

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ESTUDO DOS TIPOS DE REFRIGERAÇÃO UTILIZADOS NOS PROCESSOS DE
USINAGEM: REFRIGERAÇÃO ABUNDANTE, REFRIGERAÇÃO MQL E SEM
REFRIGERAÇÃO**

THIAGO AGUIAR SANTOS

SÃO LUÍS – MA

2014

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

**ESTUDO DOS TIPOS DE REFRIGERAÇÃO UTILIZADOS NOS PROCESSOS DE
USINAGEM: REFRIGERAÇÃO ABUNDANTE, REFRIGERAÇÃO MQL E SEM
REFRIGERAÇÃO**

THIAGO AGUIAR SANTOS

ORIENTADOR: PROF. DR. JEAN ROBERT P. RODRIGUES

Trabalho apresentado ao Curso de Engenharia Mecânica da
Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, como requisito
para obtenção do Trabalho de Conclusão de Curso.

SÃO LUÍS – MA

2014

Santos, Thiago Aguiar.

Estudo dos tipos de refrigeração utilizados nos processos de usinagem: refrigeração abundante, refrigeração MQL e sem refrigeração/Thiago Aguiar Santos .– São Luís, 2014.

49 f

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2013.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Rodrigues

1. Fluidos de corte. 2 .Refrigeração MQL. 3. Usinagem a seco. I. Título

CDU: 531.8

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO

**ESTUDO DOS TIPOS DE REFRIGERAÇÃO UTILIZADOS NOS PROCESSOS DE
USINAGEM: REFRIGERAÇÃO ABUNDANTE, REFRIGERAÇÃO MQL E SEM
REFRIGERAÇÃO**

THIAGO AGUIAR SANTOS

Qualificação aprovada em, ____ de _____ de 2014.

Profº. Dr. Jean Robert P. Rodrigues
(Orientador)

Profº. Msc. Kerlles Rafael Pereira Sousa
(Membro da Banca Examinadora)

Eng. José Carlos Silva Rocha Júnior
(Membro da Banca Examinadora)

DEDICATÓRIA

À minha mãe Rosirene Aguiar Santos e ao meu pai José de Ribamar Santos que sempre souberam da importância da educação e ao apoio que sempre tive. À todos os meus amigos que sempre estiveram junto comigo independente se estavam ao meu lado ou no pensamento: Ana Oliveira, Adalberto Almeida Júnior, José Wilson, Carlos Henrique, André Gustavo Amorim, Thallys Anderson, Hércules Oliveira, Renan Passos, Luís Felipe e Anderson Maia.

AGRADECIMENTO

Agradeço primeiramente a minha mãe, pois tudo que conquistei e ainda vou conquistar é graças a seu apoio, dedicação e amor que ela sempre teve comigo.

Agradeço ao meu pai pelo apoio, as conversas que tivemos, e tudo que pude absorver desses momentos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Jean Robert P. Rodrigues pela disposição e investimento do seu tempo em mim, pois só assim foi possível a realização deste trabalho.

Agradeço também a Universidade Estadual do Maranhão - UEMA, pelo conhecimento que absorvi durante a vida acadêmica e pelas oportunidades oferecidas.

Ao Diário Oficial do Estado que me apoiou desde o início do meu curso, agradeço também aos meus amigos que de forma direta ou indireta puderam me confortar com palavras de conhecimento e sabedoria para que eu não desanimasse.

E agradeço especialmente a Deus por ter me concedido saúde, ânimo e capacidade para a realização desta pesquisa.

“É muito melhor lançar-se em busca de conquistas grandiosas, mesmo expondo-se ao fracasso, do que alinhar-se com os pobres de espírito, que nem gozam muito nem sofrem muito, porque vivem numa penumbra cinzenta, onde não conhecem nem vitória, nem derrota.”

(Theodore Roosevelt)

RESUMO

Nos últimos anos, muito tem se falado sobre questões ambientais, questões trabalhistas e questões humanas. Não muito longe disso, as indústrias que envolvem usinagem vêm realizando grandes esforços com o objetivo de reduzir a utilização de fluidos de corte nesses processos, visto que grande parte deles são causadores de vários problemas. Estudos indicam que a solução está na usinagem a seco e na utilização de mínimas quantidades de lubrificante (MQL), técnicas que vem apresentando resultados satisfatórios em diversas aplicações quando comparados com a refrigeração abundante. Este trabalho apresenta um resumo bibliográfico a respeito dos fluidos de corte, as tendências da utilização de fluidos de corte nos processos de usinagem, bem como alguns resultados de trabalhos anteriores na aplicação dessas tendências em várias operações.

Palavras-chave: Fluidos de corte, Usinagem MQL, Usinagem a Seco, Questões Ambientais, Questões Trabalhistas.

ABSTRACT

In recent years, much has been said about environmental issues, labor and human issues. Not far from it, the industries that involve machining have been making great efforts in order to reduce the use of cutting fluids in these processes, since most of them are causing various problems. Studies indicate that the solution lies in dry machining and the use of minimal amounts of lubricant (MQL), techniques that has shown satisfactory results in many applications compared to the abundant cooling. This paper presents a bibliographic summary about the cutting fluids, trends in the use of cutting fluids in machining processes, as well as some results of previous work in the application of these trends in various operations.

Keywords: Cutting fluid, MQL Machining, Machining Dry, Environmental Issues, Labor Issues.

SUMÁRIO

LISTAS DE FIGURAS	12
LISTA DE TABELAS	13
LISTA DE GRÁFICOS	14
LISTAS DE SIGLAS	15
1. INTRODUÇÃO	16
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	18
2.1 Considerações Iniciais.....	18
2.1.1 <i>O Fluido de Corte como Lubrificante</i>	19
2.1.2 <i>O Fluido de Corte como Refrigerante</i>	20
2.2 Razões de utilizar os fluidos de corte.....	21
2.3 Classificação dos fluidos de corte	22
2.3.1 <i>Miscíveis com água</i>	22
2.3.1.1 <i>Sintéticos</i>	22
2.3.1.2 <i>Semi-sintéticos</i>	23
2.3.1.3 <i>Emulsões</i>	24
2.3.2 <i>Não miscíveis com água</i>	24
2.3.2.1 <i>Óleos Integrais</i>	24
2.3.3 <i>Gases e Névoas</i>	25
2.3.4 <i>Sólidos</i>	26
2.4 Aditivos	26
2.5 Seleção do fluido de corte	27
2.5.1 <i>Material da peça</i>	27
2.5.1.1 <i>Materiais Ferrosos</i>	28
2.5.1.1.1 <i>Aços</i>	28
2.5.1.1.2 <i>Ferro fundido</i>	28
2.5.1.2 <i>Materias não-ferrosos</i>	29
2.5.2 <i>Material da Ferramenta</i>	29
2.5.3 <i>Processo de usinagem</i>	30
2.6 Direções de aplicação do fluido de corte.....	32
2.7 Métodos de aplicação do fluido de corte.....	33
2.8 Impactos Ambientais, impactos no ser humano e impactos econômicos.....	34
2.9 Métodos para racionalização dos fluidos de corte.....	37

2.9.1	<i>Usinagem a seco (sem refrigeração).....</i>	38
2.9.1.1	<i>Efeito da temperatura e requisitos para ferramentas de corte para usinagem a seco..</i>	39
2.9.1.2	<i>Usinagem a seco de metais comuns</i>	41
2.9.2	<i>Unisagem MQL (Mínima quantidade de fluido)</i>	42
2.9.2.1	<i>Usinagem MQL em alguns processos</i>	43
CONSIDERAÇÕES FINAIS		46
REFERÊNCIAS		47

LISTAS DE FIGURAS

Figura 1 - Funções do fluido de corte. Fonte: (Santos, 2013)	19
Figura 2 - As três direções possíveis (A = sobre a cabeça; B = entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta; C = entre a peça e a superfície de folga da ferramenta) Fonte: (Barbosa, 2009).....	33
Figura 3 - Ilustração dos impactos ambientais ocasionados pelos diversos fluidos de corte Fonte: (Oliveira e Alves, 2007)	36
Figura 4 - Características da dureza com o aumento da temperatura de alguns materiais para ferramentas. Fonte: (Sreejith e Ngoi, 1999).	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Tipo de fluido versus qualidade obtida, onde 1 = Ruim; 2 = Bom; 3 = Ótimo; 4 = Excelente. Fonte: (Gonçalves, 2010).....	25
Tabela 2 - Fluidos de corte recomendados para algumas operações de usinagem. Fonte: Processos de (Fabricação I, Guedes)	31
Tabela 3 - Impactos dos fluidos de corte. Fonte: (Oliveira e Alves, 2007).....	37

LISTA DE GRÁFICOS

- Gráfico 1 - Resultados obtidos com ênfase na Força de usinagem (De Paula, 2007)... 45
- Gráfico 2 - Resultados obtidos com ênfase na emissão acústica (De Paula, 2007). 45

LISTAS DE SIGLAS

ABNT Associação Brasileira de Normas Técnicas.

CONAMA Conselho Nacional para o Meio Ambiente

APC Aresta Postiça de Corte.

MLQ Mínima Quantidade de Fluido

DIN Deutsches Institut für Normung

1. INTRODUÇÃO

Segundo a DIN 8580, a usinagem é qualquer tipo de processo onde ocorre a remoção de material sob a forma de cavaco. Este por sua vez, é a porção de material da peça retirada pela ferramenta que se caracteriza pela forma irregular. Basicamente, o estudo da usinagem é relacionado na mecânica (atrimento, deformação), na termodinâmica (calor) e nas características dos materiais usados (Schroeter, 2004).

Nos processos de usinagem, segundo (Naves e Da Silva, 2011), o uso de fluido de corte é uma medida que, quando escolhido e utilizado adequadamente, favorece a redução do calor gerado durante a formação do cavaco, conseqüentemente podendo aumentar a vida da ferramenta, beneficiar o acabamento superficial de peças usinadas, auxiliar na remoção do cavaco, proteger a máquina contra corrosão atmosférica e etc.

Com o aumento das atividades industriais e a evolução dos processos de usinagem, houve um acréscimo no consumo dos fluidos de corte e também a necessidade dos fluidos serem mais eficientes (Scandiffio, 2000). Esse aumento na utilização dos fluidos de corte trouxe conseqüências graves, como problemas com a saúde dos operadores, o impacto ambiental gerado pelo seu descarte e o alto custo para a aquisição desses fluidos (Cavaler, 2003).

Baseado nessa problemática, algumas alternativas têm sido procuradas para minimizar ou mesmo evitar o uso de fluido de corte nas operações de usinagem. Algumas dessas alternativas são usinagem a seco e usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF ou MQL) (Machado e Wallbank, 1997).

A usinagem a seco é caracterizada pela ausência de fluido de corte no processo e de acordo com (Sreejith e Ngoi, 2000), ela apresenta algumas vantagens como: a não poluição da atmosfera, a observação de quase nenhum resíduo nos cavacos que será refletido na redução dos custos de eliminação e limpeza e o fato desse processo não ser danoso à saúde já que o mesmo não é prejudicial para a pele, conseqüentemente oferecendo redução nos custos da usinagem.

