SALETE MARTINS ALVES

**ADEQUAÇÃO AMBIENTAL DO PROCESSO DE
RETIFICAÇÃO ATRAVÉS DE UM NOVO CONCEITO DE
FLUIDO DE CORTE**

Tese apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos da Universidade de São
Paulo, como parte dos requisitos para a
obtenção do Título de Doutor em
Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: PROF. TIT. JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA

São Carlos
2005

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a três pessoas únicas, sem as quais seria impossível a realização deste com êxito: Deus, o autor da minha vida, meu pai Nilson pelo carinho e apoio incondicional em todos os momentos e a minha mãe Iraci (in memoriam) pelo exemplo de vida que foi para mim.

AGRADECIMENTOS

Ao meu querido orientador, Prof. João Fernando, pela amizade, pelo apoio, pela paciência, pelo conhecimento transmitido, enfim pelo direcionamento no desenvolvimento deste trabalho de doutorado.

À querida Irene, pela ajuda sempre que eu precisava, pelos diversos “probleminhas” que resolveu para mim.

À minha família: meu pai Nilson, meus irmãos Mário e Sandra e a minha amada avó Alberina, por acreditarem em mim.

Ao meu grande amigo Alessandro Roger pela imensa ajuda que me deu durante o meu doutorado.

Aos meus amigos de laboratório Eraldo, Dinho, Fábio, Daniel e Ariel, pela ajuda no desenvolvimento deste trabalho.

Ao Cristiano pela ajuda na impressão da tese.

A família OPF pelos momentos únicos que passamos juntos e que ficarão na minha lembrança por toda a minha vida.

As minhas grandes amigas, Sania e Juciléia, as quais acompanharam de perto toda esta trajetória, pela atenção e carinho nos momentos difíceis.

Aos amigos da IPB, Jamim, Thomaz, Daniela David, Thiago Daniel, Bruno, Ariane, Raquel, Francisco, Fugi, Jahyr, Marcinha, Marina, Julio, Leonardo, Rafael e muitos outros, pelo companheirismo durante estes anos.

A Prof. Ana Rita Nogueira da Embrapa, Prof. Mansur do DEQ/UFSCar e a Prof. Eny do IQSC, pela ajuda sobre análises químicas, inclusive na disponibilidade de equipamentos e laboratório para que parte deste trabalho fosse realizada.

A FAPESP pelo apoio financeiro.

Ao CNPq pela bolsa de doutorado sandwich concedida.

Ao WZL – Alemanha, por permitir realizar uma parte do meu doutorado em seus laboratórios.

Às empresas Saint-Gobain, Zema, Microquímica, Sensis e Miracema-nuodex pelo apoio desta pesquisa através da doação de materiais.

Enfim, a todos aqueles que de qualquer forma participaram na realização e conclusão deste doutorado que porventura eu possa ter omitido.

Überhaupt lernet niemand etwas durch bloßes Anhören, und wer sich in gewissen Dingen nicht selbstständig bemühet, weiß die Sache nur oberflächlich und halb.

(Não há quem aprenda alguma coisa simplesmente por tê-la ouvido, e quem não se esforça sozinho em certas coisas acaba por conhece-las apenas de modo superficial e pela metade).

J. P. Eckermann (literato alemão, 1772-1854).

RESUMO

ALVES, S. M. (2005). Adequação Ambiental do Processo de Retificação através de um novo conceito de fluido de corte. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

O uso do processo de retificação está em crescimento na indústria de processamento de metais e junto com este crescimento há um aumento no consumo de fluidos de corte que são utilizados para minimizar o calor gerado neste processo. Estes atuam através da lubrificação da peça e ferramenta e também pelo seu poder de refrigeração. Embora os fluidos possuam a capacidade de melhorar o processo de retificação, em contrapartida, eles geram alguns problemas, tais como agressão ao ambiente através do seu descarte e causam danos à saúde do operador. Devido à necessidade crescente de adequação aos requisitos atuais de segurança do operador e ao meio ambiente, novas combinações de tipos de rebolos e fluidos de corte estão sendo procuradas. Os rebolos de CBN permitem que uma maior quantidade de calor seja removida da região de corte através da própria ferramenta superabrasiva. Quando combinados com óleos integrais, os mais agressivos ao ambiente, os rebolos de CBN mostraram resultados muito satisfatórios. O mesmo não ocorre com os fluidos à base de água. Dessa forma fica clara a necessidade de desenvolvimento tecnológico de novas possibilidades de fluidos com alta lubricidade e característica biodegradável. Fundamentado nesta necessidade, este projeto de doutoramento foi proposto, o qual tem como objetivo avaliar as influências que os diferentes tipos de fluidos existentes no mercado exercem em rebolos de CBN, através de análises químicas e físicas e também o desenvolvimento de um fluido de corte alternativo. Tal fluido deve ser formulado a base de óleo vegetal, possuir característica de lubrificação e não agredir o meio ambiente. Para avaliar se realmente os grãos de CBN reagem com a água presente nos fluidos solúveis foram realizados testes de retificação com uma menor quantidade de água (aproximadamente 50 litros) e também em um reator químico onde foi simulada condição ideal onde a reação química entre o CBN e a água é mais propícia a acontecer. Para comparação do desempenho dos diferentes fluidos foram realizados testes em retificação cilíndrica CNC de alta velocidade com rebolos de CBN. A nova formulação foi caracterizada com análises químicas e físicas, tais como viscosidade, pH, resistência à corrosão e biodegradabilidade. O desempenho mecânico do novo fluido foi avaliado através de testes de retificação plana e comparado com outros fluidos existentes no mercado. Os parâmetros de saída usados para comparação do desempenho mecânico foram rugosidade da peça e desgaste do rebolo de CBN. Os resultados obtidos permitiram concluir que os grãos de CBN não reagem com a água nas condições de retificação estudadas, o que indica que se pode usar fluido de corte solúvel na retificação com rebolos de CBN. O fluido de corte desenvolvido neste trabalho, quando usado na concentração 21% forneceu resultados semelhantes aos melhores fluidos e ao mesmo tempo preenche os requisitos ambientais.

Palavras-chave: Fluido de corte, retificação, meio ambiente.

ABSTRACT

ALVES, S. M. (2005). Environmental adequacy of the grinding process through a new concept of grinding fluid. PhD (Thesis) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2005.

The application of the grinding process is growing in the metal working industry and with this growth there is an increase in the amount of cutting fluid used to minimize the heat generated in this process. These fluids act by lubricating the wheel-workpiece interface and by conducting heat away and cooling the grinding area. Although the fluids possess the ability to improve the grinding process, on the other hand, they generate some problems; such as damage to the environment when disposed and to the operator's health during their use. Due to the growing need to adapt current safety standards regarding operators and environment, new combinations of wheel types and cutting fluids are being sought. As a result, the grinding process is being optimized by adopting grinding strategies that lead to a decrease in the energy expend during the cutting process, and its rapid dissipation out of the grinding zone. These procedures include the use of CBN wheels, which allow a larger amount of heat to be removed from cutting area through the tool. Therefore it is clear the necessity of a technological development of new cutting fluids with high lubrication ability and biodegradable characteristics. Based on this necessity this PhD project was proposed, wich aims to evaluate the influence of different types of cutting fluids available in the market on the CBN wheel, by chemical and physical analyses. Also the development of alternative cutting fluid based vegetable oil, which have lubricant ability and is not aggressive to the environment. In order to evaluate if the CBN grains react with the water in soluble fluids, grinding tests were carried out using a low amount of water (approximately 50 liters) and also reaction was simulated in a chemical reactor under ideal conditions. CNC cylindrical grinding tests were performed to compare the different cutting fluids. Chemical and physical analyses, such as viscosity, pH, rust inhibitor and biodegradability characterized the new formulation. The mechanical performance of the new cutting fluid was evaluated through conventional surface grinder and compared with other grinding fluids existent in the market. The parameters used to compare the mechanical performance were the workpiece roughness and the CBN wheel wear. Based on these experimental results, the following conclusions can be drawn: The CBN grains don't react with water under the evaluated grinding conditions, which indicates that soluble cutting fluid can be used in CBN grinding process. The proposed cutting fluid, when used in concentration of 21% gave results similar to the best commercial fluids and at the same time it accomplishes environment requirements. The soluble fluid based on sulfonate castor oil is easily biodegradable and is not aggressive to the environment

Keywords: Cutting Fluid, Grinding and Environment.

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 2.2: Propriedades dos grãos convencionais e superabrasivos (adaptado de Carius, 1999)</i>	8
<i>Figura 2.3: Rugosidade Superficial ativa do rebolo (adaptado de Hitchiner, 1999)</i>	10
<i>Figura 2.4: Regiões de formação de CBN, a partir da pirólise de PABH(Me), onde o metal é em Mg (1), Li (2), Al (3), Zn (4), Cr (5), Zr (7) e linha da interfase de equilíbrio entre HBN e CBN.</i>	11
<i>Figura 2.5: Microestrutura do rebolo de CBN vitrificado (Adaptado de Jackson et al, 2001).</i>	16
<i>Figura 2.6: Comparação dos tipos de ligantes através da taxa de remoção de material para rebolos CBN (Adaptado Jackson et al, 2001).</i>	16
<i>Figura 2.7: Influência do tipo de fluido de corte na relação G (adaptado de Carius, 1989)</i>	24
<i>Figura 2.8: Porcentagem dos custos de refrigeração nos custos de fabricação (fonte: Daimier Benz AG, Gühring- citado em Novaski e Dörr, 1999).</i>	28
<i>Figura 2.9: Equipamentos de gerenciamento de fluidos utilizados nas operações de transformações de metais (Dick e Foltz, 1997).</i>	31
<i>Figura 2.10: Emissões de resíduos de fluidos de corte (Fonte: Ignácio, 1998).</i>	42
<i>Figura 2.11: Diagrama de causas e efeitos decorrentes da utilização do fluido de corte.</i>	44
<i>(adaptado de Campos, 1992)</i>	44
<i>Figura 2.12: Ciclo de vida dos produtos químicos baseados em fonte renováveis. (Adaptado de Willing, 2001)</i>	60
<i>Figura 4.1: Sistema de circulação do fluído de corte.</i>	85
<i>Figura 4.2: Vista frontal do Reator de Quartzo.</i>	87
<i>Figura 4.3: Vista detalhada da acomodação dos grãos de CBN no reator.</i>	88
<i>Figura 4.4: Linha de Reação utilizada.</i>	89

<i>Figura 4.5: Dimensões iniciais dos corpos-de-prova (mm) utilizados na retífica plana.</i>	97
<i>Figura 4.6: Dimensões iniciais dos corpos-de-prova (mm) utilizados na retífica cilíndrica.</i>	98
<i>Figura 4.7: Desenho técnico do bico de sapata.</i>	103
<i>Figura 4.8: Desenho técnico do rebolo utilizado.</i>	104
<i>Figura 4.9: Regiões do perfil do rebolo dressadas.</i>	105
<i>Figura 4.10: Sistema de dressagem</i>	105
<i>Figura 4.11: Desenho esquemático do posicionamento da peça para o desbaste.</i>	107
<i>Figura 4.12: a) Área desgastada do rebolo e b) pontos onde houve o toque do dressador</i>	107
<i>Figura 4.13: Vista geral da retificadora ZEMA Numerika G800 –HS utilizada nos experimentos.</i>	108
<i>Figura 4.14: Tela do programa de aquisição de dados</i>	109
<i>Figura 4.15: Vista lateral da peça, do suporte e dinamômetro.</i>	110
<i>Figura 4.16: Vista frontal e lateral do dressador.</i>	111
<i>Figura 4.17: Vista em perspectiva da peça após a retificação.</i>	111
<i>Figura 4.18: Perfil esperado do rebolo após diversas retificações.</i>	112
<i>Figura 4.19: Mapa acústico da superfície do rebolo após a operação de dressagem realizada antes de cada ensaio.</i>	114
<i>Figura 4.20: Esquema do perfil do rebolo após a realização de cada ensaio (desgaste radial fora de escala)</i>	115
<i>Figura 4.21: Rebolo uniformizado, com o dressador tendo removido a totalidade da superfície não desgastada.</i>	116
<i>Figura 4.22: Representação esquemática da medição do desgaste do rebolo pela técnica de impressão do perfil do rebolo.</i>	117
<i>Figura 5.1: Espectro da amostra antes de colocar no reator.</i>	120
<i>Figura 5.2: Espectro da amostra depois da reação a 400 °C.</i>	121
<i>Figura 5.3: Espectro da amostra depois da reação a 600 °C.</i>	121
<i>Figura 5.4: Análises MEV e EDXS da superfície da ferramenta, que foi testada com éster sem aditivo: (a) SEM (ampliada 1000 vezes), b) EDXS para o ponto 1, c) EDXS para o ponto 2, e d) EDXS para o ponto 3.</i>	123

<i>Figura 5.5: Análise microscópica da ferramenta: a) 40x, b) 200x e c) 1000x.</i>	124
<i>Figura 5.6: Possível modelo de ação do aditivo de enxofre (Adaptado de Schey, 1984).</i>	125
<i>Figura 5.7: Análises de MEV e EDXS da superfície da ferramenta, que foi testada com éster com aditivo de enxofre: (a) MEV (ampliada 1000 vezes), b) EDXS para o ponto 1, c) EDXS para o ponto 2, e d) EDXS para o ponto 3.</i>	127
<i>Figura 5.8: Análise microscópica da ferramenta: a) 40x, b) 200x e c) 1000x.</i>	128
<i>Figura 5.9: Superfície da ferramenta: a) éster sem aditivo e b) éster com aditivo de enxofre.</i>	129
<i>Figura 5.10: Análises de MEV e EDXS da superfície da ferramenta, que foi testada com PAO com aditivo de enxofre e fósforo: (a) SEM (ampliada 500 vezes) para P, b) EDXS para o PAO com P, (c) SEM (ampliada 500 vezes) para S, e d) EDXS para PAO com S.</i>	131
<i>Figura 5.11: Coeficiente de atrito (força de cisalhamento/força normal) em função do tempo de atrito para fluidos a base de éster aditivados e não aditivados.</i>	132
<i>Figura 5.12: Coeficiente de atrito (força de cisalhamento/força normal) em função do tempo de atrito para fluidos com diferentes aditivos.</i>	133
<i>Figura 5.13: Vista do teste de retificação utilizando fluido OPF.</i>	136
<i>Figura 5.14: Vista lateral do dinamômetro com cavacos aderidos pelo fluido formulado.</i>	137
<i>Figura 5.15: Papel filtro determinando o grau de corrosão dos fluidos de corte: a) fórmula 1, b) fórmula 3 e c) comercial semi-sintético</i>	138
<i>Figura 5.16: Papel filtro determinando o grau de corrosão dos fluidos de corte: a) versão 1, b) versão 2 e c) Fórmula 3 (OPF)</i>	139
<i>Figura 5.17: Curva de calibração para o Fluido OPF.</i>	140
<i>Figure 5.18: Valores do desgaste radial – técnica de mapeamento acústico.</i>	142
<i>Figure 5.19. Valores do desgaste radial – técnica de impressão do perfil.</i>	142
<i>Figura 5.20 – Valores de rugosidade (Ra) para diferentes fluidos de corte (retificação cilíndrica)</i>	143
<i>Figura 5.21: Relação G para os diferentes fluidos de cortes testados.</i>	146
<i>Figura 5.22- Valores de rugosidade (Ra) para diferentes fluidos de corte.</i>	147

Figura 5.23: Comparação da Força Normal durante a retificação para o OPF 32 °Brix e o óleo integral. 148

Figura 5.24: Comparação da Força Normal durante a retificação para o OPF 21 °Brix e o óleo integral 148

Figura 5.25: Comparação da Força Normal durante a retificação para o OPF 15 °Brix e o óleo integral 149

Figura 5.26: Comparação da Força Normal durante a retificação para o OPF 21 °Brix e o fluido semi-sintético comercial. 150

Figura 5.27: Vista frontal da Retificadora Centerless. 151

Figura 5.28: Válvulas usadas do teste, a esquerda antes da retificação e a direita após a retificação. 152

Figura 5.29: Válvula na saída do processo. 153

Figura 5.30: Paralelismo da ponta das válvulas em função do número de peças. 154

Figura 5.31: Paralelismo da solda das válvulas em função do número de peças. 154

LISTA DE TABELAS

<i>Tabela 2.1: Principais características de um rebolo CBN (GE Company, 1998)</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2.2: Impactos que ocorrem no rendimento de um rebolo superabrasivo de CBN devido às alterações dos grãos e dos ligantes (GE Company, 1998).....</i>	<i>12</i>
<i>Tabela 2.3: Características dos fluidos de corte (1-pior; 4-melhor) (Webster, 1995).....</i>	<i>23</i>
<i>Tabela 2.4: Avaliação dos diferentes fluidos de corte no processo de retificação (B – bom, M – médio, R – ruim).....</i>	<i>34</i>
<i>Tabela 2.5: Exposição dos artigos da CONAMA 09/93</i>	<i>49</i>
<i>Tabela 2.6: Componentes dos fluidos de corte solúveis (Fonte: Hüber,1994).</i>	<i>61</i>
<i>Tabela 2.7: Componentes não mais usados nos fluidos de corte.</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 2.8: Substitutos para alguns, mas não para todos componentes de fluidos de corte.</i>	<i>73</i>
<i>Tabela 4.2: Parâmetros operacionais do espectrômetro de emissão ótica acoplado a plasma induzido</i>	<i>86</i>
<i>Tabela 4.3: Composição química do aço 100Cr6V.....</i>	<i>90</i>
<i>Tabela 4.4: Fluidos de corte usados no teste tribométrico.</i>	<i>91</i>
<i>Tabela 4.5: Composição básica dos fluidos de corte.</i>	<i>93</i>
<i>Tabela 4.6: Critérios de avaliação do teste de corrosão.....</i>	<i>96</i>
<i>Tabela 4.7: Dureza dos materiais utilizados na fabricação dos corpos-de-prova.....</i>	<i>97</i>
<i>Tabela 4.8: Condições de operação aplicadas nos testes de retificação cilíndrica.....</i>	<i>100</i>
<i>Tabela 5.1: Resultados da análise de boro na retífica plana.</i>	<i>119</i>
<i>Tabela 5.2: Composição da Fórmula 1</i>	<i>134</i>
<i>Tabela 5.3: Composição da Fórmula 2</i>	<i>135</i>
<i>Tabela 5.4: Composição da Formula 3</i>	<i>136</i>
<i>Tabela 5.5: Composição das formulações propostas.</i>	<i>138</i>
<i>Tabela 5.6: Valores de desgaste do rebolo e volume de material removido.....</i>	<i>145</i>

SUMÁRIO

RESUMO	V
ABSTRACT	VI
LISTA DE FIGURAS.....	VII
LISTA DE TABELAS.....	XI
1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS.....	1
2. ASPECTOS TEÓRICOS RELEVANTES	5
2.1 Retificação com rebolo CBN em altas velocidades	5
2.2. Rebolos CBN	7
2.2.1 Síntese e composição dos rebolos de CBN.....	10
2.2.2 Tipos de Ligantes	13
2.2.3 Características de uso de óleos integrais e aquosos com rebolos de CBN	17
2.3 Fluidos de Corte	18
2.3.1. Classificação dos fluidos de corte.....	19
2.3.2 Funções de um fluido de corte no processo de retificação	22
2.3.3 Seleção do correto fluido de corte	25
2.3.4. Custos do sistema de refrigeração.....	27
2.3.5 Manutenção dos fluidos de corte	28
2.3.6 Reciclagem e descarte dos fluidos de corte	30
2.3.7 Influência dos diversos Tipos de Fluidos de Corte na Retificação.....	32
2.3.8 Atuais tendências de utilização	35
2.4 Fluidos de Corte e seus Aspectos Ambientais	38
2.4.1 Impactos Ambientais Externos e Internos Causados pelos Fluidos de Corte..	40
2.4.2 Legislação Específica para os Fluidos de Corte	46
2.4.3 Sustentabilidade do Uso dos Produtos Químicos	59
2.5 Formulação dos Fluidos de Corte	61
2.5.1 Fluidos Básicos	62
2.5.2 Aditivos utilizados em fluidos de corte emulsionáveis.....	63
2.5.3 Componentes problemáticos	69
2.5.4 Controle da qualidade das emulsões/soluções	73

2.6 Fluidos de Corte Biodegradáveis e Bioestáveis.....	75
2.7 Desenvolvimento de fluido de corte para retificação com rebolos de CBN.....	76
3. PROPOSTA METODOLÓGICA.....	82
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	84
4.1 Análise da existência da reação entre CBN e fluido a base de água.....	84
4.2 Formulação de Fluidos de corte.....	90
4.2.1 Análise dos efeitos dos aditivos na formulação dos fluidos de corte	90
4.2.2 Constituintes da formulação do novo Fluido de Corte	92
4.2.3 Misturas dos reagentes	92
4.2.4 Análises da qualidade do fluido de corte	93
4.3 Testes de Retificação com Rebolos CBN	96
4.3.1 Corpos-de-prova	96
4.3.2 Fluidos de corte.....	98
4.3.3 Condições de usinagem.....	99
4.3.4 Descrição do banco de ensaios	102
4.3.5 Procedimentos para a medição do desgaste radial do rebolo.....	112
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	118
5.1 Análise da existência da reação entre CBN e fluido a base de água.....	118
5.2 Analise dos efeitos dos aditivos na formulação dos fluidos de corte.	122
5.3 Formulação de Fluidos de Corte	134
5.3.1 Teste de Corrosão	137
5.3.2 Biodegradabilidade do fluido de corte.....	139
5.3.3 Curva de correlação entre o grau Brix e a concentração do novo fluido de corte	139
5.4 Desempenho mecânico do novo fluido de corte OPF e comparação com os fluidos de corte comerciais.	141
5.4.1 Testes de retificação cilíndrica.....	141
5.4.2 Testes em Retificação Plana	144
5.4.3 Testes de desempenho mecânico em ambiente fabril	151
6. CONCLUSÕES	156

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	158
7. BIBLIOGRAFIA	159
ANEXO 1	169
ANEXO 2	175
ANEXO 3	178

1. INTRODUÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A grande utilização de fluidos de corte pela indústria de processamento de metais deve-se à necessidade de minimizar o calor gerado nas operações de usinagem. Eles refrigeram e lubrificam a peça e a ferramenta, bem como auxiliam na remoção dos cavacos. O tipo de fluido depende do processo e do material empregado, podendo ser óleos ou soluções aquosas. Com o crescimento da utilização do processo de retificação, as indústrias estão utilizando maiores quantidades de fluido de corte, mas em contrapartida, o tratamento e o descarte dos resíduos são processos caros e devem se submeter ao rigor da legislação ambiental. Segundo Queiroz et al (1999), no Brasil, os riscos associados à utilização dos fluidos de corte não são abordados por uma legislação própria, que exija o controle dos riscos no local de trabalho e no meio ambiente. Entretanto, os fluidos de corte apresentam uma série de problemas relacionados com a saúde do operador (insalubridade do local de trabalho) e com o tratamento e a disposição final dos fluidos usados e seus resíduos.

Há uma grande variedade de fluidos disponíveis no mercado que estão divididos em quatro classes principais que são os óleos integrais, óleos emulsionáveis, semi-sintéticos e sintéticos. Estes fluidos possuem características, vantagens e limitações distintas. Os óleos integrais possuem alto poder de lubricidade, porém oferecem baixa capacidade de refrigeração, ao contrário destes os óleos solúveis tem um grande poder de refrigeração, mas possuem pouca lubricidade. Além disso, deve-se considerar que o uso dos óleos de base aquosa causa menores impactos à saúde, são mais seguros, e com relação ao ambiente, são mais limpos.

Na Europa, bem como nos Estados Unidos, regulamentações e leis têm sido decretadas recentemente, o que têm afetado significativamente a formulação dos fluidos

de corte. A indústria que utiliza tais fluidos está procurando continuamente melhorar o seu desempenho através de uma variada quantidade de aditivos adicionada às formulações dos fluidos de corte. Por outro lado, uniões das indústrias e governo reforçam as tendências para um ambiente de trabalho saudável e seguro, bem como aspectos de disposição influenciando o meio ambiente.

Estas tendências têm afetado a formulação dos fluidos de corte na Europa e Estados Unidos nos seguintes aspectos: remoção de nitritos, substituindo dietanolamina e parafinas cloradas com pequena cadeia carbônica. Todas estas remoções e substituições têm sido realizadas com o cuidado de não afetar adversamente o desempenho dos fluidos de corte (Bartz, 2001).

Devido à necessidade crescente de adequação aos requisitos atuais de segurança do operador e ao meio ambiente, novas combinações de tipos de rebolos e fluidos de corte estão sendo procuradas. Como resultado, tem-se buscado otimizar o processo de retificação, através da adoção de procedimentos que visam uma diminuição na energia gerada durante o processo de corte e sua mais rápida dissipação da zona de retificação. Estes procedimentos incluem o uso de rebolos de CBN (nitreto cúbico de boro), os quais permitem que uma maior quantidade de calor seja removida da região de corte através da própria ferramenta superabrasiva (Kohli et al., 1995). Quando a retificação com rebolos de CBN é realizada com altas velocidades tem-se uma melhora significativa no processo, porém há algumas desvantagens como altas temperaturas e maiores solicitações do fluido de corte.

Segundo Novaski e Dörr (1999) os custos com refrigeração representam, em média, 17% dos custos de manufatura, um valor expressivo quando comparado aos gastos destinados à ferramenta (média de 2% a 4%). Além de gastos adicionais de manutenção do sistema e separação do cavaco do fluido de corte, uma atenção especial deve ser dada ao processo de seleção de um fluido, avaliando pré-requisitos básicos como a capacidade de lubrificação e o poder de refrigeração e de remoção dos cavacos.

Melhorias de produtividade e de resultados econômicos podem ser geradas a partir da combinação de máquinas-ferramentas e fluido de corte. Segundo Bennett citado por Monici et al (2001), a utilização de óleos integrais com ferramentas superabrasivas (CBN) mostraram-se satisfatórios, pois os rebolos de CBN possuem a características de

resistência a temperaturas elevadas, além da facilidade de dissipação de calor. Experiências com a utilização de rebolos de CBN mostraram que os fluidos a base de óleo mineral são mais indicados para altas taxas de remoção de materiais. Para médias e baixas taxas de remoção foram indicados fluidos sintéticos ou óleos solúveis (emulsões). Dessa forma, fica clara a necessidade de desenvolvimento tecnológico de novas tendências relativas à criação de novas formulações e métodos de aplicação a respeito de tais fluidos.

Diante disto, surge o questionamento de como se pode ter um processo com alta eficiência e qualidade e menores danos à saúde e ao ambiente? Com objetivo de encontrar uma solução plausível para este problema fundamentou-se este trabalho. Aqui é proposto um estudo sobre fluidos de cortes para retificação em altas velocidades com rebolos de CBN, analisando o efeito dos diversos tipos de fluidos de corte existentes no mercado sobre a retificação com CBN e o desenvolvimento de um novo conceito de fluido de corte ambientalmente adequado. Tal fluido deve ter bom desempenho mecânico, agregando características de lubrificação e refrigeração, e causar menores impactos ao ambiente e à saúde dos operários. Os objetivos mais detalhados estão listados a seguir:

- Investigar se as reações químicas entre o rebolo de CBN e a água presente nos fluidos de corte de base aquosa, propostas na literatura, realmente ocorrem, assim seria possível verificar se o novo fluido a ser proposto pode ser formulado a base de água;
- Estudar o desgaste do rebolo de CBN quando submetido à retificação com diferentes tipos de fluidos de corte, avaliando também a rugosidade da peça;
- Levantamento bibliográfico sobre legislações ambientais brasileiras e internacionais relacionadas a fluidos de cortes, compostos químicos banidos das formulações e as futuras tendências do uso e desenvolvimento de fluidos de corte.
- Desenvolver uma nova formulação de fluido de corte alternativo não existente no mercado, a base de óleo vegetal, que possua propriedades como lubricidade e refrigeração e não agrida o ambiente;

- Analisar o desempenho da nova formulação na retificação com rebolo de CBN nas condições testadas através dos parâmetros de saída (rugosidade da peça, desgaste do rebolo e força normal).

Este trabalho foi desenvolvido no laboratório de Otimização de Processos de Fabricação o qual possui uma linha de pesquisa de retificação com rebolos de CBN em altas velocidades.

A redação deste trabalho está estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 2, que descreve uma revisão bibliográfica dos principais tópicos de estudo;
- Capítulo 3, onde é exposta a proposta metodológica desenvolvida para a investigação dos objetivos propostos.
- Capítulo 4 foi reservado para a descrição dos materiais e métodos utilizados nesta pesquisa;
- Capítulo 5 que apresenta os resultados obtidos bem como a discussão dos mesmos;
- Capítulo 6 inclui as conclusões alcançadas durante o doutoramento;
- Capítulo 7 sugere trabalhos que podem dar continuidade neste trabalho.
- Capítulo 8 indica as referências bibliográficas utilizadas na elaboração deste trabalho.

2. ASPECTOS TEÓRICOS RELEVANTES

Neste capítulo serão abordados aspectos teóricos importantes e necessários para o desenvolvimento deste trabalho. Foi realizado um levantamento bibliográfico sobre rebolos de CBN, ressaltando sua composição química, principais propriedades e seu comportamento durante a retificação. Os diferentes tipos de fluidos de corte foram descritos, considerando todas as vantagens e desvantagens de cada um. Um estudo sobre as legislações ambientais internacionais e nacionais foi realizado, bem como as atuais tendências para o uso dos fluidos de corte.

2.1 Retificação com rebolo CBN em altas velocidades

O processo de retificação tem como principais funções melhorar o acabamento superficial, reduzir a dispersão dimensional e garantir a integridade superficial das peças acabadas. Por isso, as operações de retificação são as últimas fases realizadas durante a fabricação de uma peça. O uso de CBN em altas velocidades ajuda a melhorar significativamente a eficiência da usinagem de peças com alta qualidade.

O desenvolvimento da retificação em alta velocidade tem sido conduzida por promessas de taxas mais elevadas de remoção de material bruto e/ou vida mais longa do rebolo. A aplicação bem-sucedida de altas velocidades do rebolo tem significativa dependência das condições de trabalho que evitam danos térmicos (Hitchiner, 2001 (2)).

O benefício trazido pelo aumento da velocidade é evidente, pois, segundo Shi et al (1998), com o aumento da velocidade de corte ocorre uma redução da espessura teórica do cavaco e, conseqüentemente, torna-se possível um aumento na taxa de remoção de material. Outro benefício é a redução das forças por grão, o que faz com que a pressão

sobre o mesmo seja menor e proporcione um aumento da relação G (volume de material removido/volume de rebolo desgastado).

Segundo Hitchiner (2001 (2)), sob velocidades elevadas do rebolo (>100 m/s) as temperaturas superficiais podem cair, como ilustra a Figura 2.1. Nestas velocidades, o tempo de contato do grão é tão transiente e as condições térmicas subsequentemente adiabáticas, que o calor não tem tempo suficiente para penetrar na superfície da peça antes de ser removido pelos cavacos. Neste caso, o aquecimento da peça é menor, já que um dos principais meios de transmissão do calor gerado para a peça é a sua dissipação através do cavaco. Com a redução da temperatura da peça, reduz-se a probabilidade do aparecimento de danos térmicos e a queima da mesma.

Figura 2.1: Temperatura da superfície da peça em função da velocidade periférica de rebolos CBN e óxido de alumínio (adaptado de Hitchiner, 2001)

Para se obter altas taxas de remoção de material, em alta velocidade, seria melhor usar rebolos revestidos de CBN por deposição eletrolítica, retificando um material insensível à queima (como ferro fundido) a grandes profundidades de corte ou altas velocidades de trabalho e utilizando óleo integral como fluido de corte (Hitchner, 2001 (2)).

Outros fatores a serem considerados com o aumento da velocidade de corte são a solicitação mecânica da estrutura dos rebolos e a variação dimensional de seu corpo, resultados da ação das forças inerciais. Ao contrário dos rebolos convencionais, os quais são confeccionados numa estrutura única, os rebolos de CBN segmentados podem ser

utilizados em velocidades de corte superiores a 120 m/s. Como exemplo, os rebolos de CBN com ligante vitrificado possuem, na maioria dos casos, um corpo metálico onde segmentos superabrasivos são colados a este corpo. Assim, materiais específicos de maior resistência podem ser utilizados na confecção deste corpo e sistemas de fixação mais eficientes podem ser utilizados na colagem dos segmentos. A espessura dos segmentos pode ser então dimensionada de acordo com a máxima velocidade de corte de trabalho, evitando-se a sua fratura.

2.2. Rebolos CBN

O tipo de reboło, convencional ou CBN (nitreto cúbico de boro), para ser usado na retificação de peças de aço geralmente é selecionado com base na disponibilidade de equipamentos para se trabalhar em altas velocidades, na necessidade de alto desempenho no processo e na existência de sistemas de dressagem. Em casos onde a manutenção da forma do reboło é um fator importante para o desempenho da peça observa-se uma tendência pela utilização dos rebolos de CBN. Portanto, o reboło de CBN é também usado em lugar do reboło convencional quando se deseja uma boa superfície final (Satow, 1996).

O CBN com a sua singular composição química de boro e nitrogênio, mantém-se inerte quando usado para retificar materiais reativos à formação de carbetos. Portanto, mesmo que o CBN tenha uma dureza mais baixa do que a do diamante, um reboło abrasivo feito com CBN mantém-se afiado e retificará estes materiais com menor desgaste e maior eficiência do que o diamante (Carius, 1999(2)).

