

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO FINAL  
TESE DEFENDIDA POR INNOCENZO  
SCANDIFFIO E APROVADA PE  
COMISSÃO JULGADORA EM 26/06/2020  
Anselmo Eduardo Diniz  
ORIENTADOR

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**Uma Contribuição ao Estudo do Corte a Seco e  
ao Corte com Mínima Quantidade de  
Lubrificante em Torneamento de Aço**

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

Autor: **Innocenzo Scandiffio**

Orientador : **Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz**

57/2000

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**  
**DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DA FABRICAÇÃO**

# **Uma Contribuição ao Estudo do Corte a Seco e ao Corte com Mínima Quantidade de Lubrificante em Torneamento de Aço**

Autor: **Innocenzo Scandiffio**

Orientador: **Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz**

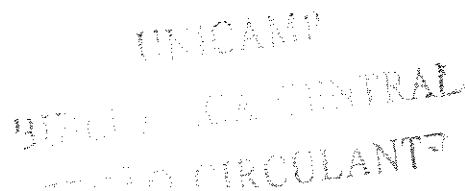
Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2000

S.P. - Brasil



UNIDADE	BC
N.º CHAMADA:	T/UNICAMP
	Sca 63c
V.	Ex.
TOMBO BC	43376
PROC.	278/2000
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	05/01/2001
N.º CPD	



CM-00153168-7

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

Sca63c Scandiffio, Innocenzo

Uma contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço / Innocenzo Scandiffio.--Campinas, SP: [s.n.], 2000.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz  
Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Fluidos de corte. 2. Metais - Corte. 3. Usinagem.  
4. Processos de fabricação. I. Diniz, Anselmo Eduardo.  
II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

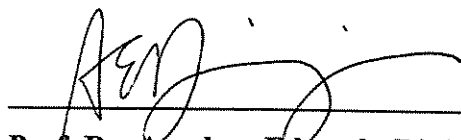
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DA FABRICAÇÃO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Uma Contribuição ao Estudo do Corte a Seco e  
ao Corte com Mínima Quantidade de  
Lubrificante em Torneamento de Aço**

**Autor: Innocenzo Scandiffio**

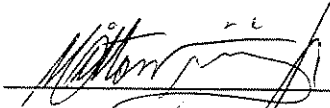
**Orientador: Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz**



**Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**



**Profa. Dra. Maria Helena Robert  
Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP**



**Prof. Dr. Milton Vieira Junior  
Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP**

Campinas, 26 de junho de 2000.

## **Dedicatória:**

Dedico este trabalho à minha querida esposa Mírna, e aos meus filhos Felipe e Matheus, pelo incentivo na conclusão deste trabalho e abnegação dos momentos de comunhão.

À minha mãe Angela e ao meu pai Giuseppe por mostrar-me o caminho da sinceridade e honestidade.

## **Agradecimentos**

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, que com muito empenho e dedicação mostrou-me os caminhos à serem seguidos.

Ao Centro Universitário Salesiano - UNISAL - Unidade de Ensino de Campinas, pelo uso dos equipamentos.

Ao Diretor do Centro Universitário Salesiano -UNISAL, Padre Milton Braga de Resende, aos colegas e amigos da Escola Salesiana São José e em especial ao Coordenador do Centro Profissional Dom Bosco, Prof. Antônio Carlos Miranda pelo seu constante apoio e credibilidade neste trabalho.

Ao colega Mário Corrêia e ao Prof. Niderauer Mastelari (UNICAMP) pelo empenho em instalar os equipamentos na máquina.

Ao colega Amauri Hassui (DEF- UNICAMP) pela sua colaboração e também aos colegas do Departamento de Engenharia da Fabricação (DEF- UNICAMP) por me ajudarem em diversos aspectos técnicos da tese.

..não que, por nós mesmos, sejamos capazes de  
pensar alguma coisa, como se partisse de nós;  
pelo contrário, a nossa suficiência vem de  
Deus.

2 Co 3:5

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

## Resumo

SCANDIFFIO, Innocenzo, *Uma Contribuição ao Estudo do Corte a Seco e ao Corte com Mínima Quantidade de Lubrificante em Torneamento de Aço*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000, 63 p. Dissertação (Mestrado).

Com o desenvolvimento das ferramentas de usinagem, o respectivo aumento da velocidade de corte e a necessidade destas ferramentas usinarem ligas cada vez mais duras, os fluidos de corte também tiveram que evoluir, pois já não mais atendiam às necessidades básicas destas operações de usinagem. Conseqüentemente, houve aumento da utilização dos fluidos de corte nos processos de usinagem tornando evidente os problemas com a saúde dos operadores de máquinas, bem como de impacto ambiental devido ao seu descarte. Este trabalho tem como objetivo geral o estudo do uso da Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (névoa) para refrigeração e lubrificação em operações de torneamento de aço SAE 1045. Inicia-se com a explanação sobre as funções, propriedades e tipos do fluido de corte e sua aplicabilidade. Os riscos e danos à saúde causados em decorrência do uso e descarte dos fluidos são abordados. Com a finalidade de solidificar os benefícios da aplicação da Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante, decorrer-se-á sobre as maneiras mais comuns de tratamento e descarte dos efluentes. Devido à Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante ser bastante parecida com corte a seco, faz parte deste estudo algumas considerações a este respeito. Considerando-se a vida da ferramenta, os resultados dos ensaios não foram favoráveis; no entanto, ao avaliar a questão da saúde dos operadores, impacto ambiental e custos de aquisição e manutenção dos fluidos, conclui-se que esta técnica torna-se uma alternativa interessante.

### *Palavras Chave*

-Mínima lubrificação; Processo de torneamento; Usinagem.

## Abstract

SCANDIFFIO, Innocenzo, *A Contribution to the Study of Dry Cutting and Cutting with a Minimum Quantity of Lubricant for Steel Turning*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2000. 63 p. Dissertação (Mestrado).

Following the development of the machining tools, the increase on cutting speed and the need of these tools to machine harder and harder alloys, the cutting fluids had to be developed accordingly, once they couldn't meet the basic needs of these machining operations, anymore. Consequently, there was an increase on the utilization of the cutting fluids for the machining processes, making evident the health problems that the machining workers were suffering, as well as the environmental impact due to the cutting fluid disposal. This project aims to study the Minimum Quantity Lubrication Technique - mist - for cooling and lubrication on SAE 1045 steel turning operations. It begins with an explanation on the functions, properties and types of cutting fluid and its applicability. Risks and health damages caused by the use and disposal of these fluids are mentioned. Also, the most common ways of treatment and effluents disposal are discussed with the purpose of consolidating the benefits on the application of the Minimum Quantity Lubrication Technique. Due to the similarity between the Minimum Quantity Lubrication Technique and dry cutting, this project makes some considerations about it. The results of essays were not favorable regarding tool life; though considering issues such as worker's health, environment and fluid costs - acquisition and maintenance - this technique becomes an interesting choice.

### *Key Words*

- Minimal mist lubrication; Turning Process; Machining.

## Índice

Lista de Figuras .....	xi
Lista de Tabelas .....	xiii
Nomenclatura .....	xiv
1. Introdução .....	01
2. Fluidos de corte.....	03
2.1. Funções dos fluidos de corte.....	03
2.2. Propriedades exigidas para um bom fluido de corte.....	04
2.3. Classificação dos fluidos de corte.....	05
2.3.1. Ar.....	05
2.3.2. Tipos aquosos.....	05
2.3.2.1. Água .....	05
2.3.2.2. emulsões .....	06
2.3.3. Óleos .....	08
2.3.3.1. Óleos Minerais Puros .....	08
2.3.3.1.1. Composição dos óleos minerais .....	09
2.3.3.1.2. Aditivos .....	10
2.3.3.1.3. Antioxidante .....	10
2.3.3.2. Óleos Graxos .....	10
2.3.3.3. Óleos Compostos .....	10
2.3.3.4. Óleos de Extrema Pressão .....	11
2.3.3.4.1. Matéria Graxa .....	11
2.3.3.4.2. Enxofre .....	11

2.3.3.4.3. Cloro .....	11
2.3.3.4.4. Fósforo .....	12
2.4. Danos à Saúde .....	12
2.5. Consumo e descarte dos Fluidos de Corte .....	14
2.6. Descarte de emulsões.....	16
2.7. Descarte de Fluidos de Corte Integrais .....	16
3. Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Lubrificante.....	18
3.1. Usinagem a Seco.....	18
3.2. Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante.....	24
4. Materiais, Equipamentos e Métodos Experimentais .....	29
4.1. Material .....	29
4.2. Equipamentos e Métodos Experimentais.....	31
5. Resultados e Discussões .....	37
5.1. Ensaios Preliminares .....	37
5.2. Ensaios Comparativos para as Diversas Condições de Refrigeração/Lubrificação em Diversas Velocidades de Corte .....	39
5.2.1. Análise dos Desgastes das Ferramentas .....	39
5.2.2. Análise da Rugosidade da Peça .....	46
5.2.3. Análise da Potência de Corte .....	51
6. Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.....	56
Referências Bibliográficas.....	58
Bibliografias Consultadas.....	61

## Lista de Figuras

2.1 Emulsificador formando a ligação do óleo com água.....	06
2.2 Custo Total de Usinagem utilizando o método de refrigeração por inundação .....	14
2.3 Distribuição das quantidades de óleos usados na Alemanha em 1994 .....	15
3.1 Possibilidades de mudança de usinagem úmida para usinagem a seco.....	19
3.2 Vida útil no torneamento de aço 42CrMo4, com fluido refrigerante e a seco.....	20
4.1 Pontos da peça onde a dureza foi medida .....	30
4.2 a. Vista geral do torno CNC .....	33
4.2 b. Vista parcial do torno CNC .....	33
4.3 Rugosímetro utilizado nos ensaios .....	34
4.4 Projetor de Perfil utilizado nos ensaios .....	34
4.5 Jato de ar/óleo utilizado na ferramenta .....	35
4.6 Inserto de Metal Duro utilizado nos ensaios .....	35
4.7 Corpo de prova utilizado nos ensaios .....	36
5.1 Desgaste de flanco com 5 minutos de corte .....	38
5.2 Cavaco gerado nos ensaios .....	39
5.3 Desgaste de flanco X comprimento de corte ( $v_c = 360$ m/min.) .....	40
5.4 Desgaste de flanco X comprimento de corte ( $v_c = 445$ m/min.) .....	41
5.5 Desgaste de flanco X comprimento de corte ( $v_c = 530$ m/min.) .....	42
5.6 Vida da ferramenta em comprimento de corte para as diferentes condições de refrigeração/lubrificação para as três velocidades de corte ensaiadas .....	44
5.7 Rugosidade ( $R_a$ ) X comprimento de corte ( $v_c = 360$ m/min.).....	46
5.8 Rugosidade ( $R_a$ ) X comprimento de corte ( $v_c = 445$ m/min.).....	47
5.9 Rugosidade ( $R_a$ ) X comprimento de corte ( $v_c = 530$ m/min.).....	49

5.10 Comparativo de rugosidade com as três velocidades de corte no início de vida da ferramenta .....	50
5.11 Comparativo de rugosidade com as três velocidades de corte no final de vida da ferramenta.....	51
5.12 Potência consumida X comprimento de corte ( $v_c = 360$ m/min) .....	52
5.13 Potência consumida X comprimento de corte ( $v_c = 445$ m/min) .....	53
5.14 Potência consumida X comprimento de corte ( $v_c = 530$ m/min) .....	54

## **Lista de Tabelas**

2.1 Composição dos aditivos nos tipos de óleos solúveis.....	07
2.2 Composição das Principais Características dos Óleos Parafínicos e Naftênicos .....	09
3.1 Variáveis que influenciam na usinagem a seco .....	24
4.1 Medidas de dureza Brinell .....	30

## Nomenclatura

$\sigma$	- desvio padrão
$a_p$	- profundidade de corte (mm)
CBN	- Nitreto Cúbico de Boro
CVD	- Deposição Química de Vapor
$f$	- avanço (mm/rotação)
HB	- dureza Brinell
$l_c$	- comprimento de corte
MQL	- Mínima Quantidade de Lubrificante
PCD	- Diamante Policristalino
$R_a$	- desvio médio aritmético (rugosidade)
TiC	- Carboneto de Titânio
TiN	- Nitreto de Titânio
TiAlN	- Nitreto de Titânio/Alumínio
$V_B$	- desgaste frontal (mm) ou ( $\mu\text{m}$ )
$v_c$	- velocidade de corte (m/min)
$X$	- valor médio de uma variável

## Capítulo 1

### Introdução

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

A lubrificação/refrigeração nas operações de corte de metal iniciou-se em 1890 com as experiências de F.W.Taylor, engenheiro americano, que ao inventar o aço rápido, e consequentemente possibilitar o aumento das velocidades de corte, gerou a necessidade de refrigerar a área de contato da ferramenta com a peça, aumentando assim a vida da ferramenta e imprimindo ainda uma maior velocidade de corte.

A água foi o primeiro fluido de corte utilizado nas experiências de Taylor, com as vantagens de ter grande capacidade de resfriar e custo reduzido. Porém ela apresenta pouco poder umectante, dificultando a tarefa de exercer as funções de lubrificante/refrigerante, causando ainda corrosão dos materiais ferrosos, além de sua capacidade de lubrificação ser muito pequena (Ferraresi, 1977; Castrol, 1999).

Surgiu então a necessidade de elaborar soluções aquosas (sais de sódio e cálcio), que molhassem melhor o metal e tivessem a vantagem de oxidar menos do que a água pura e apresentassem um certo poder lubrificante. Partindo da necessidade dos fluidos de corte terem propriedades lubrificantes e proteção contra ferrugem, os pesquisadores voltaram-se para os óleos.

Os óleos eram satisfatórios para muitas operações de corte em metais, porém eles não resfriam tão bem como a água, uma vez que seu calor específico é metade do calor específico da água.

No entanto, o óleo compensa esta deficiência de resfriamento com a redução considerável do atrito, fazendo com que o calor transformado na usinagem seja bem menor.

Analizando esta dificuldade de resfriamento do óleo, foram desenvolvidos óleos emulsionáveis, comumente chamados de óleos solúveis, misturados em água, à proporção de 5% a 30%, melhorando a incapacidade de resfriar do óleo, sem perder as características lubrificantes.

Surgiram então os fluidos de corte de extrema pressão (E.P.) que são óleos emulsionáveis, usados quando a lubrificação é um fator importante, isto é, em velocidades reduzidas de corte (onde o coeficiente de atrito é grande) e para usinagem de materiais mais duros. Nos dias de hoje, após constantes desenvolvimentos, surgiram óleos contendo cloro, associações de cloro e enxofre, fósforo enxofre e cloro.

O alto custo dos fluidos de corte utilizados na refrigeração/lubrificação em usinagem, aliado à questão ecológica e também aos cuidados com a saúde do trabalhador, justificam esta pesquisa, a qual tem por objetivo comparar o uso do fluido refrigerante em abundância - nas indústrias de usinagem - com uma técnica que utiliza apenas uma quantidade mínima de óleo (aproximadamente 10 ml/h).