Porém, segundo (Souza, 2011), na usinagem a seco não se observa as funções básicas que um fluido de corte pode oferecer, como a refrigeração, lubrificação e o transporte de cavacos. Características que podem gerar queda de rendimento da ferramenta de corte, perda de precisão dimensional e geometria das peças, aumento do teor de particulados na atmosfera, cavacos aquecidos com maior dificuldade de adquirir formato adequado, maior

risco de soldagem e variações no comportamento térmico da máquina (Klocke et al, 1996). Dessa forma, os processos de usinagem passam a exigir uma adaptação de todos os fatores influentes: máquina, peça, ferramenta e etc. Forçando as empresas a adquirirem modernas ferramentas de corte, sem perder a dureza e a resistência ao desgaste.

Já o método de mínima quantidade de lubrificação (MQL) ou mínima quantidade de fluido (MQF) está compreendido entre a usinagem com refrigeração e a sem refrigeração, onde apenas uma quantidade mínima de lubrificante/refrigerante é misturado com ar e lançado no processo cortante (De Paula, 2007). Segundo (Macagnani, 2006), na usinagem MQL a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, mesmo que pequena, pelo ar comprimido. Mesmo sendo pequena, a pequena quantidade de óleo é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em certos materiais, diminuindo a quantidade de fluido a ser descartado.

Porém, apesar das vantagens que o método MQL oferece, deve-se ter cuidado pois a pulverização levanta partículas de óleo no ambiente atmosférico, exigindo um bom sistema de exaustão com controle de partículas. A aplicação do fluido por névoa é considerada sem retorno e além disso, as linhas de ar comprimido geram muito barulho, normalmente acima do limite para o ouvido humano, causando poluição sonora e prejudicando a comunicação (Abreu, 2010).

A tendência é que cada vez mais se diminua a utilização do fluido de corte, tanto por aspectos ambientais quanto econômicos. Para que isto se torne possível, estudos são realizados e novas tecnologias são criadas, visando melhorias no processo de usinagem.

Este trabalho tem como objetivos analisar os tipos de refrigeração utilizados no processo de usinagem: refrigeração abundante, refrigeração MQL e sem refrigeração. Verificar os tipos de usinagem (furação, brocamento, torneamento e etc) e identificar que tipo de refrigeração se torna mais vantajosa para cada situação, comentando de forma crítica as consequências de cada refrigeração levando em consideração às questões funcionais de usinagem, trabalhistas, econômicas e ambientais propondo uma solução ou indicar a tarefa mais viável tendo em vista todas as questões anteriores.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Considerações Iniciais

Na usinagem, o uso de fluidos de corte é geralmente justificado pela geração excessiva e/ou eliminação deficiente de calor pelo sistema ferramenta-cavaco-peça. A utilização de fluidos de corte na usinagem dos materiais foi introduzida por F.W. Taylor em 1890, quando utilizou água para resfriar a ferramenta, depois uma solução de água e sabão para evitar a oxidação da peça e da ferramenta. Dessa forma, tal feito conseguiu aumentar a velocidade de corte em 33% sem prejudicar a vida útil da ferramenta (Lisboa et al, 2013). Com base nisso, devemos atentar para as principais funções de fluidos de corte que são:

- Prevenção contra a soldagem cavaco-ferramenta – esta é uma função de lubrificação e é bastante necessária quando o material sendo cortado tem tendência à formação da aresta postiça de corte e as condições de usinagem utilizadas propiciam esta formação (baixas temperaturas de corte);
- Retirada do cavaco da região de corte – em algumas operações de usinagem, como furação profunda, o único meio de se retirar o cavaco da região de corte é via fluxo de fluido de corte. Para isto, este fluxo deve ser de alta pressão e baixa viscosidade e o cavaco formado deve ser pequeno;
- Proteção contra a corrosão;
- Redução da dilatação (distorção) térmica da peça, com o fim de facilitar a obtenção de tolerâncias apertadas;
- Evitar dano à estrutura superficial e o crescimento exagerado de tensões residuais na superfície da peça usinada (principalmente em processos de retificação) (Santos, 2013).

Na figura 1 abaixo relaciona as funções dos fluidos de corte e as prevenções que elas ocasionam em processos de usinagem:

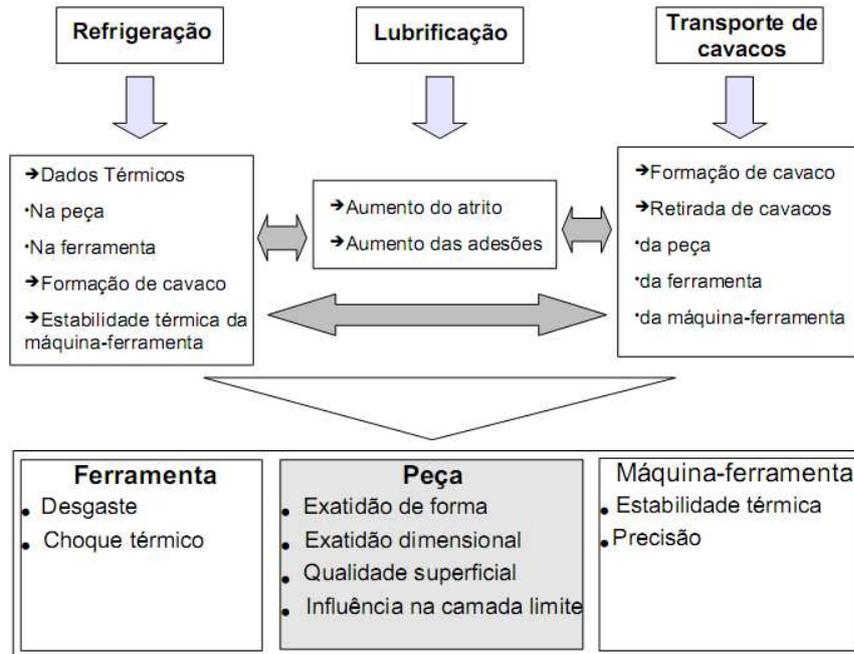


Figura 1 - Funções do fluido de corte. Fonte: (Santos, 2013)

2.1.1 O Fluido de Corte como Lubrificante

O trabalho em metal se baseia, a princípio, em uma operação de cisalhamento pela pressão exercida, com a ferramenta de corte, sobre uma camada superficial da peça. Durante o processo, o superaquecimento pode resultar em modificações estruturais no material da peça. Neste contexto, os fluidos de corte atuam de forma a promover lubrificação entre a peça e a ferramenta de corte e, também, remover parte do calor gerado durante o processo de corte (Maia et al, 2007).

Estas propriedades permitem que o fluido consiga chegar à região de corte, diminuindo o seu coeficiente de atrito, ainda que submetido a altas velocidades de corte. Estas características facilitarão a dissipação rápida do calor. Mesmo quando o material da ferramenta é resistente ao desgaste, o refrigerante é utilizado para garantir as “qualidades dimensionais, geométricas e de superfície” da peça (Lisboa et al, 2013).

Na ação do fluido como lubrificante, ele penetra entre as superfícies de contato através do fenômeno da capilaridade, sendo ajudado pela vibração entre ferramenta, peça e cavaco. Caso o fluido não consiga chegar na região de corte, ele não vai ter a capacidade de lubrificar os sistema. Devido a isto, a ação lubrificante fica prejudicada quando se aumenta a velocidade de corte, pois para o fluido chegar na região de corte é necessário que ele seja impulsionado com alta pressão, o que vai exigir dele, dentre outras características, que não se vaporize quando submetido a estas pressões altas (Santos, 2013).

Dessa forma, é compreensível entender que os fluidos tem ação lubrificante a baixas velocidades de corte, reduzindo o atrito em condições severas de tensões extremamente altas (Machado, 2013). Além desses fatores, o fluido deve ter como bom lubrificante:

- Capacidade de resistir a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- Deve possuir boas propriedades: antifricção e antissoldantes;
- A viscosidade deve ser suficientemente baixa para permitir uma fácil circulação do fluido e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às superfícies da ferramenta. (Diniz, 1999)

2.1.2 *O Fluido de Corte como Refrigerante*

Já sob altas velocidades de corte, as temperaturas são elevadas e as condições não são favoráveis para a penetração do fluido nas interfaces para que ele exerça suas funções. Deste modo, como refrigerante, o fluido favorece a transferência de calor da região de corte, reduzindo assim a temperatura da ferramenta e da peça, ainda que a temperatura na interface ferramenta/cavaco não seja significativamente alterada. Além disso, mesmo que a concentração de óleo seja mínima, haverá redução do coeficiente de atrito e, portanto, da temperatura (Souza, 2011).

Estas características facilitarão a dissipação rápida do calor. Mesmo quando o material da ferramenta é resistente ao desgaste, o refrigerante é utilizado para garantir as qualidades dimensionais, geométricas e de superfície da peça (Lisboa et al, 2013). Um exemplo típico deste caso é o processo de retificação, onde o rebolo não é danificado pelo calor gerado, pois é refratário e, na maior parte das vezes, muito grande, o que faz com que o acréscimo de temperatura no seu corpo seja muito pequena (Santos, 2013).

Dessa forma, para desempenhar suas funções, entretanto, os fluidos de corte precisam apresentar algumas propriedades. Um fluido de corte deve ter como um bom refrigerante:

- Baixa viscosidade a fim de que flua facilmente;
- Capacidade de envolver “molhar” para estabelecer um bom contato térmico;

- Alto calor específico e alta condutividade térmica. (Diniz, 1999)

Contudo, é importante salientar que os fluidos de corte podem ter suas funções afetadas em superfícies quentes, pela formação de colchões de vapor que impedem o acesso do fluido (Machado, 2013).

2.2 Razões de utilizar os fluidos de corte

A busca por valores maiores de velocidade de corte sempre foi almejado em virtude de uma maior produção de peças, e isso foi possível devido ao surgimento de novos materiais de corte (metal duro, cerâmicas e ultra-duros) capazes de usinar os materiais com altíssimas velocidades de corte, em contrapartida grandes valores de temperaturas foram geradas na região de corte devido a um grande atrito entre a peça e a ferramenta.

Dessa forma, é possível atentar para algumas razões de se utilizar os fluidos de corte como reduzir custos e aumentar a taxa de produção, através do aumento da vida das ferramentas, da redução das forças/potência de usinagem e do melhoramento do acabamento superficial facilitando a remoção dos cavacos da região de corte e promovendo menos distorção na peça (Machado, 2013).

Segundo (Stoeterau, 2007), existem várias razões para se utilizar os fluidos de corte, analisando cada fator no processo:

- Refrigeração da peça: redução de deformações devidas às tensões oriundas de grandes aquecimentos locais ou mesmo totais; Eliminação de cores de revenido na superfície usinada (usinagem por abrasão), operações de retificação - acabamento da peça; Manutenção das medidas da peça em trabalho em operações com tolerâncias estreitas; Facilidade para o manuseio da peça usinada;
- Expulsão dos cavacos gerados: muito importante em vários processo de usinagem como furação e fresamento;
- Melhoria do acabamento superficial: diminuição de danos térmicos na peça e na ferramenta através da redução do atrito ferramenta/peça;

- Refrigeração da máquina-ferramenta: manutenção da precisão da máquina - dimensões e posições de guias e dispositivos;
- Melhorias de caráter econômico: redução do consumo de energia - diminuição do grau de recalque e conseqüentemente da força de usinagem; Redução dos custos de ferramenta - redução do desgaste aumento da vida; Diminuição ou eliminação da corrosão na peça - proteção do filme de fluido da umidade, vapores e etc;

2.3 Classificação dos fluidos de corte

Diante do acelerado crescimento tecnológico mundial, existe hoje no mercado uma grande variedade de fluidos de corte. Contudo, ainda não existe um fluido de corte que seja universal, ou seja, que agrupe todos os diferentes requisitos para cada operação de usinagem conhecida nos dias atuais (Junior, 2012).