O abrasivo CBN por si só é superior aos abrasivos convencionais em termos de propriedades térmicas e mecânicas, tais como maior dureza, resistência à abrasão, à fratura e condutividade térmica 37 vezes maior que a do óxido de alumínio. Estas características permitem ao CBN ter um desempenho significativamente superior aos rebolos convencionais. A condutividade térmica do CBN, de 1300 W/m^oK a 25 °C, é inferior apenas ao do diamante. Comparando com os abrasivos convencionais, como o óxido de alumínio, 29 W/m^oK, e com o carbetto de silício, 42 W/m^oK, estes podem ser

considerados isolantes térmicos. A Figura 2.2 mostra algumas propriedades dos grãos CBN comparadas com as de outros materiais.

Figura 2.2: Propriedades dos grãos convencionais e superabrasivos (adaptado de Carius, 1999)

A vida dos rebolos de CBN é em torno de 500 vezes maior que a dos convencionais, e conforme Hitchiner (1999), os valores de G (relação entre o volume de material retificado e o volume de reboło gasto) podem variar de 1000 a 5000 para alguns casos de retificação com rebolos CBN eletrolíticos, dependendo do tipo de fluido.

Num processo típico de retificação, a geração instantânea de calor no ponto de contato reboło/peça será menor com CBN do que com o óxido de alumínio, devido ao seu corte afiado, seu baixo coeficiente de atrito, sua condutividade térmica e à sua resistência à abrasão. A maior parte do calor gerado será rapidamente dissipada dentro da partícula de CBN do que no óxido de alumínio, de menor condutividade térmica. Portanto uma menor quantidade de energia térmica é transmitida através da peça retificada com CBN, ocasionando menores temperaturas na peça de trabalho.

A obtenção dos benefícios proporcionados pela utilização de rebolos de CBN está intimamente ligada à execução de uma operação de dressagem eficiente. Segundo Hitchiner (1999), o entendimento das limitações e das exigências da dressagem de rebolos de CBN com ligante vitrificado têm sido o fator chave para a utilização de novas tecnologias, tais como os sensores acústicos para a detecção de contato, novas tecnologias de ligantes, etc.

A utilização de rebolos de CBN pode levar à redução da ocorrência do efeito de evaporação do filme de fluido de corte. Kohli et al. (1995) verificaram em seus experimentos, que 60-75% da energia gerada no processo de retificação é transportada em forma de calor para a peça quando se utiliza rebolos convencionais, contra apenas 20% quando da utilização de rebolos de CBN com ligantes metálicos e vitrificados. A análise dos resultados indica que a menor parcela de energia para a peça é resultado da maior condutividade térmica dos grãos abrasivos de CBN, quando comparado com óxido de alumínio. A menor partição de energia quando da utilização de rebolos de CBN resulta em menores temperaturas de retificação e numa grande tendência de redução de danos térmicos para a peça.

Diante destes fatores tem sido crescente o uso de rebolos CBN na retificação, tendo como resultados tolerâncias geométricas mais rigorosas e maior integridade da superfície retificada.

A superfície de um rebolo é significativamente afetada quando comparada com a sua estrutura. O processo de dressagem fratura e remove partículas abrasivas e ligantes, reduzindo a concentração superficial de ambos (Hitchiner, 1999). Yokogawa foi o primeiro pesquisador a descrever esta camada afetada, nomeando como “*Tsukidashiryō*”, também conhecida como “Rugosidade da Superfície Ativa”. Esta pode variar em profundidade, de poucos micrometros até mais de 30 μm (Yonekura & Yokogawa, 1983; Mindek, 1992). Para a maioria das aplicações de média e alta remoção de material, com o início da retificação, os cavacos irão erodir, preferencialmente, o ligante e aumentar a camada afetada (Figura 2.3). Isto é acompanhado por uma queda nas forças de retificação e um aumento da rugosidade, principalmente nas primeiras peças executadas após a dressagem. A queda nas forças é acompanhada por um aumento inicial da taxa de desgaste do rebolo e um aumento da rugosidade superficial.

Figura 2.3: Rugosidade Superficial ativa do rebolo (adaptado de Hitchiner, 1999)

A rápida queda na potência de usinagem pode ser reduzida através da otimização dos parâmetros de dressagem. Porém, esta é raramente eliminada. Nesta operação, a quantidade de material removida em cada avanço é tamanha que qualquer camada afetada é removida e uma nova é criada a cada dressagem. Pelas razões acima discutidas, a profundidade de dressagem para rebolos de CBN deve ser de somente poucos micrometros.

Desta forma, torna-se claro que não só a profundidade de cada passo de dressagem é importante, mas também a profundidade total removida. Estes aspectos são extremamente importantes e governam não só o mecanismo de fratura dos grãos abrasivos, mas também a rugosidade da superfície ativa do rebolo.

2.2.1 Síntese e composição dos rebolos de CBN

O nitreto de boro cúbico é sintetizado a partir do nitreto de boro hexagonal, um pó de extrema baixa dureza, mediante aplicação de elevadas pressões e temperatura na presença de um catalisador. Possui altíssima dureza Knoop, 4700 kg/mm^2 , independentemente da orientação dos cristais que compõem sua estrutura. Apresenta uma resistência mecânica elevada à temperatura, à pressão atmosférica e apresenta estabilidade até 2000°C (Bertalan, 1997).

Segundo Bertalan (1997), os grãos podem ainda ser mono ou policristalinos. O CBN monocristalino, que depende de um desgaste por macrolascamentos para gerar arestas afiadas, pode ser de média ou alta tenacidade. O CBN monocristalino de média tenacidade é adequado para aplicações gerais e pequenas a médias taxas de retificação. Já o CBN monocristalino de alta tenacidade é mais apropriado para aplicações mais severas.

Polushin e Burdina (1997), estudaram a síntese de nitreto cúbico de boro a partir de PABH M (poliamoniatos de hidratos de boro de metais). Os autores construíram um diagrama P, T (pressão versus temperatura) para a formação de CBN utilizando diferentes metais como catalisadores (como pode ser observado na Figura 2.4). As regiões P, T de formação do CBN são consideravelmente diferentes dependendo do metal catalisador utilizado, ou seja, o metal catalisador influencia significativamente no processo de síntese. Segundo Will e Perkins (2001), para a síntese de nitreto cúbico de boro os metais catalisadores mais utilizados são os compostos de Mg e algumas vezes compostos de Li.

Figura 2.4: Regiões de formação de CBN, a partir da pirólise de PABH(Me), onde o metal é em Mg (1), Li (2), Al (3), Zn (4), Cr (5), Zr (6) e linha da interfase de equilíbrio entre HBN e CBN.

Bianchi et al (2001) analisando as Tabelas 2.1 e 2.2, observaram que a dureza do ligante tem influência direta nos parâmetros de saída do processo. De forma geral, pode-se afirmar que se o ligante possuir baixa capacidade de retenção dos grãos abrasivos na superfície de corte do rebolo (rebolo mole) haverá o desprendimento dos grãos e, conseqüentemente, a renovação da superfície de corte. O tamanho do grão abrasivo influencia diretamente a vida útil do rebolo, a eficiência da operação de retificação e a qualidade superficial da peça retificada. A escolha da granulometria dos grãos que serão utilizados no processo de fabricação de um rebolo está associada ao que se pretende do processo. O grau de friabilidade (facilidade para fraturar o grão em pedaços, sob uma determinada força de retificação ou impacto entre o grão e a peça, formando novas arestas) de um grão abrasivo também pode comprometer o processo de usinagem. A concentração do rebolo representa a quantidade de abrasivos (em peso) por unidade de volume do rebolo. A concentração de um rebolo está relacionada ao seu custo de aquisição e as capacidades (a capacidade de um dado processo fabricar produtos dentro da faixa de especificação) do rendimento (capabilidade da vida do rebolo, remoção de material, taxa de capabilidade, requisitos de potência, acabamento superficial da peça e agressividade). Quando se utiliza valor menor de concentração, os parâmetros de saída (taxa de remoção de material, relação G, acabamento superficial e consumo de energia da máquina) diminuem.

2.2.2 Tipos de Ligantes

Os ligantes têm a função de manter o grão aprisionado até que este esteja sem capacidade de corte. Nesse instante, o ligante deve liberar o grão abrasivo para que os grãos posicionados em camadas mais profundas, ainda afiados, possam entrar em ação.

a) Ligantes Metálicos

As ligas metálicas são o tipo mais comum de matriz usada para segurar os cristais superabrasivos. As ligas metálicas compostas de bronze, cobalto, tungstênio ou outros metais são extremamente duras e resistentes ao desgaste. Nessas ligas os cristais de diamante e CBN devem ser robustos no formato e suaves na textura, para resistir à fratura

decorrente do impacto e suportar a degradação térmica causada pelas altas temperaturas geradas no processo de fabricação dos rebolos. (Carius, 1999(1))

Os ligantes metálicos são obtidos pela sinterização de pós de bronze ou de metal duro, ou pela deposição galvânica de níquel sobre um corpo base até que se tenha uma espessura suficiente para fixar os grãos abrasivos.

b) Ligantes Resinóides

Rebolos com ligante resinóide são fabricados pela mistura de quantidades medidas de resina fenólica ou poliamida e agentes de preenchimento com o peso e tamanho apropriado do abrasivo.

Dependendo da aplicação da retificação um reboło com ligante resinóide pode conter uma concentração pequena de 50 até 125. A maioria dos rebolos com ligante resinóide contém uma concentração de abrasivos de 75 a 100. Rebolos com este tipo de ligante têm ação de retificação mais macia e fácil, em comparação com outros tipos de ligantes. (Bianchi et al, 2002(1)). Este tipo de ligantes é largamente usado como ligantes de rebolos de CBN.

As principais características destes ligantes são:

- Boa qualidade de corte
- Maior ductilidade
- Podem ser utilizados em um grande número de aplicações
- Estão disponíveis em um grande número de formas e tamanhos
- Podem ser utilizados tanto em retificação refrigerada como a seco
- Apresentam uma melhor retenção do grão abrasivo.

c) Ligantes Vitrificadas

As ligas vitrificadas combinam as características das ligas resinóides e das ligas metálicas, proporcionando um corte rápido e frio e uma elevada resistência ao desgaste. A ação extremamente robusta desta liga requer menos material da matriz do que aquelas com resina ou metálicas para reter com segurança os cristais superabrasivos e ainda maior resistência de liga (Carius, 1999(1)).

Há uma gama de variedade de ligantes vitrificados para CBN avaliados por valores de dureza, porosidade e concentração. Eles consistem em uma estrutura porosa de partículas abrasivas mantidas unidas por um forte ligante de vítreo (Hitchiner, 2001(1))

Este tipo de ligante é frágil, extremamente resistente ao desgaste e possui boa estabilidade térmica. Outra vantagem significativa da utilização de ligante vitrificado em rebolos CBN é a elevada porosidade presente em seu ligante, como também, as boas propriedades de auto-afiação que simplifica o método de condicionamento (Bianchi et al, 2002(2)).

As principais características de rebolos com ligantes vitrificados são:

- Vida longa
- Facilidade de afiar
- Boa resistência à abrasão
- Boa capacidade de manutenção da forma geométrica
- Maior fragilidade ao impacto
- Possuem menor resistência devido à má utilização
- Renovam mais facilmente os grãos abrasivos
- Podem gerar melhores acabamentos superficiais (concentrações de 150 a 200 podem produzir os melhores acabamentos).

Uma típica microestrutura de rebolo de CBN com ligante vitrificado é demonstrada na Figura 2.5.

Figura 2.5: Microestrutura do rebolo de CBN vitrificado (Adaptado de Jackson et al, 2001).

A Figura 2.6 mostra a relação entre a taxa de remoção de material com o tipo de ligante para rebolos de CBN em retificação em altas velocidades.

Figura 2.6: Comparação dos tipos de ligantes através da taxa de remoção de material para rebolos CBN (Adaptado Jackson et al, 2001).

Bianchi (2002(2)) cita em seu trabalho que a empresa GE Company USA, recentemente havia divulgado resultados de um levantamento sobre a utilização dos

principais tipos de ligantes utilizados na fabricação de rebolos superabrasivos compreendido entre os anos de 1980 a 1997. De acordo com a pesquisa realizada por esta empresa, pôde-se notar uma grande queda na utilização do ligante resinóide (de 76% para 31%) e um acentuado crescimento (de 4% para 32%) na utilização de ligante vitrificado. Com bases nesses números, pode-se verificar que tais ferramentas são atualmente as mais utilizadas e em quantidades praticamente iguais.

Um estudo para avaliar o desempenho de rebolos de CBN com os diferentes tipos de ligantes foi realizado por Bianchi et al (2002(1)). Segundo os autores observando os valores de relação G, o rebolo com ligante vitrificado apresentou melhor desempenho do que o ligante resinóide. Porém, diferenças mais pronunciadas foram verificadas durante a análise dos valores de relação G, em que o rebolo de CBN com ligante resinóide de alto desempenho apresentou um desempenho até 30 vezes superior ao rebolo convencional.

2.2.3 Características de uso de óleos integrais e aquosos com rebolos de CBN

Utilizando fluidos de corte aquosos há uma alta taxa de desgaste, ocorrendo um consumo da camada de CBN. Isto tem sugerido que a reação química do CBN com a água é o fator que leva a este consumo. Alguns autores reportam uma redução de 41% na vida do rebolo quando se utiliza fluido de corte aquoso em relação ao óleo integral. Mas, geralmente, nos rebolos utilizados com óleo integral espera-se um aumento significativo na vida útil em relação aos utilizados com fluidos aquosos. A economia de rebolos de CBN quanto ao uso de óleos emulsionáveis é ainda questionada e muito dependente da aplicação e qualidade do componente (Hitchiner, 1999).

A liga dos rebolos de CBN vitrificados consiste de silicato borato de alumínio com óxidos adicionados a temperaturas de $\geq 600^{\circ}\text{C}$. Para obter altos rendimentos com os rebolos de CBN, tem que se prestar uma especial atenção ao fluido de corte, que de forma preferencial deve ser óleo integral, devido a várias razões. Segundo Hitchiner (1999), muitos dos constituintes são poucos reativos quimicamente com CBN. Os fluidos de corte aquosos dão lugar à formação de vapor a alta temperatura, no ponto de contato entre o rebolo e a peça retificada. Conforme Leal (1993) este vapor de água pode atacar o

CBN, decompondo-o. Deve-se levar em conta que a formação de B_2O_3 na superfície de CBN, forma uma capa protetora que evita sua posterior oxidação e consequente deterioração. Dado que este B_2O_3 é solúvel em água, a oxidação continua sendo conduzida deteriorando as partículas de CBN, especialmente em suas arestas de corte, acelerando a degradação do rebolo e, portanto, diminuem sua vida. Em ar, segundo Hitchiner (1999), o CBN forma uma camada protetora de B_2O_3 na superfície. Todavia nas temperaturas atingidas durante o aquecimento de um ligante vitrificado, esta proteção é perdida devido à afinidade do ligante com o B_2O_3 , convertida em muitas reações em presença de ar e/ou água na forma:

Recentemente estudos foram feitos para limitar esta reatividade por aplicação de um fino revestimento no abrasivo, por exemplo, titânio. Experiências têm demonstrado, todavia que é melhor tirar proveito desta afinidade química por CBN e alcançar um nível controlado da reatividade da superfície, obtendo um ligante extremamente tenaz (Hitchiner, 1999).

Os óleos integrais, segundo Leal (1993), eliminam a decomposição do CBN, associada à formação de vapor a alta temperatura e à oxidação, e também, diminuindo o calor gerado pelo atrito do rebolo sobre a peça. Esta pode ser uma explicação para o melhor desempenho dos rebolos de CBN com óleos integrais.

2.3 Fluidos de Corte

Taylor em 1890 introduziu a utilização de fluido de corte na usinagem dos materiais, inicialmente ele utilizou água para resfriar a região ferramenta-peça-cavaco, com isto ele conseguiu aumentar a velocidade de corte em 33%. Depois começou a utilizar água e soda, ou água e sabão para evitar a oxidação da peça e/ou ferramenta. Os óleos minerais surgiram para aplicação na usinagem de latão. Com o desenvolvimento de

materiais para ferramentas, induziu-se o estudo e desenvolvimento de novos fluidos de corte, surgindo os óleos emulsionáveis e sintéticos.

Durante o processo de corte ocorre a geração de calor devida à energia necessária para deformação do cavaco e a energia proveniente do atrito ferramenta-peça e cavaco-ferramenta. Este calor gerado precisa ser minimizado a fim de evitar alguns inconvenientes como: desgaste da ferramenta, dilatação térmica da peça, dano térmico à estrutura superficial da peça. Com a utilização de fluidos de corte, pode-se diminuir o coeficiente de atrito reduzindo assim a quantidade de calor gerada no processo.

As principais funções dos fluidos de cortes são lubrificação e refrigeração do corte, mas também outras funções podem ser oferecidas pelos fluidos como:

- Prevenção contra a soldagem cavaco-ferramenta (formação de arestas postiças);
- Retirada do cavaco da região de corte;
- Proteção contra a corrosão;
- Redução da dilatação térmica da peça;
- Evitar dano à estrutura superficial e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície da peça usinada;
- Redução no custo de ferramental na operação.

2.3.1. Classificação dos fluidos de corte

Como foi citado na introdução deste trabalho, há uma grande variedade de fluidos disponíveis no mercado que estão divididos em quatro classes principais que são os óleos integrais, óleos emulsionáveis, semi-sintéticos e sintéticos. Cada tipo básico de fluido de corte apresenta características, vantagens e limitações distintas. Segundo Runge & Duarte (1990) e ASM (1991), os fluidos de corte podem ser agrupados em dois tipos básicos:

- Óleos de corte (integral ou aditivado);
- Fluidos de corte a base de água:
 - emulsionáveis convencionais;
 - emulsionáveis semi-sintéticos;
 - soluções (fluidos sintéticos);

Os **óleos de corte** têm como composto básico o óleo mineral, podendo ser usados no estado puro (sem aditivação) ou aditivado (presença de aditivos polares e/ou aditivos químicos ativos ou inativos). Estes óleos são geralmente de base parafínica, em sua maioria, pois segundo Webster (1995), os compostos aromáticos policíclicos, se não forem destruídos durante o processo de formação do óleo de corte, através de forte hidrogenação, podem causar câncer ou dermatites. Estes óleos têm excelentes propriedades lubrificantes, bom controle anti-ferrugem, longa vida útil, porém, apresentam menor poder refrigerante quando comparados com os fluidos de corte a base de água.

Os **fluidos de corte a base de água** são misturas que variam entre emulsões e soluções dependendo da constituição básica do concentrado (óleo mineral ou sais orgânicos e inorgânicos, respectivamente), da presença e da quantidade de emulgadores no mesmo. Este fluido apresenta uma refrigeração eficiente aliado a um moderado poder lubrificante o qual depende da taxa de diluição e da constituição do concentrado do fluido aquoso.

Nas **emulsões**, o óleo mineral está disperso na água em forma de gotículas, devido à presença de emulgadores, agentes tensoativos, os quais reduzem o tamanho das partículas do óleo mineral em minúsculas partículas (gotículas), mantendo-as dispersas e evitando a sua coalescência. Apresentam menor poder lubrificante e maior poder refrigerante que o óleo integral. Todavia necessitam de cuidados especiais quanto à qualidade da água utilizada, ao controle de microrganismos (bactérias e fungos), ao pH e à concentração da emulsão.

Os **óleos semi-sintéticos** são combinações de fluidos sintéticos e emulsões em água. Estes fluidos são compostos de fluidos sintéticos que contém somente uma pequena porcentagem de óleo mineral emulsionável, variando de 5 a 30% do total do fluido concentrado, o qual é adicionado a fim de propiciar uma emulsão estável, translúcida e composta de minúsculas gotículas de óleo. Os óleos semi-sintéticos combinam algumas das propriedades dos fluidos sintéticos e dos óleos emulsionáveis. As principais desvantagens são a lubrificação insuficiente em determinadas operações, bem como a

formação de compostos insolúveis, porém possuem um melhor controle de oxidação que as emulsões convencionais.

Os **fluidos sintéticos** são soluções químicas constituídas de sais orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, não contendo óleo mineral. Possuem rápida dissipação de calor, excelente poder detergente e visibilidade da região de corte, facilidade no preparo da solução, elevada resistência à oxidação do fluido e à ferrugem. O baixo poder lubrificante, a formação de compostos insolúveis e de espuma para determinadas operações de usinagem podem ser algumas desvantagens na utilização deste tipo de fluido.

As principais funções de um fluido são:

Lubrificação:

Aproximadamente um terço de calor gerado no corte de metal é causado por atrito externo. Outros dois terços do calor gerado é causado por atrito interno; resistência dos átomos do metal em movimento quando este é deformado na zona de corte. O uso do lubrificante reduzirá a quantidade de calor gerado através do atrito por decréscimo do contato metal-metal (Littlefair, 1999). Com aplicação de lubrificante reduz-se o atrito em 30%.

Refrigeração

A temperatura na retificação pode atingir cerca de 1100 °C a seco. Em situações de alta temperatura o fluido de corte precisa remover calor suficiente do processo. Para este processo de resfriamento ser eficiente tanto quanto possível, o fluido deve possuir um alto calor específico (para poder absorver grande quantidade de calor com um pequeno aumento da temperatura). A eficácia do refrigerante permitirá altas velocidades de corte e taxa de alimentação enquanto gera a mesma quantidade de calor como de que um produto inferior.

Água é preferida para facilitar a refrigeração e com isto poderá absorver e transportar mais calor por unidade de volume mais rápido que qualquer outro meio. De fato, quando comparada ao óleo integral, a água pode absorver o calor 2,5 vezes mais rápido. O problema do uso de água como fluido de corte é a corrosão e a capacidade de

lubrificação relativamente pobre, que são opostas ao óleo integral. Por esta razão, uma combinação de lubrificação e refrigeração, fluidos de cortes aquosos foram desenvolvidos que combinem méritos do óleo e da água em um só produto (Littlefair, 1999).

2.3.2 Funções de um fluido de corte no processo de retificação

O cavaco gerado pela remoção de material no processo de retificação é acompanhado de um consumo elevado de energia que é em grande parte convertida em calor, provocando elevações na temperatura da região de corte. Como resultado tem-se uma alta sollicitação térmica da peça, levando até ao comprometimento da integridade superficial da mesma, através do surgimento de fissuras, distorções, tensões residuais elevadas e não-conformidades dimensionais. Estes efeitos indesejáveis podem ser acompanhados pelo desgaste acentuado do rebolo e pela aderência, de partículas removidas do material usinado, bem como levar ao entupimento das porosidades do ligante (Silva, 2000).

Para ser realmente efetivo, o fluido de corte não deve apenas proporcionar uma boa refrigeração da peça por convecção, mas, principalmente, também deve atuar no mecanismo de formação do cavaco, favorecendo o corte ao invés da deformação plástica sem remoção de material (*plowing*). Como resultado, tem-se uma redução na energia específica de retificação requerida no processo de usinagem (Malkin, 1989).

Segundo Hitchiner (1990), o fluido de corte pode favorecer o corte ao invés do *plowing* através de duas formas:

- Mantendo o rebolo afiado, através da diminuição do coeficiente de atrito grão abrasivo-peça, inibindo o desgaste térmico e do topo de grão;
- Pela redução do coeficiente de atrito grão-peça, permitindo assim que grãos “cegos” cortem, reduzindo as forças de retificação para uma dada taxa de remoção de material. Isto traz um duplo benefício: a energia a ser dissipada é menor, já que o corte propriamente dito é favorecido, além de ser mais facilmente dissipada.

A Tabela 2.3 apresenta sete características básicas dos quatro principais tipos de fluidos de corte utilizados em retificação. As propriedades lubrificantes e refrigerantes são as mais importantes em um processo de retificação. Entretanto, as demais devem ser consideradas antes da escolha do fluido a ser utilizado.

Tabela 2.3: Características dos fluidos de corte (1-pior; 4-melhor) (Webster, 1995)

	Fluidos sintéticos	Fluidos semi-sintéticos	Emulsões	Óleos integrais
Remoção de calor	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Facilidade de filtração	4	3	2	1
Aspectos ambientais	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1
Aumento da vida do rebolo	1	2	3	4

Segundo Carius (1989), citado por Webster (1995), na maioria dos casos o desgaste do rebolo é reduzido utilizando-se o óleo integral, conforme apresentado na Figura 2.7. Esta apresenta os valores de relação G obtidos para diferentes tipos de fluidos de corte. Por definição, uma redução no desgaste radial do rebolo leva a um aumento da relação G, já que o volume de material removido foi o mesmo para todos os fluidos testados.

Figura 2.7: Influência do tipo de fluido de corte na relação G (adaptado de Carius, 1989)

Ye & Perace (1984) e Howes (1990) afirmaram que o fluxo de calor crítico obtido para o óleo integral é de 9 W/mm^2 , quando da retificação por *creep-feed* de uma liga a base de níquel, utilizando-se um rebolo com porosidade elevada na máxima profundidade de corte. Já para o óleo emulsionável, o valor encontrado foi de 17 W/mm^2 , o que representa um significativo aumento no fluxo de calor, se comparado com óleo integral.

Os óleos integrais têm maior capacidade lubrificante quando comparada com a dos fluidos solúveis (aquosos), o que resulta em menores valores de energia específica de retificação e na redução do desgaste no topo do grão. Pode-se considerar também que devido a sua lubricidade ocorra uma maior redução na energia específica de retificação do que a proporcionada pelos óleos de base aquosa, sendo assim possível minimizar a desvantagem de baixa refrigeração.

Trincas e fraturas frágeis poderão surgir em decorrência da combinação entre o estado de tensões residuais de tração, originário do tratamento térmico do material e as tensões do processo de retificação, sendo que as altas taxas de resfriamento propiciadas pelos fluidos sintéticos são uma desvantagem. A queima superficial da peça pode ser evitada através de uma lubrificação eficaz, a qual reduz a energia específica de retificação, diminuindo as temperaturas geradas e o calor a ser dissipado durante o corte. Em componentes com maior ductilidade, emulsões e fluidos sintéticos podem ser

utilizados, já que maiores taxas de resfriamento podem ser toleradas sem que trincas ocorram (Silva, 2000).

2.3.3 Seleção do correto fluido de corte

O grau de lubrificação e o grau de refrigeração requerido por várias operações de remoção variam de acordo com o tipo de operação, rigidez e fixação, tipo de metal sua dureza e microestrutura, o material da ferramenta e sua geometria, velocidade e alimentação, e profundidade de corte selecionados (Webster, 1995).

A seleção correta de um fluido de corte dependerá de uma série de fatores, tais como, aspectos econômicos, tipo de máquina operatriz, custos relacionados aos procedimentos de descarte, tipo de sistema de circulação, saúde humana e contaminação, meios de controle, método de aplicação, severidade da operação, tipos de operação, materiais usinados e compatibilidade do metal com o fluido, entre outros. (Silva e Bianchi, 2000). Pode-se fazer diferentes combinações fluido-ferramenta-peça. Na retificação de aços temperados é recomendada a utilização de óleos integrais, pois estes proporcionam menores gradientes térmicos e favorecem a diminuição do desgaste. Para materiais mais dúcteis, os óleos emulsionáveis e sintéticos podem ser vantajosos, pois as altas taxas de resfriamento ajudam a reduzir o aparecimento de trincas (Silva, 2000).

Nenhum tipo de fluido poderá fornecer ótima lubrificação e ótimo resfriamento. De fato, lubrificação e resfriamento são características opostas em um espectro. Óleos fornecem excelente lubrificação, porém são relativamente pobres em termos de refrigeração.

Química do fluido

Quando se seleciona um fluido, é importante considerar a compatibilidade química com o processo bem como o desempenho da retificação. Um fluido que proporciona alta taxa de remoção de cavacos, mas corrói a máquina não é uma boa escolha em relação ao custo efetivo. Escolhendo a correta combinação de aditivos e misturas químicas, especialmente com os tipos a base de água, geralmente requer-se testes de bancada, os quais devem classificar o fluido seguindo as condições:

miscibilidade, alcalinidade, resistência à espuma, resíduos, corrosão, filtração e resistência a bactérias (Webster, 1995).

Desempenho da retificação

Diniz et al (1999) também nos dizem que a existência ou não do fluido de corte afeta na seleção da dureza do rebolo. Operações refrigeradas eficientemente permitem o uso de rebolos com dureza mais elevada sem modificar a estrutura superficial da peça, que já está tratada termicamente. Esta modificação da estrutura da peça é chamada de “queima”, pois muitas vezes vem acompanhada de uma mudança na coloração da parte “queimada” da peça. O uso de fluidos de corte e rebolos com durezas mais elevadas permite um incremento na produtividade do rebolo.

Sete características dos quatro maiores tipos de fluidos de corte são listadas na Tabela 2.3. As qualidades de resfriamento e lubricidade dos fluidos são as principais contribuintes para um bom desempenho de retificação, embora outras qualidades precisam ser consideradas antes de se fazer a escolha. Nenhum fluido é ideal em todos os aspectos. Cada um precisa ser avaliado tendo em vista requisitos e as limitações da aplicação no ambiente em que será utilizado (Webster, 1995).

Os óleos integrais proporcionam menores forças de retificação, devido ao seu maior poder lubrificante, permitindo a diminuição do coeficiente de atrito e, pela manutenção da afiação da ferramenta, gerando menores temperaturas na região de corte (Torrance (1980) citado por Silva (2000)).

Além dos problemas já citados, Webster (1995) descreve que a escolha de cada óleo integral ou fluido solúvel não é uma decisão fácil. Óleos integrais sofrem os seguintes problemas:

- a) Baixa condutividade térmica pode causar danos térmicos. Altíssimo ponto de ebulição;
- b) Quando retificando materiais, forma-se uma névoa de óleo ao resfriar a peça quente.
- c) Alta viscosidade requer grandes consumos de filtros de cavacos e filtros médios;
- d) Arraste de óleo para cada componente finalizado pode ser suprida e conduzida para uma gradual drenagem;

- e) Óleos minerais são conhecidos por ser carcinogênico e causam câncer de pele;
- f) Contaminação da água utilizadas no processo;

Óleos emulsionáveis causam os seguintes problemas:

- a) Maior manutenção é necessária para controlar degradação de vários aditivos;
- b) Problemas microbiológicos geralmente conduzem a disposição prematura por causa do odor e a sérias mudanças químicas;
- c) Sistemas de alta pressão, tais como as usadas em *creep-feed*, promovem formação de espumas no fluido;
- d) Baixa lubricidade quando comparados com óleos integrais;
- e) Baixa viscosidade pode limitar a coerência do jato;
- f) Abastecimento da água inicial necessita de controle cuidadoso.

2.3.4. Custos do sistema de refrigeração

Os custos de refrigeração relacionados com o processo de usinagem são freqüentemente relegados a um segundo plano. São subvalorizados porque ficam embutidos no cômputo dos custos gerais. Mas é importante que eles sejam observados ao lado dos custos fixos da instalação do sistema de refrigeração. Nessas despesas entram a aquisição, manuseio e o descarte dos fluidos refrigerantes, que são prejudiciais ao meio ambiente. Devido ao maior rigor das leis referentes ao descarte de resíduos, os custos para a queima ou descarte estão hoje mais altos do que os da aquisição. Devem ser observados ainda os aspectos referentes à manutenção do equipamento e o consumo de energia, como por exemplo, para a refrigeração do próprio fluido.

Uma análise comparativa dos custos de fabricação, dada pela Figura 2.8 e feita por Novaski e Dörr (2000), mostra que a porcentagem dos custos referentes ao sistema de refrigeração não pode mais ser negligenciada. Observa-se que o custo relacionado com o ferramental é apenas de 2 a 4%, contra 17% da refrigeração. Deve-se considerar também que na usinagem com refrigeração há a necessidade de se separar os cavacos, o que provoca mais gastos.

Figura 2.8: Porcentagem dos custos de refrigeração nos custos de fabricação (fonte: Daimler Benz AG, Gühring- citado em Novaski e Dörr, 1999).

2.3.5 Manutenção dos fluidos de corte

A estabilidade dos fluidos de corte utilizados na retificação é influenciada por diversos fatores, os quais dependem do tipo de fluido utilizado.

Para manter os óleos de corte estáveis durante o processo deve-se procurar manter a temperatura do óleo entre 21 e 24 °C e impedir a entrada de líquidos estranhos e contaminantes que podem levar à formação de compostos insolúveis, resultado da incompatibilidade de alguns aditivos. É necessário que se realize filtração periódica para a remoção de cavacos e outras partículas estranhas para aumentar a vida útil destes fluidos.

A estabilidade das emulsões depende da manutenção das cargas elétricas repulsivas entre as gotículas de óleo formadas e dispersas na água. Os fenômenos que afetam esta estabilidade e podem gerar a quebra da emulsão são (Runge & Duarte, 1990):

- A adição de ácidos e sais, os quais anulam as cargas repulsivas das gotículas.
- A acidulação da emulsão, pela absorção de CO₂ durante o preparo.
- O ataque bacteriano, que além do consumo de emulgadores e agentes anticorrosivos, gera subprodutos ácidos, resultantes de seu metabolismo, reduzindo o pH da emulsão e a proteção anticorrosiva propiciada pelo fluido.

- A qualidade da água é importante, pois a utilização de “água dura” no preparo das emulsões pode levar à formação de compostos insolúveis, resultado da combinação de cátions de cálcio, magnésio e ferro com sabões, agentes umectantes e emulgadores, podendo levar à quebra da emulsão. Além disso, a água deve estar isenta de impurezas, microrganismos, excesso de cloro, etc.