Para atingir o objetivo deste trabalho avaliar-se-á o comportamento da Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante - MQL - em operação de torneamento de aço SAE 1045, comparando-a com a refrigeração em abundância e também com o corte a seco.

Este trabalho divide-se em seis capítulos , a saber:

Capítulo 1 - Introdução;

Capítulo 2 - Fluidos de Corte;

Capítulo 3 - Usinagem a Seco;

Capítulo 4 - Materiais, Equipamentos e Métodos Experimentais;

Capítulo 5 - Resultados e Discussões;

Capítulo 6 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros.

## Capítulo 2

### Fluidos de Corte

#### 2.1. Funções dos fluidos de corte

A função principal do fluido de corte é fazer com que, tanto a ferramenta como a peça que está sendo usinada não se aqueçam demasiadamente. Para isto, o fluido de corte pode ter dois tipos diferentes de ações: a ação lubrificante que, ao diminuir o atrito entre a ferramenta/peça e ferramenta/cavaco, minimiza a transformação de calor; e a ação refrigerante que remove o calor já transformado. Como funções secundárias podem-se citar (Diniz et al., 1999; Ferraresi, 1977):

- Prevenção contra a soldagem cavaco/ferramenta – esta é uma função de lubrificação e é bastante necessária quando o material que está sendo cortado tem tendência à formação de aresta postiça de corte, como no caso da usinagem de alumínio, e também quando as condições de usinagem propiciam esta formação (baixas temperaturas de corte);
- Retirada do cavaco da região de corte – em algumas operações de usinagem, como furação e fresamento de alojamentos, um meio bastante eficiente de retirar o cavaco da região de corte é via fluxo de fluido de corte. Para que isto ocorra o fluxo deve ser de alta pressão, e o cavaco formado deve ser pequeno;
- Proteção contra corrosão;
- Redução da dilatação e deformação causadas pelo aquecimento do material;
- Evitar danos a estrutura superficial do material.

## 2.2. Propriedades exigidas para um bom fluido de corte

Nem todas as funções citadas são exigidas do fluido em toda a operação. Devido a isto, a seleção do fluido de corte apropriado depende do tipo do serviço a ser executado.

Para um fluido de corte ser satisfatório, as propriedades exigidas são (Diniz et al., 1999; Shell S.A., 1984):

- Alta capacidade de absorção de calor (isto depende da viscosidade, calor específico, condutividade térmica e em certo grau, do calor latente de vaporização);
- Capacidade de molhar eficientemente o metal, de modo que o resfriamento possa ser eficaz;
- Boas propriedades anti-fricção;
- Boas propriedades anti-soldante;
- Estabilidade durante seu uso e também no armazenamento;
- Ausência de odores desagradáveis;
- Não causar dano à pele humana e nenhum outro risco à saúde;
- Isenção da tendência de manchar ou corroer a peça trabalhada e a máquina ferramenta;
- Capacidade de proteger a peça e a máquina dos defeitos da corrosão pela umidade atmosférica, ou por outras causas possíveis;
- Isenção da tendência a originar precipitados sólidos que possam depositar substâncias semelhantes a gomas nas guias, ou obstruir os tubos de circulação do fluido de corte;
- Viscosidade adequada: a viscosidade deve ser suficientemente baixa de modo a permitir uma fácil circulação do fluido e também favorecer a decantação rápida dos cavacos e contaminantes em geral. Por outro lado, existem operações de usinagem onde são exigidas altas viscosidades, para permitir a aderência do fluido de corte nas arestas da ferramenta de corte;
- Não devem apresentar tendência à formação de fumaça;
- Transparência de modo que a peça possa ser observada claramente durante as operações de usinagem.

## **2.3. Classificação dos fluidos de corte**

Os diversos tipos de fluidos de corte podem ser classificados da seguinte maneira ( Diniz et al., 1999; Shell S.A., 1984 ):

- Ar
- Tipo aquoso:
  - Água;
  - Emulsões.
- Óleos :
  - Óleos minerais;
  - Óleos graxos;
  - Óleos compostos;
  - Óleos de extrema pressão.

### **2.3.1. Ar**

Em algumas operações de usinagem de metais, o ar é utilizado para remoção dos cavacos da região de corte e para fornecer ação refrigerante; porém o seu poder refrigerante é muito pequeno. É empregado nas usinagens de materiais de cavacos curtos, principalmente na usinagem de ferro fundido cinzento, pois quando se utiliza líquido como fluido de corte neste material, o pó produzido na usinagem é conduzido pelo líquido para as partes de atrito da máquina-ferramenta, diminuindo sua vida útil.

### **2.3.2. Tipos Aquosos**

#### **2.3.2.1. Água**

Foi o primeiro fluido de corte utilizado, porém devido a alta taxa de evaporação, deficiência em lubrificar a região de corte e também provocar corrosão nos materiais ferrosos, foi substituído por óleos integrais e óleos emulsionáveis.

### 2.3.2.2. Emulsões

Também chamados de "óleos solúveis" ou "concentrados de óleos solúveis". Estas denominações são inadequadas para os óleos minerais e semi-sintéticos, pois não são uma solução de óleo em água (óleo e água não se misturam), mas sim água com partículas de óleo dispersas em seu interior. Assim, o nome de óleo solúvel dado a este produto é incorreto. Mais corretamente deveriam ser denominados de "óleos emulsionáveis". O mais importante aditivo nos óleos emulsionáveis são os emulsificadores, que não só facilitam a dispersão do óleo na água, como também o mantêm finamente disperso como uma emulsão estável.

Os emulsificadores são responsáveis pela redução da tensão superficial, formando assim uma película monomolecular relativamente estável na interface óleo/água (figura 2.1). Estas películas evitam que as gotículas individuais se aglutinem e se separem da emulsão como óleo puro. Os emulsificadores são divididos em dois tipos: iônicos e não iônicos. Emulsificadores iônicos dissociam-se em íons positivos e negativos quando dissolvidos em água e são descritos como aniônicos ou catiônicos dependendo de atividade da superfície. Emulsificadores aniônicos típicos são sabões alcalinos de ácidos graxos ou naftênicos que são comumente usados em óleos de corte emulsionáveis.

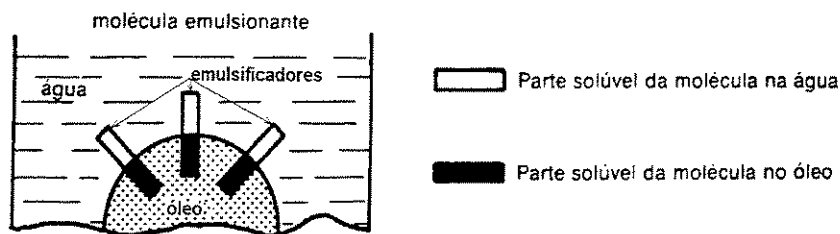


Figura 2.1 - Emulsificador formando a ligação do óleo com água (Curso de Lubrificação Industrial Shell, 1986).

Basicamente tem-se três tipos de fluidos de corte emulsionáveis:

- Mineral ou convencional - é composto por óleo mineral de petróleo e aditivos solúveis que são: emulgadores, anticorrosivos, lubrificantes, aditivos EP, biocidas e anti-espumantes.
- Semi-sintético - são óleos combinados com os pontos positivos do óleo de base mineral (formam emulsão e não solução, o que facilita o tratamento no momento do descarte) e com os pontos positivos dos óleos sintéticos (obtem-se uma emulsão estável, com alta durabilidade, bom acabamento e pouca espuma), com um mínimo de pontos negativos. O resultado desta combinação é uma emulsão estável e com todas as características desejadas de um óleo de corte.
- Sintético ou soluções químicas- são compostos por água e aditivos solúveis em água que são: emulgadores, anticorrosivos, biocidas, lubrificantes, compostos alcalinos, etc..

Na Tabela 2.1, pode-se observar as características de cada tipo de fluido de corte solúvel, bem como a presença e concentração de aditivos.

Tabela 2.1 - Composição de aditivos nos tipos de óleos solúveis.

	<b>Base Mineral</b>	<b>Semi-Sintético</b>	<b>Sintético</b>
Óleo Mineral	50-80%	20-50%	Não
Emulgadores	Média Concentração	Alta Concentração	Baixa Concentração
Tipo de Emulsão	Leitosa ou Translúcida	Translúcida	Solução Química
Lubrificantes	Alta Concentração	Alta Concentração	Baixa Concentração
Anti-Corrosivos	Média Concentração	Alta Concentração	Alta Concentração
Biocidas	Sim	Sim	Sim
Anti-Espumantes	Sim	Sim	Não
Água	Não	Sim	Sim
Aditivos E.P.	Sim/Não	Sim/Não	Não

A aplicação dos fluidos de corte de base mineral ou de base sintéticos possuem algumas qualidades e também defeitos; a opção por um ou outro tipo de fluido deve ser feita de acordo com uma análise detalhada do tipo de operação, tipo de máquina, material usinado, resultados pretendidos e outros, para obter-se resultados satisfatórios.

### **2.3.3. Óleos**

Em operações de usinagem, nas quais o calor transformado por atrito é muito grande, recomenda-se o uso dos óleos puros ao invés de emulsões. O óleo puro tem calor específico de cerca da metade do da água, o que reduz seu poder de refrigeração apesar de sua capacidade de lubrificação ser maior. Os óleos puros são divididos em puros, graxos, compostos e E.P., que serão explicados a seguir:

#### **2.3.3.1. Óleos Minerais Puros**

São fluidos de corte que devem ser usados puros. Os fluidos de corte integrais são usados nas operações de usinagens onde é necessário uma maior lubrificação, como é o caso do brunimento, brochamento, rosqueamento e furação profunda; utiliza-se também na usinagem de aço com baixo teor de carbono, latão, bronze, e ligas leves. São mais baratos e menos sujeitos à oxidação que os óleos graxos e os óleos compostos.

Apesar da deficiência que o óleo puro tem de esfriar o corte, apresenta resultado satisfatório, pois diminui o atrito, e com isso, diminui-se também a quantidade de calor transformado na usinagem.

Deve-se observar que existe um ponto de equilíbrio entre viscosidade e resfriamento, o qual é escolhido conforme o caso: tipo de operação, velocidade, calor transformado, etc.

Devido a este fator, os fluidos de corte integrais são encontrados em diferentes viscosidades. Independentemente do tipo de aditivação que o produto apresente, pode-se ajustar a viscosidade através dos óleos minerais.

Os óleos minerais são a base da grande maioria dos fluidos de corte integrais, cujas características são diretamente afetadas pelo tipo do mineral utilizado, pelos aditivos e antioxidantes que podem ser acrescentados (Diniz et al., 1999; Shell S.A., 1984; Ferraresi, 1977).

### 2.3.3.1.1. Composição dos óleos minerais

Os óleos minerais são cadeias de hidrocarbonetos. Três são os tipos principais (Catálogo Castrol):

- a) Parafínicos : constituídos por hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta, reta ou ramificada,
- b) Naftênicos : também conhecidos como ciclo-parafinas, apresentam cadeias cíclicas saturadas,
- c) Aromáticos : predominância de cadeias aromáticas, ou seja, compostos cíclicos insaturados.

As características dos óleos minerais variam de acordo com o tipo de cadeia predominante, mas no caso dos fluidos de corte integrais, deve-se levar em consideração as características físicas e químicas, além de uma desejável inofensividade à pele do operador.

A tabela 2.2 apresenta uma comparação das principais características dos óleos parafínicos e naftênicos. A escolha do óleo mineral mais indicado esta diretamente relacionada com o tipo de operação de usinagem, velocidade de corte e calor transformado na usinagem.

Tabela 2.2 - Comparação das principais características dos óleos parafínicos e naftênicos ( Catálogo Castrol, 1999 ).

Parafínicos	Naftênicos
Alto ponto de fluidez	Baixo ponto de fluidez
Alto índice de viscosidade	Baixo índice de viscosidade
Maior resistência à oxidação	Menor resistência à oxidação
Menor resíduo de carbono	Maior resíduo de carbono
Menor oleosidade ou poder lubrificante	Maior oleosidade ou poder lubrificante
Menor emulgabilidade	Maior emulgabilidade

#### **2.3.3.1.2. Aditivos**

São compostos que podem ser adicionados aos óleos minerais visando melhorar suas características. Os aditivos mais usados são os agentes de extrema pressão e, em alguns casos, um agente antioxidante.

#### **2.3.3.1.3. Antioxidante**

A oxidação do óleo pode levar à formação de vernizes e borras, sendo que se estes entrarem em contato com as partes metálicas da máquina poderão gerar pontos de corrosão. A função principal do antioxidante é reduzir a formação de substâncias ácidas, diminuindo a quantidade de oxigênio absorvido pelo óleo, reduzindo assim sua capacidade de causar corrosão.

#### **2.3.3.2. Óleos Graxos**

São óleos de origem vegetal e animal. Possuem boa capacidade de molhar o material da peça e da ferramenta. Tem boa capacidade lubrificante, mas sua capacidade anti-soldante é baixa. Em virtude do alto preço, tem sido substituído pelos óleos compostos ou pelos óleos EP. Os óleos graxos mais comuns são: óleo de toicinho e o óleo de baleia. São usados nas operações de usinagem de ligas não ferrosas tenazes, onde o uso de óleos sulfurados produziria manchas indesejáveis (Ferraresi, 1977).

#### **2.3.3.3. Óleos Compostos**

São misturas de óleos minerais e graxos. Possuem as vantagens dos óleos graxos e tem maior estabilidade química (não se deterioram ou se tornam mais viscosos com o tempo) e sua viscosidade pode ser ajustada pelo óleo mineral. São recomendados para a usinagem de cobre e suas ligas e também para fresamento e furação.

#### **2.3.3.4. Óleos de Extrema Pressão**

São óleos que tem incorporados na sua composição elementos que fazem com que eles suportem elevadas pressões sem evaporar. Esta característica é necessária para operações com altas velocidades e profundidade de corte, e também na usinagem de materiais que geram elevadas forças de corte. Assim sendo, faz-se necessário a presença de aditivos que suportem elevadas pressões sem vaporizar evitando o rompimento da película de óleo existente entre a ferramenta e a peça e, conseqüentemente, evitando o contato metal com metal. Estes aditivos reagem quimicamente com a superfície metálica, formando um composto que possui menor resistência ao cisalhamento do que o metal, reduzindo o atrito, e conseqüentemente, evitando a soldagem e a formação da aresta postiça de corte. Dentre os tipos de agentes E.P., destacam-se:

##### **2.3.3.4.1. Matéria graxa**

É constituída em sua maioria de ácidos graxos, que podem ser de origem animal ou vegetal e, graças a seus agrupamento polares, formam películas que se por um lado são excelentes lubrificantes e contribuem para um bom acabamento da peça usinada, por outro lado são usadas para trabalhos relativamente leves, visto que as películas não resistem a cargas elevadas.

##### **2.3.3.4.2. Enxofre**

Quando o enxofre puro é dissolvido no óleo mineral, obtêm-se um composto conhecido como óleo sulfurado. O enxofre é bastante utilizado para trabalhos severos devido ao sulfeto metálico formado durante o processo de corte, mas só pode ser utilizado na usinagem de aço e metais ferrosos, já que mancha as ligas de cobre e, com as ligas de níquel, pode formar eutéticos de baixo ponto de fusão.

