness in continuous-dress creep feed grinding. **Annal of the CIRP**, v.5, p. 235-240, 2002.

WHITEHOUSE, D. J. Function maps and the role of surfaces. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**, v.41, p.1847-1861, 2001.

YOUSSEF, A. H; EL HOFY, H. **Machining technology**: Machine tools and operations, Taylor e Francis group, 2008. 633p.