Através do pH mede-se a acidez ou alcalinidade de uma solução aquosa. O valor do pH é um forte indicativo do nível de ataque bacteriano presente na emulsão e da queda das propriedades anticorrosivas da mesma, pois a acidulação gradual da emulsão ocorre, principalmente, devido à geração, pelas bactérias, de subprodutos ácidos provenientes do metabolismo de seus nutrientes, sendo prudente realizar o controle do pH diariamente. O pH adequado das emulsões, a fim de se impedir a proliferação do crescimento bacteriano, deve estar entre 9 e 10,5 (Runge & Duarte, 1990).

A concentração dos fluidos de corte aquosos varia conforme o tipo de produto em uso e suas aplicações específicas. O limite inferior não deve ser ultrapassado, pois este refere-se à mínima concentração de utilização do fluido para que o mesmo mantenha suas propriedades lubrificantes e anticorrosivas de projeto. Comumente é apresentada pela taxa de diluição, na qual indica-se a taxa de diluição adequada para obter-se a concentração de projeto, através da proporção entre a quantidade de fluido de corte solúvel concentrado e a quantidade de água a ser adicionada (Runge & Duarte, 1990).

O controle microbiológico de emulsões é fundamental, pois as emulsões podem sofrer diversos tipos de contaminações. A contaminação por bactérias anaeróbias e aeróbias resulta em redução do pH, irritação na pele, corrosão e mau cheiro, podendo levar à quebra da emulsão, com a formação de camadas de óleo sobrenadante. A contaminação por fungos resulta em formação de camadas sobrenadantes de óleo, entupimento de filtros e tubulações. Por fim, pela contaminação por líquidos estranhos têm-se medições inexatas da concentração, acarretando em maior desgaste da ferramenta, entupimento dos filtros e névoa de óleo (Runge & Duarte, 1990).

As bactérias devem ser mantidas sob controle, pois é quase impossível manter-se uma emulsão estéril (problema com fungos, os quais são mais difíceis de serem controlados que as bactérias). Para tanto, deve-se utilizar biocidas, de maneira periódica,

possibilitando-se o controle do pH e a contagem de microrganismos. A adição de biocida não deve ser realizada somente quando for detectada sua degradação (deterioração), pois isso acarretará em um aumento na quantidade de biocida introduzido e uma diminuição da proteção anticorrosiva. O pH será diminuído a níveis inadequados, sendo necessário à adição de materiais que elevem o pH e de materiais anticorrosivos, resultando em emulsões de baixa qualidade (apenas aceitáveis). Surgirá então um ciclo vicioso de crescimento bacteriano (Runge & Duarte, 1990).

A manutenção de fluidos de corte inclui várias etapas. Uma delas é observar o sistema de refrigeração, detectando sinais de desestabilização. Também devem ser feitas manutenções periódicas. É importante que a retificadora seja limpa periodicamente, incluindo as linhas de alimentação e reservatórios do fluido de corte. Deve-se provocar aeração do fluido de corte para evitar a proliferação de bactérias anaeróbias. Análises de pH, concentração e contagem de microrganismos devem ser efetuadas periodicamente.

2.3.6 Reciclagem e descarte dos fluidos de corte

Após o seu uso, os fluidos de corte podem ser reciclados ou descartados internamente pela própria empresa, ou através de uma companhia de serviços de reciclagem ou remoção. Segundo Dick e Foltz (1997) a seleção do método de tratamento ou de descarte vai depender de fatores como volume gerado de água usada, composição da água usada, classificação dos produtos perigosos e não perigosos, disponibilidade e custo do contrato de remoção e se a fábrica tem acesso a um sistema de esgoto.

Existem tecnologias para tratamento de fluidos que utilizam diversos estágios e tipos de equipamento para tornar a água usada suficientemente limpa para ser reaproveitada, por exemplo, em resfriamento, lavagem de peças ou composição de fluido. Esta tecnologia permite às fábricas se aproximarem da meta “zero descarga”. Mesmo com equipamentos de tratamento avançados, existem subprodutos usados que devem ser descartados (Dick e Foltz, 1997).

Os limites para a reciclagem ou o descarte podem ser estabelecidos para cada fluido com o auxílio do fornecedor. Por exemplo, deve-se agir se o valor do pH abaixa, se o valor de óleos estranhos aumenta ou se aumenta a quantidade de bactérias. Certos

fluidos e operações podem tolerar mais contaminação, sendo este o motivo porque os limites específicos necessitam ser estabelecido pelo fornecedor.

A remoção dos resíduos sólidos contidos nos fluidos de corte (partículas metálicas, partículas abrasivas, partículas resultantes da degradação biológica, etc.) pode ser efetuada utilizando-se sistemas de purificação de fluidos de corte. Estes podem ser individuais ou centralizados, utilizando os seguintes processos de separação: decantação ou escumação, separadores magnéticos e filtração positiva.

Na Figura 2.9 é mostrado um sistema de reciclagem por tratamento intermitente, capaz de remover os contaminantes (óleo, sujeira, bactéria) e reajustar com a frequência necessária a concentração do fluido antes do seu retorno à máquina individual.

Figura 2.9: Equipamentos de gerenciamento de fluidos utilizados nas operações de transformações de metais (Dick e Foltz, 1997).

Descarte de fluidos de corte integral

Os fluidos de corte podem ser vendidos para nova refinação ou podem ser regenerados pelo próprio usuário, pelo fabricante do fluido ou por uma companhia especializada. O fluido de corte integral pode ainda ser queimado em caldeira, desde que permitido em legislação e estando o mesmo seco (isento de água) e sem impurezas, apresentando baixa concentração de enxofre e isento de cloro (Runge & Duarte, 1990).

Descarte de fluidos de corte à base de água

Segundo Runge & Duarte (1990), as emulsões e soluções não podem ser simplesmente descartadas no sistema de esgoto, havendo a necessidade da separação do óleo da água (no caso de emulsões) e demais produtos químicos da água (no caso de soluções) antes do descarte. O tratamento químico principal consiste na adição de ácidos para abaixar o pH e de sais metálicos (sulfato de alumínio, cloreto de ferro ou sulfato ferroso) para formar sabões insolúveis, levando à quebra da emulsão. A fase aquosa resultante da separação do óleo, após sua neutralização, deve estar de acordo com a legislação vigente para o seu descarte. A fase oleosa separada é removida, sendo esta tratada como um fluido integral. A borra produzida deve ser descartada de maneira aprovada conforme a legislação.

Os fluidos de corte sintéticos ou soluções são constituídos de uma grande gama de produtos químicos. A maioria destes fluidos caracteriza-se pelas seguintes propriedades: alcalinidade (pH entre 7,8 e 10,2); rejeição de óleo; elevadas cargas orgânicas, constituídas de cadeias retas, de fácil degradação normal por bactérias inoculadas e por oxidação química; predominância de tensoativos aniônicos e não-iônicos.

Para o tratamento bem sucedido de fluidos de corte sintéticos através de sistemas convencionais de descarte é necessário compreender a química coloidal/tensoativa de cada fluido a ser descartado.

2.3.7 Influência dos diversos Tipos de Fluidos de Corte na Retificação

Além da capacidade de resfriamento e lubrificação, outras características precisam ser consideradas antes de se fazer à escolha. Nenhum fluido é ideal em todos os

aspectos. A Tabela 2.4 resume as principais características dos fluidos de cortes no processo de retificação e como seria um fluido de corte ideal.

Tabela 2.4: Avaliação dos diferentes fluídos de corte no processo de retificação (**B** – bom, **M** – médio, **R** – ruim)

Fluído de Corte	Vida do Rebolo	Conservação da máquina	Temperatura da peça	Formação de névoa	Necessidade de lavagem	Danos ao meio ambiente	Custo de aquisição	Custo de manutenção
Óleo mineral	B	B	R	R	R	R	B	B
Fluido emulsionável	R	B	M	R	B	M	M	R
Fluido sintético	R	B	B	R	B	B	R	M
Água	R	R	B	B	B	B	B	B
Fluido Ideal	B	B	B	B	B	B	B	B

A partir da tabela 2.4 pode-se observar que há a necessidade de um fluido que possua as várias características desejadas no processo de retificação, este fluido precisa ser desenvolvido, considerando cada item e agregando o máximo de características positivas possíveis.

2.3.8 Atuais tendências de utilização

Tem-se dado grande ênfase à tecnologia de refrigeração/lubrificação que diminua o impacto ambiental dos fluidos de corte, isto devido à necessidade de conformidade com a norma ISO 14000. Atualmente, existe uma tendência mundial, principalmente na Europa, de reduzir a utilização de óleos integrais, devido ao elevado custo, mas principalmente pelos riscos à saúde do operador e ao meio ambiente. Segundo Queiroz et al (1999), no Brasil, os riscos associados à utilização dos fluidos de corte não são abordados por uma legislação própria, que exija o controle dos riscos no local de trabalho e no meio ambiente.

Este conjunto de situações torna cada vez mais desejável o uso de sistemas de refrigeração na produção. Algumas alternativas têm sido estudadas para substituir os métodos tradicionais de refrigeração, tais como, mínima quantidade de lubrificantes, usinagem a seco, utilização de fluidos ambientalmente amigos (ar, fluido polimérico, fluido biodegradável, etc.). Porém ao abrir mão do uso de fluido de corte, o processo de retificação é prejudicado. Com a falta de lubrificação, a camada de separação entre a ferramenta e o material não será mais suficiente garantida e o atrito aumentará. Uma consequência para a ferramenta será o aumento do desgaste abrasivo e de adesão de cavacos, formando arestas postiças. A falta de auxílio para remoção dos cavacos torna-se mais críticos para processos fechados, como a furação.

Usinagem a seco

A usinagem a seco necessita de novas soluções no sistema ferramenta-máquina-peça-processo. No caso de ferramentas, os revestimentos desempenham um papel central, junto com outros materiais e geometrias. Por outro lado, como a distribuição de calor é afetada, deve-se pensar em uma concepção mais adequada para a máquina-ferramenta.

Em alguns casos, inclusive, a usinagem a seco deve ser pensada já na fase de desenvolvimento dos materiais a serem usinados. Outro ponto a ser levado em conta refere-se às modificações dos parâmetros do processo (Novaski e Dörr, 1999).

Sreejith e Ngoi (2000) sugeriram algumas opções de ferramentas que fornecem bons resultados em operação de usinagem a seco:

1. O uso de altos ângulos de saída positivos em ferramentas de cermet submicron reduz a energia de corte global significativamente.
2. O desenvolvimento de materiais refratários para as ferramentas que possam resistir a altas temperaturas.
3. O uso de ferramentas de alta dureza tais como diamante e CBN.
4. O desenvolvimento de revestimentos nas ferramentas que possam resistir a altas temperaturas e ao mesmo tempo prover um efeito lubrificante para reduzir o atrito.

A máquina para trabalhar com usinagem a seco deve ter um sistema eficiente de transporte dos cavacos e devem ter um sistema antiatrito eficiente. Também deve-se considerar os parâmetros de usinagem, os quais devem ser escolhidos de maneira a obter tempos de corte não muito mais elevados comparativamente à usinagem com fluidos.

Mínima Quantidade de Lubrificante

Na última década, diversas pesquisas foram realizadas com o objetivo de restringir ao máximo o uso de fluidos de corte nos processos de usinagem. Os principais fatores que justificaram esse procedimento são custos operacionais de produção, exigências legais de conservação do meio ambiente e a preservação da saúde do operador.

Uma técnica muito estudada nos dias atuais é o corte com mínima quantidade de lubrificante (MQL), onde uma quantidade mínima de óleo (geralmente < 80 ml/h) é pulverizada em um fluxo de ar comprimido. Em alguns casos, esta quantidade pode ser ultrapassada, dependendo do volume de cavaco e do processo de usinagem. Estas mínimas quantidades de óleos são suficientes para reduzir o atrito da ferramenta e ainda evitar aderências de materiais (Dörr e Sahm, 2000).

Porém esta técnica possui vantagens e desvantagens em relação à usinagem com fluido abundante, as vantagens são: redução do volume de descarte, produção de peças e cavacos mais limpos, redução de custos de processamento, limpeza e acondicionamento. Contudo, possui desvantagens como a névoa de óleo gerada durante o uso da mínima quantidade de lubrificante na usinagem pode ser considerada subproduto indesejável, pois contribui para aumentar o índice de poluentes em suspensão do ar e torna-se fator de preocupação. Embora o uso de quantidade mínima de fluido não exija preocupação com o descarte e reciclagem do óleo e do cavaco, é necessário que se tenha um bom sistema de exaustão na máquina. Também com a utilização da MQL tem-se em alguns processos um maior desgaste da ferramenta (Machado et al, 2000).

Silva et al (2005) realizaram testes de MQL em retificação plana e observaram que os valores de R_a , do desgaste de flanco e do desgaste diametral do rebolo foram reduzidos significativamente com o emprego da técnica de MQL comprovando excelente propriedade de lubricidade. A técnica MQL reduziu a força tangencial de corte quando da comparação com a condição convencional.

Fluidos amigos do ambiente

O abandono total dos fluidos de corte, dependendo da operação, não é a melhor saída, pois acarretará perdas ao processo. Uma alternativa é trabalhar com novos fluidos de corte, os quais provoquem menor impacto ambiental. Segundo Heisel e Lutz (1998) estes fluidos para serem considerados compatíveis devem possuir os seguintes requisitos:

- Devem ser produzidos a partir de matérias primas regenerativas, principalmente as nativas. Devem ser poupados recursos valiosos.
- Devem ser seguro fisiologicamente. Não deve apresentar efeito tóxico, carcinogênico e nenhum dano à saúde.
- Devem ser compatíveis ecologicamente.
- Após o seu uso, os resíduos de fluidos de corte devem ser facilmente biodegradáveis e não devem, ao mesmo tempo, gerar quaisquer produtos de degradação nocivos.
- Devem distinguir-se pelas possibilidades de reciclagem simples e, portanto, não causar problemas de descarte.

Li et al (2000) propuseram um novo conceito em fluido de corte. Trata-se de um tipo de fluido não combustível onde a água, o glicol e base polimérica são os maiores componentes e o óleo mineral é totalmente excluído. Os resultados encontrados por estes autores nos testes de corte em que tais fluidos foram comparados com os insolúveis comerciais, mostraram grande melhoria do ponto de vista da lubrificação e prevenção na formação de névoa.

Rodrigues de Paula e Abrão (1999) realizaram testes para avaliar o desempenho de um novo fluido de corte a base de óleo de mamona, durante o torneamento do aço com ferramenta de metal duro. Comparado com outros fluidos comerciais (emulsões), o fluido a base de óleo de mamona apresentou resultados ligeiramente superiores no acabamento superficial, e se mostrou eficiente na redução da temperatura da ferramenta.

2.4 Fluidos de Corte e seus Aspectos Ambientais

A consciência ambiental, que cresce consideravelmente a cada ano, e o aumento dos problemas de descarte pressionado por uma legislação mais severa, obriga mais indústrias a se aprofundarem nas questões de compatibilidade ambiental das suas produções.

No último século houve um grande desenvolvimento tecnológico nos processos de manufatura, e em consequência se obteve produtos de melhor qualidade, eficiência econômica e reciclagem. Por outro lado, produziram-se também materiais residuais indesejáveis e emissões de poluentes. Portanto, os processos de manufatura são fontes que provocam um distúrbio no ecossistema (Sokovic and Mijanovic, 2001).

A utilização de fluidos de corte no processo de usinagem faz da indústria metal-mecânica uma potencial agressora do meio ambiente. São vários os problemas decorrentes desta utilização, que vão desde a geração de efeitos nocivos no ambiente de trabalho até a agressão do meio ambiente.

Para avaliar o potencial impacto ambiental total de um produto químico, deve-se analisar o ciclo completo da vida do material. Nesta abordagem, o impacto de cada estágio do ciclo de vida é dirigido e aplicado para o efeito total de um produto particular pode ter sobre o meio ambiente.

Os quatro principais pontos finais que são quantificados numa análise de ciclo de vida são, saída de energia, resíduos, reuso, e capacidade de reciclagem. Embora extremamente complexa, a análise de ciclo de vida é somente um modo para direcionar e quantificar o completo impacto que um material poderá ter sobre o meio ambiente. Quando a análise de ciclo de vida é completa, um claro diagrama do impacto ambiental total do material é produzido.

Toxicologia dos lubrificantes sintéticos

O potencial tóxico de uma particular substância química é avaliado pelo direcionamento da toxicidade intrínseca do material por si mesmo e pelo entendimento da magnitude da exposição para um indivíduo, população, comunidade ou ecossistema. A exposição a produtos químicos é determinada por uma complexa inter-relação de diversos fatores, incluindo taxa de emissão, mobilidade dos constituintes e densidade da população.

Toxicidade

A avaliação da toxicidade inclui a letalidade e efeitos na reprodução e crescimento. O mais comumente ponto final determinado é a LC_{50} (concentração letal 50), que é definido como uma concentração do material (em ar ou água) necessária para matar 50% da população dentro de um especificado período de tempo. Este parâmetro é o mais importante número usado pelos órgãos reguladores na análise da toxicidade de um determinado material (Brown, 1999)

Bioacumulação

A bioacumulação é a concentração de produtos químicos da água ou alimento dentro de um organismo vivo e é determinada pelo grau de ingestão, distribuição, metabolismo e eliminação de um produto químico no organismo.

A maioria dos casos de bioacumulação em espécies aquáticas ocorre via ingestão direta de água e também alimento. A taxa expressa pela concentração no organismo dividida pela concentração na água é chamada fator de bioconcentração, ou BCF. Como o LC_{50} , o BCF é gerado e usado para identificar os danos ambientais.

Biodegradação

O terceiro maior critério de avaliação ecológica de um produto é a persistência ou taxa e extensão da degradação. A degradação pode ocorrer por meios abiótico ou biótico, incluindo, hidrólises, fotólises, e biodegradação.

A biodegradação pode ser definida por diversos meios aceitáveis. Materiais podem ser descritos como rapidamente, inerentemente, ou relativamente biodegradável sob condições aeróbicas ou anaeróbicas. Os testes de rápida biodegradação geralmente medem o consumo de oxigênio e produção de dióxido de carbono num sistema aquoso fechado por 28 dias.

Determinar a capacidade de biodegradação de um material pode ser muito difícil. Isto ocorre porque a maioria dos métodos de testes de biodegradação têm sido desenvolvidos para o uso com materiais solúveis em água. Todavia, lubrificantes sintéticos, como muitos materiais produzidos pela indústria para os quais a avaliação da biodegradação é exigida, são hidrofóbicos (Brown, 1999).

2.4.1 Impactos Ambientais Externos e Internos Causados pelos Fluidos de Corte.

O uso de cloro em fluidos de corte vem encontrando restrições em alguns países como na Alemanha, em virtude dos danos que os compostos clorados podem causar, decorrente de seu descarte incorreto. Os solventes clorados têm fácil penetração no solo, podendo existir e acumular-se por um longo período. Podem facilmente atingir o lençol freático para contaminá-lo totalmente. O despejo de um quilo de solvente clorado pode envenenar quarenta mil metros cúbicos de água. Na Alemanha existe uma legislação muito severa quanto ao descarte de hidrocarbonetos clorados. Segundo Runge & Duarte (1990), as parafinas cloradas, tal como usadas em fluidos de corte, estão incluídas. A

concentração máxima permitida para descarte de óleos usados é de 0,5% de cloro total. Acima destes valores, o material deve ser incinerado a temperaturas superiores a 1100 °C para evitar a formação de dioxinas. A utilização dos óleos de corte integrais está limitada a operações de usinagem de metais de difícil usinabilidade, retificação de formas e nos casos onde os demais fluidos de corte não propiciam bons resultados.

Muitos produtos químicos usados na composição dos fluidos de corte, como biocidas, anticorrosivos, umectantes, flavorizantes, antiespumantes e outros aditivos podem ter efeitos nocivos sobre o homem e a natureza. Com a evolução tecnológica, uma grande quantidade de novos produtos sintéticos são lançados no mercado para os quais não existem testes toxicológicos adequados e, como é complexa a tarefa de monitorá-los, os órgãos ambientais americanos recomendam atitudes preventivas.

A OSHA (Occupational Safety and Health Administration) regulamentou algumas substâncias a serem observadas nas formulações dos fluidos de corte, entre elas estão:

- ✓ Etanolamina;
- ✓ Dietanolamina;
- ✓ Hexylene glicol;
- ✓ Morpholine;
- ✓ P-cloro-m-cresol;
- ✓ Policlorados alcalinos de C10 a C13;
- ✓ 3-iodo-2-pronylbutil carbamate;
- ✓ Nitrodietanolamina;
- ✓ O-Fenilfenol
- ✓ Éter de glicol;
- ✓ Solvente de Stoddard;
- ✓ Nitritos;
- ✓ Óleos de cadeias polinucleares aromáticas (PNA);
- ✓ Óleos parafínicos clorados de cadeias curtas;

- ✓ Compostos de bário;
- ✓ Névoa de óleo;
- ✓ Compostos de cobre.

Um fluido que contenha qualquer um destes elementos não pode ser considerado “limpo”, apesar de que nenhum efeito específico possa ser comprovadamente ligado ao uso de tais substâncias (EPA, 1995). Entretanto, alguns efeitos nocivos foram associados a tais componentes, assim, o recomendável é a precaução.

Ao avaliar os impactos gerados pela utilização dos fluidos de corte, deve-se considerar dois principais efeitos: efeitos nocivos à atmosfera (interna e externa) e degradação do solo e recursos hídricos, como está demonstrado na Figura 2.10.

Figura 2.10: Emissões de resíduos de fluidos de corte

(Fonte: Ignácio, 1998).

Os fluidos de corte podem ser dispostos depois de seu uso pela própria companhia ou por uma empresa especializada em disposição de resíduos. Dependendo da qualidade

e modo de disposição do resíduo, o resultado será poluição do solo, águas e ar. Deve ser considerado que os fluidos de corte mudam sua composição durante a usinagem, ocasionando também uma mudança nos riscos oferecidos ao meio ambiente. Podem ser formadas ainda substâncias secundárias, produtos de reações originados durante o processo, corpos estranhos e microorganismos que são agregados ao fluido de corte.

Não são apenas os problemas de disposição que despertam interesse, as perdas de fluidos de corte do sistema de manufatura ocorrem na vaporização, na saída de cavacos e peças da máquina, nos componentes da máquina, tais como dispositivos de fixação e manuseio, no vácuo, nos sistemas de pressurização do ar e na formação de gotas e vazamentos. O vazamento do fluido é um fator crítico que contribui para a perda e, em alguns casos, para as influências negativas nos sistemas hidráulicos da máquina.

Na utilização de fluidos de corte, peças molhadas e sujas, assim como cavacos e partículas, saem do sistema da máquina e entram no sistema de limpeza e secagem. Segundo Byrne (1996), cerca de 30% do consumo total anual de fluido de corte é perdido através da remoção do sistema pelos meios mencionados acima, torna evidente a necessidade de se encontrar métodos eficazes para combater tais perdas.

Segundo Ignácio (1998), a partir da preparação para a aplicação, um grande número de inconvenientes atinge os fluidos de corte de várias formas e fontes (Figura 2.9), os quais podem determinar a vida útil deste produto e também aumentar as responsabilidades da empresa. Além das causas existentes na preparação, a utilização dos fluidos de corte em processos de usinagem torna-os susceptíveis ao ataque de microorganismos, bactérias e fungos e a forma de trabalho do próprio operador e sua higiene. O manuseio incorreto, por exemplo, pode gerar resultados desagradáveis que vão desde problemas no processo de fabricação e ataques à saúde dos operadores até o descarte prematuro deste produto. Para garantir um menor impacto dos fluidos de corte à saúde dos operadores e à qualidade do meio ambiente, gerentes e operadores devem estar cientes de todos os cuidados que são indispensáveis na sua aplicação, usando das medidas de precauções fornecidas pelo fabricante e órgãos ambientais, evitando assim a ocorrência de resultados desagradáveis.

Além dos fatores naturais, as maiores causas e os respectivos agravantes que resultam em problemas internos com fluidos de corte são as apresentadas na Figura 2.11. Entre os problemas encontrados, destacam-se os métodos e as tecnologias de utilização, os custos operacionais, as enfermidades laborais e a má qualidade do produto final.

Figura 2.11: Diagrama de causas e efeitos decorrentes da utilização do fluido de corte. (adaptado de Campos, 1992)

Para evitar efeitos negativos a partir de processos de manufatura, como visto na Figura 2.11, é uma prioridade nos países desenvolvidos a pesquisa de tecnologias ecologicamente corretas, pois muitas máquinas com tecnologias ultrapassadas não têm recursos para assegurar as melhores propriedades dos fluidos de corte. Assim, torna-se necessário o investimento em máquinas e equipamentos mais modernos e satisfatoriamente adequados que garantam a esse produto o melhor de seu desempenho, evitando, assim, prejuízos com o seu descarte prematuro.

Os fluidos de corte durante o processo de usinagem geram vapores, sobretudo no contato do fluido com as superfícies quentes da peça trabalhada, da ferramenta, ou do cavaco quente, comprometendo o ar do local de trabalho. A pressão e o aquecimento do fluido de corte também exercem influência. Este comprometimento do ar, em decorrência do uso de aerossóis e dos vapores de agentes refrigerantes, varia em função, por exemplo, das propriedades físico-químicas do fluido de corte, da velocidade de rotação das peças que estão sendo trabalhadas e do aquecimento das superfícies.

A concentração de névoa no interior das instalações industriais para as operações de usinagem mais conhecidas pode variar, dependendo do tipo de operação, de 0,07 a 110 mg/m³. Especial precaução deve ser tomada quando as névoas são constituídas por mesclas de óleos minerais porque contêm substâncias associadas aos mecanismos de desenvolvimento de câncer no pulmão, em geral, frações de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA), tais como 3,4-benzopyreno, anthaceno, phenanthrenes e carbozaes (BENNER&BENNET, 1985).

Acredita-se que há substanciais evidências de aumento do risco de câncer, em diferentes órgãos do corpo humano, associado com a utilização dos fluidos de cortes. O tipo e quantidade dos constituintes químicos dos fluidos podem variar para as diferentes classes de fluidos, alguns destes componentes são considerados carcinogênicos, como por exemplo, a N-nitroamina. Dentre os diversos tipos de fluidos de corte o que tem se revelado mais agressivo à saúde do operador é o óleo integral. O fluido de corte aquoso é o menos agressivo. Porém, através dos poucos estudos realizados sobre os efeitos dos fluidos à saúde do operador, é prematuro concluir que todos os membros da classe dos fluidos de corte aquosos estão livres de ter algum risco carcinogênico, pois se deve considerar que este tipo contém muitos ingredientes encontrados nos óleos integrais, mas em diferentes concentrações.

A avaliação toxicológica dos fluidos de corte depende da sua composição química. Segundo Bersenkowitsh (2000), em função da multiplicidade de componentes dos fluidos de corte, não é possível estabelecer um valor máximo para a concentração no local de trabalho para os tipos de fluido. Contudo, para realizar uma avaliação viável da exposição ao fluido no local de trabalho, recorre-se aos produtos de óleo mineral (hidrocarbonetos alifáticos) como componentes de referência para medição. De acordo com a norma TRGS900 “Valores-limite no Ambiente de Trabalho”, estabeleceu-se, desde 1996, o valor-limite do ar de 10 mg de fluido de corte por metro cúbico, que deve ser observado como valor médio por turno de trabalho – para uma exposição diária durante oito horas. O valor-limite em base técnica é uma somatória de aerossol e vapor, para um fluido de corte com ponto de fulgor acima de 100 °C.

Há poucos estudos epidemiológicos e toxicológicos que têm avaliado os efeitos potenciais dos fluidos de corte à saúde humana. Sob altas temperaturas e pressões que estes fluidos são utilizados no local de trabalho, podem formar aerossóis. Devido à exposição dos trabalhadores, ocorrem inalações desses vapores que podem ser depositados e retidos pelo aparelho respiratório, provocando assim várias reações respiratórias. Detwiler e Shaper (1996) avaliaram os efeitos respiratórios de dez diferentes fluidos de corte utilizando ratos de laboratório. Um fluido sintético “A” provocou irritações sensoriais e pulmonares nos camundongos e foi o mais agressivo dos dez fluidos estudados. Não se pode determinar qual componente no fluido sintético “A” foi o responsável pela irritação.

O ambiente de trabalho deve ser constantemente avaliado, através de medições da concentração de aerossol do óleo e vapores de água. Para diminuir a concentração destes poluentes no ambiente de trabalho é necessário que as máquinas possuam coletores, os quais são constituídos de filtros que faz a separação dos vapores de óleo.

Diante destes problemas, uma especial atenção vem sendo dada a processos que não agredam o meio ambiente, tais como usinagem a seco, usinagem com mínima quantidade de lubrificante, usinagem com ar resfriado e usinagem com fluidos de corte biodegradáveis.

2.4.2 Legislação Específica para os Fluidos de Corte

Nas últimas décadas, os órgãos ambientais e as autoridades públicas têm se preocupado em viabilizar a harmonia entre as atividades industriais e o meio ambiente, devido ao consumo irracional de recursos naturais, poluição do ar e os resíduos industriais gerados. Por outro lado, a competitividade, a globalização da economia e a legislação ambiental mais rígida têm pressionado as indústrias a ajustar seus processos buscando atender os três aspectos mais importantes para a sua sobrevivência: tecnológico, econômico e ambiental.

Na indústria metal-mecânica, a preocupação com a questão ambiental não é menor que em outros setores da economia, haja vista a evolução das normas ambientais pertinentes aos efluentes líquidos que tratam particularmente dos fluidos de corte.

No Brasil, não existe uma legislação específica para fluidos de corte, mas através de uma revisão dos mais recentes textos da Legislação Ambiental Brasileira pode-se identificar algumas determinações sobre óleos lubrificantes, as quais estão apresentadas a seguir.

O decreto 50.877/61

O decreto 50.877/61 e seus respectivos artigos, por exemplo, dispõem sobre o lançamento de resíduos tóxicos e oleosos em águas interiores e litorâneas do país. Entre outros artigos, o 1º trata das condições de lançamento de resíduos líquidos, sólidos ou gasosos industriais, o que só poderá ocorrer in natura ou após serem tratados. Este decreto ainda dispõe sobre os padrões de qualidade da água para o interesse industrial, onde é determinado que a média mensal de oxigênio dissolvido em água não pode ser inferior a 4 (quatro) partes por milhão, nem a média diária inferior a 3 (três) partes por milhão. A média mensal de demanda bioquímica de oxigênio (DBO) não deve ser superior a 5 partes por milhão de água (5 dias / 20°C) e o pH não será inferior a 5 e nem superior a 9,5 (nove e meio). Quaisquer alterações nos padrões anteriores terão que passar por autorização das autoridades pertinentes.

CONAMA 09/93

Dentro de um tratamento mais próximo aos fluidos de corte, a Resolução Conama (conselho nacional do meio ambiente) 09/93 dispõe sobre óleos lubrificantes usados considerando que a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), em sua NBR 10.004, Resíduos Sólidos - Classificação, classifica-os como resíduos com substâncias perigosas por apresentarem toxicidade devido à formação de compostos, tais como: ácidos orgânicos, compostos aromáticos polinucleares potencialmente carcinogênicos, resinas e lacas.

Outras considerações da CONAMA 09/93 são:

- ✓ O uso prolongado de um óleo lubrificante resulta na sua deterioração parcial, que se reflete na formação de compostos tais como ácidos orgânicos, compostos

aromáticos polinucleares, "potencialmente carcinogênicos", resinas e lacas, ocorrendo também contaminações acidentais ou propositais;

- ✓ O descarte de óleos lubrificantes usados ou emulsões oleosas no solo ou nos cursos de água gera graves danos ambientais;
- ✓ A combustão dos óleos lubrificantes usados pode gerar gases residuais nocivos ao meio ambiente;
- ✓ A gravidade do ato de se contaminar o óleo lubrificante usado com policlorados (PCB's) é de caráter particularmente perigoso;
- ✓ As atividades de gerenciamento de óleos lubrificantes usados devem estar organizadas e controladas para evitar danos à saúde e ao meio ambiente;
- ✓ A reciclagem é instrumento prioritário para a gestão ambiental;

A Resolução Conama 9/93 apresenta um conjunto de definições. Dentre as quais, citamos algumas com caráter de maior relevância:

- ✓ *produtor de óleo lubrificante*: formulador, envasilhador ou importador deste produto;
- ✓ *gerador de óleo lubrificante usado ou contaminado*: pessoas físicas ou jurídicas que, em decorrência de sua atividade, ou face ao uso deste produto, gerem qualquer quantidade de óleo lubrificante usado ou contaminado;
- ✓ *receptor de óleo lubrificante usado ou contaminado*: pessoa jurídica legalmente autorizada que comercializa este produto no varejo;
- ✓ *coletor de óleo lubrificante usado ou contaminado*: pessoa jurídica que devidamente credenciada pelo Departamento Nacional de Combustível dedica-se à coleta de óleos lubrificantes usados ou contaminados nos geradores ou receptores;
- ✓ *rerrefinador de óleo lubrificante usado ou contaminado*: pessoa jurídica devidamente credenciada pelo Departamento Nacional de Combustíveis e licenciada pelo órgão estadual de meio ambiente para a prática de recuperação de óleos lubrificantes usados ou contaminados.

Na Tabela 2.5, são listados os artigos da CONAMA 09/93 e seus respectivos conteúdos.