##### **2.3.3.4.3. Cloro**

É adicionado ao óleo sob a forma de parafina clorada; é bastante eficiente em operações severas com aço, formando cloretos na superfície do metal. Este agente de alta pressão tem o seu uso restrito devido aos danos que pode causar se não for descartado corretamente.

#### **2.3.3.4.4. Fósforo**

Apresenta-se sob várias formas, podendo vir combinado com ésteres, e também como ditiodifosfato de zinco, que age como antioxidantes e principalmente como antidesgaste. Existe uma tendência que aponta para o fósforo combinado com enxofre como substituto do cloro, principalmente nos países cuja legislação proíbe o lançamento de efluentes que contenham composto clorados (Diniz et al., 1999; Shell S.A., 1984; Ferraresi, 1977; Castrol).

### **2.4. Danos à saúde**

Os riscos de câncer associados a fluidos de corte são bastante eminentes. A General Motors, juntamente com o Instituto U.A.W. (Union of American Workers), em 1983, fez uma pesquisa com o intuito de aprofundar os conhecimentos sobre os danos causados pelos fluidos de corte.

Foram selecionados pesquisadores da Universidade de Harvard e da Universidade de Massachusetts. Para a realização da pesquisa foram selecionadas três plantas fabris. Estudaram-se as mortes de mais de 46.000 trabalhadores com três ou mais anos de serviço.

Todas as mortes aconteceram entre 1941 e 1984; as pesquisas determinaram que nos trabalhadores expostos a óleo solúvel, foram encontradas altas taxas de câncer no estômago, pâncreas, laringe e próstata, além de leucemia. Para trabalhadores expostos a óleo puro, encontrou-se maior número de câncer da laringe, esôfago e reto. O risco de adquirir câncer por parte das pessoas que não foram expostas a este tipo de produto, era menor do que metade.

O SENSOR -Sentinel Event Notification System for Occupational Risks- de Michigan, descobriu que 12,3% dos casos de asma informados no Estado, estava associado a trabalhadores que foram expostos diretamente à névoa de óleo solúvel (UAW, 1998).

Dentre os produtos químicos mais nocivos, os biocidas tornam-se evidentes devido a serem produtos extremamente alérgicos e cancerígenos. As funções dos biocidas são a prevenção do mau cheiro e também evitar que o fluido de corte estrague, fato que os torna altamente utilizados em depósitos de fluido de corte; mas um fato que merece ser destacado é que eles não foram projetados para proteger os operadores contra problemas de saúde.

A adição de quantidades excessivas de biocidas em sistemas de refrigeração pode acarretar aos operadores de máquinas severas irritações nos olhos, nas vias respiratórias e também na garganta ( UAW, 1998 ).

Outro fator que afeta diretamente a saúde dos trabalhadores é a névoa que se forma durante a usinagem. O comprometimento do ar no local de trabalho, em decorrência do uso de aerossóis e dos vapores de agentes refrigerantes, variam em função, por exemplo, das propriedades físico-químicas dos refrigerantes, da rotação das peças ou das ferramentas e do aquecimento das superfícies envolvidas no processo.

Até 1996 não havia qualquer especificação de valor limite para os agentes refrigerantes no ar. De acordo com a norma TRGS 900 (norma que determina valores limites de poluição no ambiente de trabalho), estabeleceu-se desde 1996, um valor limite de 10 mg de agente refrigerante por metro cúbico, que deve ser observado como valor médio por turno de trabalho (Bersenkowitsch, 2000).

Os problemas de saúde relacionados a fluidos de corte podem ser minimizados instalando-se na máquina um sistema de exaustão para que o operador de máquinas não inale esta névoa. Já existem alguns fabricantes de máquinas que preocupados com este problema, colocam à disposição dos clientes um equipamento opcional de exaustão.

Em função dos fatos, vem-se estudando novas técnicas de refrigeração, que vão desde a água até o corte a seco, passando pelo corte com mínima quantidade de lubrificante (MQL). Estes estudos provaram que algumas destas possibilidades são viáveis, tanto para o operador que não ficaria exposto a produtos químicos, como para redução dos custos de usinagem. Vários autores afirmam que aproximadamente 16 % do custo total da usinagem é destinado a líquidos para refrigeração, conforme apresentado na figura 2.2 (Klocke et al., 1997; Cselle, 1995; Catálogo Titex Plus; Kustas et al., 1997; Dunlap, 1997, Daniel et al., 1997, Granger, 1994).

Nestes 16% estão incluídos não somente o custo de aquisição dos fluidos de corte, como também o custos dos equipamentos de bombeamento, filtragem, etc. e também o custo de reciclagem e descarte.

Pode-se ver na figura 2.2 que o custo com líquidos para refrigeração é muito maior que o custo com ferramentas de corte. Assim, a introdução do corte a seco ou do MQL, mesmo se representar um aumento no custo com ferramentas de corte, pode tornar-se viável pois, além de diminuir bastante (ou eliminar) os custos com refrigeração, diminuirá substancialmente os danos à saúde dos operadores de máquinas e ao meio ambiente.

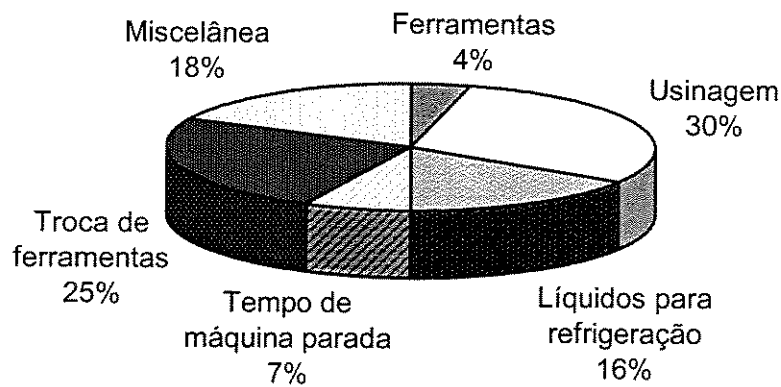


Figura 2.2 - Custo total de usinagem utilizando o método de refrigeração por inundação (Catálogo Titex Plus).

A Alemanha destaca-se quanto à conscientização da importância do uso de tecnologias associadas à preservação do meio ambiente, tanto quanto à saúde do trabalhador, tendo como meta o desenvolvimento de novas técnicas visando estes fins. Deveria ser uma exigência de âmbito mundial que as empresas estabeleçam medidas eficazes de combate à poluição, utilizando processos de fabricação isentos de produtos químicos.

## 2.5. Consumo e descarte de Fluidos de Corte

O consumo total de lubrificantes na Alemanha, em 1994, foi de 1.151.312 toneladas. Toda esta quantidade, após um determinado tempo de uso, deve ser descartada, pois perdem suas propriedades fundamentais.

A figura 2.3 apresenta a distribuição do consumo de lubrificantes, dos quais os fluidos destinados à refrigeração representam 7 % (75.491 tons); desta quantia, 37,5% são fluidos emulsionáveis em água, na concentração de 3% a 8%, formando uma quantidade de emulsão da ordem de 355.000 até 947.000 toneladas (Klocke et al., 1997; Müller-Hummel et al., 1998).

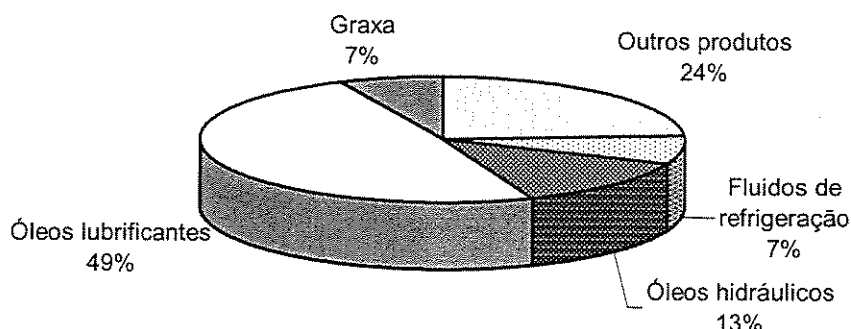


Figura 2.3 - Distribuição das quantidades de óleos usados na Alemanha em 1994  
(Klocke et al., 1997; Müller-Hummel et al., 1998).

Esta quantidade de emulsão não pode ser descartada sem um prévio tratamento. Os produtores de óleos, atentos ao problema cada vez mais crítico no Brasil e no mundo, vêm pesquisando a melhor forma de descarte para diferentes tipos de fluido de corte (sintéticos, semi-sintéticos ou convencionais). O descarte dos fluidos de corte solúveis, pelas leis brasileiras, não pode ser feito em esgotos ou curso d'água; também não podem ser deixados de lado, pois os seus custos já passam a ser consideráveis no contexto.

O processo de descarte mais usual no Brasil é a técnica da "quebra ácida", que em muitos casos é inadequada. Este processo consiste em adicionar no efluente, ácido clorídrico, sulfato de alumínio e hidróxido de sódio, que reagem com o efluente, fazendo com que o óleo se separe da água; mas a CETESB proíbe o uso de ácidos em algumas localidades.

Já existem no Brasil empresas especializadas no tratamento de rejeitos industriais que utilizam o processo térmico de tratamento, no qual toda a água é evaporada, tendo como resultado uma eliminação tecnicamente perfeita e com custos reduzidos (Catálogo Castrol, 1999).

## **2.6. Descarte de Emulsões**

Já que os refugos de emulsões e dos efluentes que contém óleo, não devem ser despejados no sistema de esgotos ou na água de superfície, estes devem ser tratados. A escolha do método ideal para o tratamento de efluentes deve ser baseada nos objetivos pretendidos, tendo por base os seguintes parâmetros:

- Tipo de despejo;
- Contaminantes específicos que se deseja remover;
- Classe de água a que o despejo se destina;
- Custo por litro;
- Planejamento e execução do sistema de tratamento de acordo com o órgão normativo.

De acordo com o tipo de óleo que se deseja descartar (sintético, semi-sintético ou base mineral) deve ser aplicado um tipo de tratamento. O fluido de corte sintético é o mais problemático para ser tratado, pois neste caso não há formação de emulsão e sim soluções, com aditivos de grande solubilidade em água, permanecendo na fase aquosa mesmo depois de tratamento, gerando um efluente impróprio para o descarte.

Alguns óleos de corte solúveis em água não contém óleo mineral e são comercializados como óleos biodegradáveis. Entretanto deve-se observar que as emulsões recém preparadas deste produto podem ser biodegradáveis. Porém no final de sua vida útil, esta emulsão pode estar contaminada com óleos, cavacos e qualquer outra partícula, fazendo com que este produto não seja aceito para ser despejado em esgotos sem prévio tratamento (Catálogo Castrol, 1999).

## **2.7. Descarte de Fluidos de Corte Integrais**

Os fluidos de corte integrais são baseados em óleo mineral de petróleo e possuem uma vida útil maior do que a dos fluidos de corte solúveis. Atualmente existe uma tendência mundial, principalmente nos países da Europa, de se reduzir a utilização de óleos integrais devido ao elevado custo, e principalmente pelos riscos à saúde humana.

Na Alemanha, o uso do cloro em fluidos de corte está se restringindo, em virtude dos danos que os compostos clorados podem causar se não forem descartados corretamente. Os solventes clorados penetram no solo e acumulam-se por um longo período, podendo atingir facilmente o lençol freático e contamina-lo totalmente. O despejo de 1 kg de solvente clorado pode contaminar 40000 m<sup>3</sup> de água (Silva e Bianchi, 2000).

Portanto para o descarte de fluidos de corte integrais, usam-se três alternativas:

- Reciclagem: este processo compreende a limpeza física e química para posterior readitivção a fim de que se tornem um produto próprio para o uso;
- Aterro Sanitário: estes locais devem estar fora do limite da área urbana, mas com a grande demanda de óleo nas indústrias, o volume de resíduos tem aumentado e as áreas para aterro, diminuído; corre-se ainda o risco de vazamento e contaminação do solo, o que certamente acarretaria um efeito desastroso. É um método insatisfatório.
- Queima : é o método mais comum e conveniente de eliminação. Contudo, certos óleos com aditivos de extrema pressão devem ser incinerados em temperaturas superiores a 1100° C, para evitar a formação de dioxinas (Silva e Bianchi, 2000).

## **Capítulo 3**

### **Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)**

#### **3.1. Usinagem a seco**

Como já citado anteriormente, as principais funções do fluido de corte, em operações de usinagem, são a redução da geração de calor através da diminuição do atrito entre a ferramenta e o cavaco, minimizando assim esforços na usinagem, como também a retirada do calor da peça e da ferramenta. Em algumas operações de usinagem, o fluido de corte também tem a função transportar o cavaco para fora da região de corte.

As funções dos fluidos de corte não estão disponíveis em operações de usinagem a seco; isto significa que existe maior atrito entre a ferramenta e a peça e entre o cavaco e a ferramenta, como também maior dificuldade de expulsão dos cavacos. A ferramenta é submetida a uma maior carga térmica, o que pode resultar em níveis mais altos de desgaste por adesão, abrasão, difusão e oxidação e, portanto, a redução de sua vida. O efeito da redução da refrigeração pode acarretar um aquecimento adicional na máquina e, conseqüentemente, problemas com a precisão. A peça ao receber maior quantidade de calor dilata-se, dificultando a obtenção de tolerâncias apertadas e também pode ter sua camada superficial metalurgicamente afetada pelo calor (Diniz et al., 1999). A ausência do auxílio na expulsão dos cavacos é bastante problemática no caso de operações de furação, podendo causar problemas com a ferramenta (quebra) e também danos à superfície do furo.

Porém, o corte a seco pode apresentar resultados positivos como a redução do choque térmico, minimizando a ocorrência de lascamentos e trincas da aresta de corte, principalmente em

operações de fresamento e outras com corte interrompido. Além disso, à medida que as preocupações com o meio ambiente se intensificam, maior é a necessidade de se remover os fluidos de corte do processo de usinagem, dada as inconveniências ambientais já citadas. Ainda mais, todos os custos envolvidos com a utilização de fluidos de corte (custos com a própria aquisição do fluido, com reciclagem, limpeza, etc.) são altos, como demonstraram Klocke et al., 1997 e Müller-Hummel et al., 1998.

Um estudo conduzido pela Daimler Chrysler AG comprova que não se pode mais negligenciar a fatia relativa aos custos da refrigeração incidente nos custos globais da manufatura. Quando comparado com os 16% determinados para a tecnologia da refrigeração, os custos proporcionais relativos à ferramenta representam apenas 4%.

Dentre os materiais conhecidos, o ferro fundido cinzento foi o primeiro a ser usinado a seco em operações de torneamento, mas hoje em dia também se pode usinar a seco materiais mais duros. Na figura 3.1, pode-se ver a possibilidade de mudança (em porcentagem), de torneamento com fluido de corte para torneamento a seco (Momper, 2000).