Cada fluido de corte possui características particulares, vantagens e limitações distintas. Por meio da distinção destas características é possível fazer uma classificação dos diversos tipos de fluidos de corte (Gonçalves et al, 2010).

2.3.1 *Miscíveis com água*

A água é o mais eficiente condutor de calor, ideal para operações de altas velocidades e temperaturas, porém seu baixo poder umectante e lubrificante junto ao relevante poder de corrosão faz com que seja substituída por outros fluidos, com o propósito de conciliar a refrigeração à lubrificação (Braga et al, 2002). Segundo (Melo et al., 2010), dentre os fluidos miscíveis com água encontram-se as chamadas soluções aquosas (sintéticos), e as emulsões (semi-sintéticos e óleos solúveis).

2.3.1.1 *Sintéticos*

Os fluidos sintéticos são definidos como soluções químicas, compostas de sais orgânicos e inorgânicos dissolvidos em água, não contendo óleo mineral ou vegetal. De forma geral, permite rápida dissipação de calor, bom controle dimensional, excelente poder detergente e boa visibilidade da região de corte, torna o preparo da solução mais prática e possui elevada resistência à oxidação do fluido e da peça (Micaroni, 2006).

Segundo (Scandiffio, 2000), os fluidos sintéticos não contêm óleos de petróleo, possuem característica de fluido refrigerante e apresenta certas vantagens, como: a alta capacidade de refrigeração, o aumento vida útil do fluido, presença de filmes residuais

pequenos e de fácil remoção, são fáceis de misturar e possuem relativa facilidade no controle da concentração desejada

As desvantagens da utilização desta categoria de fluidos estão relacionadas ao baixo poder lubrificante, a formação de compostos insolúveis e de espuma para determinadas operações de usinagem, fatos minimizados com a adição de antiespumantes e aditivos lubrificantes (Gonçalves et al, 2010).

Os seguintes agentes químicos podem ser encontrados na maioria de fluidos sintéticos (Melo et al, 2010):

- Aminas e Nitratos para proteção contra ferrugem;
- Nitratos;
- Fosfatos e boratos para reduzir a dureza da água;
- Sabões e agentes molhantes para aumentar a lubrificação;
- Compostos fosforosos, cloros e enxofre (aditivos de extrema pressão).

2.3.1.2 *Semi-sintéticos*

São também formadores de emulsões e se caracterizam por apresentarem de 5% a 50% de óleo mineral no fluido concentrado, aditivos e compostos químicos que se misturam na água formando moléculas individuais (Machado, 2013). Dessa forma, pode-se obter uma emulsão translúcida, composta por minúsculas partículas de óleo. Os fluidos semi-sintéticos combinam algumas das melhores qualidades dos sintéticos com os óleos emulsionáveis (Bianchi, 2004).

Segundo (Melo et al, 2010), assim como os fluidos sintéticos, os semi-sintéticos são adequados para inúmeros tipos de processos de usinagem e são mais fáceis de cuidar que óleos solúveis. Esses fluidos fornecem uma boa lubrificação para trabalhos de média e grande dificuldade. Suas propriedades de resfriamento também são melhores do que os óleos solúveis em geral, permitindo ao usuário cortar em velocidades maiores. São menos viscosos que um óleo solúvel e além disso, apresentam melhor resistência à corrosão e ao ataque por microorganismos (Biermann, 2007).

Porém, a dureza da água afeta a estabilidade de semissintéticos podendo causar a formação de depósitos de água dura. Os semi-sintéticos formam espuma facilmente devido

aos seus aditivos de limpeza e geralmente oferecem menos lubrificação do que os óleos solúveis (Souza, 2011).

2.3.1.3 Emulsões

Compõem-se de pequena porcentagem de um concentrado de óleo emulsionável, usualmente composto por emulsificadores de óleo mineral e outros ingredientes, dispersos em pequenas gotículas de água (Santos, 2013). Os emulsificadores são substâncias que reduzem a tensão superficial da água e, com isso, facilitam a dispersão do óleo na água e o mantêm finalmente disperso como uma emulsão estável.

A miscibilidade é garantida pela presença de emulgadores, que confere uma carga elétrica na interface óleo-água, que evita a coalescência das partículas de óleo. Em geral as emulsões apresentam propriedades lubrificantes e refrigerantes moderadas (Machado, 2013).

Segundo (Stoeterau, 2007), as emulsões possuem como grande vantagem a grande redução de calor, a remoção de cavacos, o fato de ser econômico, uma aceitação boa por parte do operador e por ser menos agressivo à saúde e mais benéficos à segurança.

Porém, segundo (Gonçalves et al, 2010) o grande problema relacionado às emulsões é quanto a estabilidade biológica, pelo fato de que os agentes emulgadores transformam-se em fonte de alimento para bactérias aeróbias e anaeróbias, as quais em grande quantidade degradam o fluido, destruindo suas propriedades de refrigeração e lubrificação, tornando-o inutilizável.

Em comparação com os óleos integrais, tanto as soluções como as emulsões têm custo inicial baixo, mas em virtude de sua vida limitada, exigem despesas mais elevadas de controle, manutenção e descarte (Melo et al, 2010).

2.3.2 Não miscíveis com água

2.3.2.1 Óleos Integrais

Podem ser classificados em: óleos minerais, óleos graxos, óleos mistos e óleos com aditivos. São chamados de óleos integrais pelo simples fato de não possuírem água na sua composição. Como regra geral, todos os óleos integrais apresentam baixa capacidade de refrigeração e alta capacidade de lubrificação se comparados com os fluidos miscíveis em água (Melo et al, 2010).

Estes óleos têm excelentes propriedades lubrificantes, bom controle anti-ferrugem e longa vida útil. No entanto, apresentam menor poder refrigerante quando comparados com os fluidos de corte solúveis em água, devido ao seu calor específico ser cerca de metade em relação ao da água (Gonçalves et al, 2010). A tabela 1 abaixo relaciona o fluido com a qualidade obtida.

Qualidade Obtida \ Fluido	Sintético	Semi- sintético	Óleo solúvel	Óleo mineral
Calor removido	4	3	2	1
Lubrificação	1	2	3	4
Manutenção	3	2	1	4
Filtrabilidade	4	3	2	1
Danos ambientais	4	3	2	1
Custo	4	3	2	1

Tabela 1 - Tipo de fluido versus qualidade obtida, onde 1 = Ruim; 2 = Bom; 3 = Ótimo; 4 = Excelente. Fonte: (Gonçalves, 2010).

2.3.3 Gases e Névoas

Os fluidos de corte gasosos visam principalmente a refrigeração e a expulsão do cavaco na operação de usinagem (Ferraresi, 1977). Contudo, não se deve esperar desta classe de fluidos os efeitos da lubrificação nem do impedimento da corrosão das partes acessíveis.

Entre os fluidos gasosos utilizados, o ar comprimido é o mais utilizado para melhorar a retirada de calor e expulsão do cavaco da zona de corte. Por possuírem menor viscosidade, os fluidos gasosos têm maior capacidade de penetrar até a zona ativa da ferramenta. Em alguns casos específicos, são utilizados para a refrigeração e proteção contra oxidação gases como o argônio, hélio, nitrogênio e dióxido de carbono, porém, é uma aplicação de alto custo. Em operações de mecânica de precisão e usinagem de alta velocidade, névoas e gases são usados (Melo et al, 2002).

Em geral, os fluidos de corte gasosos apresentam certas vantagens como menor consumo de óleo, o que reduz os custos e os impactos ao meio-ambiente, melhor visibilidade

e um certo melhoramento da vida da ferramenta. Já as desvantagens podem ser entendidas com a baixa capacidade de lubrificação e refrigeração, além da necessidade de um sistema de exaustão, o que exige um cuidado especial para a não contaminação no ambiente de trabalho.

2.3.4 Sólidos

A pasta de Bissulfeto de Molibdênio (MoS_2) pode ser aplicada na superfície de saída da ferramenta com um pincel. Pelas suas características lubrificantes em condições de extrema pressão, tem dado excelentes resultados (Stemmer, 2005). Além disso, ceras, pastas, sabão, banha de porco e grafite são os mais comuns. São geralmente aplicados diretamente na peça ou ferramenta.

2.4 Aditivos

Os aditivos melhoram as propriedades inerentes aos fluidos ou lhes atribuem novas características. Em geral, se enquadram em duas classes:

- aqueles que afetam uma propriedade física (exemplo, viscosidade);
- aqueles cujo efeito é puramente químico (exemplo, anticorrosivos e antioxidantes) (Biermann, 2007).

Por exemplo, óleos com aditivos de extrema pressão (EP) são compostos de enxofre, cloro, fósforo ou éster sintético/vegetal, que reagem em altas temperaturas (200 a 1000 °C), formando na zona de contato sulfetos, cloretos ou fosfatos, constituindo uma película anti-solda na face da ferramenta e assim, minimizando a formação do gume postiço, aumentando a vida útil da ferramenta (Melo et al, 2002).

Atualmente, os aditivos mais usados são:

- Antiespumantes: tem a função de evitar a formação de espuma que poderia impedir a boa visão da região de corte e comprometer o efeito de refrigeração do fluido;
- Anticorrosivos: tem a por finalidade proteger a peça, a ferramenta e a máquina-ferramenta da corrosão (são produtos à base se nitrito de sódio);
- Antioxidantes: tem a função de impedir que o óleo se deteriore quando em contato com o oxigênio no ar;
- Biocidas: são substâncias ou misturas químicas que tem a função de inibir o crescimento de microorganismos;

- Detergentes: reduzir a deposição de iôdo, lamas e borras (composto de magnésio, bário, cálcio, etc);
- Emulgadores: são responsáveis pela formação de emulsões de óleo na água;
- Agentes EP (extrema pressão): para operações mais severas de corte, eles conferem aos fluidos de corte uma lubricidade melhorada para suportarem elevadas temperaturas e pressões de corte reduzindo o contato da ferramenta com o material. Os principais agentes EP são à base de enxofre, cloro e fósforo (Gonçalves et al, 2010).

2.5 Seleção do fluido de corte

Embora ensaios de laboratórios ou testes nas linhas de produção devam ser primordiais para a decisão final, algumas informações relevantes devem antes ser consideradas:

- Material da peça;
- Material da ferramenta;
- Processo de usinagem;
- Outros fatores: aceitação pelo operador da máquina, facilidade de descarte, saúde humana e a contaminação do fluido e fatores econômicos.

Com base nos fatores apontados, encontrar a melhor combinação para obter o máximo proveito possível do fluido e de suas propriedades não é tarefa simples e exige, em muitos casos, intensas pesquisas (Melo et al, 2002). Os ensaios de laboratórios devem ser usados como critério de seleção correta do fluido de corte e de aditivos, apesar da maioria dos produtores fornecerem tabelas e diagramas que ajudam o consumidor a selecionar o produto .