Tabela 2.5: Exposição dos artigos da CONAMA 09/93

<i>Artigo</i>	<i>O que diz</i>
1	Entende-se por óleo lubrificante básico o principal constituinte do óleo lubrificante, que, de acordo com a sua origem, pode ser mineral (derivado de petróleo) ou sintético (derivado de vegetal ou síntese química).
2	Todo óleo lubrificante usado e contaminado será obrigatoriamente recolhido e terá uma destinação adequada, para não afetar negativamente o meio ambiente.
3	Proíbe quaisquer descartes de óleos lubrificantes usados em solos, águas superficiais e/ou subterrâneas, no mar territorial e em sistemas de esgotos ou evacuação de águas residuárias. Proíbe qualquer forma de eliminação de óleos lubrificantes que provoque contaminação atmosférica superior ao nível estabelecido pela legislação sobre a proteção do ar atmosférico.
4	Proíbe a industrialização e comercialização de novos óleos lubrificantes não recicláveis nacionais ou importados. Casos excepcionais terão que ser submetidos à avaliação do IBAMA.
5	Proíbe a disposição dos resíduos derivados do tratamento de óleo lubrificante usado ou contaminado no meio ambiente sem tratamento prévio.
6	Estabelece que a implantação de novas indústrias destinadas à regeneração de óleos lubrificantes usados ou contaminados, assim como a ampliação das existentes, deverá ser baseada em tecnologias que minimizem a geração de resíduos a serem descartados no ar, água, solo ou sistemas de esgotos.
7	Estabelece que todo óleo lubrificante usado e contaminado deverá ser destinado à reciclagem. No caso de impossibilidade da reciclagem, o órgão ambiental poderá autorizar a sua combustão para geração de energia ou incineração.
8	Descreve às obrigações dos produtores ou envasilhadores.
9	Descreve as obrigações dos geradores.
10	Descreve as obrigações dos receptores de óleos lubrificantes usados.
11	Trata apenas da observação quanto ao resgate de uma orientação específica para a coleta de óleos lubrificantes usados em embarcações.
12	Dispõe das obrigações dos coletores de óleos lubrificantes usados ou contaminados.
13	Estabelece obrigações aos re-refinadores de óleos lubrificantes usados.
14 e 15	Determina que a armazenagem dos óleos lubrificantes usados ou contaminados deve ser provida de unidades construídas e mantidas para evitar infiltrações, vazamentos e ataques diversos, evitando, assim, riscos associados a estes produtos. Quanto à embalagem e transporte, estes devem atender às normas vigentes encontradas nos órgãos ambientais.

Na Alemanha, atualmente o mais importante mercado de lubrificantes biodegradáveis, várias iniciativas políticas foram iniciadas nos últimos anos, das quais algumas foram incluídas em dois relatórios submetidos ao parlamento.

- Resolução datada de 16 de junho de 1994: medidas para promover o uso de lubrificantes facilmente biodegradáveis.
- Resolução de 28 de novembro de 1995: Notícias do Ministério de Alimento, Agricultura e Florestamento. Relatório sobre o uso de lubrificantes e fluidos hidráulicos facilmente biodegradáveis e medidas tomadas pelo governo (Nova Edição 1999).
- Regulamentação para a introdução de lubrificantes amigos do ambiente no mercado (Junho de 2000: Este programa suporta a substituição de lubrificantes de base mineral por produtos a base de éster).

A tendência mundial é seguir a mesma tendência alemã no que diz respeito à legislação ambiental para o uso de fluidos de corte e lubrificantes em geral. Portanto neste item serão abordados os principais tópicos das principais leis e diretivas alemãs onde se enquadram o uso de lubrificantes.

Segundo Luther (2001) o uso de fluidos amigos do ambiente é obrigatório em setores públicos.

Pesquisas e desenvolvimentos sobre fluidos que ecologicamente não causem danos, e clarificação de questões não respondidas são incentivadas através destes projetos. O Governo alemão oferece incentivos de pesquisa para projetos ajudando a melhorar e demonstrar o possível nível de desempenho dos lubrificantes biodegradáveis, por exemplo, para a estabilidade da temperatura, estabilidade hidrolítica e estabilidade à oxidação de produtos sem alteração significativa em sua biodegradabilidade. Pesquisas ainda precisam ser feitas sobre disposição e acondicionamento dos resíduos de óleos a base de éster.

Legislação ambiental 1: uso regular

Todos os países industrializados têm leis que são designadas para proteger águas, solo, ambientes de trabalho e poluição do ar. Embora, a única proibição sobre o uso lubrificante à base de óleo mineral existe na Áustria e isto somente para óleos de serra, que foram banidos em 1 de maio de 1992, seguindo uma resolução (N. 647) aprovada em 16 de outubro de 1990. A Alemanha e um número de outros países têm implementado previsões e procedimentos legais que são designados a promover o uso de uma nova geração de produtos. Há também pressões políticas pelas agências de proteção ao meio ambiente. As principais leis e iniciativas legislativas na Alemanha que possuem um efeito sobre o desenvolvimento e uso de lubrificantes estão sumarizadas a seguir:

- Lei alemã das águas;
- Diretiva sobre água potável;
- Lei alemã dos solos;
- Lei Federal de emissões;
- Lei de reciclagem e resíduos;
- Lei de produtos químicos;
- Lei de responsabilidade ambiental;
- Iniciativas do Parlamento alemão;
- O selo ambiental da “Blue Angel”.

A União Européia tem iniciado um número de iniciativas. Porém lubrificantes não foram incluídos até o momento.

Lei de Responsabilidade Ambiental

Segundo a introdução da Lei de responsabilidade ambiental na Alemanha, os riscos ambientais para uma companhia têm aumentado significativamente.

Esta Lei indica que o causador é responsável pela à poluição ambiental não se abstendo da culpa.

A Lei nomeia cerca de 100 tipos de indústrias que possuem um risco potencial em termos de responsabilidade.

Importantes artigos desta lei são:

- Artigo 6: Princípio do causador
- Artigo 7: Suposição da causa (responsabilidade sobre suspeita)
- Artigo 8: Obrigação de informar
- Artigo 17: Financiamento de clean-ups.
- Artigo 19: Obrigações preventivas.

Os efeitos sobre os lubrificantes são inofensivos até que se provem os riscos para os operadores usando lubrificantes não corretos. Estes riscos podem ser reduzidos pelo uso de produtos amigos do ambiente.

Lei de produtos químicos, Lei de substâncias perigosas.

A Lei alemã de produtos químicos é orientada pelas considerações de segurança no trabalho enquanto suas ligações com outras leis ambientais são ainda desejáveis. A harmonização europeia de avaliação toxicológica de produtos químicos, a qual é bem avançada, tem permitido rotulação dos lubrificantes se substâncias perigosas estão contidas e o projeto uniforme de folhas de dados de segurança da EU.

De acordo com a Lei de Substâncias Perigosas, a definição de substância perigosa e misturas (concentrações padrões de produtos químicos e aditivos) é, na prática, um aumento da rejeição de lubrificantes que contém substâncias perigosas mesmo se a concentração está abaixo do padrão correspondente. Isto significa que substâncias perigosas são também rejeitadas pela mistura (por exemplo, composto dos lubrificantes tem sido largamente substituído por novos aditivos não tóxicos).

Uma recente adição à Lei Alemã de Produtos Químicos também define substâncias perigosas e misturas de acordo com parâmetros de perigo. Novo na lista é o parâmetro “perigoso ambientalmente”. Artigo 4 da Lei de Substâncias Perigosas diz o seguinte: “Substâncias ou misturas são perigosas ambientalmente se elas e seus produtos de decomposição podem alterar a natureza da água, solo, ar, animais, plantas ou microrganismos de modo que eles sofram danos imediatos ou posteriores”. Aditivos que indicam estas características são assim também inadequados para o desenvolvimento de lubrificantes amigos do ambiente.

Os efeitos do uso de lubrificantes são, por exemplo:

- Uma redução nas substâncias que poluem o local de trabalho;
- O uso de poucas substâncias de risco.

Esta limitação na Lei de Produtos Químicos e Lei das Águas restringe severamente o número de aditivos que são apropriados para os lubrificantes amigos do ambiente e facilmente biodegradáveis.

Um adicional à limitada Lei dos Produtos Químicos em aditivos para lubrificantes facilmente biodegradáveis resulta do complicado procedimento de aprovação que são necessários para substâncias novas.

Disposição (Leis de Resíduos e Reciclagem)

A Lei dos óleos residuais que tem um status especial na Alemanha, antes estava integrada dentro da Lei de Resíduos de 1986. Esta foi então combinada com a Lei de Reciclagem de 1996. Regulamentações separadas determinam o Código de Resíduos para Produtos Residuais.

A integração dentro da Lei de Resíduos obriga os produtores de lubrificantes a receber os óleos usados dos consumidores. Como uma regra, os produtores de lubrificantes sub-contratam o trabalho para empresas de coletas de óleos residuais. Na prática, o consumidor de lubrificante paga para a coleta e disposição ou reciclagem. Uma obrigação similar provavelmente será introduzida para os óleos industriais e containeres.

Além do mais, a lei tem definido um numero de categorias de óleos residuais com conteúdo de cloro (0,2%) e conteúdo de PCB (Policloreto de Bifenila), hoje menos importante, como maiores parâmetros de classificação. O alto custo de disposição dos produtos contendo cloro leva ao desenvolvimento de produtos livre de cloro.

Lubrificantes biodegradáveis baseados em ésteres sintéticos são incluídos como óleos residuais enquanto que os óleos de base vegetal não são sequer discriminados pela lei. Como eles não estão incluídos nas leis de reciclagem e óleo residual, eles devem ser tratados diferentemente como indica o seu Código de Disposição de Resíduos. O Código 12102 requer muito cuidado de monitoramento e tais resíduos têm que ser estocados e transportados separadamente.

São boas as chances de uma revisão da Lei de Resíduos, outras subordinadas e regulamentações incluem lubrificantes a base de óleo vegetal como resíduo.

Legislação ambiental 2: Emissões

Poluição do Ar

A maioria da poluição do ar é causada por combustível fóssil que nós queimamos em veículos, casas, usinas de energia térmica e indústrias.

Muitos produtos químicos têm sido identificados em poluição do ar urbano. Um pequeno número destes tem sido encontrado por contribuir na escala de problemas da qualidade do ar. Estes poluentes incluem óxidos de nitrogênio (NO), monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO₂), materiais particulados (MP) e compostos orgânicos voláteis (COV). Quando alguns deles se combinam, eles produzem névoa ou chuva ácida. O nível base do ozônio, o maior componente da névoa de poluição, é formado quando óxido de nitrogênio (NO) e compostos orgânicos voláteis (COV) reagem na presença de altas temperaturas e luz do sol. Outro elemento chave da névoa são os materiais particulados.

Poluição da água

A qualidade da água doce e salgada é afetada por três importantes problemas de poluição das águas: substâncias tóxicas, excesso de nutrientes e sedimentação.

A substâncias tóxicas de uso industrial, agrícola e doméstico são alguns dos principais poluentes das águas. Testes incluem traços de elementos, policloreto de bifenila (PCBs), mercúrio, hidrocarbonetos de petróleo, dióxidos e alguns pesticidas. Algumas das substâncias entram na água de variados modos, incluído: fontes industriais tais como mineração, produção de aço, geração de eletricidade e fabricação de produtos químicos; acidentes, tais como derramamentos de óleo e produtos químicos; efluentes de resíduos municipais e de defensivos agrícolas.

Excesso de nutrientes, tais como compostos de nitrogênio e fósforo originados principalmente de esgoto municipal e resíduos gerados em fazendas contendo fertilizantes e resíduos animais, podem causar excesso de crescimento das plantas aquáticas, as quais morrem e deterioram, esgotando o oxigênio dissolvido na água e matando os peixes.

O impacto dos lubrificantes no meio ambiente, com respeito ao solo, água e ar, é restrito por diferentes tipos de leis. Sendo a situação alemã, em termos de legislação, um exemplo para os outros países.

Lei Alemã para proteção do solo

Em março de 1999, uma Lei Federal Alemã para proteção da terra deveria vir com força total. Esta lei é similar a Lei da Água e a Lei de Emissões e implementações serão de responsabilidade dos estados federais. Enquanto a Lei das Águas somente tem efeito indireto sobre o solo, a Lei do Solo deveria evitar a ação das substâncias ecologicamente perigosas no solo.

A Lei fornece maior precisão a respeito dos danos ambientais e uma restrição adicional ao uso de substâncias ecologicamente prejudiciais.

Como uma significativa proporção dos lubrificantes polui o solo, a Lei dos Solos tem profundos efeitos nas aplicações de lubrificantes. Por exemplo, medidas de recuperação de solos poluídos com óleo mineral.

Devido às leis nacionais alemãs designadas para proteger o solo não possuem valores padrões para limitar a poluição do solo, maioria dos países europeus usa a “lista Holandesa”, que estipula quando uma contaminação com óleo mineral precisa ser recuperada, limpa. De acordo com esta lista, os valores padrões de óleo mineral que então requer medidas de recuperação são:

1. > 500 mg/kg em áreas residenciais e zonas de proteção de águas.
2. >1000 mg/kg para regiões de recuperação.
3. Em casos individuais e quando for confirmado por um perito independente, acima de 5000 mg/kg pode ser tolerada (tais como em áreas industriais que não tenha quantidade de água relevante).

Assume-se que a disposição necessária e limpeza de 1 m³ de óleo mineral custa aproximadamente 750 Euros. Este fato também promove o desenvolvimento de produtos amigos do ambiente que geram menores custos de recuperação, tratamento (por exemplo, 75 Euros/m³).

Lei Alemã das Águas

A Lei Alemã das Águas oferece proteção direta para as águas e somente proteção indireta para os solos. Os importantes artigos da Lei Alemã das Águas são:

- Artigo 19 G – Indústrias e equipamentos para substâncias poluidoras de água (óleos minerais bem como seus derivados): “Indústrias e equipamentos projetados para estocagem, preenchimento, manufaturar ou tratar substâncias poluidoras das águas bem como indústrias e máquinas usando substâncias poluidoras de água em companhias industriais e setores públicos precisam ser projetadas, construídas, instaladas, mantidas e operadas de tal modo que não possa ocorrer contaminação de águas ou qualquer outra mudança indesejável nas características das águas”.
- Artigo 22 – Responsabilidade por mudanças nas características das águas: “Qualquer parte que reserva substâncias para contato com a água as quais mudam as características físicas, químicas e biológicas da água é responsável por qualquer dano causado. Se mais que uma parte está envolvida, então todos são responsáveis”.

Estes artigos e outras regulamentações alemãs são boas orientações para fabricantes de lubrificantes e consumidores. A aplicação destas orientações para a estocagem e uso dos lubrificantes, poderia levar a severas restrições se grandes quantidades de óleo estão envolvidas. No passado, estas regulamentações foram seguradas diferentemente nos diversos estados da Alemanha. Os estados trabalham separadamente sobre a questão das águas, que podem formar a base do modelo nacional, criando uma definição uniforme da categoria de danos e medidas de acompanhamento preventivo.

De acordo com a Agência Ambiental nas “linhas de guia sobre segurança para as substâncias poluidoras das águas”, o potencial de perigo depende do volume da planta industrial e da categoria de poluição da água das substâncias usadas. O alvo é reduzir este potencial e assim o custo massivo de renovar a planta industrial e equipamento por:

- Ajustando a planta industrial e registro de equipamento
- Fixando e selando os reservatórios
- Ajustando a capacidade do controle
- Medidas de infraestrutura.

Isto somente é possível com lubrificantes biodegradáveis. A Lei Alemã de Águas detalha procedimentos de bioteste que são obrigatórios para o monitoramento da distribuição de resíduos dentro de canalizações públicas. Também, as concentrações iniciais de metais pesados são medidas na distribuição dos resíduos dentro das canalizações públicas (estes podem originar de fluidos de corte emulsionáveis que são contaminados com óleo hidráulico contendo zinco).

Cargas de águas residuárias

A carga para distribuição dos resíduos diretamente na rede pública depende do grau de contaminação. A Lei correspondente define:

- A definição de substâncias perigosas, por exemplo, metais pesados, tais como zinco e bário nos aditivos de lubrificantes, compostos de halogênios orgânicos, etc.
- As cargas para substâncias perigosas.

Durante o uso, tais como em máquinas ferramentas, lubrificantes entram em contato com fluidos de corte, óleos hidráulicos e outros. Quando fluidos de corte solúveis são separados, partes dos aditivos dos óleos hidráulicos podem permanecer na fase aquosa e em circunstâncias desfavoráveis, estes podem levar ao aumento da carga da água residuária. Este problema tem levado ao desenvolvimento de óleos hidráulicos livres de zinco e cinzas. O uso de fluido amigo do ambiente pode também trazer uma positiva contribuição para redução da poluição, bem como abaixar a carga das águas residuárias.

Ar Limpo: Lei Alemã de Emissões

A Lei Alemã de Emissões foca-se em manter o ar limpo e tem tido um aumento da influência sobre a manufatura, uso e disposição dos lubrificantes atualmente.

A Lei de Emissão afeta lubrificantes se as emissões totais de uma indústria atinge um nível crítico. Deveria ser lembrado que em certas aplicações, mais de 10% dos lubrificantes evaporam ou formam névoa de óleo. Isto por sua vez, pode exaurir para dentro da atmosfera como emissões. Lubrificantes que evaporam ou formam névoa significativamente menor que os produtos convencionais são vistos como amigos do ambiente. Comparando óleo mineral com fluido facilmente biodegradável, como óleo de sementes ou produtos a base de éster, há uma redução das emissões acima de 90%. De acordo com a Lei das Águas, se o projeto da indústria é razoável técnica e economicamente, todos os métodos, instalações e procedimentos deveriam ser empregados para a redução de emissões. De acordo com a Lei de Emissões, todos os métodos, instalações e procedimentos que são praticáveis deveriam ser usados para limitar emissões.

Diretiva da Água Potável

O grau de pureza da água potável é um objetivo da Lei de Água, particularmente com considerações às restrições aplicáveis em zonas de proteção da água. Um importante aspecto da lei que se refere à segurança das máquinas é a classificação de lubrificantes como fluidos combustíveis. Estas leis colocam medidas para estocagem de fluidos inflamáveis.

Um lubrificante que não é classificado como um fluido combustível e que não é agressivo à água tem menor custo para estocagem. Isto se aplica para um número de lubrificantes amigos do ambiente.

2.4.3 Sustentabilidade do Uso dos Produtos Químicos

A sustentabilidade do uso de produtos químicos (e matérias-primas em geral) pode ser dividida em dois aspectos: o primeiro aspecto considera a origem das fontes. O óleo mineral é uma matéria-prima fóssil e finita, porque o processo de formação do petróleo dura milhares de anos. Com tudo isso, a viabilidade do óleo mineral é altamente dependente de considerações políticas. Ésteres sintéticos, por outro lado, são derivados de gorduras animais e óleos de plantas como matéria-prima, e são considerados materiais renováveis. O segundo aspecto considera a poluição do meio ambiente associado com o uso e descarga dos produtos químicos. Este aspecto pode ser dividido em dois sub-aspectos: poluição direta e indireta. A Figura 2.12 mostra o ciclo de vida dos óleos sintéticos. Na primeira reação catalisada enzimaticamente, o carbono orgânico dos óleos é sintetizado nas folhas das plantas verdes via assimilação fotossintética do gás carbônico da atmosfera. Um excesso de moléculas orgânicas ricas em energia é estocado nas plantas como carboidratos ou como gorduras. Gorduras são ésteres de ácidos graxos com álcool glicerol trifuncional. A biomassa da planta então pode ser usada diretamente para a extração de trigliceróis ou, por exemplo, no caso de biomassa rica em carboidratos, pode ser usada como ração para gados. Os trigliceróis extraídos são sujeitos a reações de quebra de gordura, onde as ligações do éster são quebradas. Produtos da reação são livres de ácidos graxos e álcool glicerol. Ambos podem ser usados como tais ou podem ser também processados por meios de métodos químicos. Os óleos químicos resultantes são usados como matéria-prima na formulação de produtos industriais ou de consumo (Willing, 2001).

Figura 2.12: Ciclo de vida dos produtos químicos baseados em fonte renováveis.
(Adaptado de Willing, 2001)

Depois de seu uso, os produtos são descartados, a maioria via águas residuárias. Uma pequena fração vai para tanques de armazenamentos finais e ainda uma pequena fração do resíduo é energeticamente usada (queimada). No caso dos óleos químicos, o dióxido de carbono liberado é igual à quantidade de dióxido de carbono que foi originalmente absorvido pelas plantas da atmosfera. Assim, o balanço do dióxido de carbono da atmosfera para óleos químicos, e em especial ésteres sintéticos têm efeito zero. Ao contrário dos óleos químicos, onde o ciclo de carbono dos produtos petroquímicos não é fechado, e sim aberto, os óleos de base mineral levam a um aumento do dióxido de carbono atmosférico e assim contribuem para o aquecimento global. Este efeito é conhecido como poluição ambiental indireta ou secundária. Poluição direta ou primária é causada pela exposição direta de um produto químico ao meio ambiente. No caso dos lubrificantes, há dois tipos diferentes de aplicações, sistemas abertos e sistemas fechados. No sistema aberto o lubrificante é usado como uma perda de lubrificante. Assim, depois de um tempo o lubrificante é perdido para o meio ambiente. Nos sistemas fechados o lubrificante idealmente não é exposto ao ambiente, embora, na realidade a situação seja um pouco diferente. Portanto, os lubrificantes são produtos químicos com

alta relevância ambiental. Conseqüentemente, é desejável que um lubrificante ambientalmente compatível deva ser usado sempre que possível (Willing, 2001).

2.5 Formulação dos Fluidos de Corte

Na literatura não são encontradas muitas publicações sobre o tema formulação de fluidos de corte, pois é um assunto mais restrito à indústria e pouco divulgado. Portanto, diante desta escassez de informações, torna-se evidente a necessidade de mais estudos científicos considerando esta abordagem.

A composição geral dos fluidos de corte emulsionáveis pode ser caracterizada como:

Óleo Base + Emulsificador + outros aditivos

A Tabela 2.6 lista os mais importantes componentes deste fluido (Hüber,1994). A composição complexa dos fluidos torna claro quando o potencial dos compostos usados para formular os fluidos de corte é considerado.

Tabela 2.6: Componentes dos fluidos de corte solúveis (Fonte: Hüber,1994).

Composição dos fluidos de corte emulsionáveis.
Óleo Base (óleo mineral ou vegetal, ésteres ou polialfaoleina)
Melhoradores de solução
Emulsificador
Agentes neutralizadores
Inibidores de corrosão
Aditivos de lubrificação (aditivos antidesgaste e de extrema pressão)
Biocidas e fungicidas
Agentes estabilizadores*
Inibidores de espuma*

* Somente em casos especiais

A seguir serão descritos os componentes básicos dos tipos de fluidos de corte mais importantes.

2.5.1 Fluidos Básicos

- Óleos minerais

Os Fluidos de corte podem basear-se em óleos minerais, contendo ou não aditivos. Os óleos minerais usados na sua fabricação podem ser de base parafínica (cadeias de carbono retas ou ramificadas) ou naftênica (cadeias de carbono saturadas cíclicas).

Antigamente era predominante o uso de óleos naftênicos, pois possuem a vantagem de serem mais facilmente emulgados e, quando usados em óleo de corte integrais, permitem dissolver maiores quantidades de enxofre, resultando em maior poder EP. Atualmente o uso deste tipo de óleo é cada vez mais restrito, por um lado pela escassez e conseqüente elevado custo, e por outro lado, pelo maior potencial de causar problemas a saúde humana e ao meio ambiente.

- Óleos vegetais e animais

Houve algumas tentativas para a sua utilização, porém seu elevado custo e a fraca resistência à oxidação, entre outras características, não permitiram que o seu uso se constituísse num sucesso comercial ou técnico. Sua aplicação em forma de fluidos integrais é a primeira vista, interessante, devido ao seu elevado poder lubrificante, porém sua rápida rancificação e as conseqüências associadas, impediram que seu uso se popularizasse. No entanto, são amplamente utilizados em forma de aditivos nos óleos de corte integrais e solúveis.

2.5.2 Aditivos utilizados em fluidos de corte emulsionáveis

Os óleos emulsionáveis recebem este nome, pois são formados de água e óleo mineral ou vegetal. Na verdade, o óleo não se solubiliza na água, mas através de agentes emulgadores, o óleo se dispersará em pequenas gotículas na água.

Emulsificadores

Os emulsificadores são os tensoativos polares (reduzem a tensão superficial) e formam uma película monomolecular relativamente estável na interface óleo/água. Emulsificadores enquadram-se um grande grupo de produtos químicos, que são conhecidos como surfactantes ou substâncias ativas nas superfícies. Todas as substâncias de superfície ativa espumam em uma solução aquosa; este é um fenômeno indesejado para os fluidos de corte. As substâncias de superfície ativa solúvel em água, incluindo também os emulsificadores, são freqüentemente descritas pelo termo “detergentes”.

Os emulsificadores são divididos entre produtos iônicos e não-iônicos. Os produtos iônicos são dissociados em água como cátions com uma carga positiva e ânions com uma carga negativa. Os emulsificadores não-iônicos não dissociam em água e a molécula tem propriedades surfactantes. Sua solubilidade em água é geralmente causada pelos grupos contendo oxigênio na molécula com uma alta afinidade com a água.

Os tipos principais são os sabões de ácidos graxos, as gorduras sulfatadas, os sulfonatos de petróleo e os emulgadores não-iônicos. A estabilização das emulsões depende de materiais tensoativos, que dão à superfície de cada gotícula de óleo uma carga negativa para a sua dispersão na água.

Inibidores de corrosão

A grande importância do sistema inibidor em fluidos de corte de baixo teor ou livre de óleo mineral permite também que este sistema de inibidores de corrosão seja usado para mais acurada classificação de produtos. Por exemplo, os tipos carboxilatos (sais de alcanolamina de ácidos carboxílicos), tipo boratos (borato de sódio) ou tipos PTBB (p. terc-butil ácido benzóico), que, por razões toxicológicas, são usados

atualmente somente em casos excepcionais. Ácidos carboxílicos, especialmente sais alcalinos e alcanolaminas, têm sido usados nos fluidos de corte.

Os materiais anticorrosivos são constituídos, usualmente, por nitrito de sódio, di ou trietanolamina, petróleo sulfonado, óleos sulfonados ou sulfurados, fosfatos ácidos polietoxilados ou seus sais, que agem simultaneamente como emulgadores e redutores de desgaste. A principal função, como próprio nome diz, é evitar a oxidação das superfícies metálicas da máquina, bem como da peça de trabalho (Runge&Duarte, 1990).

Biocidas

Usualmente são compostos orgânicos não fenólicos, eles são adicionados para o controle do crescimento de microrganismos, tais como bactérias, algas e fungos. Se a disposição não é considerada, fenólicos podem ser usados (Rouse et al, 1952)

Os biocidas são usados principalmente em fluidos de corte emulsionáveis em forma de materiais de conservação. Ocasionalmente são usados também em fluidos de corte integrais. Os conservantes podem ser definidos como substâncias ou misturas químicas definidas, que, usadas em baixas concentrações (usualmente entre 0,1 e 5000 µg/ml) matam microrganismos ou inibem o seu desenvolvimento; devem apresentar baixa toxidez e boa compatibilidade com a pele e com o produto a que são adicionados.

Um biocida deve ter as seguintes propriedades:

- Largo espectro antimicrobiano;
- Ação biocida rápida;
- Ação bioestática duradoura;
- Tolerância à presença de materiais orgânicos e inorgânicos;
- Elevada estabilidade térmica;
- Boa compatibilidade com outros materiais;
- Nenhuma influência nas propriedades refrigerantes e lubrificantes dos fluidos de corte;
- Baixa influência sobre o pH da emulsão;

- Solubilidade no fluido de corte concentrado e nas emulsões;
- Odor aceitável;
- Compatibilidade com a pele humana;
- Degradabilidade biológica;
- Baixo custo.

Não existe nenhum biocida que preencha todos os requisitos acima. Portanto, a escolha de produtos que atendam ao maior número de requisitos, de maneira mais adequada, é uma importante tarefa para os formuladores de fluidos de corte solúveis.

Antiespumante

Os fluidos integrais raras vezes apresentam problemas de formação excessiva de espuma em serviços. No entanto, quando isso ocorre, podem ser usadas minúsculas quantidades de óleos de silicone com resultados satisfatórios. O controle da espuma em fluidos de corte emulsionáveis é freqüentemente difícil. Podem ser usados ceras especiais ou óleos de silicone. Às vezes deve-se endurecer a água pra reduzir a espuma.

A tendência de formar espuma depende em muito da seleção adequada das matérias primas dos fluidos de corte. Nota-se freqüentemente que um fluido emulsionável espuma bastante quando recém posto em serviço e que a espuma gradativamente diminui. Os resíduos de óleos contaminantes e os resíduos de corte encarregam-se de debelar a espuma.

Causas mecânicas também podem contribuir para a formação excessiva de espuma, tais como entrada falsa de ar, baixo nível de fluido no reservatório, sistema de circulação mal projetado, pressão excessiva do jato de fluido, etc. A formação de excessiva espuma faz naufragarem muitas formulações de fluidos de corte emulsionáveis excelentes sob outros aspectos. É freqüentemente uma das mais difíceis características a se controlar num fluido de corte.

Antidesgaste (AW) e Extrema Pressão (EP)

Devido a sua estrutura polar, estes aditivos formam camadas sobre a superfície do metal por adsorção ou quimisorção que garante sua imediata efetividade no caso de condições de fricção mistas. Quando o filme lubrificante hidrodinâmico não abrange toda a superfície, a temperatura aumentará e os aditivos AW e EP podem reagir com a superfície do metal formando camadas de reações triboquímicas (fosfato de ferro, sulfitos, sulfatos, óxidos e carbeto – dependendo da química do aditivo) que prevenirá contato direto entre as superfícies em contato.

Aditivos AW são principalmente designados pra reduzir o desgaste quando o sistema é exposto a moderada tensão enquanto os aditivos EP são muito mais reativos e são usados quando as tensões do sistema são muito altas para prevenir a adesão das partes em movimento.

Camadas protetoras formadas pelos aditivos EP

Os aditivos EP consistem em sua maioria de compostos clorados, sulfúricos e fosfóricos reagindo triboquimicamente com o metal exposto durante o processo mecânico e desenvolvendo uma boa aderência e formando uma camada protetora (Heinicke, 1984).

A reação entre a superfície metálica e o aditivo pode também reduzir a adesão. Nos pontos de contatos entre as superfícies onde a temperatura é alta, o aditivo previne a formação de uma ponte de adesão por reação com a superfície metálica (Iliuc, 1980).

Para prevenir o aparecimento de grandes regiões de contato metal-metal e assim o desgaste por contato, a nova formação da camada por reação dos aditivos EP com a área de atrito tem que seguir a camada de destruição antes que uma maior tensão mecânica tome lugar. Assim, para encontrar estas condições, os aditivos têm que reagir com o metal com uma velocidade suficientemente alta (Heinicke, 1984)

A ação do aditivo EP procede por alguns (mas não necessariamente todos) dos seguintes passos (Schey, 1984):

1. Interações dos aditivos com o ambiente (oxigênio, água, outros aditivos e fluido base) formando espécies mais reativas.

2. O aditivo e/ou as espécies reativas são adsorvidas sobre a superfície do metal.
3. Sob condições de contato de intensa pressão e temperatura, espécies reativas podem ser formadas, e ligações na molécula ativa são quebradas para formar filmes poliméricos que usualmente demonstram um aumento da concentração do elemento ativo na forma de compostos orgânicos ou organometálicos, geralmente juntos com óxidos. Radicais orgânicos remanescentes penetram no lubrificante e podem contribuir para reações sob o passo 1.
4. O produto da reação é desgastado através de deslizamento, e também por dissolução química e ainda é perdido sobre a material retirado ou absorvido pelo lubrificante, mudando a sua reologia e reatividade.
5. O produto da reação é reestabilizado pelos passos acima 1 a 3. O sucesso da lubrificação depende do balanço da manutenção entre remoção ou regeneração do produto da reação.

A adsorção também toma um importante papel no desenvolvimento desta reação. Primeiramente para a reação, o aditivo é adsorvido sobre a superfície. Se o aditivo é adsorvido mais rapidamente, maior será a concentração na superfície e a taxa de reação (Iliuc, 1980)

Os meios fundamentais para a formação das camadas são apresentados a seguir (Heinicke, 1984):

I. Espontânea formação da camada a partir dos reactantes:

II. Formação da camada via a formação de estágios de sorção:

III. Formação das camadas seguindo o procedimento de decomposição ou reformação dos aditivos:

No caso de reações de multi-estágios a menor constante de velocidade determina a formação da camada protetora; ademais para aditivos contendo halogênios, uma formação espontânea das camadas foi detectada a partir do impacto sobre a superfície do metal, acompanhado pela formação de halogênios de ferro e produtos residuais. O fosfato de ferro e sulfito de ferro são importantes produtos da reação com aditivos contendo ferro e enxofre, respectivamente.

A estrutura química do aditivo pode afetar a formação da camada de reação se na molécula há a adição de grupos de átomos reagentes (Cl, P,S) afetando a energia de adsorção dos aditivos. Como a reação toma lugar em um sistema heterogêneo, a cinética da reação é determinada, através de outros fatores, pela concentração do aditivo na superfície sólida e não diretamente pela sua concentração no volume do lubrificante. A concentração do aditivo na superfície de atrito é diretamente relativa à energia de adsorção, uma quantidade considerável é afetada pela presença de grupos $-\text{COOH}$, $-\text{OH}$, etc. na molécula (Iliuc, 1980).