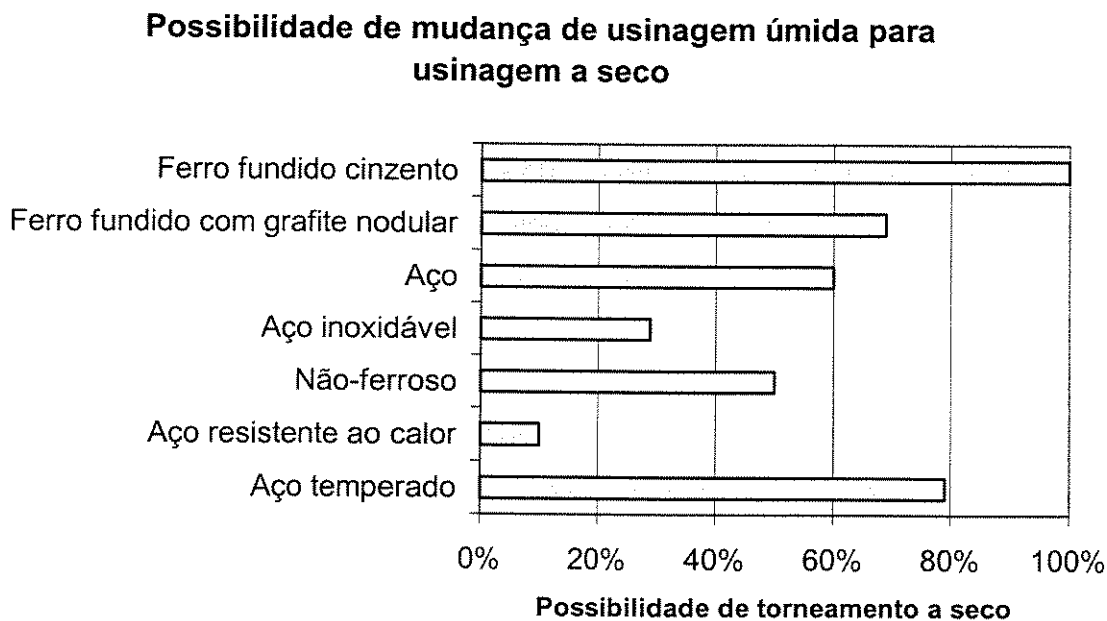


Figura 3.1 - Possibilidade de mudança de usinagem úmida para usinagem a seco em processo de torneamento (Momper, 2000).

Momper (2000), mostrou em seu trabalho que, em operação de torneamento de aço 42CrMo4, com ferramenta tipo CNMG 120408-LF de metal duro revestido com  $Al_2O_3$ , utilizando diferentes velocidades de corte e avanços, o processo convencional de refrigeração/lubrificação pode ser substituído pela usinagem a seco, com um prejuízo bastante pequeno da vida útil de ferramenta, conforme pode-se ver na figura 3.2. Neste ensaio o fim de vida da ferramenta foi determinado quando o desgaste frontal atingia  $V_B = 0,35$  mm. A boa performance da usinagem a seco é atribuída à cobertura de  $14\mu m$  de  $Al_2O_3$  que funciona como um isolante térmico, facilitando a irradiação de calor através dos cavacos e, consequentemente, protegendo o substrato contra sobrecarga térmica.

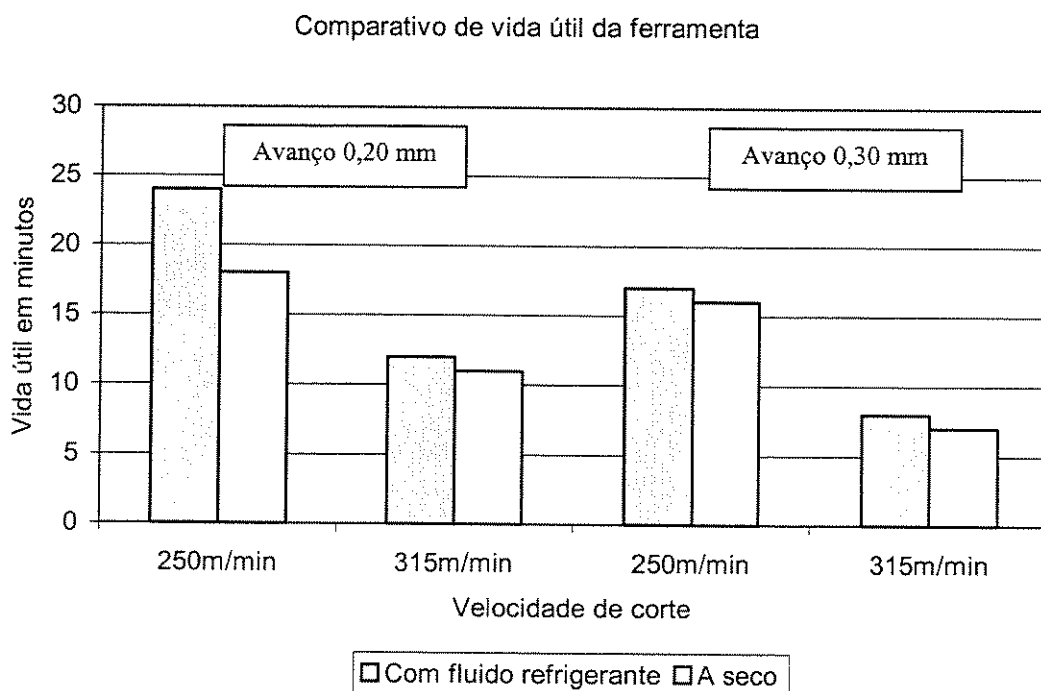


Figura 3.2 - Vida útil da ferramenta no torneamento de aço 42CrMo4, com fluido refrigerante e a Seco (Momper, 2000).

Executar uma usinagem a seco é possível em alguns casos; mas provavelmente não poder-se-á usinar com a mesma rapidez e rendimento como poderia ser feito usando um fluido de corte. Porém, mesmo que a utilização de corte a seco (ou com Mínima Quantidade de Lubrificante, que será citado ainda neste capítulo) represente um incremento no gasto com ferramentas, devido à diminuição de sua vida com o aumento da temperatura ou pela utilização de materiais para ferramentas com custos mais elevados, na maioria das vezes pode ser economicamente viável.

Temperaturas de usinagem mais altas influenciam na formação do cavaco; isto pode resultar em cavacos longos em forma de tiras, ou cavacos encaracolados que prejudicam a boa performance do trabalho. Estudos recentes, realizados por Rodrigues de Paula e Abrão, 1999, mostram que o cavaco formado, em operação de torneamento de aço ABNT 1045 a seco, foi do tipo em fita emaranhado e, portanto, bastante indesejável. Este estudo mostra também que o tipo do cavaco muda à medida que se muda o fluido de corte. Devido a este motivo, é necessário o desenvolvimento e a utilização de insertos com geometria especial para um melhor controle de formação de cavaco quando se utiliza o corte a seco.

Observando esta tendência de redução da utilização de fluidos de corte em operações de usinagem, existe uma preocupação em se desenvolver ferramentas com geometrias especiais de quebra cavaco para um melhor controle e descarga de cavaco e também nos próprios desenhos das ferramentas para prevenir o desgaste prematuro da aresta em operações a seco.

O material da ferramenta selecionado para uma operação de corte de metal a seco é tão importante quanto a geometria da ferramenta escolhida. A dureza em altas temperaturas e a resistência ao desgaste do metal duro, cermetes, cerâmica, CBN e PCD fazem esses materiais eminentemente satisfatórios para o uso em operações de usinagem a seco.

As ferramentas de CBN e cerâmicas têm sido utilizadas com sucesso em operações de torneamento de aço endurecido a seco. Momper (2000), apresentou em seu trabalho testes realizados em operações de torneamento de aço endurecido (60 a 62 HRC) na condição a seco e também com fluido refrigerante, com pastilhas SNGN120716T de CBN e de cerâmica mista, com velocidade de corte de 165m/min, avanço de 0,08mm e profundidade de corte de 0,125 mm, utilizando como critério de fim de vida da ferramenta o acabamento superficial da peça. Para ambas as ferramentas testadas, as velocidades de corte econômicas situam-se na faixa de 120 a 200 m/min. Com os dois tipos de ferramentas testadas, a usinagem a seco obteve o mesmo rendimento da usinagem com fluido refrigerante, reduzindo assim os custos adicionais.

O substrato das ferramentas de metal duro para corte a seco ou quase seco deve ser produzido por um pó de metal duro ultrafino, com tamanho do grão menor que 0,3 microns e com alta resistência ao calor, possibilitando assim a obtenção de arestas de corte mais afiadas, o que gera menos calor se comparado com as ferramentas de metal duro tradicionais. Estes pós de metal duro ultrafinos têm uma resistência aproximadamente de 60% a 70% maior do que os pós normais de metal duro, com tamanho de grão de aproximadamente 2,5 microns (Cselle, 1995).

No entanto, somente os fatores citados anteriormente não são suficientes para a obtenção de uma ferramenta de alta performance na usinagem a seco. Os revestimentos de carboneto de titânio e/ou óxido de alumínio, nitreto de titânio e carbonitreto de titânio, são fundamentais para suprir os efeitos da deficiência de lubrificação na região de corte.

O revestimento reduz o atrito e a adesão, funcionando como um "lubrificante sólido"; além disto, a carga térmica no substrato é diminuída pela baixa condutividade térmica da camada de cobertura. O nível reduzido de dissipação de calor pela ferramenta muda o fluxo de calor entre a ferramenta e o cavaco, fazendo com que o cavaco dissipe mais calor do que o normal. Além do revestimento diminuir o desgaste de flanco e aumentar o tempo de corte, ele também protege o substrato dos efeitos químico e térmico (Dunlap, 1997).

Dentre os materiais utilizados para recobrir o metal duro, o que mais proporciona a redução do coeficiente de atrito é o nitreto de titânio (TiN), que começou a ser utilizado em escala industrial na década de 60, através do processo de deposição química a vapor (CVD). O material utilizado para recobrir o metal duro que tem menor condutividade térmica é o óxido de alumínio ( $Al_2O_3$ ). Com isso, a camada de  $Al_2O_3$  que recobre uma ferramenta de metal duro, funciona como uma barreira à passagem de calor, protegendo as demais partes da ferramenta que, em geral, resistem menos ao calor que o próprio  $Al_2O_3$ . Além disso, o óxido de alumínio tem alta estabilidade química, protegendo a ferramenta contra o desgaste de cratera que, sem a presença desta camada, com certeza ocorreria em larga escala, dada as altas temperaturas envolvidas na operação (Diniz et al., 1999).

Outra cobertura usada, com propriedades notáveis de resistência ao desgaste é o nitreto de titânio/alumínio (TiAlN). Esta cobertura pode ser usada combinada com outras coberturas, como por exemplo o  $Al_2O_3$ , conferindo assim à ferramenta alta resistência a quente, em operações de usinagem a seco. Este revestimento com dupla camada tem melhor rendimento em ferramentas de metal duro do que em ferramentas de aço rápido, devido à ferramenta de aço rápido sofrer deformação durante o processo de usinagem. Esta deformação tende a trincar as coberturas, comprometendo assim a sua performance (Cselle, 1995).

No processo de furação a seco de ferro fundido, as brocas revestidas com TiAlN tem apresentado resultados excelentes, graças à sua alta dureza sob temperaturas elevadas e também boa resistência a oxidação. Testes realizados em operações de furação a seco de ferro fundido, utilizando broca de diâmetro de 8,5mm sem cobertura, avanço de 0,25mm, velocidade de corte de 60m/min e profundidade de 40mm, foi possível realizar aproximadamente 250 furos, enquanto

com broca revestida com 4 a 5 $\mu$ m de TiAlN foram executados 1750 furos, com velocidade de corte de 130m/min (Momper, 2000).

Um parâmetro do processo que não deve ser esquecido antes da introdução da usinagem a seco é o conjunto das condições de usinagem. Em geral, quando se passa da usinagem com fluido abundante para a usinagem a seco, a velocidade de corte precisa ser diminuída, já que ela é, dentre as condições de corte, a que mais influencia na vida da ferramenta (Diniz et al., 1999).

Portanto, para que o volume de cavaco removido na unidade de tempo não seja diminuído e, assim, aumente-se o tempo de corte, pode-se, por exemplo, aumentar o avanço na mesma proporção da diminuição da velocidade. Assim o volume de cavaco removido na unidade de tempo fica constante e o calor gerado também se mantém aproximadamente constante. Porém a área da ferramenta que recebe este calor aumenta e a temperatura de corte diminui, quando comparada à temperatura que ter-se-ia no corte a seco, se as condições de usinagem não fossem alteradas. Este procedimento deve causar a piora do acabamento superficial de peça, devido ao aumento do avanço e a diminuição da velocidade de corte. Assim, em operações de acabamento, o raio da ponta da ferramenta também deve ser aumentado para manter a rugosidade da peça nos mesmos níveis.

Analisando esses fatores pode-se deduzir que a introdução de usinagem a seco necessita de medidas satisfatórias para compensar as funções primárias do lubrificante. Isto, por sua vez, requer uma análise muito detalhada do limite condicional de cada elemento para o entendimento das inter-relações que unem o processo de usinagem, as quais são: ferramenta, peça e máquina ferramenta. Dentre as funções a serem analisadas, destaca-se: material da peça, tipo de operação de usinagem, quantidade mínima de lubrificante de corte, condições de corte, revestimento da ferramenta de corte, geometria da ferramenta, condições da máquina-ferramenta, e usinabilidade do material, conforme apresentado na tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Variáveis que influenciam na usinagem a seco (Klocke et al., 1997).

Usinagem a seco – Fatores a serem levados em consideração.	
Material	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Usinabilidade</li> <li>➤ Propriedades térmicas</li> </ul>
Máquina ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Nova/velha</li> <li>➤ Remoção de cavaco</li> <li>➤ Estado de conservação</li> </ul>
Ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Capacidade de dissipar calor</li> <li>➤ Remoção de cavaco                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Geometria</li> <li>- Tamanho do grão</li> </ul> </li> </ul>
Revestimento da ferramenta	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Capacidade de penetração térmica</li> <li>➤ Resistência ao desgaste</li> <li>➤ Dureza a quente</li> <li>➤ Estabilidade química</li> </ul>
Condições de corte	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Vida da ferramenta</li> <li>➤ Tempo de usinagem</li> <li>➤ Taxa de remoção de material</li> </ul>
Quantidade mínima de Refrigerante/lubrificante	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Resfriamento/lubrificação</li> <li>➤ Remoção de cavaco</li> </ul>
Operações de usinagem	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Torneamento</li> <li>➤ Fresamento</li> <li>➤ Rosqueamento</li> <li>➤ Furação</li> <li>➤ Mandrilamento</li> </ul>
Peça a ser usinada	<ul style="list-style-type: none"> <li>➤ Acabamento</li> <li>➤ Geometria</li> <li>➤ Complexidade                             <ul style="list-style-type: none"> <li>- Forma</li> <li>- Dimensional</li> </ul> </li> </ul>

### 3.2. Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL)

Em situações em que as operações de usinagem completamente a seco não são possíveis, ou não são economicamente viáveis, como é o caso das operações de furação e fresamento de alojamentos a Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante vem sendo estudada como uma opção bastante viável. Esta técnica tem uma importância significativa pelo fato de minimizar as quantidades de fluidos de corte, (que contém aditivos químicos que agredem o meio ambiente no momento de seu descarte) já que cada vez mais os problemas ecológicos e econômicos estão tornando estes fluidos indesejáveis na produção.

A Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) vai ao encontro dos objetivos da indústria manufatureira que são aumentar cada vez mais a produtividade e reduzir os custos, metas que podem ser atingidas substituindo-se o uso abundante do fluido de corte por uma mínima quantidade de óleo, e ao mesmo tempo, atender aos requisitos ecológicos.

O termo Mínima Quantidade de Lubrificante é usado quando uma quantidade mínima de lubrificante/refrigerante misturado com ar é adicionada ao processo cortante; estas quantidades mínimas de fluido são suficientes para reduzir substancialmente o atrito na ferramenta e evitar a aderência de material.

Müller-Hummel e Berky (1998) mostram em seu trabalho que, para se usinar liga de alumínio AlZnMgCu 1,5, óleos convencionais utilizados na indústria alimentícia podem ser usados como fluidos para resfriamento misto (ar/óleo). Estes produtos, provenientes do óleo vegetal, são certificados para a produção de alimentos, cosméticos e medicina, e não contém nenhum aditivo. Devido à alta estabilidade química deste líquido graxoso, este produto também é certificado para manutenção de máquinas, além de ser biodegradável quando adicionado em água. Neste trabalho, os autores também apresentam testes elaborados na empresa DASA, onde foi substituído o sistema de refrigeração/lubrificação tradicional de inundação pela Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL), com vazão de 20 a 40 ml/h, em um processo de fresamento de liga de alumínio AlZnMgCu 1,5.

Após este novo método ter sido considerado satisfatório e, portanto, aprovado pelo departamento de qualidade da empresa - no qual foram avaliadas a qualidade dimensional e também o acabamento - produziram-se aproximadamente 3.000 peças para a indústria aeronáutica, sem que nenhuma peça tenha sido refugada. Com o sistema de refrigeração/lubrificação por inundação, 80.000 litros de fluido refrigerante (emulsão de óleo mineral) eram necessários para a execução deste trabalho; uma parte deste óleo era reciclada, totalizando um consumo aproximado de 150 litros por dia. Com a introdução da nova técnica, o consumo de óleo diminuiu para apenas 1,3 litros por dia de óleo vegetal, e ainda este óleo criava uma película sobre as partes móveis da máquina mantendo-as lubrificadas.

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 aço 50CrV4 com brocas de metal duro de 11,8 mm de diâmetro (revestidas com TiN), a velocidade de corte utilizada foi de 80 m/min, avanço de 0,25 mm e profundidade de corte de 30 mm.

O fim de vida da ferramenta foi determinado quando o desgaste atingia 0,30 mm. Na furação a seco, a vida útil da ferramenta chegava ao final após 200 furos, e com a utilização da Técnica da Mínima Quantidade de lubrificante, com vazão de 8 ml/h e pressão de 3 bar, este nível foi elevado para 1500 furos, obtendo o mesmo resultado que na refrigeração/lubrificação por inundação.

Braga em 1999 mostrou em seu trabalho que, em operação de furação de liga de alumínio-silício SAE - 323 com broca de metal duro inteiriça tipo K10 sem cobertura, a utilização da Técnica da Mínima Quantidade de Lubrificante com vazão de óleo integral de 10ml/h em um fluxo de ar comprimido de 4,5 bar de pressão, atendeu plenamente à necessidade de lubrificação, garantindo a qualidade dos furos e vida da ferramenta similar ao processo com refrigeração/lubrificação por inundação. A usinagem completamente a seco e também somente com ar não foi possível devido à adesão de cavaco na superfície de saída da broca, ocasionando a quebra da ferramenta. Também foram testadas as vazões de 30 ml/h e 60 ml/h no fluxo de ar comprimido. Estas vazões não causaram aumento nem na vida da ferramenta, nem na qualidade dos furos quando comparados com o corte com MQL com 10ml/h de vazão de óleo e ainda causaram o aumento da névoa de óleo no ambiente.

Neste mesmo trabalho foi comparada a capacidade de refrigeração dos sistemas utilizados, ou seja: jato de ar comprimido, Técnica da Mínima Quantidade de lubrificante (MQL) com vazão de 10, 30 e 60 ml/h e refrigeração abundante com óleo emulsionável na proporção de 1:25. Os corpos de prova, que eram feitos da mesma liga de alumínio SAE 323, foram submetidos a uma temperatura de 400° C; após o aquecimento, os corpos de prova foram expostos à estas condições de refrigeração/lubrificação utilizadas no experimento. Os resultados não foram diferentes dos esperados, o jato de ar puro foi a condição que teve menor poder de refrigeração, e o óleo emulsionável foi a que teve maior poder de refrigeração. Para as três condições de mínima lubrificação obteve-se resultados equivalentes e intermediários aos anteriores, com capacidade de refrigeração pouco superiores ao jato de ar comprimido.

Estes dois resultados juntos conduzem à conclusão que a refrigeração não é importante para a furação destas ligas, já que um fluido com poder muito maior de refrigeração, no caso o óleo solúvel em abundância, não melhorou o desempenho do processo. Além disso, para se lubrificar este processo não é necessário uma grande quantidade de óleo, já que o aumento da vazão de óleo (para 30 e 60 ml/h) não resultou na melhoria da sua performance.

Testes conduzidos em fresamento de liga de alumínio AlZnMgCu 1,5, com ferramenta HM K40 com 16mm de diâmetro, velocidade de corte de 1005 m/min, avanço por dente de 0,21mm e profundidade de corte de 6mm, os resultados foram bastante animadores. Estes testes compararam resultados obtidos na usinagem a seco, Técnica MQL com vazão de 10 e 40 ml/h e refrigeração por inundação. Na usinagem totalmente a seco, a formação da aresta postiça de corte foi de 2,9mm de altura, causando na peça uma qualidade insatisfatória.

Quando se utilizou a Técnica MQL, mesmo reduzindo o volume de óleo para 10ml/h, as adesões na ferramenta foram quase completamente evitadas, assemelhando-se com o sistema de inundação de fluido de corte (Novaski e Dörr, 1999).

Machado e Wallbank em 1997, mostraram em seu trabalho a performance de cinco diferentes tipos de refrigeração/lubrificação em operações de torneamento de aço com médio teor de carbono (AISI 1040). As condições de refrigeração/lubrificação testadas foram: usinagem a seco, jato de ar comprimido, ar comprimido com água com vazão de 300 ml/h, ar comprimido com óleo solúvel com vazão de 200 ml/h e refrigeração abundante com óleo solúvel emulsionável com concentração de 5 % e vazão de 5,2 l/min. A máquina utilizada nos ensaios foi um torno da marca Torshalla S250 CNC com 30 kW de potência, e as ferramentas foram insertos de metal duro sem cobertura tipo SNMG 120404 P40. Os resultados obtidos nestes ensaios foram bastantes animadores, porque em alguns casos, a Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante apresentou melhor performance comparada com o método por inundação. Utilizando a Técnica do MQL, com fluxo de 200 ml/h de óleo solúvel, as forças de corte e de avanço foram reduzidas, principalmente em baixas velocidades de corte e altas taxas de avanço. Outro método testado foi o ar comprimido com água, apresentando também boa performance, mas este método causa problemas de corrosão na máquina.

Dentre os principais benefícios da Técnica MQL, se aplicada corretamente, tem-se que, tanto a ferramenta como a peça e o cavaco permanecem secos; elimina-se toda a manutenção e os problemas inerentes ao descarte do fluido de corte e a preparação dos fluidos, incluindo-se também o benefício da não exposição dos operadores de máquinas ao produto químico. A proporção do óleo residual nos cavacos diminui bem abaixo de 0,3 % do peso do cavaco, permitindo assim a sua refundição e eliminando a necessidade dos custos da limpeza dos cavacos antes da reciclagem (Novaski e Dörr, 1999). Devido a estes fatores, em algumas situações esta técnica é denominada também como usinagem a seco.

A Técnica MQL tem sua aplicação mais comum, substituindo o corte a seco, nas operações de furação, mandrilamento e rosqueamento em ferro fundido, aço e ligas de alumínio; também para acabamento em operações de fresamento em ligas de alumínio e furação profunda.

Além destas aplicações sabe-se também que para tornear aço, o uso da Técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante reduz o coeficiente de atrito e a temperatura na região do corte quando comparada com a usinagem a seco.

## Capítulo 4

### Materiais, Equipamentos e Métodos Experimentais

#### 4.1. Material

O material dos corpos de prova utilizados para os ensaios foi o aço laminado SAE 1045, obtidos de uma única barra, com a composição química citada a seguir:

C = 0,47%

Si = 0,26%

Mn = 0,73% (porcentagem em peso)

P = 0,022%

S = 0,007%

A tabela 4.1 mostra os valores de diversas medidas de dureza realizadas em 5 amostras escolhidas aleatoriamente entre os corpos de prova. Nota-se, conforme a tabela, bastante homogeneidade nos valores de dureza. A medição de dureza foi realizada em diversos pontos do raio da peça, apresentados na figura 4.1, a seguir.

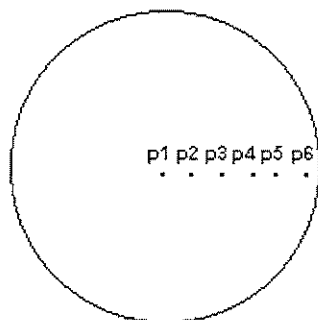


Figura 4.1 - Pontos onde a dureza foi medida no corpo de prova.

Tabela 4.1 - Medidas de dureza Brinell

Amostra	P1	P2	P3	P4	P5	P6
1	203	194	202	212	212	212
2	212	194	203	203	194	203
3	219	203	202	203	203	211
4	219	201	203	211	203	212
5	211	203	202	203	203	203
X	212.8	199	202.4	206.4	203	208.2
$\sigma$	6.65	4.63	0.55	4.67	6.36	4.76

esfera = 1.6 mm      carga = 100 kg.

## 4.2. Equipamentos e Métodos experimentais

Os testes foram realizados no laboratório de usinagem do Centro Universitário Salesiano de São Paulo - UNISAL - Unidade de Ensino de Campinas. Foi utilizado um torno CNC de marca Romi, modelo Cosmos 10U, comando FANUC, com potência e rotação máximas de 10 cv e 4500 rpm, respectivamente (figuras 4.2a e 4.2b).

O desgaste das arestas de corte foi medido em um projetor de perfil da marca Mitutoyo com ampliação de 10 vezes (figura 4.4) e o acabamento das peças foi monitorado por um rugosímetro portátil utilizando cut-off de 0.8mm (figura 4.3), também da marca Mitutoyo. Para determinar a potência consumida do motor foi usado o mostrador digital do próprio CNC. Para realizar a mistura ar/óleo, foi utilizado um misturador simples produzido pela empresa Fuso Seiki Co.,Ltd. O fluxo ar/óleo era injetado de tal maneira a penetrar entre a superfície de folga da ferramenta e a peça (figura 4.5). Também foi realizado um ensaio colocando o fluxo de ar/óleo na superfície de saída da ferramenta, mas os resultados deste teste não foram satisfatórios e, por esta razão, não são analisados neste trabalho.

Os corpos de prova utilizados foram barras de aço ABNT 1045 com diâmetro inicial de 99 mm e 240 mm de comprimento. Foram utilizados insertos de metal duro com geometria TNMG 160404 PF 4015<sup>1</sup> (figura 4.6), montadas em um suporte PTG NR 2020 K 16.

Os ensaios foram realizados na condição a seco, e também empregando-se três tipos de refrigeração/lubrificação: i) somente jato de ar comprimido com pressão de 4 bars, ii) mistura de ar com óleo de corte integral - Ilocut 171<sup>2</sup> e iii) emulsão de óleo solúvel sintético (CASTROL SYNTILO RX) na concentração de 5% com vazão de 3 m<sup>3</sup>/h.

Foram realizados ensaios preliminares submetendo a ferramenta a cinco minutos de corte, em cada condição de refrigeração/lubrificação: Mínima Quantidade de Lubrificante com vazão de óleo de 10 ml/h, 30ml/h, 60 ml/h, somente ar comprimido e corte a seco sem nenhum tipo de refrigerante. Em todos os ensaios realizados, foram medidos desgaste de flanco da ferramenta

<sup>1</sup> Classe de inserto GC 4015 – Metal duro com cobertura espessa e resistente ao desgaste sobre um substrato duro e termoresistente. A camada interna de tem 8 µm, recebeu também 6 µm de Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> no topo. A camada externa é uma cobertura fina de TiN. A combinação de substrato e coberturas proporciona excelentes propriedades de resistência ao desgaste, para uma ampla gama de aplicações em aços (Catálogo Sandvik, 1998).

<sup>2</sup> Ilocut 171 - Fluido de corte integral do tipo EP, inativo para usinagem de metais não ferrosos sem que haja manchamento ou perda de brilho. Também indicado para usinagem leve de aços SAE 1045 em diante e aços de média usinabilidade, permitindo a obtenção de elevado grau de acabamento das peças, mesmo em altas velocidades e profundidades de corte (Catálogo Castrol, 1999).

( $V_B$ ) e rugosidade do corpo de prova. O objetivo destes ensaios era escolher a melhor vazão de óleo no fluxo de ar comprimido. O desgaste de flanco depois de 5 minutos de corte foi usado como padrão de comparação entre as diversas vazões de óleo.

As condições de refrigeração/lubrificação 30 ml/h e 60 ml/h, foram abandonadas após os primeiros ensaios, por apresentarem uma névoa intensa no ambiente. Além disso, os desgastes de flanco para as condições ar e 10 ml/h mostraram-se menores que para as outras duas condições testadas. Nestes ensaios preliminares as condições de usinagem foram:  $V_C = 445$  m/min ,  $f = 0.15$  mm/rev ,  $a_p = 0.7$ mm, que são aquelas recomendadas pelo fabricante da ferramenta para este par ferramenta-peça (Catálogo Sandvik, 1998).

A segunda etapa dos ensaios consistiu em usinar os corpos de prova com uma determinada condição de usinagem até o desgaste de flanco da ferramenta atingir um valor que determinou-se ser o final de vida da ferramenta, neste momento o ensaio era interrompido e a ferramenta era substituída. O valor adotado para o desgaste de flanco foi  $V_B = 0.3$  mm, que foi monitorado a cada dois passes nos corpos de prova. Este valor foi escolhido baseado em trabalho realizado no DEF/FEM/UNICAMP (Costa, 1995) que mostra que ferramentas com cobertura tem sua taxa de desgaste muito aumentada após este valor ter sido ultrapassado. Nestes ensaios foram monitorados, também, a rugosidade dos corpos de prova que foi medida após cada dois passes, em nove pontos diferentes em cada corpo de prova, e a potência consumida do motor que foi monitorada três momentos em cada passe, já que estes dois parâmetros podem determinar o final de vida de ferramenta.

Os parâmetros de corte adotados foram:

- Velocidades de corte ( $V_C$ ) 360 - 445 e 530 m/min;
- Avanço ( $f$ ) 0.15 mm/rev;
- Profundidade de corte ( $a_p$ ) 0.7 mm.