2.5.1 *Material da peça*

O momento da escolha do fluido de corte pode ser considerado decisiva para os objetivos desejados no processo de usinagem. Como exemplo desses objetivos, pode-se citar: Aumento da produção, vida mais longa da ferramenta, arraste de cavacos, melhor acabamento e etc. Segundo (Ferraresi, 1977), conhecer o material da peça a ser usinada e o seu comportamento é decisivo para uma escolha correta do fluido de corte. Assim, surge o conceito de usinabilidade, que nada mais é do que a propriedade que os materiais têm de se deixarem ser usinados.

Se um material possuir baixa usinabilidade, ele deverá ser usinado a baixas velocidades de corte, ocasião em que o atrito gerado supera a elevação da temperatura. Conseqüentemente, será selecionado um fluido de corte lubrificante, como um óleo integral. Já um material de alta usinabilidade será, preferencialmente, usinado a altas velocidades de corte, gerando muito calor durante o processo. Assim, emulsões poderiam ser escolhidas nesse caso.

2.5.1.1 Materiais Ferrosos

2.5.1.1.1 Aços

Quase todos os fluidos podem ser utilizados, dependendo principalmente do tipo de operação a ser realizado. No caso dos aços de usinabilidade normal (aços de cementação, de beneficiamento e de construção) recomenda-se o uso de emulsões e soluções. Já para os aços com usinabilidade difícil (aço inox, aço fundido) é recomendável as emulsões com aditivos de extrema pressão e óleos altamente aditivados para evitar o empastamento do material na ferramenta (Santos, 2013). No caso dos aços de difícil usinagem (aço manganês, aços CrMo, aços silício) é imprescindível o emprego de óleos de extrema pressão.

Já para o aço carbono, pode-se usar qualquer tipo de óleo (a escolha se dá baseada em outros fatores que não o material da peça) e para o aço inoxidável austenítico, é bom que se utilize óleos do tipo EP para dificultar o empastamento do cavaco na ferramenta.

2.5.1.1.2 Ferro fundido

O ferro fundido cinzento deve ser usinado a seco ou com ar (às vezes com aspiração do cavaco), para evitar dano à máquina-ferramenta já que produzem cavacos de ruptura e no torneamento de aços endurecidos com ferramentas de CBN ou cerâmicas é preferível que não se use fluido de corte, a fim de que o calor gerado possa diminuir um pouco a dureza do material da peça e, com isso, facilitar o corte. Isto não traz prejuízos às ferramentas, já que estes materiais são extremamente resistentes à temperatura. Um óleo emulsionável pode, entretanto, ser útil para ajudar a remover o cavaco (Biermann, 2007).

Na usinagem de ferro fundido maleável, se for usado fluido de corte, este deve ser óleo puro ou algum tipo especial de emulsão. Deve-se tomar cuidados para que os cavacos não reagem quimicamente com emulsões de óleos solúveis. A usinagem de ferro fundido branco é difícil e geralmente requer aditivos EP nas emulsões.

2.5.1.2 *Materias não-ferrosos*

No caso do alumínio, do latão, do bronze e do cobre, eles devem ser usinados a seco ou com óleos inativos sem enxofre e, além disso, não se deve utilizar fluidos com água devido ao risco de combustão, causada pela liberação de hidrogênio.

Na usinagem do níquel e suas ligas em geral, são utilizados emulsões, visto que o níquel e suas ligas possuem uma grande tendência para encruarem. Já as ligas de titânio e cobalto são resistentes ao calor e muitas vezes chamadas de superligas, também possuem altas tendências de encruarem e são difíceis de serem usinadas. A escolha do fluido de corte dependerá da operação de corte e da tenacidade da liga e a decisão pode cair em qualquer tipo de fluido de corte. Em condições severas, os aditivos são frequentemente usados. Enxofre livre, entretanto, pode causar descoloração da peça (Barbosa, 1999).

2.5.2 *Material da Ferramenta*

O momento da escolha de materiais para as ferramentas usadas nos processos de usinagem é muito importante para se ter sucesso na operação desejada. Esses materiais podem ser o aço rápido, o metal duro, a cerâmica e o diamante e devem conter as seguintes propriedades, de acordo com (Ferraresi, 1977):

- Elevada dureza a quente;
- Elevada dureza a frio;
- Tenacidade;
- Resistência à abrasão;
- Estabilidade química;
- Facilidade de obtenção a preços econômicos.

É importante que o profissional tenha conhecimento das temperaturas de corte e das tensões na ferramenta para um determinado tipo de usinagem, mas para isso, é necessário identificar a taxa de remoção do material por meio da escolha do material da ferramenta. As ferramentas de aço carbono e aço liga devem ser usadas à baixas temperaturas, é essencial que se use uma refrigeração adequada. Os aços-rápidos também requerem uma refrigeração eficiente, e na usinagem de materiais tenazes, aditivos anti-solda devem ser usados (Barbosa,

1999). Além disso, ferramentas de aço rápido têm problemas com a exposição à água devido à corrosão, exigindo emulsões com aditivos antiferruginosos eficientes (Diniz, 1999).

Como as ligas fundidas, os metais duros e os cermets possuem durezas maiores que as ferramentas de aços, acabam suportando trabalhar à temperaturas mais elevadas. A taxa de remoção de material quando se utiliza estas ferramentas é alta, dessa forma, é necessário a aplicação de um refrigerante para o aumento de vida da ferramenta. Óleos emulsionáveis são usados com frequência, mas a escolha correta deve variar de acordo com as condições de cada operação (Lisboa et al, 2013).

Para as operações com ferramentas cerâmicas à base de óxidos é importante que se faça sem fluido de corte para evitar a variação de temperatura, pois devido a alta fragilidade, a probabilidade de ocorrer choques térmicos se torna muito grande podendo causar trincas superficiais. As cerâmicas à base de nitreto de silício são menos susceptíveis a este tipo de problema, por serem mais tenazes que as cerâmicas à base de Al_2O_3 (Stemmer, 2005).

Se um fluido de corte vai reduzir temperatura, sem causar trincas, ele será sempre recomendado para aumentar a vida da ferramenta, porém, já se tem realizado alguns estudos para evitar ou minimizar a utilização de fluidos de corte, a fim de se evitar problemas com o meio ambiente causados pelo vapor dos fluidos de corte e para se diminuir os custos com a compra e tratamento dos fluidos de corte (Santos, 2013).

2.5.3 *Processo de usinagem*

Nos processos em que se utiliza baixa velocidade de corte (de usinagem difícil) recomendam-se fluidos com boas características de lubrificação, os insolúveis em água (óleos com aditivos de extrema pressão, por exemplo). Já para a usinagem fácil, onde se utilizam altas velocidades de corte, a característica esperada do fluido é a qualidade refrigerante (usam-se emulsões ou soluções).

A severidade dos processos de usinagem variam desde os mais pesados cortes de brochamento até os mais leves de retífica. Devido a isso, a seleção do fluido de corte vai variar desde os mais ativos tipos de óleo de corte até os óleos emulsionáveis de baixa concentração. Não é difícil encontrar literaturas que orientam a escolha de acordo com a operação de corte (Barbosa. 1999).

Na retificação geralmente ocorrem fortes aquecimentos que produzem marcas de superaquecimento, endurecimento de certos pontos, camadas macias por recristalização, trincas, etc. É necessário reduzir a temperatura na zona de retificação e isso pode ser feito através de refrigeração ou reduzindo-se o atrito. Em operações leves de retificação (retificação

sem centros, retificação plana) empregam-se normalmente fluidos de corte miscíveis em água. Através de aditivos o conjunto peça-ferramenta fica protegido contra corrosão, reduz-se o atrito e o desgaste. Na retificação com rebolos perfilados (roscas, engrenagens), gera-se muito calor de atrito (Melo et al, 2010).

No caso da furação profunda, necessita-se de lubrificação, mas também de baixa viscosidade, para que o cavaco possa ser removido sem dificuldade. Assim, utiliza-se óleo mineral composto ou óleo sulfurado com baixa viscosidade. No brochamento são utilizadas emulsões, óleos sulfurados ou óleos puros, dependendo do material que está sendo cortado. Há grandes exigências quanto à precisão de formas, de medidas e a qualidade do acabamento. Devido a isso, óleos com aditivos redutores do atrito são utilizados. Já no superacabamento, o fluido de corte deve reduzir o atrito e o desgaste, isso para que se obtenha a mínima rugosidade superficial. Utilizam-se óleos de viscosidade muito baixa com aditivos de extrema pressão e busca-se melhorar as qualidades lubrificantes (Reis, 2000).

Além destes fatores importantes, o custo do fluido de corte pode também influenciar na decisão. Os óleos solúveis tem um bom preço no mercado, e muitas vezes este é um fator chave para a decisão. A tabela 2 abaixo, relaciona o material, o tipo de processo e o fluido que deve ser utilizado no caso.

Material	Torneamento	Fresamento de topo	Perfuração	Abertura de roscas
Aço de baixo C	Compostos sintéticos ou óleos solúveis 1:20. Óleos clorinados ou sulfurados para aços mais duros. Com ferramentas de metal duro, pode-se prescindir de fluidos	Óleo mineral sulfurado ou óleo solúvel para serviço pesado 1:20. Com metal duro prefere-se compostos sintéticos.	Fluidos sintéticos (químicos). Óleo de gordura. Óleo solúvel 1:10 de serviço pesado em corte com metal duro.	Óleos sulfurados. Óleos minerais sulfuclorinados. Óleo de gordura. Óleos para serviço leve e pesado.
Ferro fundido	Corte seco, quando usinados com metal duro. Óleo solúvel 1:20 para garantir pequena quantidade de pó, pode auxiliar em usinagem de acabamento. Óleo solúvel para serviço pesado ou óleos sulfuclorinados para peças mais duras	Corte seco com metal duro. Maior quantidade de lubrificante que no torneamento. Óleo solúvel para serviço pesado ou aditivos sulfuclorinados.	Corte a seco ou óleos solúveis. Óleos de pressão extrema para grandes avanços.	Corte seco ou fluidos sintéticos (químicos) para serviço pesado. Óleos solúveis clorinados-sulfurados de serviço médio a pesado.
Aço inoxidável	Óleos minerais sulfuclorinados. Óleo solúvel para serviço médio a pesado 1:5. Com metal duro, às vezes de corte seco.	Óleos solúveis para serviço médio e pesado 1:5. Para cortes de acabamento, os óleos sintéticos para serviço leve podem ser melhores.	Óleo mineral sulfuclorinado ou óleo mineral-gordura. Para serviço médio a pesado. Óleos solúveis, com S e Cl para brocas de metal duro.	Para aços inoxidáveis de usinagem fácil; óleo solúvel para serviço médio a pesado. Outros aços inoxidáveis: óleo mineral, sulfuclorinado ou mistura de óleo de gordura
Ligas de alumínio	Corte a seco ou óleos solúveis leves 1:15 a 1:30 ou querosene preferivelmente com óleo.	O mesmo para o torneamento.	Óleo solúvel 1:15 para brocas de metal duro, corte leve,	Óleo solúvel sulfuclorinado para vida mais longa das ferramentas. Para