Geralmente muitos processos contribuem para a formação de uma camada protetora, por exemplo, o desenvolvimento de óxidos, poliméricos, e outras camadas de reação. Neste modo, camadas protetoras podem ser produzidas com uma combinação apropriada que permaneça constante e não perca seu efeito lubrificante mesmo com a deformação do metal base.

Em resumo, pode-se concluir que as reações triboquímicas tomam um decisivo papel na formação das camadas protetoras antiatrito e desgaste, e deste modo esta nova fase protege o material contra desgaste por adesão e também contra fadiga da superfície e do ataque químico externo.

2.5.3 Componentes problemáticos

Os seguintes grupos de substâncias referem-se a componentes problemáticos as quais estavam contidos em fluidos de corte no passado (Bartz, 2001).

- Nitrosaminas (N-nitrosodietanolaminas)
- Materiais de Formaldeídos condensados.
- Substâncias contendo organos clorados (parafina clorada e bifenóis policlorados)
- Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos, tais como benzopireno
- Outros, tais como boro e chumbo

Considerando seu potencial carcinogênico, as substâncias podem ser classificadas como abaixo:

Definitivamente geradora de câncer

N-nitrosaminas, bifenóis policlorados.

Definitivamente Geradora de Câncer em Testes com animais

Benzopireno.

Suspeita de potencial de câncer

Parafinas cloradas (algumas classes, não todas), Formaldeído.

Substâncias contendo organos clorados

Como estas substâncias são altamente efetivas e relativamente baratas, as parafinas cloradas foram extensamente usadas como aditivos de anti-desgaste e de extrema pressão.

Uma Lei Alemã de 1986 sobre a disposição de resíduos divide óleos usados em três categorias que precisa ser coletado separadamente. A regulamentação contém o seguinte limitante para óleos usados que são apropriados para reciclagem.

0,2 % de halogênios total; 4 ppm bifenóis policlorados.

Óleos usados contendo especialmente altas quantidades de halogênios, especialmente cloro são tratados como resíduo especial causando altos custos de disposição.

Nitrosaminas

Nitritos alcalinos, especialmente nitrito de sódio, foram usados como efetivos inibidores de corrosão. Para o mesmo propósito, dietanolaminas foram aplicadas. O potencial de câncer causado pelo N-nitroso-dietanolamina formado desta combinação é avaliado como abaixo (Muller, 1994):

Extremamente perigoso = 0,05%

Altamente perigoso < 0,05 – 0,005%

Perigoso < 0,005-0,0005%

Nitrosaminas podem ser formadas por:

- Reações entre nitritos e aminas
- Reações entre aminas e óxidos de nitrogênio do ar (NO_x)
- Formados de grupos nitrosos de aminas secundárias (dietanolaminas), o que é facilmente possível.

Para reduzir o risco da geração de nitrosaminas, a Regulamentação Técnica para produtos perigosos (TRGS/611), redigida em abril de 1993, especifica que:

- Fluidos de corte não podem conter componentes geradores de nitrosaminas. Isto se aplica a nitritos como inibidores de corrosão, bem como a poucos compostos contendo nitrogênio orgânico usado como biocidas.
- Aminas secundárias como dietanolaminas como inibidores de corrosão não podem ser usados por longo tempo.
- Estas restrições não se aplicam para aminas especiais selecionadas ou efetivos inibidores usados.
- O conteúdo de aminas secundárias incluídas em produtos com outros componentes não pode exceder 0,2%. Um resultado do processo de produção, mono - e trietanolaminas pode conter pequenas quantidades de dietanolaminas.

Em adição, deve-se tomar cuidado para que a água usada na preparação da emulsão deve conter baixas concentrações de nitratos (menor que 50 mg/l). Nitrato pode ser decomposto em nitrito quimicamente ou por ação de bactérias. Atualmente, as formulações de fluidos de corte, não contem níveis de nitritos superiores a 5 ppm em forma diluída.

Hidrocarbonetos aromáticos policíclicos

Estas substâncias podem estar presentes em fluidos de corte através do óleo base. O potencial gerador de câncer do benzopireno (BaP), por exemplo, é classificado como (Muller, 1994):

Altamente perigoso = 0,1%

Perigoso < 0,1 – 0,005%

O câncer gerado por hidrocarbonetos aromáticos é reduzido quando óleos base produzidos por especial processo de refinamento são selecionados, os quais são feitos por modernas tecnologias.

Formaldeídos Condensados

Materiais de formaldeídos condensados podem estar presentes nos fluidos de corte como biocidas. A concentração destes aditivos nos fluidos é baixa, menor que 0,05 mg/m³. Em contraste, a chamada “máxima concentração em local de trabalho”, que significa a quantidade existente no ar, para formaldeídos condensados, pode ser tão alta quanto 1,2 mg/m³. Existem indicações que o uso de formaldeídos condensados não leva a um aumento da exposição ao formaldeído.

Substâncias contendo fósforo orgânico

Estas substâncias, tais como, tricresolfosfato, são usados como aditivos de antidesgaste e extrema pressão. Por razões toxicológicas, deve-se tomar cuidado para que o tricresolfosfato esteja livre de O-cresol.

Outras Substâncias

- Componentes contendo chumbo: naftenos contendo chumbo foram usados no passado para especiais aplicações, mas em fluidos de corte somente como uma exceção. Devido ao seu efeito de aumentar a quantidade de chumbo no sangue, lubrificante contendo chumbo são dificilmente usados.
- Componentes contendo boro: ésteres de ácido bórico, bem como produtos de Alcoolaminas condensadas de ácido bórico, têm ganhado importância como inibidor de corrosão, porque eles são biologicamente estáveis. Esta propriedade pode resultar num certo efeito desvantajoso quando da eliminação dos fluidos. Como o boro danifica o crescimento de algumas plantas, alguns países têm elaborado regulamentações que definem as concentrações máximas de boro nas águas residuárias.
- Difosfato de Zinco: recentemente, este grupo tem sido também avaliado por seu potencial tóxico. Testes têm demonstrado que eles provocam irritações. De acordo com a legislação européia eles devem ser classificados como “perigosos”. Isto significa que este grupo de aditivos pode ser usado se classificado apropriadamente.

Componentes e substitutos usados recentemente

Devido a estas considerações, muitos aditivos não são mais usados, particularmente na Alemanha (Hübner 1994). A Tabela 2.7 lista algumas das mais importantes substâncias restringidas. A fim de abranger os requerimentos para fluidos de corte no futuro, substitutos precisam ser desenvolvidos. Em vez de utilizar alguns componentes problemáticos, outros aditivos são indicados (Tabela 2.8), que possuem mais ou menos exigências nas aplicações práticas. Em certos casos respeito às limitações da sua efetividade precisam ser consideradas.

Tabela 2.7: Componentes não mais usados nos fluidos de corte.

Fenol e Derivados de Fenol
Parafinas Cloradas
p.tert. Butil ácido benzóico
Benzotiazil mercaptana
Butileter etilenoglicol
Nitrito de sódio
Aminas secundárias (dietanolaminas)
Biocidas (a base de compostos nitro-orgânicos)

Tabela 2.8: Substitutos para alguns, mas não para todos componentes de fluidos de corte.

Componente substituído	Substituto
Biocidas fenólicos (regulamentações para águas residuárias)	Biocida livre de fenol (exemplo: triazinas, tiazóis)
Nitrito (TRGS611)	Inibidores de corrosão orgânicos
Parafinas cloradas	Compostos de Enxofre e/ou Fósforo
Aminas Secundárias (TRGS611)	Aminas primárias
Biocidas com nitrito (TRGS611)	Outros biocidas (exemplo: triazinas, tiazóis)

2.5.4 Controle da qualidade das emulsões/soluções

Após o preparo de um fluido de corte, algumas análises físico-químicas devem ser realizadas com a finalidade de garantir a qualidade do produto. Estas análises devem contemplar principalmente a avaliação da vida útil do fluido, bem como efeitos sobre a qualidade da peça. Deve-se também verificar algumas características básicas, como por exemplo a capacidade de lubrificação.

PH

Uma solução para evitar contaminação microbiana dever ter pH superior a 9,0. Mas o pH não é uma característica analisada somente na formulação das emulsões.

Devem ser feitas medidas diariamente para verificação do pH, e deve ser mantido entre 9,0 e 11,0, verificando valores menores entre 7,8 e 9,0 deve ser adicionado biocida em quantidades suficiente para o controle de bactérias. Se o pH estiver abaixo de 7,9 a emulsão está contaminada e deve ser trocada.

Viscosidade

No processo de lubrificação, os óleos têm três funções primárias: prevenir o desgaste de superfícies conjugadas, mantendo-as afastadas, minimizar o atrito entre essas superfícies e remover o calor através do contato de lubrificação.

Em todas as três, a viscosidade é importante, já que se ela for relativamente alta, a carga das peças é completamente suportada pelo filme de óleo, minimizando o atrito no contato metal-metal/metal-ferramenta. Também se obtém um atrito relativamente baixo, mesmo com viscosidade pouco menor, de vez que a carga é apenas parcialmente suportada pelo filme de óleo, sendo o restante suportado pelo contato metálico. Já, quando essa viscosidade é baixa, a carga é predominantemente suportada pelo contato metal-metal, gerando um atrito relativamente alto, de forma que a viscosidade do óleo acaba tendo somente um papel menor na operação. Embora muito importantes, as propriedades antidesgaste do óleo lubrificante representam um papel menor quando sua viscosidade é suficientemente alta para suportar as cargas.

Os lubrificantes também reduzem o atrito entre as peças em movimento relativo, quando as condições de operação não conduzem para formação do filme de óleo. Superfícies metálicas, mesmo aquelas que parecem ser suficientemente lisas, são compostas de picos e vales microscópicos, sendo estes picos e vales que entram em contato uns com os outros.

Resistência à degradação por microrganismos

Na formulação do fluido de corte é adicionada uma pequena quantidade de bactericida para garantir maior vida útil do fluido, no que diz respeito à degradação por contaminação microbiológica.

Propriedades Anticorrosivas

As propriedades anticorrosivas são necessárias para proteger a peça, a ferramenta e os componentes da máquina contra a corrosão.

2.6 Fluidos de Corte Biodegradáveis e Bioestáveis

O conceito de biodegradabilidade não pode se aplicado aos fluidos de corte aquosos (emulsões e soluções) da mesma maneira como é aplicado, por exemplo, aos detergentes domésticos. Estes são descartados quase que imediatamente após o seu uso.

A emulsão ou solução deve durar o maior tempo possível. Portanto, um fluido de corte não pode ser facilmente degradado; ao contrário, o fluido de corte solúvel deve ser bioestável e compatível com o meio ambiente. É desejável que a água resultante do descarte da emulsão não contenha produtos agressivos à fauna e à flora aquáticas e para isso, é necessário que a formulação de fluidos de corte solúveis tradicionais contenha componentes que facilitem e reduzam o custo do descarte. Fenóis e nitritos usados amplamente na formulação de fluidos de corte aquosos tradicionais, passam para a fase aquosa do fluido, e por ocasião do descarte, encontram-se na água resultante da quebra das emulsões. É desejável sua ausência ou a presença apenas em quantidades mínimas. (Duarte & Runge, 1990)

Produtos à base de ácido bórico usualmente são bioestáveis desde que no produto em uso a concentração de boro seja superior a 300 ppm.

Os fluidos bioestáveis foram introduzidos no mercado no início da década de 1980. Desde então, verificou-se na Alemanha uma redução de aproximadamente 55% no consumo de fluidos de corte solúveis concentrados durante os três anos seguintes.

As causas principais desta redução foram:

- vida útil das emulsões de no mínimo um ano;
- quase nenhuma necessidade de medidas preservativas para os fluidos;

- serviço de monitoração cada vez mais amplo por parte dos fornecedores dos fluidos.

Uma vez que a proliferação de microrganismos depende em grande escala da temperatura do fluido de corte, a longa vida útil das emulsões nas máquinas nesse caso pode ser atribuída, também, pelo menos em parte, às temperaturas ambientes médias mais baixas na Europa, ao contrário das temperaturas bem mais elevadas nos países tropicais, embora outros fatores possam também influir. Em alguns casos, a vida útil de emulsões de produtos bioestáveis chegou a dois anos. Sua troca foi feita apenas pelo acúmulo de impurezas no reservatório não em função da deterioração da emulsão.

Os fluidos de corte são formulados com materiais resistentes ao ataque bacteriano (bacteriostáticos), usualmente mantém o pH em nível estável durante a sua vida útil, e raras vezes será necessário usar qualquer material de conservação. Usualmente estes fluidos são formulados a base de boro, para evitar ataque bacteriano, é necessário usar estes fluidos em concentrações que não sejam inferiores às mínimas recomendadas pelo fabricante do fluido, com a finalidade de manter o nível de boro na emulsão suficientemente elevado para garantir a ação bacteriostática.

2.7 Desenvolvimento de fluido de corte para retificação com rebolos de CBN

Como já foi citado, há uma escassez de artigos científicos que tratam a respeito de desenvolvimento de formulações de fluidos de corte, sendo encontrados apenas alguns trabalhos, do mesmo autor, considerando este assunto. Estes artigos serão apresentados neste item.

Primeiramente, Yamanaka et al (1995) analisaram a viabilidade de utilizar nos testes de avaliação do desempenho de fluidos de corte o método abrasivo denominado pelos autores “*Block-on-Ring Grinding*”.

Este método foi escolhido considerando as seguintes razões:

1. Possibilidade de simulação de operações de retificação;

2. Facilidade de teste;
3. É mais fácil e barato fazer o reboło de CBN eletrodepositado;
4. Fazer os blocos de ensaio é mais fácil e barato, podendo ser produzidos vários tipos de materiais.

Para avaliar se há correlação entre o teste de abrasão proposto com o teste de retificação em retificadora cilíndrica, foram testados quatorze tipos de fluidos de corte. Uma solução química, nove fluidos sintéticos e quatro óleos emulsionáveis foram usados como fluidos de corte. A velocidade de corte na retificadora cilíndrica era dez vezes maior que no *block-on-ring method*. Foi verificado que existe uma alta correlação entre o atrito no *block-on-ring* e os resultados do teste de desgaste da operação de retificação cilíndrica. Os autores concluíram que o método proposto é simples e excelente como um novo método de teste em laboratório.

Yamanaka et al (1997) estudaram três tipos de aditivos: agentes de oleosidade, modificadores de atrito e agentes de extrema pressão, utilizando o método abrasivo *block-on-ring grinding*. Os testes foram realizados com reboło de CBN eletrodepositado e peça de aço AISI-P21. As conclusões obtidas desta análise foram:

- Efeito da viscosidade do óleo base: viscosidades em torno de $4,6 \text{ mm}^2/\text{s}$ reduzem a força de retificação tangencial enquanto a quantidade de material removido é aumentada;
- Desempenho na retificação dos agentes de oleosidade: dentre os agentes estudados, particularmente o óleo de canola, *sulfurized lard* e ácido oléico foram consideravelmente efetivos na redução da força de retificação tangencial e no aumento do material removido.
- Desempenho na retificação dos modificadores de atrito: não se observou um efeito significativo destes aditivos na força de retificação tangencial e nem na quantidade de material removido.
- Desempenho na retificação dos aditivos de extrema pressão: o efeito foi o maior comparado com os outros aditivos testados. A formação de um filme fino (Max. $1 \text{ }\mu\text{m}$) na superfície da peça, contribui para um melhor desempenho da retificação.

A concentração e a composição dos aditivos influenciam no processo, isto foi investigado por Yamanaka et al (1998). Os pesquisadores variaram a concentração dos aditivos em 5 níveis de 0,25 a 5 % em peso. Os agentes de oleosidade estudados foram óleo de canola, *sulfurized lard* e ácido oléico, como modificador de atrito o sulfato de cálcio e como agentes de extrema-pressão utilizaram parafina clorada, *sulfurized lard*, polisulfito de alquila, fosfato ácido de alquila.

Os resultados e conclusões obtidos através destes testes são sumarizados através dos parâmetros avaliados:

- **Redução da força tangencial de retificação:** *Sulfurized lard*, fosfato ácido de alquila e ácido oléico se mostraram aditivos efetivos nos testes realizados. Polisulfito de alquila, parafina clorada e óleo de canola tiveram comportamento semelhantes, enquanto o sulfato de cálcio teve o pior resultado.
- **Melhora na quantidade de material removido:** *Sulfurized lard* e polisulfito de alquila foram os melhores no efeito de melhorar a quantidade de material removido, seguidos pela parafina clorada e fosfato ácido de alquila. Todos os tipos de agentes de oleosidade e modificadores de atrito tiveram um mínimo efeito, comparado com os aditivos de extrema-pressão.
- **Redução na energia específica relativa de retificação:** O *sulfurized lard*, polisulfito de alquila e fosfato ácido de alquila demonstraram um grande efeito na redução e foram significativamente diferentes dos outros. O efeito do *sulfurized lard* foi especialmente notado.
- **Rugosidade e qualidade da superfície da peça:** não foi verificado nenhum efeito na rugosidade para todos os aditivos estudados. *Sulfurized lard*, polisulfito de alquila e fosfato ácido de alquila tiveram a melhor qualidade.
- **Análise das superfícies das peças testadas através do X-Ray Photoelectron Spectroscopy (XPS):** O desempenho na retificação dos aditivos de extrema-pressão concordou bem com os resultados da análise

de superfície pelo XPS destes aditivos. A quantidade de produtos de reação (composto de ferro) produzida na superfície da peça foi pequena.

Estes pesquisadores, após verificarem que os aditivos de extrema-pressão são os que mais influenciam no processo, realizaram um estudo avaliando a combinação destes aditivos com os outros já estudados por eles, sempre adicionando ao fluido de corte dois tipos de aditivos (Yamanaka et al, 2000(a)). Foram avaliados dois tipos de agentes de oleosidade, um modificar de atrito e três agentes de extrema-pressão.

Como nos trabalhos anteriores, as conclusões dos testes de combinação de aditivos foram baseadas nos mesmos parâmetros avaliados durante os testes, e são as seguintes:

- **Redução da Força Tangencial de Retificação:** Não foi observado nenhum efeito na redução da força tangencial quando utilizadas combinações diferentes de fluidos de corte. A força tangencial de cada fluido testado foi aproximadamente a média das forças dos dois aditivos usados individualmente, exceto quando se usou em combinação com fosfatos. Neste caso, a força tangencial depende da força tangencial do fosfato.
- **Melhora na quantidade de material removido:** também não foi observado nenhum efeito das combinações na remoção de material. A quantidade de material removido foi aproximadamente a mesma obtida para os aditivos usados separadamente.
- **Redução da Energia Específica Relativa de Retificação (EERR):** Similarmente não foi observado efeito significante neste parâmetro. Quando dois aditivos de extrema-pressão foram usados conjuntamente com um agente de oleosidade, a EERR foi determinada pelo *sulfurized lard* ou pelo fosfato ácido de alquila e que são fortemente reativos com o ferro (Fe).
- **Qualidade da superfície da peça:** observou-se uma melhora na qualidade da superfície quando usada a combinação *sulfurized lard* e fosfato ácido

de alquila, e a combinação de cada um dos três tipos de agentes de extrema-pressão com o ácido oléico.

Por último, estes autores estudaram o desempenho na retificação de vários tipos de ácidos carboxílicos (Yamanaka et al, 2000(b)), considerando os seguintes pontos de vista:

- 1) Comparação com o número de átomos de carbono dos ácidos graxos saturados,
- 2) Comparação entre ácidos graxos saturados e insaturados, e;
- 3) Comparação entre isômeros de estrutura (estrutura normal e estrutura ramificada).

Os ácidos carboxílicos usados neste experimento foram ácidos graxos saturados (8 tipos), ácidos graxos insaturados (3 tipos) e ácido graxo com estrutura ramificada (isoácidos carboxílicos, 3 tipos). Foi usado o mesmo aparato já descrito neste item, nos comentários dos artigos anteriores dos referidos autores.

As conclusões dos autores a respeito dos ácidos carboxílicos usados neste estudo são:

- **Redução da Força Tangencial de Retificação:** Nos ácidos carboxílicos saturados, a força de retificação reduz gradualmente com o aumento do número de átomos de carbono até 18 átomos, e a partir deste número demonstra valores constantes para qualquer acréscimo de átomos de carbono. Nos ácidos carboxílicos insaturados, devido à dupla ligação das moléculas, as forças de retificação foram um pouco maior que nos ácidos saturados com o mesmo número de átomos de carbono. Por outro lado, a força de retificação nos ácidos carboxílicos ramificados foi maior que em ácidos carboxílicos de cadeia normal com o mesmo número de átomos de carbono.
- **Melhora na quantidade de material removido:** Nos ácidos carboxílicos saturados, o material removido aumentou até ácido com 14 átomos de carbono e manteve-se num nível constante em todos os ácidos testados com um maior número de átomos de carbono. Em contraste, a quantidade de material removido reduz quando duplas ligações aumentam em

número. Todavia, a quantidade de material removido em ácidos carboxílicos com cadeia ramificada foi menor que para ácidos carboxílicos de cadeia normal.

- **Redução da Energia Específica Relativa de Retificação (EERR):** No caso dos ácidos carboxílicos saturados, a EERR reduz com o aumento no número de átomos de carbono até o número de 18 átomos, e mantém-se constante até um ácido com 22 átomos de carbono. Como no caso da quantidade de material removido, a EERR aumenta com o aumento no número de duplas ligações. Em ácidos com cadeia ramificada, o EERR é consideravelmente maior do que em ácidos com cadeia reta.
- **Rugosidade e qualidade da superfície da peça:** Não foram observadas diferenças significantes na rugosidade para todos os ácidos carboxílicos testados. Nos ácidos carboxílicos saturados, por outro lado, a qualidade da superfície foi boa.

Estes trabalhos citados avaliaram vários componentes da formulação de fluidos de corte, sendo uma referência para o desenvolvimento deste trabalho de doutorado.

A seguir é proposto um método para se avaliar o desenvolvimento de uma nova formulação para um fluido ambientalmente adequado para a aplicação na retificação com rebolos de CBN e ligantes vitrificados.

3. PROPOSTA METODOLÓGICA

Sendo o principal objetivo deste trabalho desenvolver um novo conceito de fluido de corte, onde os requisitos lubrificação e refrigeração estejam presentes num mesmo produto e ainda que este seja ambientalmente adequado, algumas metodologias foram avaliadas para verificar a viabilidade deste produto.

Considera-se inicialmente que a literatura diz que quando se usa rebolo de CBN na retificação não é aconselhável usar fluidos de cortes de base aquosa, pois a água presente neste fluido reage com os grãos de CBN aumentando o desgaste do rebolo. A partir desta informação foram propostas metodologias para investigar se realmente esta reação química ocorre e qual a influência desta no desgaste total dos rebolos de CBN quando retificados com fluidos aquosos. O primeiro método avaliado foi o de montar um sistema fechado, onde uma pequena quantidade de fluido pudesse ser recirculado várias vezes concentrando assim o óxido de boro eventualmente produzido da reação da água com o CBN.

Foram realizados também testes numa retificadora convencional plana com um tanque com volume igual a 50 litros. As amostras coletadas de água utilizada durante os testes foram analisadas por Espectrômetro de Emissão Ótica acoplado a plasma induzido, através da qual é possível identificar a quantidade de boro presente na amostra.

Para verificar a veracidade da reação proposta foi simulada uma condição ideal para que esta reação ocorresse. Para isto foi utilizado um reator onde foram colocados grãos de CBN e circulado vapor d'água em altas temperaturas 450 e 600 °C. Após um tempo estipulado a amostra do sólido foi analisada por difração de raios-X, onde seria possível identificar os produtos da possível reação. Com estes testes se pode obter uma

resposta definitiva quanto à afinidade química entre o CBN e a água. Caso não ocorra reação com a água, deve-se atribuir o baixo rendimento do CBN com este tipo de fluido à falta de lubricidade (que aumenta a geração de calor) e ao choque térmico promovido pela água. Assim, o novo fluido a ser proposto utilizaria alta concentração de óleo vegetal em água poderia ser uma solução viável. Caso o CBN reaja com a água, outras soluções para a formulação do fluido seriam propostas, como por exemplo, o óleo vegetal aplicado por névoa ou por inundação.

As formulações comerciais geralmente são complexas, contendo uma gama diversificada de aditivos. Os aditivos de antidesgaste e extrema-pressão (EP) são geralmente incluídos na formulação. Sendo a intenção deste trabalho formular um fluido de corte com uma formulação mais simples, testes tribológicos para avaliar o efeito destes aditivos no processo abrasivo fazem parte da metodologia.

Depois de verificada a influência da água presente nos fluidos aquosos no desgaste químico dos rebolos de CBN e também os efeitos dos aditivos de extrema-pressão e antidesgaste no processo abrasivo, então deve-se formular o novo fluido de corte emulsionável. Primeiramente são escolhidos materiais que não tenham restrições ambientais. De posse destes materiais, com um trabalho de tentativas manipula-se as concentrações para ter um produto com alta viscosidade, pH na faixa desejada, estabilidade, mistura homogênea e resistência à corrosão. Diferentes concentrações dos reagentes devem ser testadas até encontrar uma que atenda aos requisitos estipulados. Análise de biodegradabilidade deve ser realizada para garantir que a nova formulação seja adequada em termos ambientais.

Além das características ambientais a nova formulação deve apresentar bom desempenho mecânico, assim testes de retificação com CBN são propostos avaliando como parâmetros de saída rugosidade superficial da peça e desgaste radial do rebolo. Fluidos de corte comerciais são também testados para efeito de comparação. Nesta etapa são avaliados dois extremos: óleo integral (alto poder lubrificante) e fluido semi-sintético (alto poder refrigerante). Diferentes diluições da nova formulação são testadas para avaliar a melhor diluição para o uso do novo fluido de corte em processos de retificação.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Análise da existência da reação entre CBN e fluido a base de água.

O objetivo desta etapa foi verificar se há reações químicas entre o rebolo CBN, óleo solúvel e o ar, conforme descrito por Hitchinner (1999) e Leal (1993) (item 2.2.3). Estes autores afirmam ocorrer reação química entre o rebolo de CBN e o vapor d'água, proveniente da vaporização da água contida nos fluidos solúveis.

Primeiramente foi construído um sistema de alimentação do fluido de corte, o qual era composto por um pequeno reservatório plástico com volume igual a 10,0 litros. Este reservatório foi colocado dentro da máquina retificadora (Zema G800), próxima à zona de corte, para recircular o fluido sob a área de corte. Foi inserido outro recipiente com dimensões ajustadas ao rebolo e a peça, de maneira que pudesse reaproveitar a maior parte do fluido utilizado. Porém foi possível realizar apenas um pequeno número de passes de retificação, devido à vaporização da água e outras perdas na zona de

corde.

Figura 4.1: Sistema de circulação do fluido de corte.

Os testes foram realizados com água, como descrito no capítulo anterior, pois a reação proposta deve ocorrer devido à presença da água nos fluidos aquosos. Os fluidos semi-sintéticos não foram analisados, porque as temperaturas de retificação alcançadas com estes fluidos são menores que as obtidas com a água. Uma menor quantidade de vapor é gerada. A composição dos fluidos semi-sintéticos poderia afetar também os resultados da concentração de boro originado da retificação, pois o fluido utilizado apresenta em sua composição amida borada. Os dados de operação encontram-se na Tabela 4.1

Tabela 4.1: Dados operacionais do processo.

Rebolo CBN b 181 (Winter) – com ligante vitrificado, concentração – 125 (31,25%), 20% porosidade natural e 21.10% porosidade induzida, Velocidade de corte = 60 m/s		
Amostra	Avanço (mm/min)	Sobremetal (mm)
1	0,4	0,3
2	1,2	2,0

As amostras de água coletadas foram analisadas quimicamente, através do Espectrômetro de Emissão Ótica acoplado a plasma induzido, no laboratório da Embrapa em São Carlos. Foi escolhida essa técnica, pois é a mais precisa e sensível a baixas concentrações. Esta análise é quantitativa, ou seja, apenas detecta a quantidade de boro existente na amostra, não informa em qual forma ele está, como por exemplo, na forma de óxido de boro (B_2O_3). Como na literatura não há dados para saber se realmente ocorre esta reação, primeiramente optou-se por avaliar a presença de boro na água após a retificação. Os parâmetros operacionais do Espectrômetro de Emissão Ótica acoplado a plasma induzido estão expostos na Tabela 4.2. Inicialmente foi feita uma curva padrão com soluções conhecidas de boro, com concentrações 0, 10 e 20 mg/l.

Tabela 4.2: Parâmetros operacionais do espectrômetro de emissão ótica acoplado a plasma induzido

Potência da radiofrequência (kW)	1,3
Vazão do gás do plasma (l/min)	15
Vazão do gás auxiliar (l/min)	1,5
Vazão do gás de nebulização (l/min)	0,70
Câmara de nebulização	ciclônica
Nebulizador	concêntrico
Comprimento de onda (λ)	208,959
Limite de Detecção (LD) (mg/L)	0,480

Também foram realizados testes de retificação em uma retificadora plana, pois esta possui um tanque de armazenamento de fluido menor (65 litros), permitindo uma maior concentração do produto da reação e também um maior contato rebolo/fluido de corte.

Com o intuito de simular uma condição ideal para que esta reação ocorresse, foi utilizado um reator de quartzo amorfo e uma linha de reação onde foi possível alimentar o reator contendo grãos de CBN com vapor d'água. Estes testes foram desenvolvidos no Laboratório de Catálise do Departamento de Engenharia Química da Universidade Federal de São Carlos. Na Figura 4.2 é demonstrado o reator utilizado. O reator consiste num tubo de quartzo amorfo com três orifícios. O superior é conectado à tubulação de alimentação de vapor d'água. O inferior é destinado à saída dos reagentes e produtos voláteis. O orifício lateral é por onde se retira o reagente e produtos sólidos.

Uma vista mais detalhada do suporte de lã de quartzo e os grãos de CBN é dada pela Figura 4.3. Nesta foto é possível observar a fina camada de CBN sobreposta sobre o suporte, o qual não permite a passagem de sólidos, somente do vapor e voláteis.

Figura 4.2: Vista frontal do Reator de Quartzo.

Figura 4.3: Vista detalhada da acomodação dos grãos de CBN no reator.

Depois de preparado com os grãos de CBN, aproximadamente 100 mg, o reator é inserido no forno tubular elétrico (EDG-FT-3) onde a temperatura podia ser controlada, garantindo um ambiente isotérmico para que a reação investigada pudesse acontecer, como pode ser observado na Figura 4.4. A tubulação de vapor d'água foi conectada ao reator. As temperaturas foram fixadas em 400 e 600°C. Então se esperou o forno e o vapor atingirem a temperatura estipulada para iniciar a circulação do vapor pelo reator. O tempo de reação foi de duas horas.

Figura 4.4: Linha de Reação utilizada.

Foram realizadas reações em duas temperaturas diferentes, 400 e 600 °C, a vazão de vapor foi igual a 3g/h para as duas temperaturas. O tempo de reação foi o mesmo em ambas as temperaturas de duas horas. Coletou-se o sólido após a reação com a finalidade de analisar a ocorrência da reação. As amostras foram analisadas através do método de Difração de Raio X, no Instituto de Física de São Carlos – USP.

4.2 Formulação de Fluidos de corte

A etapa de formulação dos fluidos de corte foi desenvolvida no Laboratório de Química Ambiental do Instituto de Química de São Carlos, pois este oferece equipamentos, reagentes e vidraria necessários nesta parte do trabalho.

4.2.1 Análise dos efeitos dos aditivos na formulação dos fluidos de corte

Os testes tribológicos foram conduzidos em um equipamento específico para este tipo de análise, porque trabalha com pequenas quantidades de materiais (peça, ferramenta e fluido de corte). Tal equipamento chama-se tribômetro. Esta etapa foi realizada no Werkzeugmaschinenlabor (WZL) na Universidade RWTH em Aachen na Alemanha, como parte do doutorado sanduíche. Consiste em realizar o atrito entre a ferramenta e o corpo-de-prova através da rotação e aplicação de uma força normal, a qual pode ser monitorada durante o teste.

Materiais

Ferramenta de teste

Consiste num pequeno cilindro de CBN policristalino com diâmetro igual a 2 mm. Este material contém 5-7% de ligante vitrificado.

Corpo-de-prova

Foi confeccionado de aço 100Cr6V. A composição química deste material está na Tabela 4.3. Através de um tratamento térmico atingiu-se a dureza de 64 HRc.

Tabela 4.3: Composição química do aço 100Cr6V

Elemento	C	Si	Mn	P	S	Cr
%	0,9 – 1,05	0,15 – 0,35	0,25 – 0,45	< 0,3	<0,025	1,35-1,65

Fluidos de Corte

Foram estudados fluidos sem e com aditivo, mantendo o mesmo óleo base (Tabela 4.4). Os fluidos foram aplicados através de um pequeno alimentador, bem próximo à zona de contato. O WZL não concordou em testar as formulações propostas no presente trabalho, assim foram utilizados os fluidos lá disponíveis e foram testadas as influências dos aditivos naqueles fluidos. Ao se estudar a interação tribológica das superfícies em estudo, foi possível entender melhor a ação de alguns aditivos no processo de retificação.

Tabela 4.4: Fluidos de corte usados no teste tribométrico.