Estas velocidades de corte foram escolhidas porque configuraram um intervalo que vai de um valor 20% menor a 20% maior do que aquele recomendado pelo fabricante da ferramenta. As condições de refrigeração/lubrificação utilizadas nestes ensaios foram: corte a seco sem nenhum tipo de refrigerante, somente ar comprimido, Mínima Quantidade de Lubrificante com vazões de óleo de 10 ml/h e refrigeração por inundação com óleo solúvel.



Figura 4.2 a – Vista geral do torno CNC.

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENT.  
SEÇÃO CIRCULAN

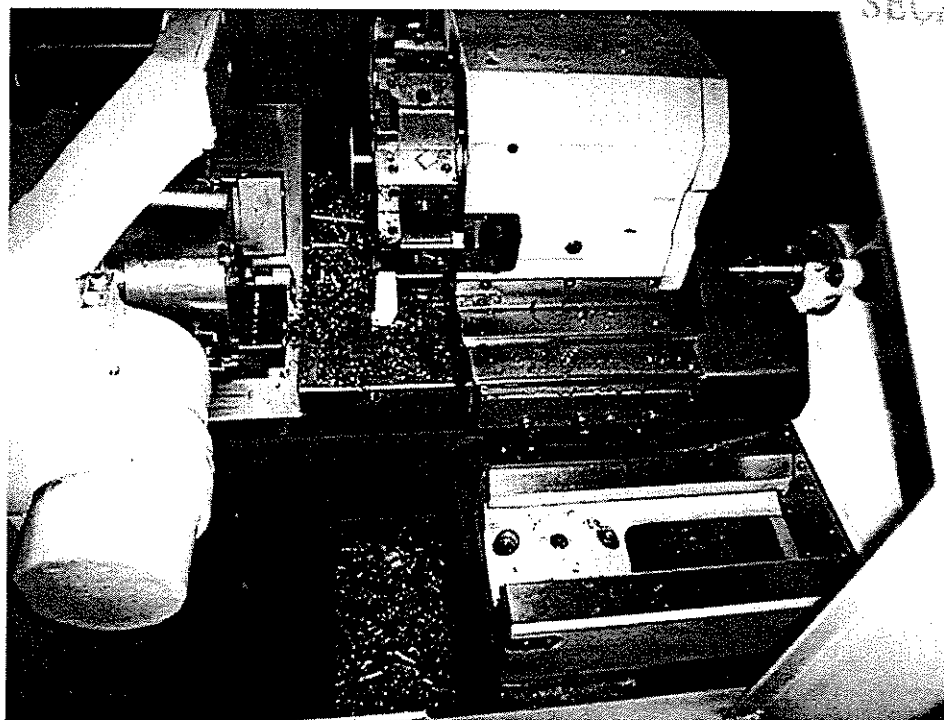


Figura 4.2 b – Vista parcial do torno CNC.

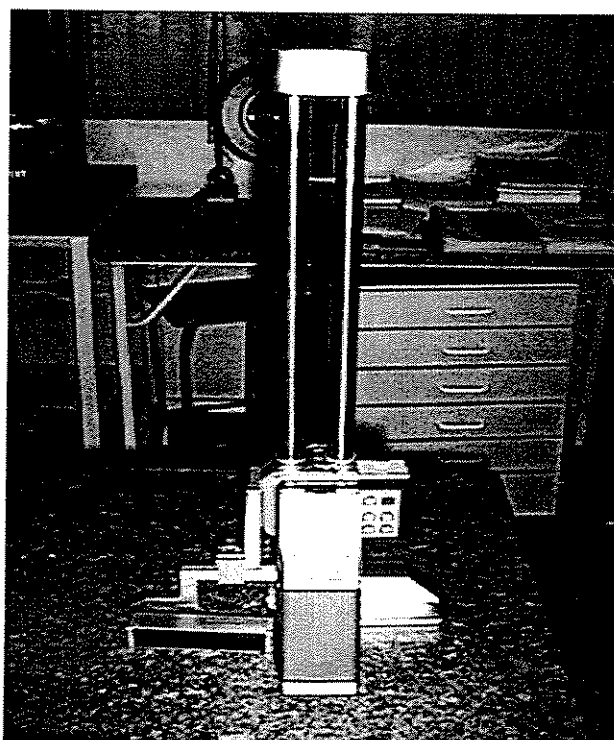


Figura 4.3 – Rugosímetro utilizado nos ensaios.

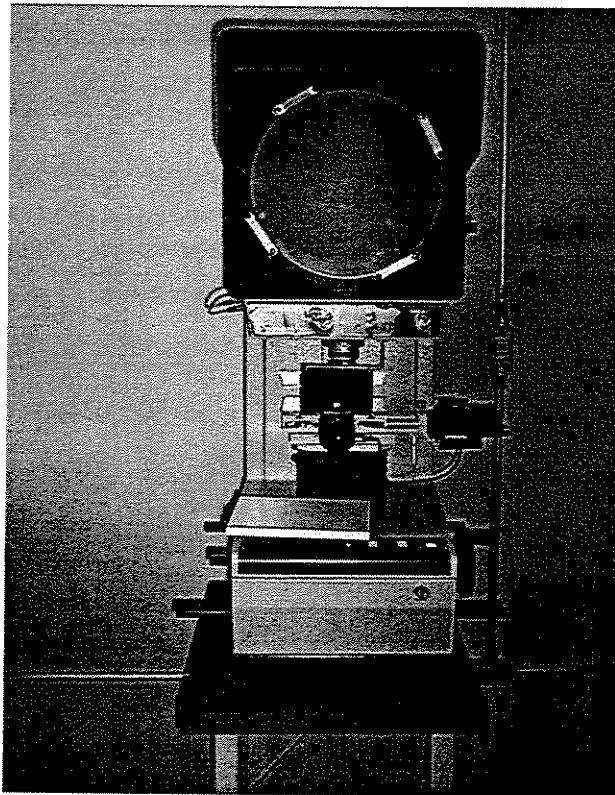


Figura 4.4 – Projetor de perfil utilizado nos ensaios

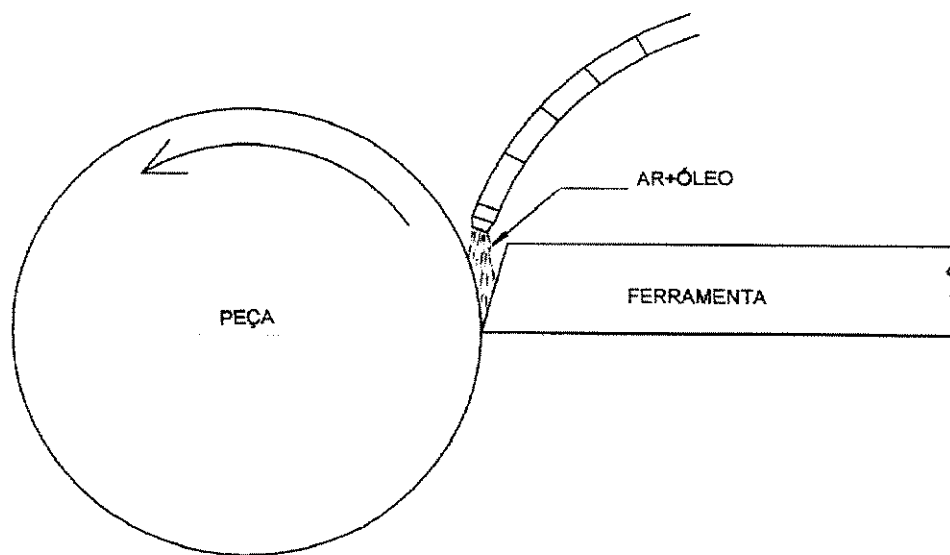


Figura 4.5 Fluxo de ar/óleo injetado entre a superfície de folga da ferramenta e a peça.

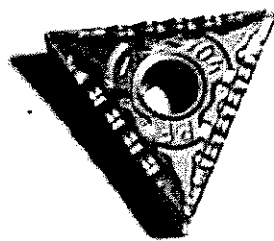


Figura 4.6 - Inserto de Metal Duro utilizado nos ensaios.

Foram utilizados nos ensaios 15 corpos de prova de dimensões conforme mostrado na figura 4.7, sendo que o diâmetro inicial torneado foi de 99 mm, e o diâmetro para fixação na placa foi de 50 mm. Estes corpos de prova foram usinados repetidamente em torneamento cilíndrico, tendo como diâmetro mínimo 63 mm. Os testes de dureza já citados demonstraram que sua variação com relação a variação do diâmetro não foi substancial ( $\cong 5\%$ ).

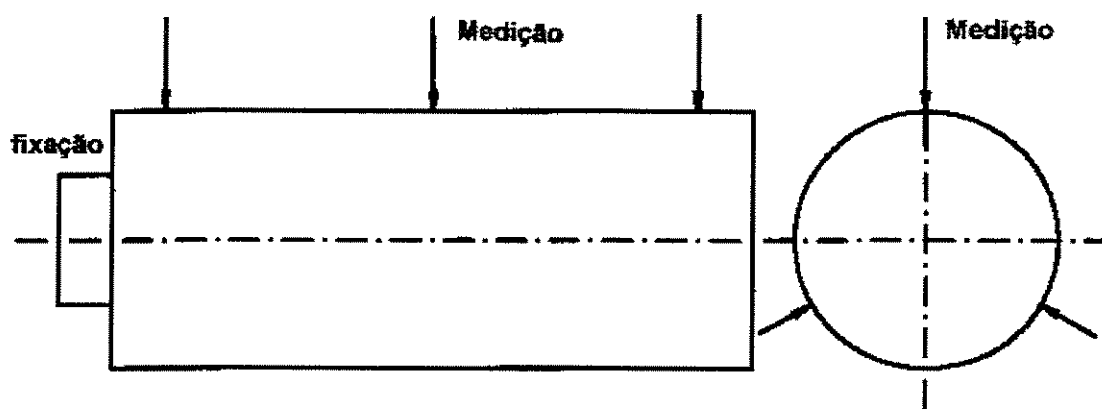


Figura 4.7 - Corpo de prova utilizado nos ensaios.

## Capítulo 5

### Resultados e Discussões

#### 5.1. Ensaios preliminares

O objetivo destes ensaios foi analisar e selecionar uma condição de refrigeração/lubrificação que obtivesse melhor performance, para que, nos ensaios posteriores pudesse ser comparada com a condição a seco e também com a condição mais utilizada nas indústrias que é a inundação de óleo solúvel.

Na figura 5.1 estão comparados os desgastes de flanco com cinco minutos de corte utilizando velocidade de corte  $v_c = 445$  m/min, profundidade de usinagem ( $a_p$ ) = 0.7 mm e avanço ( $f$ ) 0.15 mm/rev., com vários tipos de refrigeração/lubrificação em usinagem: fluxo de ar comprimido; MQL com 10 ml/h; 30 ml/h e 60 ml/h. Nota-se na figura que a condição de 10 ml/h apresentou resultado bastante satisfatório, sempre igual ou melhor que outras condições. Com 30 ml/h e 60 ml/h, os resultados não foram satisfatórios, tanto no que se refere ao desgaste da ferramenta como também no ambiente de trabalho, pois ambos formaram uma névoa intensa que dificultava a respiração dos que estavam próximo da máquina. Em razão dos resultados deste ensaio preliminar, a condição de refrigeração/lubrificação adotada para se comparar com inundação de óleo solúvel foi a mistura ar/óleo com vazão igual a 10 ml/h. Como também o ar comprimido apresentou resultados similares à vazão de 10 ml/h, este tipo de refrigeração também foi utilizada em alguns ensaios definitivos.

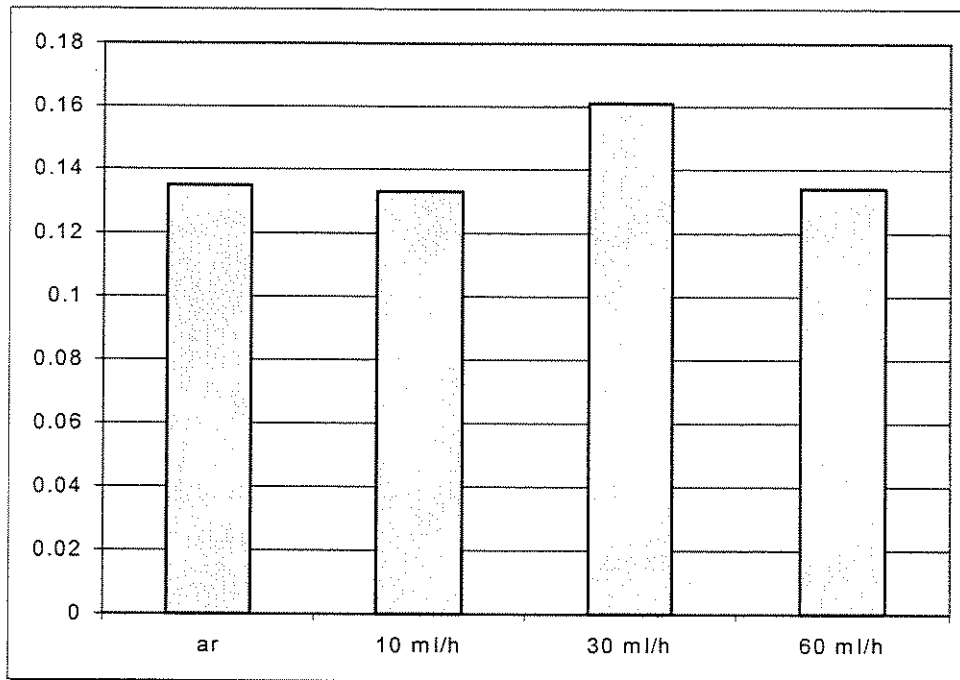


Figura 5.1 - Desgaste de flanco com 5 minutos de corte.

Preliminarmente, pode-se notar que o óleo contido no fluxo de ar não foi capaz nem de refrigerar, nem de lubrificar a ferramenta, pois nenhum dos sistemas ar/óleo apresentou resultados melhores que o fluxo de ar comprimido seco. Mais ainda, isto não depende do volume de óleo no fluxo de ar, pois o aumento da vazão de óleo de 10 ml/h para 30 ml/h e depois para 60 ml/h, não representou uma diminuição do desgaste da ferramenta.

Em todos os ensaios preliminares, como também nos ensaios definitivos, o cavaco gerado foi satisfatório e bastante parecido para todas as condições ensaiadas. O cavaco apresentou coloração azulada, o que sugere que altas temperaturas foram atingidas na região do corte (fig.5.2).