	Há vários óleos e fluidos sintéticos (químicos) produzidos especialmente para usinagem de alumínio.		eventualmente com enxofre e cloro. Compostos especiais.	ferramentas maiores e altas velocidades, óleo para serviço pesado. Óleo de gordura.
Ligas à base de níquel	Óleo mineral-gordura sulfluorinados para serviço pesado. Óleos solúveis para serviço pesado e óleos solúveis sulfluorinados	O mesmo para o torneamento.	Óleos minerais ou de gordura sulfluorinados para serviço médio ou pressão extrema ou combinações.	O mesmo para perfuração.
Cobre e latão	Óleo solúvel comum ou óleo comum clorinado. Ter cuidado com manchas	Óleo solúvel comum 1:30 ou mistura de óleo mineral-gordura.	Óleo solúvel 1:20 ou clorinado. Óleo mineral-gordura leve.	Óleo mineral-gordura leve. Para cortes maiores, óleo sulfurizado ou clorinado.
NOTAS	Óleos solúveis – água é o melhor meio de resfriamento, mas não lubrifica e enferruja. Mistura com óleo e sabão ou sulfonados são adicionadas. Óleo solúvel é misturado com água nas proporções indicadas.			
	Óleos comuns – os mais comuns são os minerais, porque são de baixo custo, bons lubrificantes e sem cheiro.			
	Óleos gordos – como os de gordura são misturados (5-10%) com os minerais porque lubrificam melhor, sobretudo sob pressão.			
	Enxofre e cloro – um ou outro ou ambos podem ser adicionados aos óleos básicos acima citados, resultando numa película lubrificante, entre o cavaco e a ferramenta, mais estável e mais tenaz.			
	Óleos sulfurados – são usados principalmente na usinagem do aço, para a abertura de roscas e brochamento, pois não mancham. Como eles mancham o cobre, os óleos clorinados ou comuns são melhores para usinagem desse metal.			
FLUIDOS DE CORTE – Com exceção do ferro fundido, que pode ser cortado “a seco”, a maioria dos metais e das ligas é usinada com o emprego de fluidos de corte, que permitem a usinagem mais eficiente, mais rápida e de melhor acabamento, por que a presença desses fluidos promove não só o resfriamento da peça e das ferramentas, como igualmente a lubrificação da ferramenta e da superfície das peças, além de formar uma película sobre a superfície da ferramenta, atuando como agente que impede a soldagem da ferramenta com o cavaco e a corrosão (enferrujamento) da ferramenta, da peça e da própria máquina operatriz.				

Tabela 2 - Fluidos de corte recomendados para algumas operações de usinagem. Fonte: Processos de Fabricação I, Guedes.

2.6 Direções de aplicação do fluido de corte

A escolha da melhor direção de aplicação depende de uma série de fatores inerentes ao processo como, por exemplo, o tipo de material a ser cortado como citado acima. Além da direção de aplicação, a forma como o fluido de corte é utilizado pode ser considerado importante no momento da utilização do fluido. Assim, diferentes formas e direções de aplicação têm sido usadas para conduzir o fluido de corte mais próximo possível da aresta cortante, de tal forma que ele possa exercer suas funções, principalmente a lubrificante como mostra a figura.

Há três direções básicas de como o fluido pode ser aplicado: sobre cabeça; entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta; entre a peça e a superfície de folga da ferramenta, conforme a figura 2 mostra abaixo (Reis, 2000).

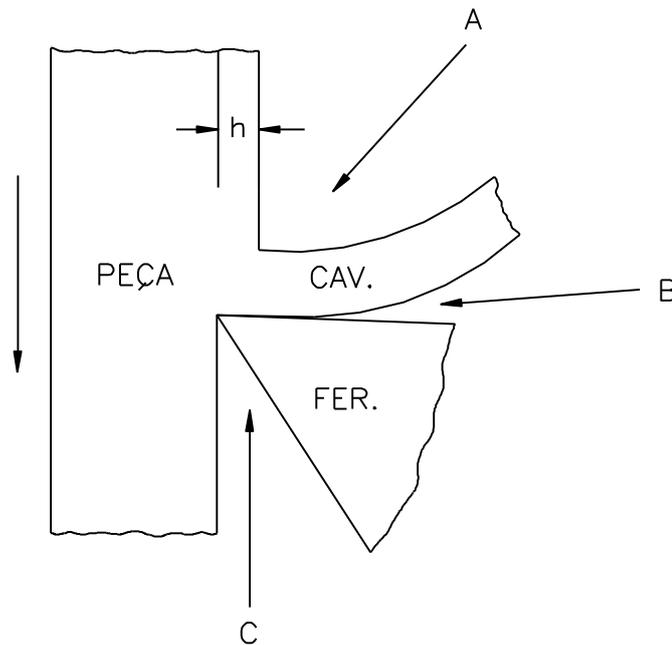


Figura 2 - As três direções possíveis (A = sobre a cabeça; B = entre a superfície inferior do cavaco e a superfície de saída da ferramenta; C = entre a peça e a superfície de folga da ferramenta) Fonte: (Barbosa, 2009)

2.7 Métodos de aplicação do fluido de corte

Existem basicamente três métodos de aplicação dos fluidos de corte:

- Jorro de fluido à baixa pressão (torneira à pressão normal);
- Pulverização;
- Sistema à alta pressão.

Segundo (Reis, 2000), o jorro de fluido à baixa pressão é o mais tradicionalmente utilizado, principalmente devido à sua simplicidade. O fluido é aplicado em baixa pressão, sobre-cabeça (posição A) contra a superfície do cavaco, ou ainda na superfície de saída da ferramenta (posição B). Assim, um grande volume de fluido é utilizado para atuar em uma região muito pequena e este alto volume de fluido pode justificar-se por sua ação refrigerante. Mas como lubrificante não se justifica, pois, apesar da quantidade, o fluido à baixa pressão não consegue penetrar na interface, sendo arrastado para fora desta região.

Já (Micaroni, 2006) defende em seu trabalho que o método convencional de aplicação à baixa pressão não é eficiente o bastante para penetrar e reduzir a temperatura e o

atrato na região de corte. Nos últimos tempos, na tentativa de reduzir custos, tem-se observado uma necessidade de reduzir o consumo de fluido de corte e portanto a técnica de baixos volumes de fluidos tem sido mais investigada. Nesta técnica o fluido é aplicado em volumes muito baixos chegando a 10 ml/h. Normalmente, eles são aplicados juntamente com um fluxo de ar (ou seja, método da pulverização), e direcionados contra a saída do cavaco, ou entre a superfície de folga da ferramenta e a peça.

Em seu trabalho, (Machado e Wallbank, 1997) utilizaram água e uma emulsão de óleo mineral utilizando um venturi para misturar esses componentes no fluxo de ar e aplicou o jato da mistura contra a saída do cavaco no torneamento de aço AISI 1045 (ABNT 1045). Verificou-se uma redução nas componentes de forças, principalmente em baixas velocidades de corte e alto avanço.

Em outra obra, (Machado, 1999) utilizaram o mesmo método de pulverização via venturi e testaram a capacidade lubrificante de dois produtos para fluidos sintéticos. Um sem enxofre e outro com 10% de enxofre. Este método mostrou-se capaz de distinguir e classificar as características lubrificantes via medição das componentes da força de usinagem, principalmente a força de avanço, a espessura do cavaco e o acabamento superficial da peça usinada. O método tem como principais vantagens a economia do consumo do fluido para obter a informação e a praticidade de execução.

2.8 Impactos Ambientais, impactos no ser humano e impactos econômicos

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 ao ambiente de trabalho até a agressão do meio ambiente (Oliveira e Alves, 2007). Ao avaliar os impactos gerados pela utilização dos fluidos de corte, devemos considerar dois principais efeitos: efeitos nocivos à atmosfera (interna e externa) e degradação do solo e recursos hídricos.

No sentido de impacto ambiental, pode-se analisar o fluido de corte como um produto de ciclo de vida fixo. Durante este ciclo, o fluido mantém contato permanente com os trabalhadores, sendo causas de problemas mencionados anteriormente, como as dermatoses. Em relação ao meio ambiente, infelizmente os produtos que agregam boas características tecnológicas aos fluidos de corte são em sua grande maioria nocivos. Durante o uso, normalmente em circuito fechado, o fluido também recebe contaminações de outros produtos

e elementos nocivos, como solventes e metais pesados do material da peça, ferramenta e revestimentos (Melo et al, 2002).

Em seu trabalho (Heymeyer, 2006) alerta para a coleta obrigatória dos fluidos de corte usados, determinada pela legislação brasileira, através da Resolução número 9 de 31 de agosto de 1993 do Conselho Nacional para o Meio Ambiente (CONAMA). Os fabricantes têm como objeto de estudo, aumentar a vida dos fluidos com manutenção de alta qualidade e monitoramento, chamado gerenciamento dos fluidos.

Para que o processo de manufatura seja ambientalmente adequado em relação aos fluidos de corte são relacionados os seguintes pontos:

- A composição do fluido de corte não pode comprometer a saúde do trabalhador ou do meio ambiente;
- Durante sua aplicação os fluidos não devem gerar contaminantes ou afetar os componentes e vedações da máquina;
- A zona de corte não deve ser inundada. Minimizar a aplicação visando apenas a refrigeração e lubrificação durante o corte;
- O monitoramento contínuo do fluido de corte e o ambiente dentro da máquina através de sensores;
- Através de manutenção e gestão é possível reduzir os consumos de água e óleo e consequentemente a produção de resíduos e custos de produção.

Considerando uma empresa do setor metal-mecânico que represente a maioria das empresas que utilizam fluidos de corte, observa-se o alto consumo de matérias-primas e recursos naturais, como na figura acima. Após o processamento, tem-se, além do produto, emissões atmosféricas, resíduos sólidos misturados com fluidos de corte e efluentes líquidos (Oliveira e Alves, 2007). A figura 3 resume o que acontece com o vários tipos de fluidos de corte nas indústrias.