Base	Viscosidade 40 °C (mm²/s)	Aditivo	FABRICANTE
Éster	8,3	sem	Fuchs
	10,4	S (inativo)	Fuchs
PAO (Polialfaolefina)	5,5	S (inativo)	Fuchs
	5,5	AW – P	Fuchs

Descrição do ensaio

No triboteste existe um contínuo contato entre o corpo-de-prova e a ferramenta, o que permite ter um conhecimento indireto do comportamento e tendência do processo de retificação.

As condições de teste escolhidas foram:

- Força Norma: $F_N = 1000 \text{ N}$
- Velocidade da ferramenta: $V_R = 1360 \text{ mm/s}$
- Tempo de atrito: $t_R = 5 \text{ min}$ e adicional de 2 min.

Para cada fluido de corte uma nova ferramenta de CBN foi utilizada. A influência dos aditivos sobre a superfície do aço foi analisada por MEV (microscopia de varredura) e por EDX (análise de espectroscopia por raios-X).

4.2.2 Constituintes da formulação do novo Fluido de Corte

Foram escolhidos alguns reagentes, a maioria da linha LIOVAC da Miracema-Nuodex produtos químicos, para compor a proposta de formulações de fluido corte. Estes reagentes são óleos vegetais, ésteres, aditivos para melhorar o desempenho dos fluidos, bactericida e anticorrosivo. Estes produtos não possuem componentes que sejam banidos pela legislação vigente. Os produtos utilizados estão listados abaixo:

- Óleo de mamona sulfonado 80% (Liovac 80);
- Éster metílico de ácido oléico (Liovac 3219);
- Bactericida para sistemas aquosos em geral, derivado de triasina (Bakzid 35);
- Aditivo anticorrosivo – Liovac 3147 (composição de ésteres sintéticos e alconolamidas de ac. Bórico);
- Éster sintético de poliglicol (Liovac 4260) – aditivo de lubricidade e agente emulsionante.

4.2.3 Misturas dos reagentes

Para a etapa de desenvolvimento de formulações trabalhou-se com pequenos volumes, cerca de 100 ml, para evitar desperdício de reagentes.

A rotina de mistura de reagentes foi a seguinte:

- 1) Determinar a concentração os reagentes;
- 2) Colocar primeiro a água em um béquer de 250 ml;
- 3) Adicionar a água a quantidade pré-estabelecida de óleo de mamona ou éster;
- 4) Agitar a mistura em um agitador magnético por alguns minutos;
- 5) Adicionar então o bactericida, anticorrosivo e o agente emulsionante;
- 6) Manter a solução em agitação por alguns minutos;
- 7) Esperar alguns minutos para verificar se a solução se desestabilizava;
- 8) Armazenar a solução em um frasco de vidro.

A formulação básica está demonstrada na tabela 4.5.

Tabela 4.5: Composição básica dos fluidos de corte.

Reagente	Porcentagem na fórmula %
Bactericida	5
Anticorrosivo	10
Agente emulsionante	5-10
Óleo de mamona ou éster	20-40
Água	40-50

Os reagentes como óleo de mamona, éster, água e agente emulsionante tiveram suas porcentagens variadas, gerando diversas combinações de concentrações.

Esta etapa consistiu em um trabalho de tentativas e erros. Foi necessário testar diversas composições, para obter um produto estável e com as características desejadas. Após a etapa laboratorial, seguiu-se o teste mecânico da formulação que consistiu em retificar peças com rebolo de CBN utilizando este fluido de corte. Através do comportamento do mesmo durante o processo e das variáveis de saída, pode-se concluir se a formulação é apropriada para a operação, pois muitas vezes apesar de estar dentro da qualidade desejada, no que se refere à estabilidade da solução, o fluido não possui um desempenho mecânico satisfatório.

4.2.4 Análises da qualidade do fluido de corte

Após a mistura dos reagentes, algumas análises qualitativas e quantitativas devem ser realizadas com a finalidade de verificar a qualidade do produto.

Oleosidade

A oleosidade é uma característica analisada qualitativamente. Coloca-se um pouco da solução nos dedos e esfregando os mesmos verifica-se se há um aspecto oleoso do fluido.

Determinação do pH

O pH da solução formulada foi determinado através de um medidor digital portátil da QUIMIS, modelo Q-400BI. O pH de um fluído de corte solúvel deve estar entre 9 e 11.

Viscosidade

O equipamento utilizado para a determinação da viscosidade dos fluidos formulados foi o viscosímetro tipo esfera. O procedimento experimental foi:

- 1- Preencher o tubo de queda do viscosímetro com 40 ml do fluído formulado.
- 2- Colocar a esfera de metal dentro do tubo com o fluído.
- 3- Fechar o tubo evitando vazamento.
- 4- Virar o tubo de queda e fazer a medida do tempo de queda da esfera entre as duas marcas externas (3 vezes).
- 5- Determinar a densidade da esfera, pesando e medindo seu volume.
- 6- Determinar a densidade do fluído, pesando um volume conhecido.

O cálculo da viscosidade do fluído é feito através da seguinte fórmula:

$$\eta = t(\rho_1 - \rho_2)K \quad (4.1)$$

onde: η - viscosidade dinâmica (MPa.s)

ρ_1 – densidade da esfera (g/cm³);

ρ_2 – densidade do fluído (g/cm³);

t – tempo de queda da esfera entre as duas marcas do tubo (s);

K – constante da esfera (0,13 MPa.cm³.g⁻¹)

Teste de corrosão

O objetivo desta análise é determinar as características anticorrosivas dos lubrificantes de base aquosa, usando como o material de teste cavacos de ferro fundido, em cima de papel de filtro. Como medida para corrosão, conforme este teste, mediu-se as manchas que se formaram no filtro quando os cavacos de ferro fundido foram umedecidos com fluido a ser testado misturado com a água.

A seguir estão descritos os materiais, reagentes e procedimento desta análise.

Materiais

- Provetas de 100 ml
- Placas de Petri, 100 mm (diâmetro)x15 mm (altura)
- Espátula de plástico
- Papel-filtro redondo com 90 mm de diâmetro
- Pipeta de 2 ml
- Peneiras de 4 e 8 mesh
- Cavacos de ferro fundido nodular

Reagentes

- Água destilada
- Ticloro etileno ou toluol
- Acetona

Procedimento

- Numa proveta de 100 ml preparar uma emulsão de óleo emulsionável a 5% ou conforme outra concentração indicada.
- Pesar 2 gramas dos cavacos de ferro fundido (verificar visualmente ausência de ferrugem nos cavacos) sobre o papel filtro acondicionado na placa Petri.
- Pipetar 2 ml da emulsão a ser testada e umedecer os cavacos uniformemente.
- Espalhar de maneira uniforme os cavacos sobre o papel filtro utilizando uma espátula de plástico.
- Cobrir a placa de Petri e deixar em repouso por 2 horas.
- Descartar os cavacos. Lavar o papel filtro suavemente em água de torneira. Mergulhar o papel filtro rapidamente em acetona. Esperar secar a temperatura ambiente e verificar visualmente o grau de corrosão.

Para se avaliar o grau de corrosão de um fluido de corte, observam-se os sinais de corrosão retidos no papel filtro, como indicado na Tabela 4.6.

Tabela 4.6: Critérios de avaliação do teste de corrosão

Corrosão	Significado	Superfície do papel filtro
0	Sem corrosão	Inalterado.
1	Vestígios de corrosão	No máximo 3 sinais de corrosão com menos de 1 mm de diâmetro.
2	Ligeira corrosão	Não mais que 1% da área do papel, porém mais manchas que no grau 1 ou com tamanho maior do que 1 mm.
3	Corrosão moderada	Acima de 1%, porém não mais que 5% da superfície.
4	Forte corrosão	Acima de 5% da superfície.

Biodegradabilidade

O método usado para investigar a biodegradabilidade do fluido de corte foi o *Ready Biodegradability : 301B CO₂ Evolution Test* adotado em 1992 (OECD,1997) . Esta análise foi realizada pelo laboratório BioAgri.

Neste teste usou-se um sistema de aeração de fluxo contínuo e para filtrar o ar foram utilizados vários potes com hidróxido de sódio. O teste foi conduzido em escuro, sob 20 até 25°C por 28 dias.

A biodegradabilidade do fluido de corte foi avaliada pela evolução do CO₂ que era absorvido pela solução de Ba(OH)₂ durante o período de teste. A evolução CO₂ foi determinada por titulação com HCL.

4.3 Testes de Retificação com Rebolos CBN

4.3.1 Corpos-de-prova

Os materiais utilizados na fabricação dos corpos-de-prova foram SAE 8640 e SAE 52100. A Tabela 4.7 mostra o tratamento e a dureza final para cada material utilizado.

Tabela 4.7: Dureza dos materiais utilizados na fabricação dos corpos-de-prova.

	MATERIAIS DOS CORPOS-DE-PROVA	
	SAE 8640	SAE 52100
TRATAMENTO TÉRMICO	Têmpera	Têmpera
DUREZA FINAL	52 HRc	55 HRc

Os corpos-de-prova foram confeccionados nas dimensões apresentadas na Figura 4.5 e 4.6, que representam os corpos-de-prova utilizados na retífica plana e cilíndrica, respectivamente.

Figura 4.5: Dimensões iniciais dos corpos-de-prova (mm) utilizados na retífica plana.

Figura 4.6: Dimensões iniciais dos corpos-de-prova (mm) utilizados na retífica cilíndrica.

4.3.2 Fluidos de corte

Nesta pesquisa optou-se pelo teste de dois tipos de fluidos de corte comerciais (um integral e outro semi-sintético – as fichas técnica estão disponíveis no anexo 1), água e fluidos formulados neste trabalho. Estes fluidos estão descritos a seguir:

- **Micro Corte 247 CS:** é um óleo de corte integral, formulado com óleos básicos selecionados e aditivos de última geração. Doado pela empresa Microquímica.
- **BioG 503 B:** é um fluido semi-sintético formulado a partir de matérias primas vegeto-animais completamente compatível com o meio ambiente. Doado pela empresa Microquímica.
- **Água**
- **Fluido formulado:** emulsão desenvolvida com óleo de mamona.

Antes da realização de cada experimento foi determinada a concentração e o pH de cada fluido de corte aquoso utilizado.

Medida de pH

O instrumento destinado ao monitoramento do pH foi o mesmo medidor portátil da QUIMIS, descrito anteriormente. Este foi calibrado com soluções tampão, com pH 4 e

6,89. O ajuste do valor lido no aparelho foi efetuado através de um parafuso localizado em sua parte superior, devido à solução utilizada.

Determinação da concentração

Para monitorar a concentração do fluido de corte foi utilizado um refratômetro manual, marca QUIMIS, modelo Q-107-1. Para a calibração do refratômetro foi necessário ajustar na posição 0 °Brix a intersecção entre a parte escura e a branca, utilizando água destilada. Este ajuste foi efetuado através de um parafuso localizado na parte superior da lente ocular do aparelho, devendo-se ajustar a intersecção na marca zero da escala.

4.3.3 Condições de usinagem

A condição de usinagem testada foi próxima a normalmente utilizada em um desbaste, verificando-se o desempenho de cada fluido de corte nesta condição. Como parâmetros de entrada, definiu-se a utilização de um único tipo de rebolo superabrasivo de CBN, com uma única condição de dressagem, com fluido de corte aplicado a uma única vazão. Os testes foram realizados em duas máquinas, uma retífica cilíndrica CNC e uma retífica plana convencional. As Tabelas 4.8 e 4.9 explicitam as condições de operação para cada máquina de trabalho.

Tabela 4.8: Condições de operação aplicadas nos testes de retificação cilíndrica.

DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
CORPO DE PROVA	SAE 52100, 55 HRc, diâmetro da peça $d_w = 48,0$ mm e 35 mm de comprimento
REBOLO	Rebolo de CBN vitrificado B181, concentração 125 (31,25%) dressagem: eixo cruzado usando disco de diamante eletrodepositado (velocidade do rebolo na dressagem $v_s=45$ m/s, velocidade periférica do disco dressador $v_r=38$ m/s, velocidade transversal $v_d = 100$ mm/min, profundidade de dressagem $a_d=2$ μ m (no raio))
CONDIÇÕES DE RETIFICAÇÃO	Velocidade de corte $v_s = 80$ m/s; velocidade de avanço $v_f = 2,6$ mm/min; material removido = 10 mm, largura de retificação (b) = 8 mm, rotação da peça = 300 rpm, vazão do fluido de corte = 65 L/min. Número de peças retificadas por teste: 10.
RETIFICA CILÍNDRICA CNC	Zema modelo G 800 HS
PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	Rugosidade da peça e desgaste radial do rebolo.

Tabela 4.9. Condições de operação aplicadas nos testes de retificação plana.

DESCRIÇÃO	CARACTERÍSTICAS
CORPO DE PROVA	SAE 8640, 52 HRc, largura da peça = 18,0 mm e 170 mm de comprimento e 40,0 mm de altura.
REBOLO	Rebolo de CBN vitrificado B181, concentração 125 (31,25%) dressagem usando disco de diamante (velocidade do rebolo na dressagem $v_s=33\text{m/s}$, velocidade periférica do disco dressador $v_r=1,5\text{m/s}$, profundidade de dressagem $a_d=10\text{ }\mu\text{m}$).
CONDIÇÕES DE RETIFICAÇÃO	Velocidade de corte $v_s = 33\text{ m/s}$; velocidade da peça= $11,5\text{ mm/s}$; largura de retificação (b) = $6,5\text{ mm}$. Número de peças retificadas por teste: 2; profundidade de corte $a = 25\text{ }\mu\text{m}$.
RETIFICA PLANA CONVENCIONAL	Ferdimat FRPH-600
PARÂMETROS DE AVALIAÇÃO	Rugosidade da peça, força normal e tangencial e desgaste radial do rebolo.

A fim de se avaliar o desempenho dos diferentes fluidos de corte, definiu-se então as seguintes variáveis de saída:

- **Rugosidade:** para a medição da rugosidade R_a (μm) utilizou-se um rugosímetro portátil Taylor Hobson. Os *cut-offs* utilizados foram $0,8\text{ mm}$ para as peças cilíndricas e $0,25\text{ mm}$ para as peças retangulares. Optou-se por este *cut-off* porque a largura de medida era pequena ($6,5\text{ mm}$).
- **Desgaste radial do rebolo:** para a medição do desgaste radial do rebolo, utilizou-se o mapeamento acústico da superfície do rebolo (retificação cilíndrica) e impressão do perfil do rebolo em uma lâmina metálica (retificação plana).

4.3.4 Descrição do banco de ensaios

Retificação cilíndrica

Um programa CNC foi editado para fazer a retificação e analisar o desgaste do rebolo. Este programa consiste de três partes:

- localização da peça (X,Z), garantido assim que sempre a retificação ocorrerá em uma mesma posição no rebolo
- desbaste
- toque do dressador no rebolo em três pontos, um na área supostamente desgastada, e os outros um a esquerda e outro a direita do primeiro toque, onde o rebolo não sofreu desgaste. Esta etapa tem a finalidade de avaliar o desgaste.

Também editou-se o programa de dressagem, nesta etapa dados de emissão acústica são coletados para analisar o desgaste.

As peças que foram utilizadas neste teste possuem três colos, como mostrado na Figura 4.6. Cada colo foi retificado com um fluído diferente, retirando 10 mm no diâmetro.

A rotina do experimento para avaliar o desgaste do rebolo CBN foi:

- 1) Dressagem do rebolo
- 2) Antes de colocar a peça na máquina, media-se os diâmetros interno e externo, e atualizava estes dados no programa de retificação.
- 3) localização da peça (X, Z), através do toque do rebolo (etapa executada pelo programa).
- 4) Desbaste de 10 mm, controlado pelos dados de emissão acústica e potência.
- 5) O dressador tocava em três pontos do rebolo, em área desgastada e não desgastada, o programa capturava estes valores.
- 6) Fazia esta rotina para 10 colos e depois dressava o rebolo. A dressagem foi acompanhada pelos dados de emissão acústica, através dos quais podia-se observar se o rebolo já estava limpo e o quanto havia desgastado pela contagem de passes de dressagem.

A condições de usinagem foram ajustadas de modo que ao utilizar óleo integral, a potência consumida não ultrapassasse 75%, pois quando fossem utilizados os outros

fluidos de corte haveria um maior consumo de potência. Os testes foram realizados com velocidade de corte de 80 m/s; avanço de 2,6 mm/s , rotação da peça igual a 300 rpm e vazão do fluido de corte de 65 l/min.

Nos ensaios foi utilizado, para a aplicação do fluido de corte, um bocal tipo sapata. Este bocal foi desenvolvido no laboratório de otimização de processos de fabricação (OPF). A Figura 4.7 mostra o desenho técnico do bico de sapata utilizado. Este modelo de bocal oferece um melhor contato rebolo/fluido de corte.

Figura 4.7: Desenho técnico do bico de sapata.

Trabalhou-se com rebolo de CBN com ligante vitrificado: A Figura 4.8 apresenta o desenho técnico do rebolo de CBN que foi utilizado.

Figura 4.8: Desenho técnico do rebolo utilizado.

Em cada etapa da dressagem foi removida uma camada de CBN de 2 μm ao longo de todo o perfil, de cinco regiões, conforme apresentado na Figura 4.9.

Figura 4.9: Regiões do perfil do rebolo dressadas.

O sistema de dressagem está apresentado na Figura 4.10, que mostra o rebolo em contato com disco dressador no interior da máquina.

Figura 4.10: Sistema de dressagem

A metodologia de dressagem, desenvolvida pelo aluno de doutorado Eraldo Jannone da Silva, consiste no referenciamento do disco dressador, com a captura de três coordenadas no perímetro do disco. Estas coordenadas são identificadas como posição X#500 (posição X do dressador), Z#501 (posição Z à direita do disco dressador) e Z#516 (posição Z à esquerda do disco dressador). Os demais parâmetros envolvidos são:

diâmetro do disco dressador (#518), largura do rebolo (#517) e altura do segmento (#527).

O programa de dressagem permite a execução prévia do referenciamento por emissão acústica (EA). As dressagens das laterais e da face são efetuadas com deslocamentos lineares em G01 com velocidades de avanço específicas. As dressagens dos raios esquerdo e direito são executadas através de uma interpolação circular G03 no sentido anti-horário, com raio igual ao raio do disco dressador mais o raio a ser executado.

Os fluidos de corte utilizados nesta etapa foram: água, óleo integral e semi-sintético, com concentrações 3 e 20%. O fluido semi-sintético é um óleo de base vegetal e contém boro na forma de amida borada. O reservatório utilizado para a aplicação destes fluídos foi adaptado à máquina e tem capacidade de 250 litros. Utilizou-se um reservatório externo por economia e para facilitar a troca dos fluidos, pois o tanque acoplado à máquina tem capacidade de 500 litros.

Os testes de desbaste foram realizados sempre na mesma posição na face do rebolo. Cada colo da peça retificada tinha largura de 8 mm e a face do rebolo 20 mm. Após feita a localização da peça pelo rebolo, este era posicionado de modo que, o colo a ser retificado estaria em contato com o lado esquerdo do rebolo (Figura 4.11). Após diversas retificações, o perfil esperado do rebolo seria igual ao demonstrada na Figura 4.12 a), se ocorresse desgaste. Era feito o toque do dressador em três pontos, como mostra a Figura 4.12 b). Um ponto de toque seria na área desgastada (linha azul), um ponto à direita (linha verde) e outro à esquerda (linha vermelha) da área desgastada, a qual seria o valor de referência. Com estes valores seria possível avaliar o desgaste radial do rebolo.

Figura 4.11: Desenho esquemático do posicionamento da peça para o desbaste.

Figura 4.12: a) Área desgastada do rebolo e b) pontos onde houve o toque do dressador

A Figura 4.13 apresenta uma vista geral da retificadora Zema utilizada nos testes de retificação cilíndrica.

Figura 4.13: Vista geral da retificadora ZEMA Numerika G800 –HS utilizada nos experimentos.

A Figura 4.14 apresenta o programa de aquisição de dados, desenvolvido na linguagem LABVIEW 6.1, o qual permitiu a aquisição da emissão acústica, potência gerada pelo motor e rotação instantânea da ferramenta em tempo real. Nesta Figura destacam-se as variáveis de saída medidas.

Figura 4.14: Tela do programa de aquisição de dados

O banco de ensaios era constituído de uma retificadora cilíndrica externa CNC instrumentada, a qual possibilitava a aquisição de sinais de emissão acústica e de corrente elétrica consumida pelo motor de acionamento do rebolo durante a operação de retificação.

Os sinais de emissão acústica foram adquiridos utilizando-se o sensor específico para cada sinal.

Retificação Plana

Com o intuito de trabalhar-se com menores volumes de fluido de corte e aumentar o tempo de contato rebolo/fluido de corte, optou-se por realizar alguns testes na retificação plana convencional.

O rebolo de CBN utilizado nestes testes possui a mesma concentração e porosidade do usado na retificadora cilíndrica, tendo diferenças somente nas dimensões, 250 mm de diâmetro externo, 13 mm de largura e 5 mm de espessura da camada de CBN.

Para realizar os testes na retificadora plana foram confeccionados corpos de prova com as dimensões especificadas no item 4.3.1, Figura 4.5. Para fixar a peça ao dinamômetro, foi projetado um suporte que ficasse fixo neste equipamento, permitindo uma fácil troca da peça. O conjunto com o suporte, dinamômetro e peça pode ser visto na Figura 4.15.

Figura 4.15: Vista lateral da peça, do suporte e dinamômetro.

Para realizar uma dressagem do rebolo de CBN, foi projetado e construído um dressador rotativo. Os dados de projeto estão no anexo 2. A Figura 4.16 mostra uma foto do dressador colocado na mesa da retificadora plana. A dressagem foi realizada a seco, discordante e com profundidade de dressagem igual a 10 μm .

Figura 4.16: Vista frontal e lateral do dressador.

Os testes de desbaste foram realizados sempre na mesma posição na face do rebolo. A peça retificada tinha largura de 18 mm e a face do rebolo 13 mm, sendo retificada apenas a metade (6,5 mm), permitindo retificar os dois lados da peça (Figura 4.17). O posicionamento do rebolo foi feito manualmente, mas de modo que sempre retificasse com o mesmo lado do rebolo. Após diversas retificações, o perfil esperado do rebolo seria igual ao demonstrado na Figura 4.18, sendo possível medir o desgaste radial do rebolo.

Figura 4.17: Vista em perspectiva da peça após a retificação.

Figura 4.18: Perfil esperado do rebolo após diversas retificações.

A rotina da experimentação para cada fluido estudado foi a mesma. Primeiramente dressava-se o rebolo de CBN, deixando a superfície uniforme. Em seguida retificavam-se os dois lados da peça, com profundidade de passe igual a 25 μm . Através de um programa desenvolvido na linguagem LABVIEW, as forças normal e tangencial, captadas através do dinamômetro, foram monitoradas. Os sinais após serem tratados eram transferidos para o computador através cartão de aquisição modelo DAQCard-6062E da National Instruments que recebia os sinais de uma caixa de conexão.

4.3.5 Procedimentos para a medição do desgaste radial do rebolo

Para a medição do desgaste radial do rebolo foram utilizadas duas técnicas: emissão acústica na dressagem e impressão do perfil do rebolo em uma peça de aço ABNT 1020. A primeira foi aplicada somente na retificação cilíndrica, pois a máquina é

moderna, sendo possível captar sinais acústicos durante os processos de retificação e de dressagem. Na retífica plana não foi possível empregar esta técnica, pois o sinal gerado não representava emissão acústica, mas sim ruídos da rede elétrica e de rolamentos do motor. A segunda técnica foi aplicada nos dois processos.

Emissão acústica

Nos experimentos conduzidos neste trabalho, o sinal de emissão acústica foi tratado na unidade Amplificadora/Filtro/RMS Sensis DM42 e a conversão analógico-digital dos sinais adquiridos foi feita por uma placa de aquisição de dados A/D. Utilizando-se o programa Labview, rotinas de aquisição e de manipulação dos dados de EA foram elaboradas, permitindo-se o armazenamento dos dados no microcomputador e o tratamento destes, gerando-se os mapas acústicos da superfície do rebolo durante a dressagem e durante a retificação dos corpos-de-prova.

O desgaste foi medido após a realização de cada ensaio, utilizando o mapeamento acústico da superfície do rebolo. O procedimento de medição é descrito a seguir.

Antes da realização de cada ensaio, o rebolo era dressado, em sua largura total, com as condições de dressagem citadas anteriormente, cujas funções eram a correção de seu perfil e a afiação do mesmo, conferindo-lhe a agressividade necessária. Utilizando-se o sistema de mapeamento acústico da superfície do rebolo, adquiria-se a imagem da superfície do mesmo, durante a operação de dressagem, a qual é apresentada na Figura 4.19.

Figura 4.19: Mapa acústico da superfície do rebolo após a operação de dressagem realizada antes de cada ensaio.

Ao final de cada ensaio, a superfície do rebolo apresentava o seguinte perfil, conforme apresentado na Figura 4.20.

Figura 4.20: Esquema do perfil do rebolo após a realização de cada ensaio (desgaste radial fora de escala)

Em virtude da utilização de apenas uma faixa da largura total do rebolo ($b = 8$ mm), ao final de cada ensaio, o rebolo apresentava o mapa mostrado na Figura 4.20, onde, em decorrência do processo de retificação, o rebolo apresentava um desgaste radial Δ_r , na largura de retificação utilizada. A superfície não desgastada era então utilizada como referência para a determinação deste desgaste radial.

Utilizando-se o sistema de mapeamento acústico, ao final de cada ensaio, eram efetuadas dressagens sucessivas de profundidade igual a $2 \mu\text{m}$ no diâmetro, gerando-se o mapa correspondente a cada ciclo de dressagem. No início, o dressador tocava apenas a superfície não desgastada do rebolo, já que na largura de retificação, o rebolo havia sofrido um desgaste radial Δ_r . Sucessivos passes de dressagem eram efetuados, computando-se a soma das profundidades já alcançadas.

O processo de dressagem era interrompido quando ocorria a uniformização completa do rebolo, conforme apresentado na Figura 4.21, através da análise visual do mapa acústico da dressagem gerado. Esta figura apresenta dois mapas da superfície do

rebolo. Adicionalmente, o tempo t_d final é comparado ao tempo de referência, certificando-se que o contato pleno em toda a largura do rebolo era atingido. O número total de passes de dressagem é então multiplicado pela profundidade de dressagem empregada, resultando no valor de desgaste radial do rebolo Δ_r no ensaio realizado.

Figura 4.21: Rebolo uniformizado, com o dressador tendo removido a totalidade da superfície não desgastada.

Impressão do perfil do rebolo

Nesta técnica o desgaste radial do rebolo foi analisado pela impressão do perfil desgastado. No final de cada ensaio, uma lâmina de aço 1020 foi fixada no suporte sobre a qual uma retificação de mergulho era feita a uma profundidade que permitia avaliar o desgaste do rebolo. Como durante o processo de retificação, apenas uma parte da largura do rebolo é desgastada, a outra serve de referência para a medição do desgaste radial. A Figura 4.22 exemplifica a técnica de medição.

Figura 4.22: Representação esquemática da medição do desgaste do rebolo pela técnica de impressão do perfil do rebolo.

Com a ajuda de um projetor de perfil, pode-se avaliar o perfil do rebolo impresso na lamina de aço inox.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados obtidos nos experimentos descritos acima.

5.1 Análise da existência da reação entre CBN e fluido a base de água

Segundo Hitchinner (1999) e Leal (1993) pode ocorrer reação química entre o rebolo de CBN e o vapor d'água, proveniente da vaporização da água contida nos fluidos solúveis, como citado no item 2.2.3. Assim sendo, realizou-se teste de retificação com água para verificar se a reação química entre o CBN e vapor d'água ocorre e se é significativa no desgaste do rebolo. Amostras de água foram coletadas antes e depois do teste de retificação.

Os testes realizados com o pequeno reservatório inserido no interior da máquina não foram conclusivos. Os valores lidos estavam abaixo do limite de detecção, onde não há confiabilidade dos resultados, podendo-se concluir que não há quantidade significativa de boro na amostra.

A partir da inviabilidade de trabalhar com pequeno reservatório, optou-se por realizar estes testes em uma retificadora plana convencional, na qual foi acoplado um tanque de fluido de corte com capacidade de 65 litros.

Como apresentado na Tabela 5.1, uma quantidade maior de boro foi detectada na água após a retificação, quando comparada com a análise da água antes dos ensaios. Considerando que o tanque utilizado tem capacidade igual a 65 litros, o incremento na quantidade de boro na água depois da retificação foi de 9,75 mg. Este pequeno valor não

é significativa para o desgaste do rebolo analisado. Para este ensaio, o volume desgastado do rebolo de CBN foi $0,0485 \text{ cm}^3$, o que corresponde a 88,949 mg de Nitreto Cúbico de Boro (CBN). Portanto, a quantidade de boro detectada na análise química corresponde a 10,96% da quantidade removida do rebolo durante o processo de retificação. Esta quantidade de boro na água de retificação pode ser devida as minúsculas partículas de CBN que se dissolveram na água, e não necessariamente Óxido de Boro (B_2O_3), produto da reação investigada.

Tabela 5.1: Resultados da análise de boro na retífica plana.

<i>Amostra</i>	<i>Concentração (mg/L)</i>
Água antes da retificação	0,04
Água depois da retificação	0,19

Se fluidos de corte aquosos fossem usados, os mecanismos de desgaste poderiam ser considerados como uma consequência do aumento do atrito e do choque térmico dos grãos, e uma pequena contribuição da degradação química.

Como os testes realizados não foram conclusivos quanto à existência ou não da reação química proposta por Hitchiner (1999), optou-se por simular uma condição ideal para que esta reação ocorresse. Segundo Ohlweiller (1971) o nitreto de boro cristalino (forma presente nos rebolos de CBN) é quimicamente muito inerte. Não sofre alteração quando aquecido em presença de ar, oxigênio, hidrogênio, iodo, etc. Este composto é hidrolisado pelo vapor d'água ao rubro dando B_2O_3 e NH_3 . Um reator de quartzo foi utilizado para promover o contato dos grãos de CBN e o vapor d' água em altas temperaturas, oferecendo assim uma condição ideal para a reação acontecer.

As Figuras 5.1, 5.2 e 5.3 mostram os espectros obtidos para amostra antes da reação, depois da reação a 400°C e da reação a 600°C , respectivamente. Em todos os espectros são obtidos três picos principais (picos pretos), o quais são característicos do CBN. Os picos identificados na cor preta são os que foram lidos na análise e os picos vermelhos são os esperados para o CBN e os azuis são os esperados para o óxido de

boro, nos espectros foram colocados os picos lidos e esperados, podendo assim fazer uma análise dos compostos presentes nas amostras. Nas amostras que sofreram reação, ou melhor, tiveram contato com vapor d'água, observou-se que não coincidem os picos esperados para o B_2O_3 com os detectados durante a análise, os quais indicam apenas a presença de CBN. Assim, conclui-se que mesmo em condições ideais a reação entre os grãos de CBN e o vapor d'água não acontece, o mesmo pode ser concluído para o processo de retificação. O desgaste do rebolo durante o processo é influenciado principalmente pelo atrito peça/rebolo e o choque térmico.

Figura 5.1: Espectro da amostra antes de colocar no reator.

Figura 5.2: Espectro da amostra depois da reação a 400 °C.

Figura 5.3: Espectro da amostra depois da reação a 600 °C.

Após verificar que a água não provoca um aumento no desgaste devido à reação química entre os grãos de CBN e o vapor d'água gerado durante a retificação, concluiu-se

que é possível trabalhar com um fluido de corte solúvel, sem provocar uma degradação química considerável do rebolo de CBN.

5.2 Análise dos efeitos dos aditivos na formulação dos fluidos de corte.

Éster sem aditivos

Os resultados das análises de MEV e EDXS para as amostras da superfície da ferramenta obtidas após o teste tribométrico com éster sem aditivo estão apresentados na Figura 5.4 e 5.5. Na Figura 5.4a (amostra ampliada 1000 vezes), pode-se observar a superfície da ferramenta não uniforme em termos de composição. Nas áreas claras (pontos 1 e 2 da Figura 5.4a) foi identificada somente a presença de elementos do metal, ou seja, a área branca representa o metal aderido sendo que não ocorreu reação química entre os componentes do sistema tribológico. Esta conclusão foi extraída a partir da análise de Raio-X onde Fe (ferro) e Cr (cromo), elementos presentes no aço, foram identificados. Porém nas regiões escuras (ponto 3), através da análise de Raio-X, Al (alumínio) e O (oxigênio) foram encontrados, somente elementos do ligante do CBN (alumina-borosilicatos). O elemento boro não foi identificado na região escura porque a análise de EDX só reconhece os elementos com peso atômico igual ou maior do que o carbono, como o boro possui um valor de peso atômico menor não foi identificado no espectro. Também, se o ferro e o oxigênio existem numa mesma área, pode-se assumir que (FeO) (camada de óxido de ferro) está presente.

Narutaki e Yamane (1997) e König e Neises (1993) fizeram testes para investigar a reatividade entre CBN e ferro. Estes autores também concluíram que não há reação química entre os grãos de CBN e o ferro puro, mas eles observaram algumas mudanças da composição química do ligante. De acordo com Schey (1984), para reduzir o atrito entre a peça e a ferramenta é necessária a formação de um filme lubrificante sobre a superfície do metal e se este filme não é contínuo ou não efetivo, um alto contato peça-ferramenta ocorre resultando em alto desgaste. Provavelmente, neste experimento, a camada ou filme formado foi insuficiente para evitar o contato entre CBN e aço, e conseqüentemente a adesão do metal na superfície da ferramenta.