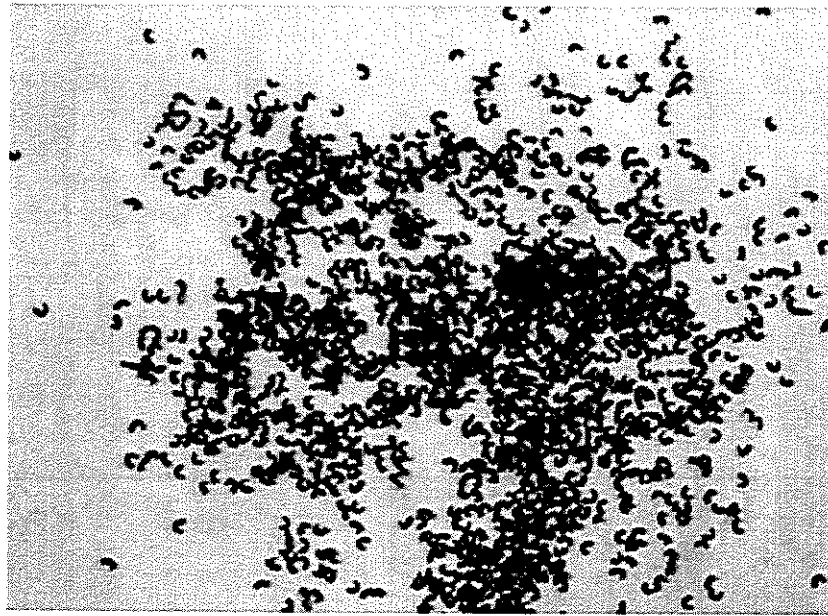


Figura 5.2 - Cavaco gerado nos ensaios.

## **5.2. Ensaio Comparativos para as Diversas Condições de Refrigeração/Lubrificação em Diversas Velocidades de Corte.**

### **5.2.1. Análise dos Desgastes das Ferramentas.**

A figura 5.3 mostra o comportamento do desgaste de flanco ( $V_B$ ) contra o comprimento de corte ( $l_c$ ) para as três condições de refrigeração/lubrificação ensaiadas, com velocidade de corte de 360 m/min. Pode-se observar na figura que as condições a seco e mistura ar / óleo apresentam valores de desgastes similares, enquanto o corte com inundação de óleo solúvel apresentou valores de desgaste de flanco bem menores, somente atingindo o valor limite de desgaste ( $V_B = 0.3\text{mm}$ ) quando o comprimento de corte ( $l_c$ ) estava próximo de 10 km.

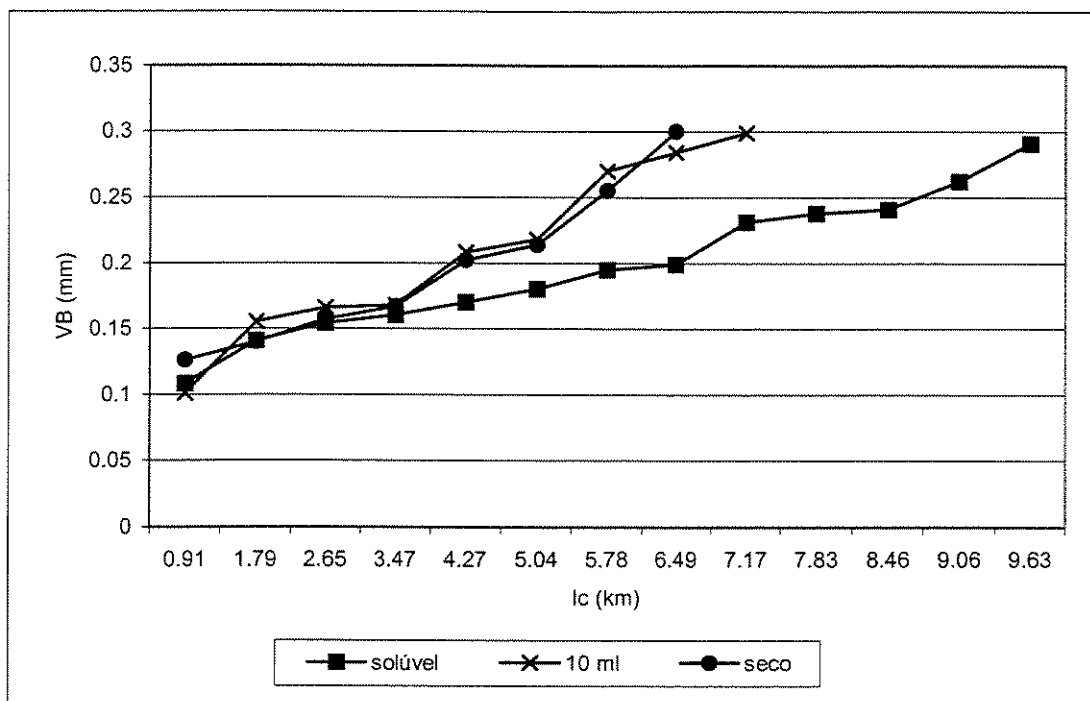


Figura 5.3 - Desgaste de flanco X comprimento de corte ( $v_c = 360$  m/min).

Como já citado anteriormente segundo Braga, (1992), a capacidade de refrigeração do óleo solúvel é muito maior que a da mistura ar/óleo e também que a da simples exposição do processo ao ar (corte a seco); e a capacidade de lubrificação da mistura ar/óleo é igual ou até maior que a do óleo solúvel. Então, o que se conclui a partir dos resultados da figura 5.3 é que a função de lubrificação não foi importante na velocidade de corte testada (a performance do corte à seco foi similar a da mistura ar/óleo) e que a função de refrigeração predominou, já que o corte com óleo solúvel desgastou bem menos a ferramenta. Muito provavelmente, a lubrificação do sistema ar/óleo não foi eficiente, pois o óleo não conseguiu atingir a região de contato ferramenta/peça, já que o sentido do fluxo de ar/óleo era contrário do sentido de rotação da peça (ver figura 4.5).

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
CIRCULANTE

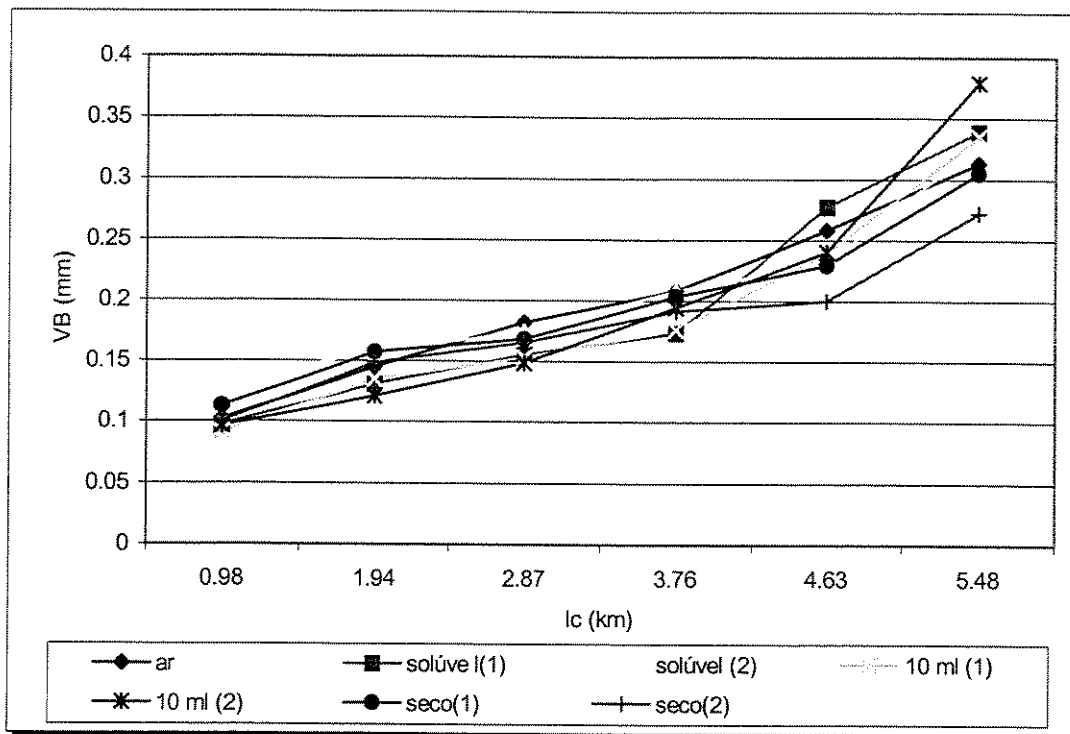


Figura 5.4 - Desgaste de flanco X comprimento de corte ( $v_c = 445 \text{ m/min}$ ).

Na figura 5.4 pode-se observar o comportamento do desgaste de flanco em função do comprimento de corte, utilizando velocidade de corte de 445 m/min.

Para a realização destes ensaios adotou-se a usinagem a seco e também três condições diferentes de refrigeração/lubrificação : jato de ar comprimido, ar/óleo (névoa) com vazão de 10 ml/h e óleo solúvel com concentração de 5%.

Nota-se nesta figura que todas as condições de refrigeração/lubrificação ensaiadas, bem como a usinagem a seco, resultaram em desgaste de flanco ( $V_B$ ) bastante similar ao longo da vida da ferramenta. Devido a este comportamento inesperado, foram repetidos os ensaios utilizando a mistura ar/óleo e óleo solúvel para se comprovar a confiabilidade dos resultados obtidos. É por este motivo que nesta figura vê-se 2 curvas relativas à refrigeração com óleo solúvel e outras 2 curvas relativas ao Mínima Quantidade de Lubrificante com 10 ml/h. Pode-se ver que não houve modificação nos valores e nem o comportamento das curvas.

A partir dos resultados desta figura conclui-se que, nesta velocidade de corte, tanto a refrigeração como a lubrificação não foram fatores essenciais, devido à performance da usinagem a seco ser similar a todas as condições de refrigeração/lubrificação utilizadas, comprovando a viabilidade da usinagem a seco nestas condições. Interessante notar que os resultados nesta

velocidade de corte diferem totalmente daqueles obtidos na menor velocidade (360 m/min figura 5.3) e também daqueles na maior velocidade (530 m/min figura 5.5), na qual o óleo solúvel mostrou-se como melhor condição de refrigeração/lubrificação analisando o desgaste da ferramenta. O fato do óleo solúvel não ter apresentado melhor performance nesta condição ocorreu provavelmente devido a uma instabilidade térmica na ferramenta. No momento que a ferramenta retornava para um novo passe, o fluxo de óleo solúvel resfriava bruscamente a ferramenta, comprometendo a performance da mesma.

Outra hipótese que provavelmente deve ter ocorrido nesta velocidade de corte nas condições de corte a seco e com ar/óleo, é que a alta temperatura desenvolvida na região do corte devido à baixa capacidade de refrigeração destes sistemas provoca um amolecimento do material, sendo necessárias forças de corte mais baixas, o que conduz a um desgaste reduzido da ferramenta.

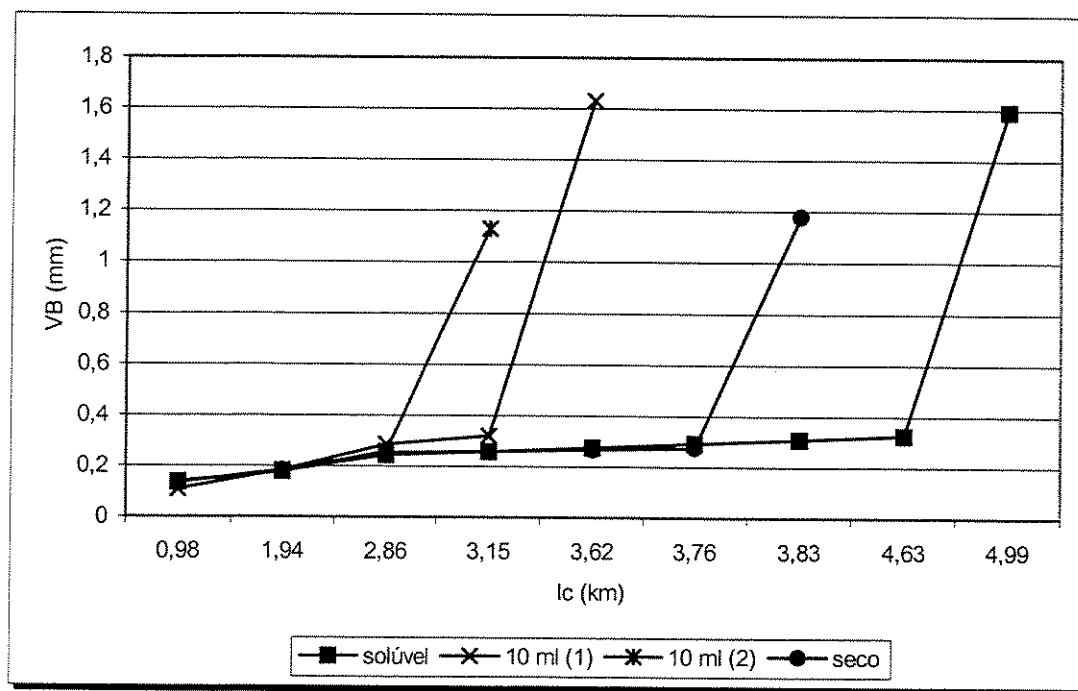


Figura 5.5 - Desgaste de flanco X comprimento de corte ( $v_c = 530$  m/min).

A figura 5.5 mostra o comportamento do desgaste de flanco contra o comprimento de corte, utilizando  $v_c = 530$  m/min. As condições de refrigeração/lubrificação foram mantidas as mesmas do ensaio anterior.

Nota-se nesta figura que logo após o desgaste de flanco atingir  $V_B = 0.3$  mm, houve um rápido crescimento deste desgaste, atingindo valores acima de 1.2 mm.

Este fato ocorreu devido ao desgaste ter atingido o substrato da ferramenta, ou seja, após o desgaste de flanco atingir  $V_B = 0.3$  mm, as camadas de cobertura, que são responsáveis pela resistência ao desgaste, já foram desgastadas, fazendo com que a ferramenta corte com o seu substrato, que é composto de um metal duro simples e menos resistente (Diniz et al., 1999).

A condição de refrigeração/lubrificação que obteve melhor resultado, levando em conta o comprimento de corte, foi a inundação de óleo solúvel, seguido da usinagem a seco e por último a mistura ar/óleo (névoa). Nota-se através dos resultados que em altas velocidades de corte, a condição ar/óleo (névoa), não apresentou um bom resultado. Este fato ocorreu provavelmente em função da dificuldade de penetração da névoa na região de contato da ferramenta com a peça, devido ao deslocamento de ar em torno da peça durante o processo de usinagem.

O que pode-se concluir através da análise da figura é que com esta velocidade de corte a lubrificação é um fator de pouca importância pois a performance da mistura ar/óleo foi pior do que a usinagem a seco. Nota-se ainda que a introdução da mistura causou danos ao processo, já que o desgaste nesta condição foi maior que na condição a seco. Provavelmente, a refrigeração/lubrificação com ar/óleo, além de não refrigerar (pois sua capacidade de refrigeração é muito baixa, como Braga em 1999, já mostrou) e não lubrificar, pois o fluxo da mistura colocado no sentido contrário à rotação da peça não consegue atingir a região de contato da superfície de folga da ferramenta com a peça, causou uma instabilidade térmica na ferramenta que incentivou o desgaste.

Nesta condição de usinagem a refrigeração teve grande importância, fato que fez com que o sistema de refrigeração/lubrificação por inundação de óleo solúvel apresentasse melhor rendimento.