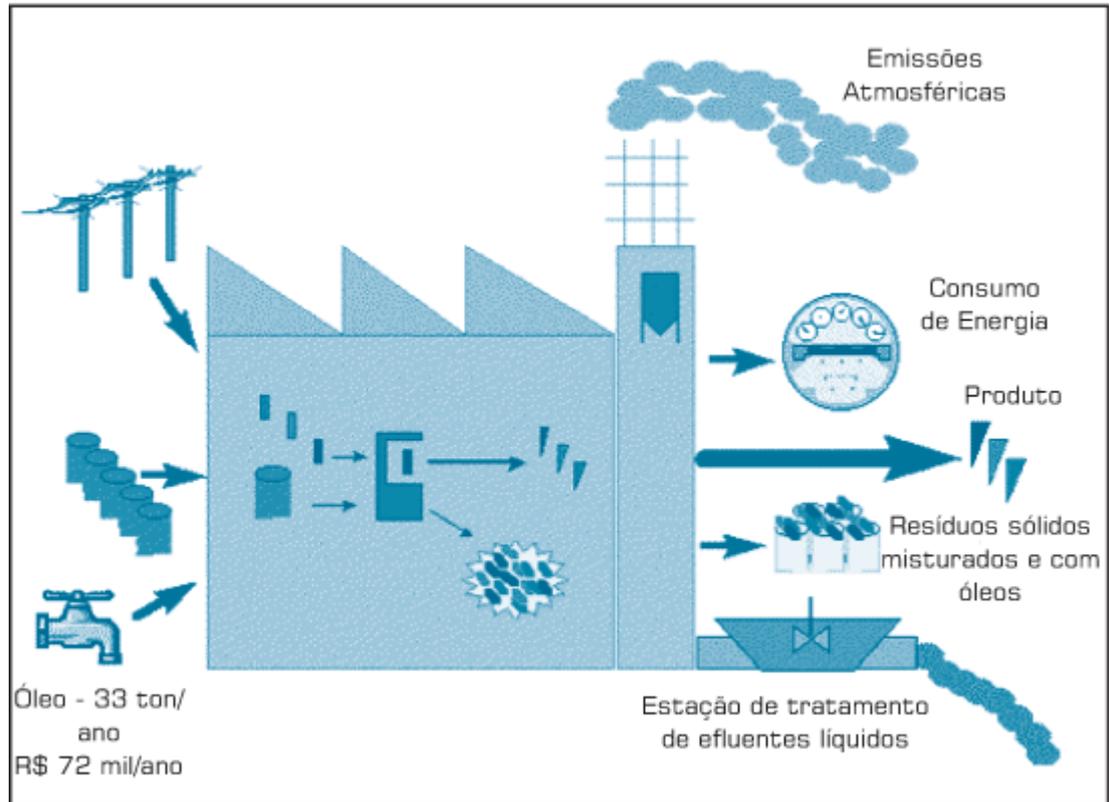


Figura 3 - Ilustração dos impactos ambientais ocasionados pelos diversos fluidos de corte. Fonte: (Oliveira e Alves, 2007)

Embora tenham significativa importância dentro da maioria dos processos de produção, os fluidos de corte se apresentam com um dos principais agentes nocivos ao homem (operador e meio ambiente). Além disso, grande atenção tem sido dada aos custos envolvidos no processo de aplicação de fluidos de corte (Ribeiro et al, 2003). Em seu trabalho, (Klocke e Eisenblaetter, 1997) observou uma pesquisa conduzida na indústria automotiva alemã e verificou que na composição de custos da peça cerca de 7 a 17% eram relativos aos fluidos de corte, já os custos com as ferramentas variavam entre 2 a 4%, lembrando que nos custos gerados pelo emprego de fluidos de corte deve-se considerar a operação de manufatura, o componente, a qualidade exigida da peça, o arrasto do fluido de corte, a vaporização, o lubrificante envolvido, o tipo de máquina, o tamanho das instalações, a situação do prédio, o processamento e disposição do fluido e outros fatores.

Abaixo a tabela 3, representando os impactos ao ser humano, os impactos ambientais e os impactos econômicos:

Impactos no ser humano	<ul style="list-style-type: none"> ● Pele (aditivos, biocidas, fungicidas): alergia, dermatite eczematosa; ● Pulmão (névoas e vapores): asma; ● Estômago: úlceras; ● Olhos: irritações; ● Diversos tipos de câncer.
Impactos ambientais	<p>Solo e água:</p> <p>Contaminação do lençol freático, rios e rede de coleta de esgoto;</p> <p>Arraste para a rede fluvial e solo, por parte da chuva, de diversos compostos constituintes dos fluidos de corte que são solúveis ou emulsionáveis em água.</p> <p>Ar:</p> <p>No aquecimento formam-se vapores (por ex. dioxinas e gases nitrosos, ambos nocivos ao meio ambiente) nas mais variadas combinações químicas dos seus elementos constituintes.</p>
Impactos econômicos	<p>Alto custo:</p> <ul style="list-style-type: none"> ● Aquisição, tratamento, descarte e limpeza do cavaco. ● Varia de 7 a 17% do custo de produção por peça.

Tabela 3- Impactos dos fluidos de corte. Fonte: (Oliveira e Alves, 2007).

2.9 Métodos para racionalização dos fluidos de corte

Segundo (Macagnani, 2006), até poucos anos atrás, as indústrias tinham como objetivo principal a fabricação de produtos visando somente satisfazer aspectos tecnológicos e econômicos. Atualmente, esse objetivo ganha o componente ambiental como destaque. De acordo com (Oliveira e Alves, 2007), a necessidade da indústria de se adequar ambientalmente tem feito com que muitas empresas revejam seus processos. Considerando as legislações vigentes e a demanda por produtos e processos considerados "verdes", tem motivado a busca por metodologias de gestão ambiental.

Para que se possa minimizar a utilização dos fluidos de corte, existem duas técnicas que têm sido amplamente pesquisadas no intuito se apresentarem como alternativas: a usinagem a seco (completamente sem fluido de corte) e a usinagem com a mínima quantidade de lubrificante (MQL). A função específica do fluido de corte no processo de usinagem é a de proporcionar lubrificação e refrigeração, que minimizem o calor produzido entre a superfície da peça e a da ferramenta. Ao se abrir mão do uso destes fluidos, a sua influência positiva na usinagem também perde o efeito, pois o fluido de corte é um importante parâmetro tecnológico na usinagem. A sua redução drástica ou até a completa eliminação, certamente poderão ocasionar aumento de temperatura nos processos, queda de rendimento da ferramenta de corte, perda de precisão dimensional e geometria das peças e variações no comportamento térmico da máquina (De Paula, 2007).

2.9.1 Usinagem a seco (sem refrigeração)

Segundo (Sreejith e Ngoi, 2000), usinagem sem o uso de qualquer fluido de corte (usinagem a seco) vêm se tornando cada vez mais popular devido à preocupação com a segurança do ambiente e dos operadores. No entanto, também se deve notar que alguns dos benefícios de fluidos de corte não vão estar disponíveis para a usinagem a seco, pois a mesma só será aceitável sempre que a qualidade da peça for igualada ou superada com relação a usinagem com refrigeração abundante.

As empresas ao abandonarem os métodos convencionais de refrigeração, como a refrigeração abundante, por exemplo, e passar a utilizar tecnologias da usinagem seca, será possível observar uma melhoria significativa na eficiência do processo de produção, tendo como consequência uma tecnologia que contribui para a proteção ao trabalho e do ambiente. A redução da exposição substancial de lubrificantes de refrigeração no local de trabalho, ocasiona um aumento na satisfação do trabalho e melhora os resultados esperados ao mesmo tempo. Além disso, uma empresa pode usar os processos de produção economicamente amigáveis para fins publicitários, o que leva a uma imagem melhor no mercado (Weinert et al, 2007) .

Porém, segundo (Heymeyer, 2006) em alguns casos não é possível a usinagem a seco, principalmente quando há forte adesão entre a ferramenta de corte e o cavaco, conduzindo a desgaste excessivo da ferramenta. Outra situação crítica é quando a deformação térmica da peça não pode ser controlada. Dessa forma, tolerâncias de dimensão e de forma, apertadas, podem ser restrição para a usinagem a seco.

2.9.1.1 Efeito da temperatura e requisitos para ferramentas de corte para usinagem a seco

O desempenho de uma ferramenta de corte é dependente da estabilidade da forma da cunha de corte, o que por sua vez, é principalmente dependente da dureza e da condutividade térmica dos materiais da ferramenta de trabalho. A dureza do material de trabalho da ferramenta está relacionada com as características de dureza a quente e do material da ferramenta. Com base na figura 4, o aço carbono e o aço rápido apresentam uma redução constante na dureza com o aumento da temperatura (Sreejith e Ngoi, 2000).

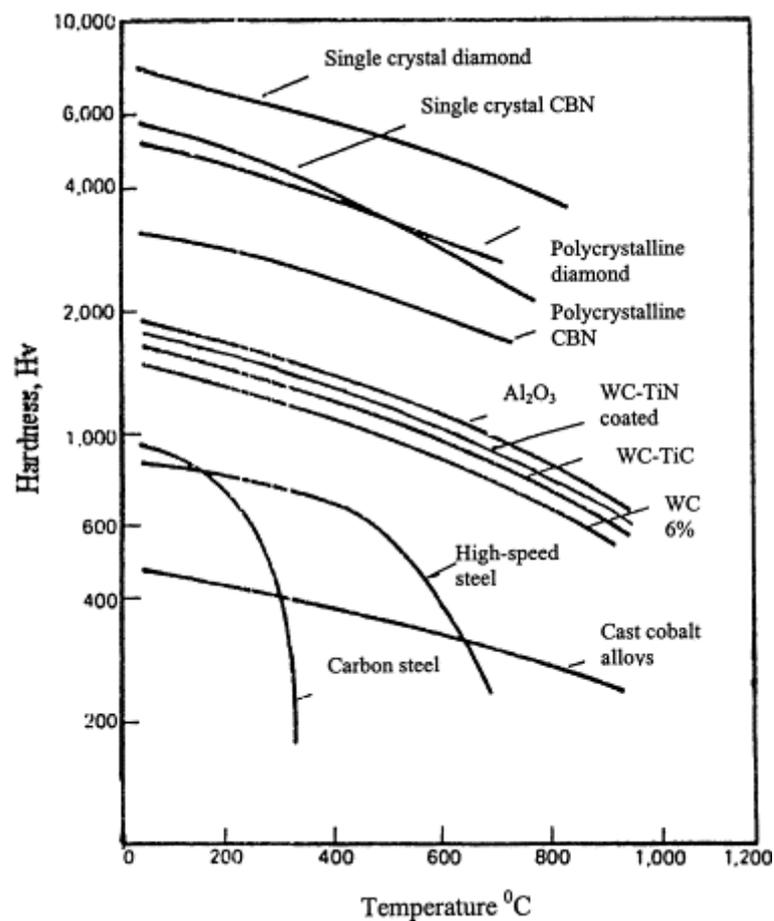


Figura 4 - Características da dureza com o aumento da temperatura de alguns materiais para ferramentas. Fonte: (Sreejith e Ngoi, 1999)

A usinagem a seco necessita de novas soluções no sistema ferramenta-máquina-peça-processo. No caso de ferramentas, os revestimentos desempenham um papel importante, juntamente 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. A máquina para trabalhar com usinagem a seco deve ter um sistema eficiente de transporte dos cavacos. 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 (Oliveira e Alves, 2007).

Em sua obra, (Derflinger et al, 1998) defende que o tempo de vida das ferramentas pode ser aumentada através da utilização de uma ferramenta que é revestido por uma combinação de uma camada dura e lubrificante. Principalmente, em condições de usinagem a seco para materiais como ligas de alumínio ou aço, alcançando assim os resultados almejados.

Desde 1970 muitos novos desenvolvimentos têm sido feitos em revestimentos de ferramentas para melhorar a vida da ferramenta e também para aumentar a velocidade de corte (Horsfall e Fontana, 1993). Os revestimentos sobre as ferramentas de metal duro foram desenvolvidos inicialmente usando a técnica de deposição de vapor químico (CVD). Atualmente, para ferramentas de metal duro, revestimentos que envolvem deposição física de vapor (PVD) são utilizados (Sreejith e Ngoi, 2000). A atração do processo de PVD é que é um processo muito mais limpo e a formação de interface de quebradiça entre o substrato da ferramenta e revestimentos - que é responsável pela fraca adesão dos revestimentos com o substrato da ferramenta - é eliminado, até certo ponto, uma vez que as temperaturas de substrato são menores em comparação com aqueles para o processo CVD (450 ° C, em vez de 1000 ° C).