Figura 5.4: Análises MEV e EDXS da superfície da ferramenta, que foi testada com éster sem aditivo: (a) SEM (ampliada 1000 vezes), b) EDXS para o ponto 1, c) EDXS para o ponto 2, e d) EDXS para o ponto 3.

A análise microscópica da superfície da ferramenta é demonstrada na Figura 5.5. A primeira imagem mostra toda a superfície da ferramenta. É possível observar que as regiões escuras representam a maior parte da superfície. No último parágrafo, foi descrito que estas regiões são compostas por ligantes da ferramenta na qual não houve adesão do metal. Provavelmente a temperatura do processo foi alta, devido ao atrito entre os componentes do tribosistema. Este fato pode ajudar a formação da camada de metal aderida, aumentando o desgaste da ferramenta. Porém, ao usar fluido de corte sem aditivo, observou-se uma alta interação entre o ligante vitrificado e o aço por adesão triboquímica do metal na superfície da ferramenta.

Figura 5.5: Análise microscópica da ferramenta: a) 40x, b) 200x e c) 1000x.

Éster com aditivo de enxofre ativo

A Figura 5.7 mostra o efeito do aditivo a base de enxofre ativo no teste tribométrico. A superfície da ferramenta foi analisada por MEV e EDX. Na imagem da amostra foram escolhidos três pontos na superfície para análise de composição, incluindo regiões claras e escuras. Os diagramas 5.7b e 5.7c representam as regiões claras e os picos obtidos na análise de EDX caracterizam a presença de O, S (enxofre) e elementos do aço, tais como, Fe e Cr. A presença de S caracteriza a formação do filme lubrificante. Walter (2002) em seus experimentos verificou que o sulfito de ferro foi gerado na superfície do aço. O mecanismo da ação do aditivo de enxofre foi sugerido por Schey (1984), este mecanismo de reação envolve a adsorção na superfície do metal, quebrando as ligações S-S, e – em elevadas temperaturas – reação do enxofre com o metal, que alguns radicais livres penetram no lubrificante ou reagem com o metal. A Figura 5.6 descreve a ação deste tipo de aditivo. Esta camada, que é quimisorvida, protege a superfície efetivamente se as condições da área de atrito não são excessivamente severas.

Figura 5.6: Possível modelo de ação do aditivo de enxofre (Adaptado de Schey, 1984).

A Figura 5.7d mostra a composição das regiões escuras. Nestas regiões foi observada a presença de elementos do ligante vitrificado (Al, Si (silício), O) indicando que nesta região da ferramenta não houve adesão do metal.

Também de acordo com Iliuc (1980), adsorção ocupa um importante lugar no desenvolvimento da reação. Antes da reação, o aditivo é adsorvido na superfície do metal. Quanto mais rápido o aditivo é adsorvido, maior é a concentração na superfície e maior a taxa de reação. A camada adsorvida também assegura a separação da superfície a baixas velocidades.

Reação entre a superfície metálica e o aditivo pode também reduzir a adesão. Nos pontos de contato entre a superfície onde a temperatura é alta, o aditivo previne a formação de uma ponte de adesão por reação com a superfície metálica. Como as asperidades são os pontos de contato inicial, o processo pode ocasionar polimento da superfície (polimento químico) conforme Iliuc (1980). Este fato explica porque na maior parte da superfície da ferramenta ocorreu adesão do metal. Alguns pontos não houve reação entre o aço e o aditivo, conseqüentemente a camada de proteção não foi formada, permitindo que o metal fosse aderido a ferramenta.

Figura 5.7: Análises de MEV e EDXS da superfície da ferramenta, que foi testada com éster com aditivo de enxofre: (a) MEV (ampliada 1000 vezes), b) EDXS para o ponto 1, c) EDXS para o ponto 2, e d) EDXS para o ponto 3.

A Figura 5.8 apresenta diferentes ampliações da imagem da superfície da ferramenta. Estas figuras mostram que a maioria da superfície é composta pela região clara, ou seja, a camada formada pela reação entre o ferro e o enxofre sobre a superfície facilita a adesão, de uma forma mais uniforme do metal na superfície da ferramenta existindo poucas áreas onde o ligante vitrificado não sofreu adesão de metal e filme lubrificante.

Figura 5.8: Análise microscópica da ferramenta: a) 40x, b) 200x e c) 1000x.

A Figura 5.9 é uma comparação entre as amostras testadas com e sem aditivo de enxofre. Quando o éster com aditivo foi usado, a superfície da ferramenta ficou mais uniforme. Pode-se dizer que uma camada de metal e filme lubrificante foi formada na superfície da ferramenta. Esta camada evita a adesão de uma grande quantidade de metal

num ponto da superfície da ferramenta, como observado quando éster sem aditivo foi usado.

Figura 5.9: Superfície da ferramenta: a) éster sem aditivo e b) éster com aditivo de enxofre.

É importante considerar que se a efetividade dos aditivos E.P e antidesgaste é devida à camada de reação formada sobre a superfície metálica em contato; diante disto pode-se assumir que existe uma relação direta entre efetividade e reatividade. A reatividade do aditivo deve ser controlada, isto é, a reação entre a superfície metálica e o aditivo deve tomar lugar somente sobre a superfície de atrito. Excessiva reatividade pode causar corrosão e baixa reatividade pode não permitir a formação e preservação da camada protetora sobre a superfície de atrito (Iliuc, 1980).

Efeito de diferentes tipos de aditivos

Dois tipos de aditivos foram avaliados, enxofre e fósforo. Ambos os aditivos foram adicionados ao fluido base Polialfaolefina (PAO). A Figura 5.10 mostra a análise da superfície e sua composição química. A análise de EDX mostra a existência de enxofre na superfície do metal quando PAO contendo enxofre foi utilizado (Figura 5.10). Diferentemente, o elemento P (fósforo) não foi detectado na superfície da ferramenta quando o aditivo fósforo foi adicionado ao PAO (Figura 5.10b). Provavelmente o FeO foi

formado sobre a superfície do metal em ambos os testes e posteriormente aderida à superfície da ferramenta. Segundo Zhao (1996) isto ocorre por causa das altas temperaturas da superfície atritada, causada por altas velocidades, acelerando a difusão do elemento e dissolução química na ferramenta.

Walter (2002) observou também que o uso de fósforo não induz a camada de reação baseada no fosfato de ferro, como demonstrado na Figura 5.10a e 5.10b. Devido à passividade da molécula do aditivo de fósforo, somente ocorre uma adsorção sobre a superfície do metal.

A presença do oxigênio é também uma pré-condição indispensável para a reação dos aditivos EP (Heinicke et al, 1984).

Hershberger et al (2004) concluíram que uma fina camada de FeO é formada durante o desgaste por difusão do O₂ presente no óleo. O desgaste causa a formação de uma fina camada cristalina de FeO quando PAO foi usado. Camadas da superfície podem ter lenta difusão de O no metal ou os aditivos podem ter reação com o O no óleo, concordando com os resultados deste trabalho.

Figura 5.10: Análises de MEV e EDXS da superfície da ferramenta, que foi testada com PAO com aditivo de enxofre e fósforo: (a) SEM (ampliada 500 vezes) para P, b) EDXS para o PAO com P, (c) SEM (ampliada 500 vezes) para S, e d) EDXS para PAO com S.

Os aditivos são relativamente não efetivos na redução do atrito, mas são geralmente indispensáveis em limitar a transferência de metal e desgaste (Schey, 1984).

Para clarificar as reações triboquímicas dos aditivos, a superfície do metal deveria ser examinada por XRD (Espectroscopia de difração por Raio-X). Nesta análise, é possível identificar quais são os produtos da reação, por exemplo, FeS e FeO.

Comparação do desempenho mecânico dos aditivos

Além da análise qualitativa do efeito dos aditivos nas formulações dos fluidos de cortes, foi realizada também uma análise quantitativa levando em consideração o desempenho mecânico dos fluidos aditivados ou não durante o teste tribométrico.

A Figura 5.11 mostra o efeito do aditivo de enxofre sobre o coeficiente de força de atrito/força normal em função do tempo de atrito como um indicador no material dos efeitos do tribosistema sobre o mesmo. Observa-se que o fluido à base de éster com aditivo de enxofre possui valores do coeficiente de força superior ao do fluido sem o mesmo aditivo, isto indica que houve um maior contato entre a ferramenta e a peça. Este maior contato implica em maiores temperaturas na zona de contato, favorecendo a reações de adesão e adsorção na superfície da peça. Mesmo tendo a viscosidade maior, $10,4 \text{ mm}^2/\text{s}$ em comparação com o fluido sem aditivo, $8,3 \text{ mm}^2/\text{s}$, o fluido com aditivo, mais viscoso, forneceu um maior valor do coeficiente de força. A partir deste resultado é possível concluir que fluido a base de éster tem uma maior capacidade de lubrificação que o fluido aditivado com enxofre, pois apresentou menores valores de força de atrito.

Figura 5.11: Coeficiente de atrito (força de cisalhamento/força normal) em função do tempo de atrito para fluidos a base de éster aditivados e não aditivados.

Na Figura 5.12 tem-se uma comparação do efeito de diferentes aditivos, enxofre (S) e fósforo (P). O fluido base utilizado foi o Polialfaolefina (PAO). Os fluidos utilizados neste teste com os diferentes aditivos possuem a mesma viscosidade $5,5 \text{ mm}^2/\text{s}$. O PAO com fósforo em sua formulação apresentou valores do coeficiente de atrito maiores do que o obtidos com PAO com enxofre. Este fato indica que a camada formada do filme lubrificante ou a camada de reação para o PAO + S é mais uniforme, proporcionando um maior contato da camada intermediária com o metal, assim diminuindo o valor do coeficiente de atrito.

Figura 5.12: Coeficiente de atrito (força de cisalhamento/força normal) em função do tempo de atrito para fluidos com diferentes aditivos.

Portanto, através destes testes foi possível verificar que na retificação com CBN os aditivos EP e antidesgaste aumentam o atrito entre a peça e a ferramenta, não formam um filme uniforme sobre a superfície da peça, não justificando assim a sua inserção nas formulações dos fluidos de corte, pois os benefícios não se mostraram muito significativos de forma a justificar sua inclusão no que se refere ao atrito e também formaram uma camada de metal e filme lubrificante mais uniforme sobre a superfície do abrasivo. Entretanto deve-se observar que as quantidades de enxofre não devem ser muito altas, apesar da legislação não limitar essa quantidade.

5.3 Formulação de Fluidos de Corte

Considerando que a água não é um agravante em termos de desgaste químico do rebolo, os fluidos aquosos podem ser usados em retificação com CBN e para diminuir o desgaste deve desenvolver um fluido de corte emulsionável com maior lubricidade, semelhante ao óleo integral. A partir desta visão, foram desenvolvidas algumas formulações, utilizando como base o óleo de mamona e éster metílico de ácido oléico. Os reagentes utilizados foram:

- Óleo de mamona sulfonado 80% (Liovac 80);
- Éster metílico de ácido oléico (Liovac 3219);
- Bactericida para sistemas aquosos em geral, derivado de triasina (Bakzid 35);
- Aditivo anticorrosivo – Liovac 3147 (composição de ésteres sintéticos e alconolamidas de ac. Bórico);
- Éster sintético de poliglicol (Liovac 4260) – aditivo de lubricidade e agente emulsionante.

A seguir serão descritas as composições testadas.

Fórmula 1

A fórmula 1 tem como base óleo de mamona sulfonado e sua composição está descrita na tabela 5.2

Tabela 5.2: Composição da Fórmula 1

Reagente	Composição (%)
Bactericida	5
Agente emulsionante	5
Anticorrosivo	20
Óleo de mamona sulfonado	25
Água	45

Durante a formulação, observou-se que o anticorrosivo é muito viscoso, dificultando a solubilização dos reagentes, concluindo que é necessário diminuir sua concentração. Agitando a solução em uma proveta verificou a formação de espuma, a

qual se dissipa rapidamente. O pH foi de 10,25 e a viscosidade 25,76 mPa.s. A formulação se mostrou estável, ou seja, não houve separação das fases.

Fórmula 2

Nesta formulação procurou-se manter concentrações semelhantes às da fórmula 1, trocando soc mente o reagente base para éster metílico de ácido oléico e também diminuiu-se a concentração do anticorrosivo. A Tabela 5.3 descreve a composição desta formulação.

Tabela 5.3: Composição da Fórmula 2

Reagente	Composição (%)
Bactericida	5
Agente emulsionante	5
Anticorrosivo	10
Éster	20
Água	60

Após a mistura e agitação dos reagentes, observou-se a formação de uma solução homogênea, porém com aspecto leitoso. O pH da formulação medido foi 10,17 e a viscosidade 18,25 mPa.s. Ao agitar a solução em uma proveta, não foi observada a formação de espumas. Contudo, após 24 horas houve separação das fases, o que permitiu concluir que a solução é instável. Portanto, para desenvolver uma formulação a base de éster é necessário ter outros produtos químicos, conhecidos como tensoativos, que auxiliam na solubilização do éster na solução. O balanço da fórmula com tensoativos é difícil e resulta de várias tentativas e erros.

Fórmula 3

A intenção ao desenvolver esta fórmula foi ter um produto semelhante em viscosidade e oleosidade ao óleo integral. Portanto, adicionou-se uma maior porcentagem de óleo de mamona sulfonado (40%). A composição final deste fluido está indicada na Tabela 5.4.

Tabela 5.4: Composição da Formula 3

Reagente	Composição (%)
Bactericida	5
Agente emulsionante	5
Anticorrosivo	10
Óleo de mamona sulfonado	40
Água	40

A formulação se mostrou estável, com aspecto bem viscoso (viscosidade igual a 105,56 mPa.s) e com pH igual a 10,77, sendo considerada apta para atuar como fluido de corte na operação de retificação. Foi realizado então teste mecânico, como o fluido ficou viscoso, fez uma pequena diluição em água de 61,5%. Este fluido recebeu o nome de OPF. A Figura 5.13 mostra o fluido OPF no teste de retificação.

Figura 5.13: Vista do teste de retificação utilizando fluido OPF.

Durante o teste de retificação, verificou-se a formação de espumas, as quais foram controladas com a aplicação 20 ml de antiespumante. Também foi constatado que este fluido provocava a aglomeração dos cavacos, formando aglomerados que entupiam a tubulação de retorno do fluido ao tanque, provocando assim paradas no processo.

O fluido provocou aderência dos cavacos ao dinamômetro como pode ser visto na Figura 5.14. Após algumas horas do término do processo houve a formação de uma película sobre a mesa e o suporte que tiveram contato com o fluido durante o processo.

Diante destes fatos pode-se concluir que é inviável trabalhar com esta concentração de óleo de mamona.

Figura 5.14: Vista lateral do dinamômetro com cavacos aderidos pelo fluido formulado.

5.3.1 Teste de Corrosão

A seguir serão apresentadas as imagens do teste de corrosão obtido para cada fluido (Figura 5.15).

Figura 5.15: Papel filtro determinando o grau de corrosão dos fluidos de corte: a) fórmula 1, b) fórmula 3 e c) comercial semi-sintético

Na Figura 5.15 (a) pode-se observar que a formulação 1 possui um forte grau de corrosão, devido à formação de inúmeras manchas. A formulação 3 (Figura 5.15 (b)), também chamada de fluido OPF apresenta ligeira corrosão, ou seja, grau 1, sendo detectados apenas 4 manchas. E o fluido comercial para comparação apresentou grau 0 de corrosão, sem corrosão (Figura 5.15 c).

Diante destes resultados, resolveu-se alterar a concentração de anticorrosivo, água e óleo de mamona sulfonado. Foram elaboradas duas versões, na primeira aumentou-se a apenas a porcentagem de anticorrosivo, na segunda aumentou-se o anticorrosivo e diminuiu a quantidade de água e de óleo de mamona (Tabela 5.5).

Tabela 5.5: Composição das formulações propostas.

Reagente	Composição (%) – Versão 1	Composição (%) – Versão 2
Bactericida	4,76	5
Agente emulsionante	4,76	5
Anticorrosivo	14,28	15
Óleo de mamona	38,10	40
Água	38,10	35

A viscosidade das novas formulações são 82,59 mPa.s (versão 1) e 129,41 mPa.s (versão 2), e o pH 10,25 e 10,19, respectivamente. Observa-se que ao diminuir a

quantidade de água e aumentar o anticorrosivo, o qual possui um aspecto bem viscoso, tem-se um aumento considerável na viscosidade.

Quanto ao grau de corrosão, a versão 1 foi classificada grau 1 (vestígios de corrosão) e a versão 2 grau 0, sem corrosão. Estes resultados nos permitem concluir que tanto o aumento da quantidade do anticorrosivo, bem como a diminuição da quantidade de água são fatores positivos no sentido de diminuir ou mesmo eliminar o grau de corrosão. Este fato pode ser observado na Figura 5.16.

Figura 5.16: Papel filtro determinando o grau de corrosão dos fluidos de corte: a) versão 1, b) versão 2 e c) Fórmula 3 (OPF)

5.3.2 Biodegradabilidade do fluido de corte

O resultado da análise de biodegradabilidade permite concluir que o novo fluido de corte (OPF) é facilmente biodegradável, como pode ser visto no laudo fornecido pelo laboratório BioAgri (anexo 3). Do ponto de vista ecológico este fluido de corte não é agressivo ao meio ambiente e seu tratamento e disposição são feitos com facilidade.

5.3.3 Curva de correlação entre o grau Brix e a concentração do novo fluido de corte

Como no ambiente fabril a concentração é determinada com o auxílio de um refratômetro, que expressa a concentração em grau Brix, foi feita uma curva de

calibração do fluido OPF, a partir da qual é possível determinar a porcentagem do fluido a ser dissolvido em água para o desejado grau Brix. A Figura 5.17 mostra esta relação, bem como a correlação obtida para a mesma.

Figura 5.17: Curva de calibração para o Fluido OPF.

A equação matemática que correlaciona grau Brix e concentração do fluido OPF é:

$$°\text{Brix} = 0,4607 \cdot \text{conc} - 0,8071 \quad (5.1)$$

onde:

°Brix – grau brix,

conc – concentração (%), porcentagem do fluido concentrado que foi diluído em água.

5.4 Desempenho mecânico do novo fluido de corte OPF e comparação com os fluidos de corte comerciais.

Neste item serão discutidos os resultados obtidos nos dois processos de retificação estudados: cilíndrica e plana. Os valores do desgaste radial do rebolo foram medidos por duas técnicas: mapeamento acústico da superfície do rebolo e impressão do perfil do rebolo.

5.4.1 Testes de retificação cilíndrica

Testes de retificação foram realizados em uma retificadora cilíndrica CNC de alta velocidade para avaliar a importância das principais propriedades dos fluidos de corte: refrigeração e lubrificação, podendo assim analisar a influência destas sobre o desgaste radial do rebolo de CBN e da rugosidade superficial da peça de trabalho. Foram testados diferentes fluidos de corte: óleo integral, água e um fluido semi-sintético.

Analizando os resultados do desgaste radial do rebolo apresentado na Figura 5.18, pode-se observar a influência do tipo de fluido de corte no desgaste radial de rebolo de CBN. É possível verificar que o desgaste é significativamente reduzido quando o fluido utilizado possui alto poder lubrificante, como também foi observado por Hitchiner (1990). O uso de óleo integral elimina o desgaste radial pelo menos para a quantidade de material removida nos testes de retificação cilíndrica ($6764 \text{ mm}^3/\text{mm}$). Por outro lado, um alto desgaste foi observado quando se retificou com água (alto poder refrigerante e sem propriedade lubrificante) no valor aproximadamente $8 \mu\text{m}$ no raio. Os fluidos semi-sintéticos apresentaram valores intermediários. Diferentes resultados foram observados na medida do desgaste comparando as duas técnicas utilizadas (Figura 5.18 e 5.19). Enquanto na técnica de impressão do perfil, a área desgastada foi medida pelo degrau entre duas regiões (desgastada e referência), o mapeamento acústico considera todas as imperfeições perimetrais do rebolo. A uniformização da superfície do rebolo é obtida quando todas as imperfeições são corrigidas.

Figure 5.18: Valores do desgaste radial – técnica de mapeamento acústico.

Figure 5.19. Valores do desgaste radial – técnica de impressão do perfil.

Para a quantidade de material removido, o aumento da concentração do fluido semi-sintético de 3% para 20% não forneceu resultados significantes na medida do desgaste do rebolo quando o mapeamento acústico foi usado (Figura 5.18). Porém, uma diferença no desgaste foi detectada quando se usou a técnica de impressão do perfil (Fig. 5.19).

Os fluidos semi-sintéticos contêm porcentagens de óleo, que adicionam lubricidade e proteção à partícula abrasiva de CBN. Aumentando a concentração destes fluidos geralmente melhora seu desempenho. Os resultados demonstram que aumentando a concentração de 3% para 20% produz-se uma pequena diminuição no desgaste do rebolo. Isto não pode ser vantajoso em comparação com o custo adicional. Também usando maiores concentrações tem-se um aumento na formação de espumas.

Os resultados da rugosidade para os testes de retificação cilíndrica usando diferentes fluidos de corte estão apresentados na Figura 5.20. O tipo do fluido de corte influencia nos valores de rugosidade. O aumento da capacidade lubrificante do fluido de corte diminui a rugosidade. Este fato pode ser observado quando a água é usada como fluido de corte. Aumentando a quantidade de material removido houve um aumento nos valores de rugosidade, devido ao baixo poder lubrificante da água e o efeito do material removido na agressividade do rebolo. Os valores variaram de 0,26 μm a 0,57 μm . Esta tendência não foi tão pronunciada para os outros fluidos de corte.

Figura 5.20 – Valores de rugosidade (R_a) para diferentes fluidos de corte (retificação cilíndrica)

A baixa lubricidade causa um aumento no atrito entre o cavaco e o ligante o que leva a um aumento dos valores de rugosidade. O melhor desempenho foi observado pelo

uso do óleo integral, onde a rugosidade foi menor que $0,33 \mu\text{m}$. O aumento dos valores de rugosidade em função do aumento da quantidade de material removido observado para a água não pode ser verificado nos mesmos níveis para os outros fluidos de corte.

Os fluidos semi-sintéticos apresentaram um comportamento similar ao da água, com tendência de aumento dos valores de rugosidade, com o aumento do volume da material removido. O fluido semi-sintético com concentração 20% apresentou melhores resultados, principalmente quando uma grande quantidade de material é removida, como pode ser observado nas peças 9 e 10. Neste caso, a variação dos valores de rugosidade, para semi-sintético 3 e 20%, é aproximadamente de $0,1 \mu\text{m}$. Nestes testes pode ser confirmado que o poder lubrificante do fluido é o maior fator no desempenho dos fluidos de cortes.

Portanto, os resultados mostraram que a principal característica que determina o desgaste do rebolo e rugosidade da peça é a lubrificação.

5.4.2 Testes em Retificação Plana

Foi avaliada a influência que diferentes tipos de fluidos de corte exercem sobre o desgaste radial do rebolo em testes de retificação plana. Os fluidos testados foram semi-sintético, óleo mineral e um fluido formulado neste trabalho a base de óleo de mamona sulfonado 80%.

Como o controle da profundidade de passe não era muito precisa (controlador manual e com folga), não foi possível remover a mesma quantidade de material das peças de trabalho durante os testes. Neste caso não é viável analisar o desgaste simplesmente medido, optou-se por calcular a relação G (volume de material removido/volume de rebolo desgastado). Com esta relação pode-se analisar o desgaste radial do rebolo para todos os fluidos.

Devido ao tanque de armazenamento do fluido de corte ser menor (65 litros), para analisar o desempenho da nova formulação, optou-se por realizar teste de retificação nas mesmas condições de operação citadas na Tabela 4.8 do item 4.3.4 para a retifica plana. Variou-se a quantidade de fluido de corte OPF diluída em água, pois como foi descrito a 65,5% se mostrou ainda, muito concentrado. Utilizou-se com a medida de concentração o

°Brix, determinado através de um refratômetro. Todas as diluições testadas foram obtidas do concentrado correspondente à fórmula 3, denominada fluido OPF descrita na Tabela 5.4. Para a diluição de 65,5% teve-se 31°Brix, trabalhou-se também com as concentrações 21 e 15 °Brix.

Os resultados obtidos foram comparados com os obtidos para um fluido semi-sintético comercial e um óleo integral. Os valores de desgaste medidos estão expressos na Tabela 5.6, juntamente com o volume de rebolo desgastado e volume de material removido e o valor da relação G.

Tabela 5.6: Valores de desgaste do rebolo e volume de material removido.

Fluido de Corte	Volume de Material Removido (mm³)	Desgaste medido (µm)	Volume desgastado do rebolo (mm³)	Relação G
OPF (31°Brix)	39813,7	10	51,05	779,88
OPF (21°Brix)	29206,25	3,4	20,42	1682,68
OPF (15°Brix)	27107,86	4,8	10,21	1106,26
semi-sintético	42006,58	13	66,37	632,95
Óleo integral	28417,84	2,9	30,63	1913,54

Comparando as novas formulações com os fluidos comerciais (semi-sintético e óleo integral) com base na relação G, através da Figura 5.21 verificou-se que o fluido OPF (composição descrita na Tabela 5.4), com concentração 21 °Brix possui valor da relação G próximo ao obtido pelo óleo integral, indicando que uma menor quantidade de rebolo foi desgastada. O mesmo fluido, quando comparado com o óleo semi-sintético, se mostrou muito superior com relação ao desgaste.

Segundo Brinksmeier et al (1982), aumentando a capacidade lubrificante do fluido observa-se uma redução no desgaste do rebolo. Neste caso há uma redução do atrito entre o cavaco e o ligante, o que conduz a menores desgastes do rebolo. Neste

trabalho pode-se verificar que o fato do fluido ser muito viscoso, no caso do fluido OPF 31 °Brix, não garante um bom desempenho, não proporciona uma boa lubrificação, portanto deve ter um valor limite de viscosidade o qual seja bom para o processo de lubrificação.

Durante os testes, foi observado que este fluido de corte aglomera os cavacos, fazendo os mesmos atritarem com a peça de trabalho. O desejável é que ocorra uma diminuição do atrito devido à lubrificação, mas que não haja aglomeração de cavacos. Esta situação foi encontrada quando se utilizaram os fluidos OPF 21 °Brix, 15 °Brix e o óleo integral.

Figura 5.21: Relação G para os diferentes fluidos de cortes testados.

Com relação à rugosidade final da peça, não foi possível relacionar diretamente com fator lubrificidade, pois o óleo integral e o fluido OPF 31 °Brix não forneceram os menores valores de rugosidade. As menores rugosidades foram obtidas pelo fluido semi-sintético e o Fluido OPF 21 °Brix. Na Figura 5.22 são apresentados os valores obtidos para os dois lados da peça retificada, sendo que a primeira coluna corresponde ao primeiro lado e a segunda ao segundo lado. Portanto, é possível concluir que a rugosidade aumenta com a quantidade de material removido no processo.

Figura 5.22- Valores de rugosidade (R_a) para diferentes fluidos de corte.

Comparando as forças normais de retificação, observa-se que tanto os fluidos de corte desenvolvidos neste trabalho, como o óleo integral manteve as forças normais de retificação praticamente constantes. Nas Figuras 5.23, 5.24 e 5.25, pode-se comparar as forças normais de retificação de cada diluição do fluído OPF estudada com as obtidas com o óleo integral. Estes gráficos foram construídos com os picos das forças após cada incremento na profundidade de corte.

Considerando que a vida do rebolo é muito longa, para se obter resultados consistentes, o volume de metal removido da peça deve ser suficiente para garantir a estabilização da operação. Nas curvas de forças tradicionais, a força cresce até que no final da vida do rebolo ocorre um rápido aumento no valor da força. Este fato não foi observado durante os testes, pois, como já citado, o rebolo de CBN é mais resistente ao desgaste.

Figura 5.23: Comparação da Força Normal durante a retificação para o OPF 32 °Brix e o óleo integral.

Figura 5.24: Comparação da Força Normal durante a retificação para o OPF 21 °Brix e o óleo integral

Figura 5.25: Comparação da Força Normal durante a retificação para o OPF 15 °Brix e o óleo integral

Através destas figuras, foi possível verificar que o fluido OPF com concentração 21 °Brix possui comportamento semelhante ao óleo integral no que se refere à força normal durante a retificação. As concentrações 31 e 15 °Brix tiveram valores de força normal maiores que os observados para o óleo integral.

Na Figura 5.26, ao comparar o fluido OPF 21 °Brix com um óleo semi-sintético, observa-se que o mesmo possui menores forças de corte, ou seja, facilita o processo de corte.

Figura 5.26: Comparação da Força Normal durante a retificação para o OPF 21 °Brix e o fluido semi-sintético comercial.

Estes resultados permitiram concluir que o fluido OPF 21 °Brix tem desempenho mecânico equivalente ao óleo integral, no que diz respeito a forças de corte e desgaste radial do rebolo, e ainda forneceu melhor acabamento superficial da peça. Mas, além disso, convém ressaltar que a composição química deste fluido é ambientalmente adequada, não tendo em sua composição nenhum composto condenado pelas legislações ambientais.

5.4.3 Testes de desempenho mecânico em ambiente fabril

Com a finalidade de avaliar de uma forma mais completa o fluido de corte desenvolvido neste trabalho, foram realizados testes num ambiente fabril, pela simples substituição do fluido de corte costumeiramente usado em uma das retificadoras da linha de produção pelo fluido de corte OPF. Nenhuma condição de operação foi alterada. Estes testes foram feitos na TRW unidade de Santo André, na área de retificação de válvulas. O objetivo foi o de observar o comportamento do fluido durante longos períodos de tempo e verificar sua estabilidade. Como a máquina não estava equipada com rebolos de CBN, não fazia parte dos objetivos testar os ganhos de vida de rebolos com a substituição do fluido de retificação.

Os testes foram realizados numa retificadora Centerless Cincinnati Milacron modelo 2, com rebolo de óxido de alumínio marrom Sivat (A80N/P6V13). As válvulas retificadas eram compostas de dois materiais: a cabeça era de aço SAE EV8/X52CrMnNiN219 e a haste de aço SAE HNV3/X45CrSi93. A junção era feita por meio de solda. A vazão de fluido de corte variava de 4 a 5 l/min). Uma visão geral da retificadora está demonstrada na Figura 5.27 e da válvula pela Figura 5.28.

Figura 5.27: Vista frontal da Retificadora Centerless.

Figura 5.28: Válvulas usadas do teste, a esquerda antes da retificação e a direita após a retificação.

Analisando o fluido OPF em termos de seu comportamento durante a retificação verificou-se que o mesmo oferece um bom escoamento, como demonstrado na Figura 5.29. Também foi observado que não há um comprometimento da pintura da máquina, fato que ocorre normalmente com fluidos solúveis. Houve uma boa refrigeração da zona de corte, não havendo um aquecimento da peça durante o trabalho. O único inconveniente observado foi a formação de espuma que era controlada apenas com adições de antiespumantes de tempos em tempos. Nos testes de laboratórios a formação de espuma foi verificada apenas no início do processo e era facilmente controlada pela adição de uma pequena quantidade de antiespumante, mas a vazão utilizada era baixa. Além dos testes na TRW utilizarem uma vazão maior, há também outros limitantes, por exemplo, não haver um filtro no tanque permitindo assim o acúmulo de borra no fundo e também a entrada de ar na bomba, estes fatores ajudam e até mesmo acentuam a formação de espuma.

Figura 5.29: Válvula na saída do processo.

Com relação ao desempenho mecânico, o parâmetro de saída avaliado foi o paralelismo da válvula. As Figuras 5.30 e 5.31 mostram os resultados obtidos para um fluido aquoso utilizado na fábrica trabalhando com 20 peças por dressagem e para o fluido de corte OPF trabalhando com 20 e 35 peças por dressagem. A Figura 5.30 representa o paralelismo medido na ponta e a Figura 5.31 o paralelismo da solda. Foi observado para o fluido de corte OPF um comportamento normal de desgaste durante o processo de retificação, o aumento do erro de paralelismo em função do aumento dos números de válvulas retificadas, este fato não foi observado pelo fluido aquoso, usado para comparação, pois o mesmo não apresentou a tendência esperada. As amplitudes de variação do paralelismo em relação a ponta da válvula foram menores para o fluido OPF com 20 peças/dressagem o que tornou possível testar o fluido OPF com 35 peças/dressagem. Entretanto o desgaste foi maior para o fluido OPF na região da solda da peça.

Figura 5.30: Paralelismo da ponta das válvulas em função do número de peças.

Figura 5.31: Paralelismo da solda das válvulas em função do número de peças.

A partir destes resultados verificou-se que o fluido de corte OPF é indicado para o uso em ambientes industriais, mas existe a necessidade de promover mudanças na sua formulação quando a formação de espuma for um fator crítico. Em relação aos benefícios relacionados à vida do rebolo espera-se que maiores benefícios do fluido OPF ocorram em rebolos de CBN que são mais resistentes ao desgaste, nesta condição como avaliada experimentalmente e descrita nos itens anteriores obtiveram-se resultados semelhantes ao óleo integral. Cumprindo assim o objetivo deste trabalho que era desenvolver um fluido de corte adequado do ponto de vista ambiental para retificação com rebolos de CBN.