Atualmente, as investigações estão voltadas para a melhoria das propriedades e desempenho dos materiais de revestimento, reduzindo a escala espacial do sistema (Jayaram et al, 1995). Os estudos indicam que revestimentos podem aumentar significativamente a dureza, o módulo e a tenacidade da ferramenta e, assim, eles serão capazes de dar um melhor desempenho, em atrito, e aplicações de lubrificação.

Já (Derflinger et al, 1998), verificou que o TiAlN (nitreto de titânio de alumínio) é um desenvolvimento evolutivo do revestimento de material duro de TiN amplamente utilizado. TiAlN só pode ser produzido usando os processos do plasma onde ele é depositado como uma fase cristalográfica metaestável, com base em parâmetros diferentes, tais como a composição do material do alvo, a taxa de evaporação, os parâmetros de ionização de plasma e etc. Este tipo de revestimento TiAlN, é o preferido para usinagem com forças de corte mais baixas. Usinagem de material com uma força inferior à tração e maior alongamento, ou seja, cavacos longos, é possível. Os parâmetros de processo que levam a um esforço interno do

revestimento de cerca de -2 GPa foram escolhidos. A composição química do revestimento é de cerca $Ti / Al = 0,6 / 0,4$.

Contudo, (Sreejith e Ngoi, 2000) também apresentam em sua obra materiais para ferramentas, tais como o diamante e nitreto de boro cúbico. Fresas têm sido encontrados para produzir características de superfície melhor maquinadas, com aumento considerável na vida da ferramenta, devido à sua elevada dureza e condutividade térmica. Diamante e CBN são bem semelhantes em vários aspectos, e como sendo os materiais super-duros, têm encontrado inúmeras aplicações como ferramentas de corte. Eles partilham a mesma estrutura cristalográfica e apresentam elevados valores de condutividade térmica.

A qualidade de uma superfície maquinada, em particular no torneamento, depende em grande medida da estabilidade forma das ferramentas de corte. Durante a rotação, a ferramenta de corte se replica o seu nariz na superfície de trabalho, resultando na formação da textura da superfície. Do ponto de vista da textura de superfície, uma ferramenta ideal é aquela que é capaz de sustentar a replicação do nariz de corte. Assim, o desempenho da ferramenta ou a qualidade da textura de superfície maquinada é em grande parte dependente da estabilidade da forma da ferramenta de corte. Estabilidade de forma é largamente influenciada pelas diferentes formas de desgaste da ferramenta. A qualidade de uma superfície maquinada é importante enquanto avaliar a fiabilidade e a vida funcional de uma estrutura. Além disso, a seleção de um material inadequado como ferramenta pode resultar não apenas na deterioração da superfície, mas também no aumento dos custos de ferramentas. Portanto, o conhecimento dos materiais de ferramenta e a natureza e a qualidade da superfície que produzem o corte é de considerável importância (Santhanakrishnan, 1994).

2.9.1.2 Usinagem a seco de metais comuns

O ferro fundido pode ser cortado a seco em operações de torneamento e fresamento. Especificamente na usinagem a seco de ferro fundido, estudos com materiais de corte cerâmicos e CBN em altas velocidades tem sido observados (Spur e Lachmund, 1995). Uma vez que as ferramentas de CBN tem condutividade térmica maior que as ferramentas de cerâmica, o CBN foi capaz de remover o calor de forma eficiente a partir do material de corte. Por isso, conclui-se que CBN foi altamente adequado para a usinagem a seco de ferro fundido em altas velocidades de corte.

Ferro fundido também pode ser moído a seco com um certo tipo de cermet de ferramentas em altas velocidades (Duplo benefício de usinagem a seco, 1994). Nesse caso, a

alta velocidade não é empregado para reduzir o tempo de processamento, mas sim para reduzir o tempo de contato da ferramenta e da peça de trabalho para evitar que o calor se propague na ferramenta.

Para a usinagem de alta velocidade contínua de superligas e de titânio, o resfriamento é necessário. No entanto, para máquinas de corte interrompido, o fluido refrigerante, se utilizado induz choques térmicos sobre qualquer material de corte. Devido a isso, a usinagem a seco pode ser recomendada para corte interrompido (Sreejith e Ngoi, 2000).

A respeito do alumínio e suas ligas, que são considerados os materiais mais importantes no que diz respeito a usinagem a seco devido à sua elevada condutividade térmica, a peça absorve calor considerável do processo de usinagem e pode causar deformação, devido às suas capacidades de expansão térmica elevada. Assim, na usinagem de alumínio e suas ligas, é essencial utilizar ferramentas com revestimentos adequados (Derflinger et al, 1998).

A principal questão que deve ser considerada para usinagem a seco de metais não-ferrosos está na alta velocidade de corte. Nesse contexto as ferramentas de diamante será um grande facilitador desta tecnologia devido ao seu elevado coeficiente térmico, a difusão rápida de calor e o fato dele não possuir afinidade com o alumínio (Sreejith e Ngoi, 2000).

2.9.2 *Unisagem MQL (Mínima quantidade de fluido)*

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. Esta mínima quantidade de óleo é suficiente para reduzir o atrito da ferramenta e ainda evitar aderências de materiais (Dörr e Sahm, 2000).

Como relatado por alguns autores, fluidos para trabalhar metais custar intervalos de 7 a 17% do custo total de maquinagem, enquanto as faixas de custo da ferramenta de 2 a 4%. Por isso, utilizando a técnica de MQL, uma redução notável dos custos de maquinagem pode ser obtida reduzindo a quantidade de lubrificante utilizada no processamento. Em MQL, um fluxo muito pequeno de lubrificante (ml/h, em vez de l/min) é usado. (Attanasio et al, 2005).

Esta técnica possui vantagens e desvantagens quando comparados 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. Apesar de suas inúmeras vantagens, a técnica MQL possui desvantagens também, duas delas são a névoa e a fumaça de óleo gerada durante a usinagem que podem ser considerados subprodutos indesejáveis, pois contribuem para aumentar o índice de poluentes em suspensão do ar e tornam-se fatores de preocupação (Oliveira e Alves, 2007).

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 pode-se ter, em alguns processos, um maior desgaste da ferramenta. (Machado et al., 2000).

Em muitas operações de usinagem, a usinagem com quantidade mínima de lubrificação (MQL) é a chave para uma usinagem bem sucedida. Todos os componentes do MQLC sistema deve ser muito cuidadosamente coordenada, a fim de alcançar o resultado desejado, o que é ótimo, tanto tecnologicamente e economicamente (Klocke et al, 1996).

Por outro lado, o limite principal do método MQL é a sua incapacidade para arrefecer a superfície de corte. Isto significa que MQL não é capaz de fornecer vantagens, se for aplicada em uma operação de corte em que a ação de arrefecimento é fortemente exigido (Brinksmeier, 1996). Nestes casos, é muito importante definir corretamente as condições que permitem que a técnica MQL possa ser aplicado com vantagens reais.

2.9.2.1 Usinagem MQL em alguns processos

Em seu trabalho, (Macagnani, 2006) observou que no processo de retificação os resultados diversos indicaram que a técnica de MQL pode ser aplicada com eficiência, reduzindo razoavelmente a força tangencial de corte, permitindo a permanência das arestas de corte do rebolo por mais tempo antes de ocorrer à renovação das mesmas, e os resultados permitiram mostrar que o método e a quantidade de aplicação de fluido de corte são fatores que exercem influências no processo de retificação.

Já (Scandiffio, 2000), observou que no processo de usinagem, o MQL foi responsável pelo aumento da vida das brocas em todos os grupos de revestimentos estudados, também houve uma redução na força tangencial de corte, possivelmente pela presença de lubrificante na periferia do rebolo proporcionando melhor deslizamento do grão na interface

peça-rebolo. Os valores do desgaste de flanco e do diâmetro do rebolo foram reduzidos significativamente com o emprego da técnica de MQL.

No processo de roscamento notou-se que com a pequena quantidade de óleo é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características, a técnica MQL apresentou, em geral, melhores resultados que a usinagem sem fluido de corte, principalmente na redução do torque (Bianchi, 2004).

Em sua obra, (Braga et al, 2002) comparou o desempenho de uma operação de furação com refrigeração abundante em relação à utilização da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificação (10 ml/h de óleo em um fluxo de ar comprimido) perfurando ligas de alumínio (A356). O resultado desta pesquisa demonstrou que o desempenho do processo (em termos de força, vida da ferramenta e qualidade dos furos), quando usando mínima quantidade de lubrificação, era bem parecido ao obtido quando usado em lubrificação abundante. Já (Momper, 2000), realizou experimentos com a Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante em operação de furação, e constatou que esta Técnica pode ser vista como uma alternativa viável para trabalhos de furação. Os testes foram feitos em um tipo de aço com brocas de metal duro de 11,8 mm de diâmetro (revestidas com TiN). Na furação a seco a ferramenta chegava ao final após 200 furos, já utilizando a Técnica com Mínima Quantidade de Lubrificante, com vazão de 8ml/h e pressão de 3 bar, este nível foi elevado para 1500 furo.

Em seu artigo, (De Paula, 2007) realizou teste em que consistiam aplicar torneamento de aço ABNT 1045 e monitorar a força de corte e a emissão acústica geradas em diversas condições de lubrificação e com variados parâmetros de corte. O trabalho experimental foi realizado no laboratório de Automação da Manufatura (LAM) da UNIMEP campus Santa Bárbara d'Oeste. Os experimentos foram executados num torno Romi CENTUR 30 RV, equipado com comando numérico computadorizado Mach 8 com potência máxima de 7cv e rotação de 4000rpm. Os corpos de prova utilizados foram de aço laminado ABNT 1045 com diâmetro inicial de 25 mm e 195 mm de comprimento. Os parâmetros de corte estabelecidos foram, avanço de 0,3mm/rev; profundidade de corte de 0,1mm; e três valores de velocidade de corte: 220, 275 e 330m/min. Para as três combinações de parâmetros de corte foram aplicadas três condições de lubrificação: a seco, MQL e com fluido abundante.

Ao final do experimento, os resultados mostraram que ambos os sistemas MQL se mostraram eficientes em diminuir a força de corte e a emissão acústica, todos com redução na faixa de 5-10% em relação à usinagem a seco, como mostrado nos gráficos 1 e 2. O consumo mínimo de fluido provou que a usinagem MQL acarreta economia nos custos com fluidos e também contribui para a preservação ambiental. É esperado que a técnica MQL aplicada

tenha aumentado o tempo de vida da ferramenta e tenha diminuído os desgastes envolvidos na estrutura da mesma por diminuir a fricção entre a interface de usinagem.