6. CONCLUSÕES

Com base nos resultados experimentais, as seguintes conclusões podem ser destacadas:

- O desgaste químico, proveniente da reação química que ocorre entre o CBN e o vapor d'água, é insignificante quando comparado pelo desgaste por atrito. Mesmo em condições ideais a reação química entre o vapor d'água e os grãos de CBN não ocorre. Diante disto, não há restrições para a formulação de um fluido de corte aquoso com uma maior concentração de óleo vegetal ou éster, para trabalho em retificadora com rebolo CBN.
- Os aditivos de extrema pressão (enxofre) e antidesgaste (fósforo) atuam formando camadas intermediárias, porém estas não são uniformes, provocando um maior atrito entre a peça e a ferramenta, não justificando assim o seu emprego nas formulações dos fluidos de corte aquosos.
- O desenvolvimento de um novo fluido de corte é um trabalho de tentativas e erros, por mais que, do ponto de vista laboratorial, este fluido preencha os requisitos, o teste mecânico é indispensável para a validação do mesmo.
- A lubricidade do fluido de corte é o fator chave para seu desempenho e pode influenciar o desgaste radial e rugosidade da peça. O desgaste do rebolo foi mínimo quando o óleo integral foi usado e os valores de rugosidade foram menores que dos fluidos semi-sintético e água. Quando a água foi usada como fluido de corte, pode-se observar um alto nível de desgaste radial. Isto é consequência da sua pobre capacidade lubrificante que provoca um aumento no desgaste devido ao atrito, degradação química e choque térmico dos grãos e do ligante.

- O melhor desempenho na operação de retificação foi obtido quando óleo integral foi utilizado como fluido de corte. Contudo, a formulação desenvolvida neste trabalho, quando usada na concentração 21 °Brix, apresentou desempenho mecânico semelhante ao obtido pelo óleo integral, em termos de desgaste radial do rebolo e força normal. Sendo assim, é possível ter um produto com as duas principais características: refrigeração, advinda da água existente na fórmula, e lubrificação, fornecida pelo óleo de mamona.
- A formulação desenvolvida neste trabalho possui uma gama de constituintes menor que a das formulações tradicionais, o que facilita o tratamento e descarte deste fluido de corte. Os reagentes utilizados estão em conformidade com as legislações vigentes não só no Brasil, mas com as legislações ambientais mais severas dos países desenvolvidos.
- O novo fluido de corte foi considerado facilmente biodegradável, podendo ser considerado um produto amigo do ambiente.

7. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Estudar a influência dos aditivos de extrema pressão e antidesgaste na formulação de fluido de corte com óleo de mamona sulfonado, analisado as possíveis reações que possam ocorrer na superfície do metal.
- Balancear a formulação desenvolvida neste trabalho com antiespumante, podendo assim ter um maior controle na formação de espumas em vários tipos de máquinas, como por exemplo, a retificadora utilizada para os testes na TRW.
- Analisar o comportamento térmico da peça durante a retificação com a formulação OPF.
- Fazer uma análise de custo do novo produto, avaliando assim a sua viabilidade comercial.
- Utilizar o fluido de corte OPF em aplicações de MQL.

7. BIBLIOGRAFIA

ASM International Handbook Committee, Metal Handbook, 6ª edição, Cap. 27, maio de 1991, p. 14-20.

BARTZ, W., 2001, Ecological and Environmental Aspects of Cutting Fluids, Lubrication Engineering, March, pp. 13-16.

BENNETT, B. “Cutting fluids and superabrasives applications”. Cincinnati Milacron, AES Magazine, p. 12

BENNETT, E. O. e D. L. Bennett. OCCUPATIONAL AIRWAY DISEASES IN THE METALWORKING INDUSTRY. Tribology Internacional. Butterworth & Co Publishers Ltd. Houston. Texas, USA. vol. 18. n. 3. June, 1985. p. 169-176.

BERSENKOWITSCH, H. “Medidas de segurança no manuseio de agentes refrigerantes”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n° 409, p. 24-33, fevereiro, 2000.

BERTALAN, C. “Retificação com rebolos de nitreto de boro cúbico em máquinas-ferramenta convencionais”. Florianópolis, 208 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, 1997.

BIANCHI, E. C., MONICI, R. D., AGUIAR, P. R., DARÉ NETO, L. “Comportamento entre os rebolos superabrasivos e convencionais”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n° 435, p. 198-225, abri, 2002(1).

- BIANCHI, E. C., MONICI, R. D., DARÉ NETO, L., AGUIAR, P. R. “Estudo comparativo entre a agressividade superficial obtida na retificação com rebolos de óxido de alumínio e CBN, fabricados com ligantes resínóide e vitrificado”. Anais do II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica”. Agosto de 2002 (2), cd-rom.
- BIANCHI, E. C., VALRELLI, I. de D., AGUIAR, P. R., SILVA, E. J., MONICI, R. D., SOUZA, G. F. “A contribuição dos rebolos de CBN para a melhoria da competitividade e qualidade”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n ° 423, p. 170-197, abril, 2001.
- BIANCHI, E. C. “Ação das condições de dressagem na vida de rebolo na retificação de precisão” São Carlos. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica). Escola de Engenharia de São Carlos – USP, 1990.
- BRINKSMEIER, E., HEINZEL, C., WITTMANN, M., SCHMID, U., DREYER, M. RATH, H. J. “Como a aplicação de fluido refrigerante pode ser melhorada na retificação”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n ° 429, p. 34-41, outubro, 2001.
- BROWN, W. L. Metalworking Fluids, In: Rudnick, L. R. and Shubkin, R. L.: Synthetic Lubricants and High - Performance Functional Fluids. 2nd Edição, Ed. Marcel Dekker, New York, 1999.
- BYRNE, G. USINAGEM EM AMBIENTE LIMPO: NÃO SE TRATA APENAS DE HIGIENE. Tradução: Revista Máquinas e Metais. Editora Aranda Técnica Ltda. São Paulo-SP. Abril, 1996. p. 67-80.
- CARIUS, A. C. “Super-revestimentos para superabrasivos”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n ° 399, p. 92-101, abril, 1999(1).

CARIUS, A. C. “Desenvolvimentos de produto e do mercado de CBN na América e na Europa”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n° 403, p. 86-103, agosto, 1999(2).

CARIUS, A. C. “Desenvolvimentos de produto e do mercado de CBN na América e na Europa”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n ° 380,p. 34-50, setembro, 1997.

DETWILER-OKABAYADHI, K. A., SCHAPER, M. M. “Respiratory effects of a synthetic metalworking fluid and its components”. Arch Toxicol, n° 70, p. 195-201, 1996.

DICK, R. M., FOLTZ, G. “Os fluidos usados na transformação de metais têm de ser bem gerenciados”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n ° 403,p. 86-103, agosto, 1999(2).

DÖRR, J., SAHM, A. “A mínima quantidade de lubrificante avaliada pelos usuários”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n ° 418, p. 20-39, novembro,2000.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L.. “Tecnologia da Usinagem dos Materiais”. Editora MM, São Paulo, 1999.

HEINICKE, G. in co-operation: HENNIG, H.L. et al. Tribochemistry. Carl Hanser Verlag, München, 1984.

HEISEL, U., LUTZ, M. “Pesquisa de fluidos de refrigeração e de lubrificação”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n ° 388,p. 40-49, maio, 1998.

HERSHBERGER, J., AJAYI, G. R. FENSKE. “Nondestructive characterization of surface chemical wear films via X-rays”. Thin solid Films, 446, pp. 248-257, 2004.

HITCHINER, M. P. “Creep feed grinding of superalloys with CBN”. Abrasives Magazine, p. 24-28, decembre/january 2001(1).

HITCHINER, M. P. “O emprego da alta velocidade com rebolos de CBN”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n^o 428, p. 116-133, setembro, 2001(2).

HITCHINER, M.P. “Advantages in Production Grinding with CBN and their Influence on Machine Tool Design”. Saint Gobain Grinding Conference, São Carlos, São Paulo, Junho 2001(3), em CD.

HITCHINER, M. P. “Technological Advances in Creep Feed Grinding of Superalloys with CBN”. 3rd International Machining and Grinding Conference SME, Cincinnati, Ohio, October 4-7, 1999.

HITCHINER, M. P. “Precision Grinding Systems for Production Grinding with Vitrified CBN” SME Technical Paper MR90-507, 1990, p. 1-11.

HOWES, T. “Assessment of the cooling and lubricative properties of grinding fluids” Annals of the CIRP., 39/1, p. 1-11, 1990.

HÜBNER, J., 1994, Aufbau Moderner Kühlschmierer (Composition of modern Coolants), Tribologie und Schmierungstechnik, 41(2)

IGNÁCIO, E. A. (1998) “Caracterização de Legislação Ambiental Brasileira voltada para a utilização de fluido de corte na indústria metal-mecânica”. Dissertação de mestrado. UFSC, engenharia de produção.

ILIUC, I. Tribology of Thin Layers. Tribology Series, 4. Elsevier Scientific Company. 1980

- JACKSON, M.J., DAVIS, C.J., HITCHINER, M. P., MILLS, B. "High-speed grinding with CBN grinding wheels – applications and future technology". Journal of Materials Processing Technology, n° 110, p. 78-88, 2001.
- KLOCKE, F.; BAUS, A.; BECK, T., 2000, "Coolant Induced Forces in High Speed Grinding with Shoe Nozzles", Annals of the CIRP, v. 49/1, pp. 241-244.
- KOVACEVIC, R., MOHAN, R. "Effect of High speed grinding fluid on surface grinding performance". SME Technical paper MR95-213, p. 919-931, 1995.
- KOHLI, S. P., GUO, C., MALKIN, S. "Energy Partition for Grinding with Aluminum Oxide and CBN abrasive Wheels". ASME Journal of Engineering for industry, vol. 117 p. 160-168, 1995.
- LEAL, J. "La filtration en los procesos de rectificado com muelas de Borazon". Filtrations News, v. VIII, p. 1-8, 1993.
- LI, M., EDA, H., IMAI, T., NISHIMURA, M., KAWASAKI, T., SHIMIZU, J., YAMOAMOTO, T. ZHOU, L. "Development of high water-content cutting fluids with a new concept Fire prevention and environmental protection". Journal of the International Societies for Precision Engineering and Nanotechnology". 24, p. 231-236, 2000.
- LITTLEFAIR, G. "Evaluation of Cutting Fluid Machinability Performace" 3rd International Machining and Grinding Conference SME, Cincinnati, Ohio, October 4-7, 1999.
- LUTHER, R., 2001, Lubricants in the Environment, In: Mang, T and Dresel, W.: Lubricants and Lubrication, Germany, WILEY-VCH, pp. 115-164.

- MACHADO, A. R. E DINIZ, A. E. “Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de cortes”. Máquinas e Metais, p. 134-151, 2000.
- MALKIN, S. “Grinding Mechanisms” e Grinding Temperatures and Thermal Damage”, In MALKIN, S. Grinding Technology: theory and applications of machining with abrasives. 1 ed. Chichester, Ellis Horwood Limited, Cap. 5 e 6, p. 108-171, 1989.
- MINDEK, M., 1992, “Improved Rotary Disc Truing of Hot-Pressed CBN Grinding Wheels” MSc Thesis, University of Connecticut.
- MONICI, R. D., BIANCHI, E. C., AGUIAR, P. R. “Como e quanto lubrificar e refrigerar no processo de retificação”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, n ° 427,p. 101-115, agosto,2001.
- MOTTA, M. F., MACHADO, A. R. “Fluidos de corte: tipos, funções, seleção, métodos de aplicação e manutenção”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, p. 44-56, setembro de 1995.
- MÜLLER, J., Kühlschmierstoffe – Gesetze, Verordnungen und ühlschmierstoffe – Gesetze, Verordnungen und Regelwerke zum Arbeitesschutz (Coolants for Metalworking – Laws and Regulations Concerning Safety). Proceeding 9th International Colloquium Ecological and Economical Aspects of Tribology, TAE, Ostfildern, 1994.
- NOVASKI, O. E DÖRR, J.. “Usinagem sem refrigeração”. Revista Máquinas e Metais, Editora Aranda, p. 18-27, 1999.
- OHLWEILLWE, O. A. **Química Inorgânica**. Ed. Edgard Blucher, São Paulo, 1971.

- POLUSHIN, N. I., BURDINA, K. P. “Cubic boron nitride synthesis by pyrolysis of certain polyammoniates of boron hydrides of metals at high pressure”. *Diamond and Related Materials*, n° 6, p. 987-990, 1997.
- QUEIROZ, J. L. L., BOEHS, L., SANT’ANNA, F. “Proposta para aprimorar o manejo dos fluidos de corte”. *Revista Máquinas e Metais*, p. 250-255, abril de 1999.
- QUEIROZ, J. L. L. (2001) “Desenvolvimento de um protótipo de software para controle da variável ambiental na utilização do fluido de corte”. Tese de doutorado. UFSC, departamento de engenharia de produção.
- RODRIGUES DE PAULA, M. A., ABRÃO, A. M. “Derivados do óleo de mamona como fluidos de corte”. *Revista Máquinas e Metais*, Editora Aranda, n ° 400,p. 104-112, maio, 1999.
- ROUSE, H., ASCE, M., HOWE, J.W; METZLER, D.E., “Experimental Investigation of Fire Monitors and Nozzles, 117th ASCE Transactions. 1952.
- RUNGE, P. R. F., DUARTE, G. N. “Lubrificantes nas indústrias – Produção, manutenção e controle” *Triboconcept – Edições Técnicas*, p. 71-171, 1990.
- SATOW, Y. “Use of High Pressure Coolant Supply in Precision CBN Grinding”. *International Grinding Conference*, Philadelphia, Pennsylvania, June 10-12, 1986.
- SCHEY, J. A., *Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear*. Ed. American Society for Metals. 1984.
- SHIH, A. J.; GRANT, M. B.; YONUSHONIS, T. M.; MORRIS, T. O.; MCSPADDEN, S. B., 1998, “High Speed and High Material Removal Rate Grinding of Ceramics Using the Vitreous Bond CBN Wheel”. *Annual Meeting of American Society for Precision Engineering*. October 25-30.

- SILVA, E. J. “Análise da influência dos tipos de fluido de corte e rebolo na retificação do aço SAE HVN-3” Bauru, 179p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Industrial). Faculdade de Engenharia – UNESP, 2000.
- SILVA, L. R. et al. “Avaliação da técnica de mínima quantidade de lubrificantes-MQL nos processos de usinagem”. Anais do III Congresso Brasileiro de Fabricação. Abril de 2005, cd-rom.
- SOKOVIC, M., MIJANOVIC, K. “Ecological aspects of cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of the cutting processes”. Journal of Materials Processing Technology, n° 109, p. 181-189, 2001.
- SREEJITH, P.S., NGOI, B. K. A. “Dry machining: Machining of the future”. Journal of Materials Processing Technology, 101, p. 287-291, 2000.
- TOLBERT, P. E., EISEN, E. A., POTHIER, L. J., MONSON, R. R., HALLOCK, M. F., SMITH, T. J. “Mortality studies of machining-fluid exposure in the automobile industry. II. Risks associated with specific fluid types”. Scand J Work Environ Health, 18, p. 351-360: in CALVERT, G. M., WARD, E., SCHNORR, T. M., FINE, L. J. “Cancer risks among workers exposed to metalworking fluids: a systematic review”. American Journal of Industrial Medicine, n°33, p. 282-292, 1998.
- TORRANCE, A. A. “Cooling and Metallurgical Effects”. University of Bristol, England, p. 1-5, 1980.
- WALTER, A. Tribophysikalische und Tribochemische Vorgänge in der Kontaktzone bei der Zerspaltung. Dissertação da Universidade de Bremen, 2002.

- WEBSTER, J. "Selection of coolant type and application technique in grinding".
Supergrind 1995, p. 205-218, 1995.
- WEBSTER, J. A.; CUI, C.; MINDEK, R. B., 1995, "Grinding Fluid Application System Design", Annals of the CIRP, v. 44/1, pp.
- WEBSTER, J., 1999, "Optimizing Coolant Application Systems for High Producing Grinding". Abrasives Magazine, Oct. /Nov. pp. 34-41.
- WILL, G. PERKINS, P. G. "Is the a new form of boron nitride with extreme hardness?"
Diamond and Related Materials, n° 10, p. 2010-2017, 2001.
- WILLING, A. "Lubricants based on renewable resources – an environmentally compatible alternative to mineral oil products". Chemosphere, n. 43, p. 89-98, 2001.
- WITTMANN, M., MEYER, L., WALTER, A., HEINZEL, C. "Approaches to improve grinding fluid application". Abrasives Magazine, p. 1-7, August/September, 2002.
- YAMANAKA, Y. et al. "Development of Grinding Fluid for CBN Grinding Wheels – Part 1: Establishment of the Block-on-Ring Grinding Method for Simple Evaluation of the Grinding Performance of Grinding Fluids". Lubrication Engineering. May 1996.
- YAMANAKA, Y. et al. "Development of Grinding Fluid for CBN Grinding Wheels – Part 2". Lubrication Engineering. February, 1997
- YAMANAKA, Y. et al. "Development of Grinding Fluid for CBN Grinding Wheels – Part III: Study of Concentration of Metalworking Additives on Grinding Performance". Lubrication Engineering. August, 1998

YAMANAKA, Y. et al. "Development of Grinding Fluid for CBN Grinding Wheels – Part IV: A Study of Grinding Performance When Two Types of Metal Working Additives are Used Together". Lubrication Engineering. March 2000.

YAMANAKA, Y. et al. "Development of Grinding Fluid for CBN Grinding Wheels – Part V: A Study on the Grinding Performance of Various Types of Carboxylic Acids". Lubrication Engineering. March 2000.

YE, N. E., PEARCE, T. R. A. "A comparison of oil and water as grinding fluids in the creep-feed grinding process" Proc. Of I. Mech. E., 198B, p. 229-237, 1984.

YONEKURA; YOKOGAWA, 1983, "Effects of Tsukidashiryo of Resinoid Bonded Borazon CBN Wheels on Grinding Performance" Bull JSPE 17 (2), p113-118.

ZHAO, X., LIU, J., ZHU, B., MIAO, H., LUO, Z. "Effects of antiwear additives on the friction and wear of Si_3N_4 /steel sliding contacts". Wear 201, pp. 99-105, 1996.

ANEXO 1

Fornecedor	Micro Química Indústria e Comércio Ltda. Rua Projetada, 225 - Jardim União - CEP 09970-000 Tel.: 4057-3400
Nome Comercial	MICROCORTE 247 CS

Características Químicas	Óleo de corte integral.		
	Forma: Líquida	Cor: Castanho Claro	Cheiro: Característico

Características Físicas e Dados de Segurança				
Alteração Estado Físico	°C	°C	Densidade 20/4°C DIN 51757	0.875 g/cm³
Viscosidade 40 °C (cSt)	22,0		Solubilidade em água °C (g/l)	Insolúvel
pH Concentrado 20°C	N.A.	DIN 51369	Ponto de Fulgor °C	160
Ponto de Inflamação °C	190		Degradação Térmica	Ocorre
Decomposição	Não ocorre		Reações Perigosas	Não ocorrem
Pressão de Vapor °C (mbar)	N.A.		Limite de Explosividade	Inferior 5,0% Superior 10,0

Descrição	<ul style="list-style-type: none"> • Óleo mineral • Matéria graxa • Aditivos de extrema pressão

Transporte	Tambores de ferro.
Observações	Em caso de incêndio: Extintores Classe B CO2 / Pó Químico Seco

Estocagem , Manuseio e Transporte

Vazamento Transporte Rodoviário	Conforme ONU 3082 - Classe 9
Armazenamento	Ao abrigo das intempéries.

Descarte

Primeiramente verificar a possibilidade de recuperação (destilação ou filtração). Caso seja inviável, o produto deve ser incinerado em instalações adequadas, desde que previamente verificadas as características dos efluentes gasosos.

Para informações detalhadas, consultar a legislação vigente.

Proteção Pessoal e Primeiros Socorros

Exposição	Sistêmico			
Local	Pele Não irritante	Olhos Irritante	Ingestão Tóxico	Inalação Baixa toxidez
Primeiros Socorros	Pele	Lavar com água durante 15 minutos.		
	Olhos	Lavá-los cuidadosamente com água corrente durante 15		

		minutos.
	Inalação	Remover o operador para local arejado.
	Ingestão	Procurar auxílio médico.
Proteção Individual	Utilizar óculos e luvas de PVC.	
Ventilação	Áreas abertas.	

Informações Adicionais

A precisa composição deste produto, assim como outros dados de sigilo industrial, são de propriedade da Micro Química Indústria e Comércio Ltda. Informações detalhadas sobre o produto poderão ser fornecidas a pessoas autorizadas, mediante solicitação escrita ao nosso Departamento Técnico. As recomendações e sugestões que fazemos acima quanto ao uso de nossos produtos, baseiam-se em resultados de experiências anteriores, podendo porém, serem consideradas como orientação geral. Não podemos dar garantias formais sobre resultados futuros devido a diferença de condições de uso. Colocamos à disposição o nosso departamento técnico, o qual está apto a auxiliá-lo na aplicação de nossos produtos. Consulte-o caso necessário.

MC 247-
CS
Rev. 11.99
Emissão: 18/02/03

Bio G 503

Fluido Semi-sintético

Descrição: Fluido semi-sintético de última geração desenvolvido para atender a crescente demanda das operações em metais, com baixa manutenção. Produto não agressivo ao meio ambiente e seguro para o trabalho.

Propriedades: Produto formulado a partir de matérias primas vegeto-animais completamente compatível com o meio ambiente.

Devido a sua peculiar formulação permite um melhor acabamento e peças limpas. Bio G 503 não é afetado por águas duras, não irrita a pele, é biodegradável e facilmente removido, isento de triazina, nitrito, boro e óleo mineral.

Não contém em sua formulação boro, óleo mineral e outros hidrocarbonetos de petróleo.

Aplicação: Bio G 503 é especialmente indicado para retificar e usinar metais ferrosos e não ferrosos.

Recomendações de uso (%):

Retífica.....3 a 5 %

Usinagem em geral.....6 a 10 %

Dados Típicos:

Item	Unidade	Método	Bio G 503
Cor	-	MAMQ 01	Castanho
Aspecto	-	MAMQ 01	Líquido
Límpido			
Densidade	g/cm ³	MAMQ 02	0,996
pH a 5%	-	MAMQ 13	10
Corrosão	-	DIN 51360/2	0A

ANEXO 2

N. Rev	Nota Revisão	Data	Assinat.	Verif.
--------	--------------	------	----------	--------

1	1	Não Especificado			Material Comprado	
Item	Quant.	Material e Dimensões			Observação	
Desenhado por Salete		Verificado por Salete	Aprovado por -----	Arquivo salete.dwg	Data 26/05/2003	Escala 1:1
OPF NUMA EESC			Título DISCO DRESSADOR			
			Desenho FOLHA DE DETALHE		Edição 1	Folha 2/4

ANEXO 3

Informações Gerais

Substância teste:	FLUÍDO
Lote:	Não informado
Recebida em:	29/Jan/2004
Aspecto:	Líquido viscoso
Cor:	Castanho
Tipo de Embalagem:	Frasco plástico
Código da BIOAGRI:	DOM-0152/04
Proposta nº:	002964/04
Nome Comum:	FLUÍDO
Substância Teste Enviada por:	JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA
Composição declarada:	40% de óleo de mamona sulfonado; 40% de água; 5% de éster sintético de poliglicol; 10% de ésteres sintéticos e e alconolamidas de ácido bórico e 5% de bactericida
Data de Início do Estudo:	03/Fev/2004
Data do Início da Fase Experimental:	05/Fev/2004
Data do Final da Fase Experimental:	05/Mar/2004
Data do Relatório Final:	15/Mar/2004
Corpo Técnico:	Márcia R. T. de Camargo Ranzani; Miriam Galvani; Jacqueline Sá
Total de Páginas:	10

Resumo

O objetivo do presente estudo foi verificar a metabolização da substância teste FLUÍDO em solução nutritiva mineral, por uma cultura mista de microrganismos provenientes do meio ambiente. O ensaio teve duração de 28 dias, sendo realizado em ambiente com temperatura controlada entre 20-25°C. Os tratamentos constaram do branco (solução nutriente e microrganismos), substância teste (FLUÍDO, solução nutriente e microrganismos), padrão biodegradável (benzoato de sódio, solução nutriente e microrganismos), inibição (FLUÍDO, benzoato de sódio, solução nutriente e microrganismos) e abiótico (FLUÍDO, solução nutriente e solução esterilizante). A biodegradação da substância teste foi verificada através da análise da liberação de CO₂ entre os tratamentos utilizados. A percentagem de CO₂ liberado aos 28 dias de incubação foi de 98,76% do carbono total esperado da substância teste. O controle benzoato de sódio liberou 77,46% e o teste de inibição 66,36%. Os resultados mostraram que a substância teste FLUÍDO é facilmente biodegradável.

1. Introdução

O teste é baseado na metabolização de uma substância por uma cultura mista de microrganismos oriundos do meio ambiente. A percentagem de CO₂ desprendida, em relação ao total de CO₂ teórico esperado, informa se a substância teste é biodegradável ou biorresistente, num período de tempo.

1.1. Definições

Biodegradabilidade imediata: é a propriedade de uma substância orgânica para ser metabolizada, isto é, degradada por uma cultura mista de microrganismos.

Biodegradação para efeito deste teste: é definida como a percentagem de CO₂ liberado, pela ação microbiana em um determinado tempo, em relação ao total de CO₂ teoricamente esperado para a oxidação completa da quantidade de substância ensaiada.

Substância teste: é qualquer espécie química, biológica ou biotecnológica, formulação ou metabólito, que está sob investigação em um estudo.

2. Objetivo

O propósito do teste foi avaliar a biodegradabilidade imediata da substância teste FLUÍDO.

3. Material e métodos

O método utilizado para a avaliação da biodegradabilidade desta substância teste foi o “Ready Biodegradability: 301 B CO₂ Evolution Test adopted on 1992” (OECD, 1997).

3.1. Substância teste

A substância teste foi o FLUÍDO (ver informações gerais). A quantidade total de carbono foi determinada através do método de oxidação por via úmida. O teor médio de carbono encontrado foi de 39%. Foram transferidos 75 µL da substância teste FLUÍDO para os frascos, contendo 3 litros de solução nutritiva mais uma mistura de microrganismos.

3.2. Inóculo microbiano

Foi coletado no Rio Piracicaba uma mistura de microrganismos selvagens, em alta concentração de material orgânico. Um litro do material coletado foi centrifugado, o sobrenadante foi descartado e o precipitado foi ressuspensão em solução nutritiva para obtenção do inóculo para teste. O número de microrganismos foi determinado pelo método de diluição em placas. Para esse teste o número de células por mL foi de $2,5 \times 10^6$.

3.3. Procedimentos

Para o teste utilizou-se um sistema de aeração de fluxo contínuo, onde, colocou-se em série frascos com hidróxido de sódio para filtrar o ar de entrada no sistema. Os frascos dos tratamentos, em duplicatas, foram acoplados ao sistema de aeração e a cada frasco foram acoplados, em série, frascos com hidróxido de bário para captura do CO₂ evoluído.

O teste foi conduzido no escuro, a temperatura de 20 a 25°C durante 28 dias.

Foram utilizados os seguintes tratamentos:

- A. Branco - solução mineral (em duplicata)
- B. Solução padrão para biodegradabilidade – benzoato de sódio 20 mg de carbono/Litro (em duplicata).
- C. Substância teste - FLUÍDO na concentração de 10,0 mg de carbono/Litro.
- D. Inibição – benzoato de sódio (20 mg carbono/Litro) e substância teste FLUÍDO (10,0 mg carbono/Litro).
- E. Abiótico – FLUÍDO na concentração de 10 mg de carbono/Litro e solução esterilizante (solução de cloreto de mercúrio a 5%, 100 mL).

Todos os tratamentos receberam 10 mL do inóculo/ litro de meio, 24 horas antes da adição da substância teste.

A biodegradabilidade da amostra foi analisada pela evolução do CO₂, que foi absorvido pela solução de Ba(OH)₂ durante todo o período do teste. O CO₂ evoluído foi determinado por titulação com HCl.

4. Resultados

Os valores diários da evolução do CO₂ dos tratamentos benzoato de sódio, da substância teste FLUÍDO, solução de inibição e do abiótico estão listados na Tabela 1.

Na Tabela 2, estão listados os valores cumulativos da evolução do CO₂. Na Tabela 3, estão listadas as percentagens de CO₂ evoluído do benzoato de sódio, da substância teste FLUÍDO, solução de inibição e do abiótico.

A Figura 1 mostra a evolução de CO₂, em percentagem, das soluções de benzoato de sódio, da solução da substância teste FLUÍDO e da solução de inibição em função do período de incubação.

Após 10 dias de incubação, contados a partir dos 10% de CO₂ evoluído, a percentagem de CO₂ do tratamento com benzoato de sódio atingiu o nível superior a 60% de evolução e o tratamento inibição foi superior a 25% após 14 dias do início do teste, condições básicas para o teste ser válido. A percentagem de CO₂ evoluído aos 28 dias de incubação foi de 98,76% do carbono total da substância teste e 66,36% do carbono total do tratamento de inibição, descontando o valor encontrado para o sistema abiótico. O controle benzoato de sódio evoluiu 77,46%. De acordo com a metodologia empregada o FLUÍDO é facilmente biodegradável.

5. Conclusão

Pelos resultados obtidos, concluímos que a substância teste FLUÍDO, enviada por JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA, é facilmente biodegradável.

Referência

OECD. Organization for Economic Co-Operation and Development. In: OECD Guidelines for the Testing of Chemicals; Section 3: Degradation and Accumulation; Ready Biodegradability: 301 B CO₂ Evolution Test adopted on 1992. Paris: OECD, 1997.

Tabela 1. Quantidade diária de CO₂ evoluído (mg) do benzoato de sódio, substância teste FLUÍDO, da solução de inibição do abiótico, durante o período de incubação de 28 dias, de duplicatas.

<i>Dias de incubação</i>	<i>Benzoato de Sódio</i>		<i>FLUÍDO</i>		<i>Inibição</i>	<i>Abiótico</i>
	CO ₂ - 1	CO ₂ - 2	CO ₂ - 1	CO ₂ - 2	CO ₂ - 1	CO ₂ - 1
1º	6,71	1,98	6,6	4,62	8,25	0
3º	12,87	11,44	13,53	13,2	14,08	0
4º	14,96	15,51	21,67	20,35	16,39	0
5º	27,83	28,49	20,79	18,81	27,17	0
6º	20,515	21,505	2,255	1,485	13,805	0
7º	24,97	25,41	3,41	3,41	16,83	0
10º	32,78	32,01	9,24	9,02	28,38	0
14º	24,31	22,99	6,93	4,95	30,36	0
19º	3,63	2,31	11,99	10,12	29,92	0
24º	1,375	4,125	2,695	6,435	19,195	0
28º	2,255	2,805	13,035	12,705	14,575	0

Tabela 2. Total de CO₂ evoluído (mg) do benzoato de sódio, substância teste FLUÍDO, da solução de inibição e abiótico, durante o período de incubação de 28 dias, de duplicatas.

<i>Dias de incubação</i>	<i>Benzoato de Sódio</i>		<i>FLUÍDO</i>		<i>Inibição</i>	<i>Abiótico</i>
	CO ₂ - 1	CO ₂ - 2	CO ₂ - 1	CO ₂ - 2	CO ₂ - 1	CO ₂ - 1
1º	6,71	1,98	6,6	4,62	8,25	0
3º	19,58	13,42	20,13	17,82	22,33	0
4º	34,54	28,93	41,8	38,17	38,72	0
5º	62,37	57,42	62,59	56,98	65,89	0
6º	82,885	78,925	64,845	58,465	79,695	0
7º	107,855	104,335	68,255	61,875	96,525	0
10º	140,635	136,345	77,495	70,895	124,905	0
14º	164,945	159,335	84,425	75,845	155,265	0
19º	168,575	161,645	96,415	85,965	185,185	0
24º	169,95	165,77	99,11	92,4	204,38	0
28º	172,205	168,575	112,145	105,105	218,955	0

Tabela 3. Percentagem de CO₂ evoluído do benzoato de sódio, substância teste FLUÍDO, da solução de inibição e abiótico, durante o período de incubação de 28 dias.

<i>Dias de incubação</i>	<i>Benzoato de Sódio</i>		<i>FLUÍDO</i>		<i>Inibição</i>	<i>Abiótico</i>
	CO ₂ - 1	CO ₂ - 2	CO ₂ - 1	CO ₂ - 2	CO ₂ - 1	CO ₂ - 1
1°	3,0505546	0,900164	6,001091	4,200764	2,500455	0
3°	8,9016185	6,101109	18,30333	16,20295	6,767897	0
4°	15,702855	13,15239	38,00691	34,70631	11,73547	0
5°	28,355155	26,10475	56,91035	51,80942	19,9703	0
6°	37,681851	35,88152	58,96072	53,15967	24,15439	0
7°	49,033915	47,43362	62,06128	56,26023	29,25532	0
10°	63,936625	61,98627	70,46281	64,46172	37,85688	0
14°	74,988634	72,43817	76,76396	68,96254	47,05856	0
19°	76,638934	73,48836	87,66594	78,16421	56,12687	0
24°	77,264048	75,3637	90,11638	84,01528	61,9446	0
28°	78,289234	76,63893	101,9685	95,56738	66,36207	0
Total Médio*	77,46		98,76		66,36	

(*) valor de CO₂ evoluído da substância teste e do tratamento na inibição subtraídos, do valor do tratamento abiótico.

Figura 1. Percentagem de CO₂ evoluído na solução de benzoato de sódio, na solução da substância teste FLUIDO e na solução de inibição em função do período de incubação em dias (médias obtidas da Tabela 3).