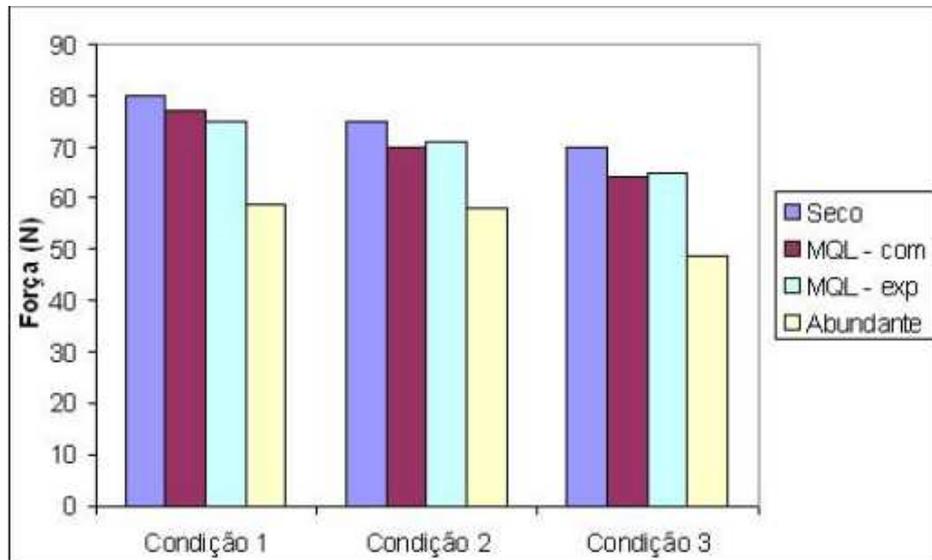


Gráfico 1 - Resultados obtidos com ênfase na Força de usinagem (De Paula, 2007)

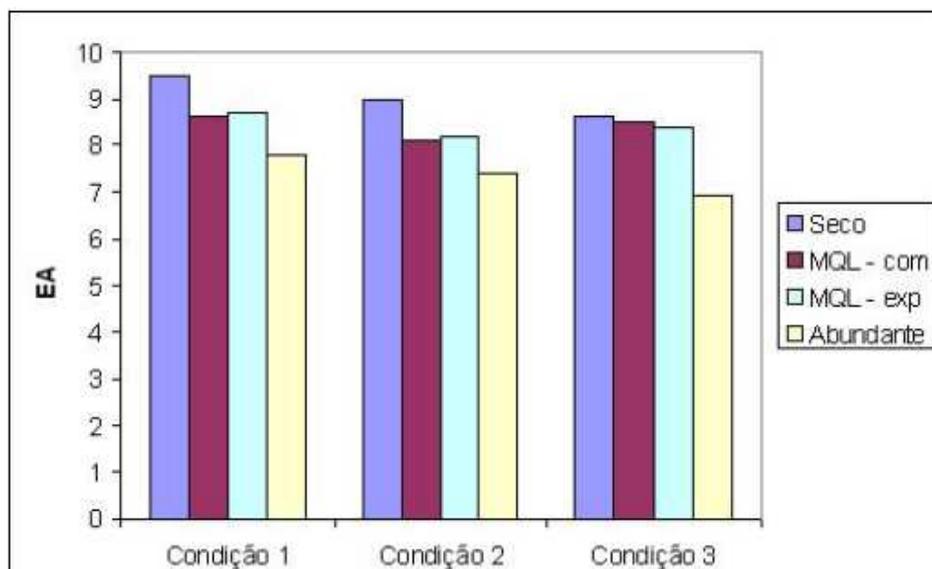


Gráfico 2 - Resultados obtidos com ênfase na emissão acústica (De Paula, 2007)

CONSIDERAÇÕES FINAIS

É possível perceber em várias obras a preocupação que as empresas vêm sofrendo com questões ambientais, trabalhistas e econômicas advindas dos processos de fluidos de corte. A lubrificação abundante, embora valorize os aspectos principais de um resultado final da peça, acarreta graves problemas devido a enorme quantidade de fluido de corte no momento do seu descarte além de ser uma das principais causas para o custo elevado de uma empresa.

A tecnologia-chave que representa redução de custos relacionada com lubrificação de refrigeração, e, simultaneamente, melhora o desempenho global de corte operações, é a usinagem a seco. A eliminação dela ou a redução significativa de lubrificantes de arrefecimento afeta todos componentes de um sistema de produção.

Outra alternativa para a solução dos processos de lubrificação é a usinagem com MQL, onde as propriedades finais da peça são próximas quando comparadas com a lubrificação abundante.

Porém é importante salientar que em ambos os processos, o uso da tecnologia será o principal aliado na busca de melhores condições de trabalho, na sua eficiência, na preservação ambiental e principalmente nos lucros. Investimentos para a descoberta de novos materiais como revestimento, por exemplo, e novos fluidos de corte para usinagem MQL são desafios que a engenharia irá enfrentar ao longo dos próximos.

REFERÊNCIAS

1. ABREU, GUILHERME PEDROSO PIRES. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais - 4ª ed. Fluidos de Corte. Usinagem dos Materiais.** 2010.
2. ATTANASIO, A. GELFI, M. GIARDINI, C. REMINO, C. **Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear,** 2005.
3. BARBOSA, M. F. **Fluidos de corte,** Cap. 13, 1999.
4. BIANCHI, E.C. **Comportamento da Técnica de mínima Quantidade de Lubrificante – MQL sob diferentes condições de lubrificação e refrigeração na retificação,** 2004.
5. BIERMANN, MARIA JULIETA ESPINDOLA. **Gestão de Fluidos de Corte,** 2007.
6. BRINKSMEIER, E. **Einsatzbeispiele für Minimalmengenkühlschmierung und Trockenbearbeitung, Proc. of the Conference on Tribology-Solving Friction and Wear Problems, Technische Akademie Esslingen,** 1996.
7. BRAGA, DU. DINIZ, AE. MIRANDA, WA. COPPINI, NL. **Using a minimal quantity of lubricant (MQL) and a diamond coated tool in the drilling of aluminum–silicon alloys,** 2002.
8. CAVALER, LUIZ CARLOS DE CESARO. **Fluidos de Corte,** Cap 04, 2003.
9. DE PAULA, LEONAM JOÃO LEAL. **Estudo e Desenvolvimento de Sistema de Refrigeração MQL (Mínima Quantidade de Lubrificantes),** 2007.
10. DERFLINGER, V. BRANDLE, V. ZIMMERMANN, H. **New hard/lubricant coating for dry machining,** 1998.
11. DINIZ, ANSELMO EDUARDO. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais,** 1999.
12. DÖRR, J. SAHM, T **Quais são e para que servem os revestimentos.** Revista Máquinas e Metais, 2000.
13. **Duplo benefício de usinagem a seco,** 1994.
14. FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais.** São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda, 1977.
15. GONÇALVES, BRUNO BASTOS. YAGINUMA, GABRIEL FERNANDO. YAMAMOTO, MARCELO KAZUO. **Óleo de usinagem: Tipos, Classificação e Desempenho,** 2010.
16. GUEDES, LUIZ FERNANDO MOLZ. **Processos de fabricação I,** Cap 04, Fluidos de Corte, 2007.

17. HEYMEYER, TOBIAS. **Prospecção de oportunidades para a otimização dos processos de usinagem na pequena e média empresa em São Carlos/SP**, 2006.
18. HORSFALL, R. FONTANA, R. **TiAlN coatings beat the heat, Cutting Tool**, 1993.
19. JAYARAM, G. MARKS, L.D. HILTON, M.R., **Surf. Coat. Technol**, 1995.
20. JUNIOR, HAMILTON FUNES. **Utilização da técnica da mínima quantidade lubrificante (MQL) com adição de água no processo de retificação cilíndrica externa de aços endurecidos com rebolos de CBN**, 2012.
21. KLOCKE, F. EISENBLATTER, G. **Machinability Investigation of the Drilling Process using Minimal Cooling Lubrication Techniques, Production Engineering**, 1997.
22. KLOCKE, F. SCHULZ, A. GERSCHWILER, K. **Saubere Fertigungstechnologien - Ein Wettbewerbsvorteil von morgen?**, 1996.
23. LISBOA, FABIO DE CORDEIRO. MORAES, JESSYCA JORDANNA BARROSO DE. HIRASHITA, MASSAKO DE ALMEIDA. **Fluidos de corte: uma abordagem geral e novas tendências**, 2013.
24. MACAGNANI, GUILHERME RODRIGO. **Estudo e Desenvolvimento de Sistema de Refrigeração MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante)**, 2006.
25. MACHADO, ÁLISSON ROCHA. **Fluidos de Corte**, 2013
26. MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B. and WALLBANK, J., " **Practical Determination of Lubricant Performance in Turning**", Submetido para publicação no Transaction da ASME – Journal of Manufacturing Science and Engineering, em abril de 1999.
27. MACHADO, A.R. WALLBANK, J., "The Effect of Extremely Low Lubricant Volumes in Machining", *Wear*, vol. 210, 1997, pp 76 - 82.
28. MAIA, DEBORA ALINE SOARES. GUIMARÃES, ARTEMIS PESSOA. DOS SANTOS, RINALDO. CAVALCANTE JR, CÉLIO LOUREIRO. SANT'ANA, HOSIBERTO BATISTA. **Fluidos de corte: novas formulações e recuperabilidade**, 2007.
29. MELO, DOUGLAS SAITO. BÄTZNER, LOUISE NOVELLO. SALATI, MARCELO REAMI. **Fluidos de Corte**, 2010.
30. MELO, ALLAN P. G. DI. DELFINO, DANIEL. SERAFIM, MARCIO. **Avaliação do óleo de corte integral com aditivação de éster na furação profunda do aço 42CRMn4 modificado**. 2002

31. MICARONI, RICARDO. **Influência do fluido de corte sob pressão no torneamento do aço ABNT 1045**, 2006.
- NAVES, VITOR TOMAZ GUIMARÃES. DA SILVA,
32. NAVES, VITOR TOMAZ GUIMARÃES. DA SILVA, MARCIO BACCI. **Usinagem com fluido de corte à alta pressão**, 2011.
33. OLIVEIRA, JOÃO FERNANDO GOMES DE. ALVES, SALETE MARTINS. **Adequação ambiental dos processos usinagem utilizando Produção mais Limpa como estratégia de gestão ambiental**, 2007.
34. REIS, ALEXANDRE MARTINS. **Influência do ângulo de posição secundário da ferramenta, raio de ponta e lubrificação na usinagem em presença de aresta postiza de corte**, 2000.
35. RIBEIRO, LEONARDO OLIVEIRA. DA SILVA, ROSEMAR BATISTA. MACHADO, ÁLISSON ROCHA. **A temperatura na interface cavaco-ferramenta sob diferentes condições de refrigeração/lubrificação**, 2003
36. SANTHANAKRISHNAN, G. **Tribological aspects in composite machining**, 1994.
37. SANTOS, LEONARDO H. **Apostila de Usinagem**, 2013.
38. SCANDIFFIO, INNOCENZO. **Uma contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com Mínima Quantidade de Lubrificante em Torneamento de aço**, 2000.
39. SCHROETER, ROLF BERTRAND. **Processos de Usinagem: Fabricação por Remoção de Material**, 2004.
40. SOUZA, ANDRÉ JOÃO DE. **Processos de Fabricação por Usinagem, Parte 1**. 2011.
41. SPUR, G. LACHMUND, U. **Trockenbearbeitung von graugub mit hohen schnittgeschwindigkeiten**, 1995.
42. SREEJITH, P. S., NGOI, K. A. **Dry machining: Machining of the future**. Journal Of Materials Processing Technology, v.109, pp. 181-189, 2000.
43. STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I. 6º Edição revisada e ampliada**. Florianópolis: Editora da UFSC, 2005.
44. STOETERAU, RODRIGO LIMA. **Fluidos de Corte e Revestimentos de ferramentas**, 2007.
45. WEINERT, K. INASAKI, I. SUTHERLAND, JW. WAKABAYASHI, T. **Usinagem a seco e quantidade mínima de lubrificação**, 2007