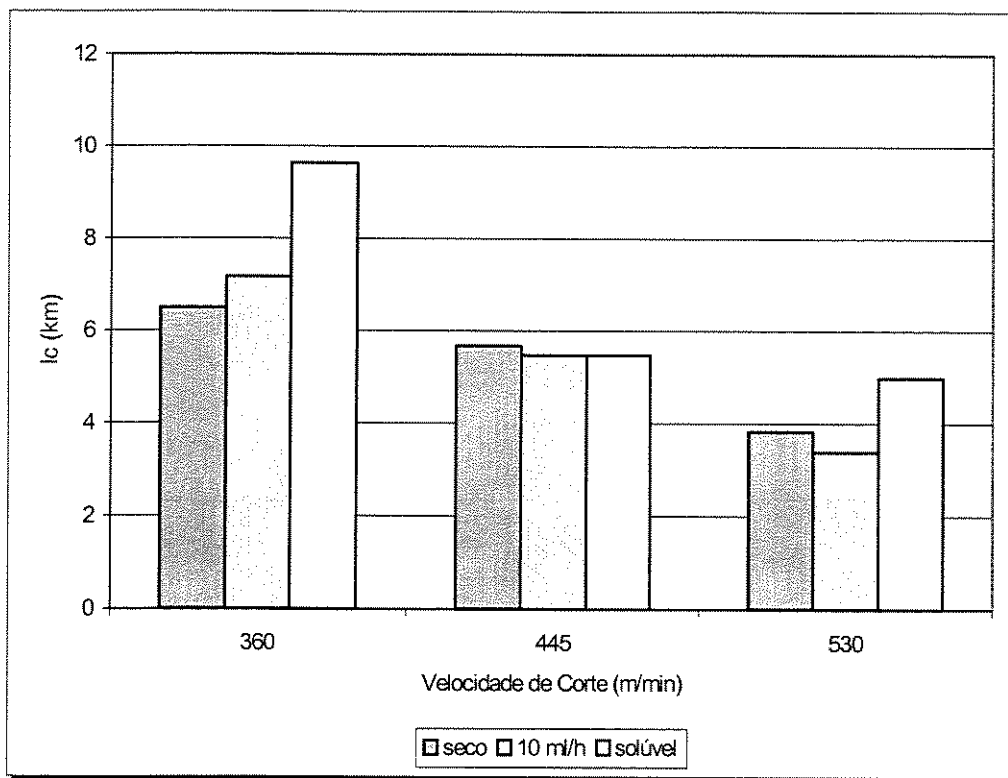


Figura 5.6 – Vida da ferramenta em comprimento de corte para as diferentes condições de refrigeração/lubrificação para as três velocidades de corte ensaiadas.

A figura 5.6 mostra o valor da vida da ferramenta em comprimento de corte nas três velocidades ensaiadas. Nota-se na figura que à medida que a velocidade de corte aumenta, o comprimento de corte diminui (nas 3 condições de refrigeração/lubrificação) devido ao demasiado aumento da temperatura na região de corte, conforme já era esperado.

Nas velocidades de corte de 360 e 530 m/min a condição de refrigeração/lubrificação que obteve melhor performance foi a inundação de óleo solúvel devido ao seu alto poder de refrigeração, comprovando que nestas velocidades de corte a refrigeração é um item bastante importante.

Na velocidade de corte de 445 m/min, a vida da ferramenta foi igual nas três condições, diferenciando-se das outras duas outras velocidades de corte ensaiadas. Provavelmente este fato deve ter ocorrido devido a uma instabilidade térmica na ferramenta utilizada no corte com óleo solúvel, comprometendo a sua performance e igualando-se com as outras condições que não têm poder de refrigeração. Outra hipótese para se explicar esta ocorrência é que nas condições a seco e ar/óleo a temperatura na região de corte era mais elevada, provocando amolecimento do

material a ser cortado e conseqüentemente provocando um desgaste reduzido da ferramenta, fator esse que se contrapõe à menor temperatura da ferramenta utilizada no corte com óleo solúvel. Nota-se também que nesta velocidade de corte, a lubrificação não foi um fator importante, devido à condição a seco ter obtido a mesma performance comparado com as outras condições. Não foi possível porém encontrar uma explicação para o fato de que tudo isto tenha ocorrido numa velocidade de corte intermediária. Em outras palavras, não foi possível explicar porque não existe uma tendência das condições refrigeração/lubrificação se igualarem na performance com a variação da velocidade de corte e, conseqüentemente, do calor gerado. Aumentando em 20% a velocidade de corte (de 360 para 445 m/min) as performances equiparam-se e aumentando-se a velocidade ainda mais 20% (de 445 para 530 m/min), a performance da refrigeração/lubrificação com inundação de óleo solúvel volta a ser melhor.

Baseado nestes resultados pode-se concluir que a condição de refrigeração/lubrificação MQL não deve ser utilizada em condições similares às deste trabalho, pois a vida da ferramenta com MQL nunca foi substancialmente maior que no corte a seco (com  $v_c = 530$  m/min foi até menor). A decisão entre se utilizar o corte a seco ou com óleo solúvel depende de uma análise econômica que verifique qual dos fatores representa maior dispêndio - o óleo (com todos os seus custos de reciclagem, armazenagem, etc.) ou a ferramenta (que no corte a seco vai ser mais dispendiosa). Além disso, há que se levar em conta também, a ausência dos danos ambientais e à saúde dos operadores que o corte a seco representa.

### 5.2.2. Análise da Rugosidade da Peça

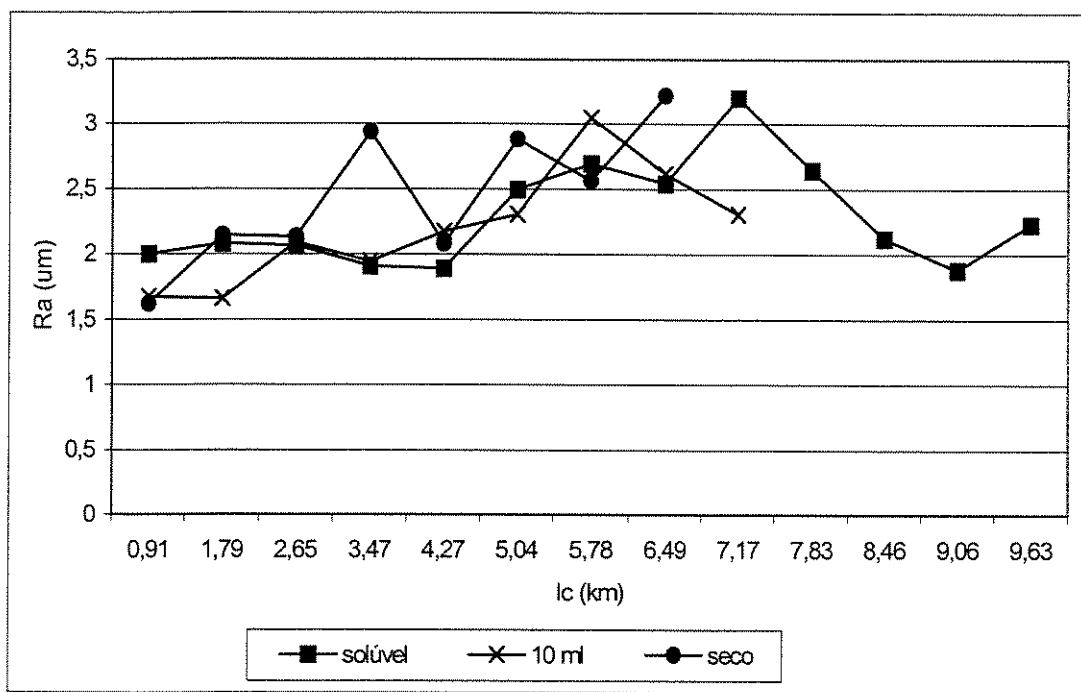


Figura 5.7 - Rugosidade ( $R_a$ ) X comprimento de corte ( $v_c = 360$  m/min).

A figura 5.7 mostra o valor da rugosidade média ( $R_a$ ) da peça contra o comprimento de corte ( $l_c$ ). A velocidade de corte utilizada para este ensaio foi de 360 m/min. Nota-se na figura que nas três condições de refrigeração/lubrificação a rugosidade não acompanha o desgaste de flanco  $V_B$  (ver figura 5.3). Pode-se também observar nesta figura, que a rugosidade tem um comportamento aleatório, provavelmente acompanhando as variações da geometria da ponta da ferramenta ao longo do processo. Portanto nota-se que geralmente a rugosidade não depende da condição de refrigeração/lubrificação, e também não tem relação direta com o desgaste de flanco ( $V_B$ ), mas sim com algum outro tipo de desgaste que cause a variação da forma da ponta da ferramenta.

Na condição de refrigeração/lubrificação com óleo solúvel a rugosidade atingiu o valor de  $R_a=3,2$  µm (valor considerado limite em torneamento nas operações de acabamento) quando o comprimento de corte era  $l_c=7,17$  mm e o desgaste de flanco era  $V_B = 0,22$  mm; mas à medida que o comprimento de corte ( $l_c$ ) aumentava, o valor da rugosidade passou a ter um comportamento

decrecente. No momento que a ferramenta atingiu o fim de vida (determinado por  $V_B = 0,3$  mm) a rugosidade era perfeitamente admissível para uma operação de torneamento ( $R_a = 2,2 \mu\text{m}$ ) (Agostinho et al., 1977). Devido ao comportamento da rugosidade apresentar a aleatoriedade acima descrita, houve dificuldade para usar este parâmetro para se determinar o fim de vida da ferramenta. Comportamentos semelhantes ocorreram para as outras duas condições de refrigeração/lubrificação, embora nenhuma delas tenha alcançado o valor limite de rugosidade estabelecido ( $R_a = 3,2 \mu\text{m}$ ). Como já foi visto, quando  $V_B = 0,3$  mm o desgaste já está próximo de atingir o substrato de ferramenta, o que faria com que ele se acelerasse intensamente, podendo causar a completa destruição da ponta da ferramenta. Assim, se valores de  $R_a$  próximos a este fossem adotados para se estabelecer o fim de vida de ferramenta, poder-se-ia ter a completa destruição da ponta da ferramenta e, somente neste momento, a rugosidade ultrapassaria este limite, o que poderia causar danos como a perda da aresta da superfície da pastilha oposta à que está sendo utilizada ou mesmo danos ao porta ferramenta.

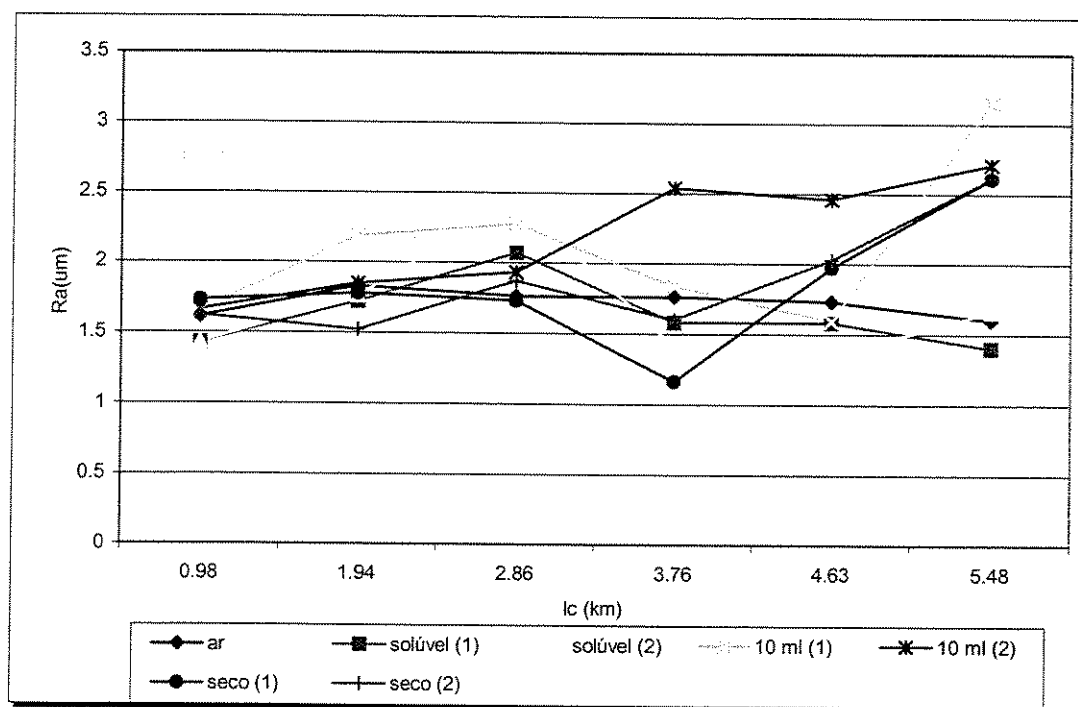


Figura 5.8 - Rugosidade ( $R_a$ ) X comprimento de corte ( $v_c = 445\text{m/min}$ ).

A figura 5.8 apresenta o comportamento da rugosidade em função do comprimento de corte, utilizando velocidade de corte  $v_c = 445$  m/min.

Nota-se na figura que alguns ensaios foram repetidos a fim de se garantir a confiabilidade dos resultados obtidos. Em nenhum momento, neste ensaio, a rugosidade ultrapassou  $Ra = 3.2 \mu\text{m}$ , valor este considerado comum para operação de torneamento (Agostinho et al., 1977) e limite para uma operação de acabamento.

A rugosidade atingiu o valor próximo a  $Ra = 3,2 \mu\text{m}$ , somente para algumas condições de refrigeração/lubrificação quando o desgaste de flanco ( $V_B$ ) era de aproximadamente 0,3 mm (ver figura 5.4). Outro detalhe apresentado na figura acima, é que a rugosidade não progride na mesma proporção do desgaste de flanco ( $V_B$ ); este fato geralmente ocorre quando a geometria da ponta da ferramenta tem um desgaste bastante uniforme, isto é, existe um desgaste, no entanto, este é de tal uniformidade que mantém a geometria original da ferramenta.

Pode-se ver na figura que, em algumas condições, a rugosidade cai quando o fim de vida se aproxima (o desgaste de flanco chega próximo a 0.3 mm) e em outras condições a rugosidade cresce próximo ao fim de vida da ferramenta. Definitivamente, não é a variação do desgaste de flanco que determina o comportamento da rugosidade ao longo da vida da ferramenta, mas sim outro tipo de desgaste que influi na forma da ponta da ferramenta a qual se reproduz na peça e gera a rugosidade.

Este comportamento aleatório depende também da resposta que o sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação-peça (MFDP) tem com relação à vibração.

Assim, se outro sistema MFDP fosse utilizado, é muito provável que a oscilação da rugosidade também aconteceria, mas com um comportamento diferente ao apresentado na figura 5.8 (Bonifácio, 1993).

Portanto, nessas condições também não pode-se adotar a rugosidade como critério de fim de vida. Outro fator digno de nota e que também ocorreu nos ensaios com  $v_c = 360 \text{ m/min}$  é que a condição de refrigeração/lubrificação não influenciou nos valores de rugosidade.

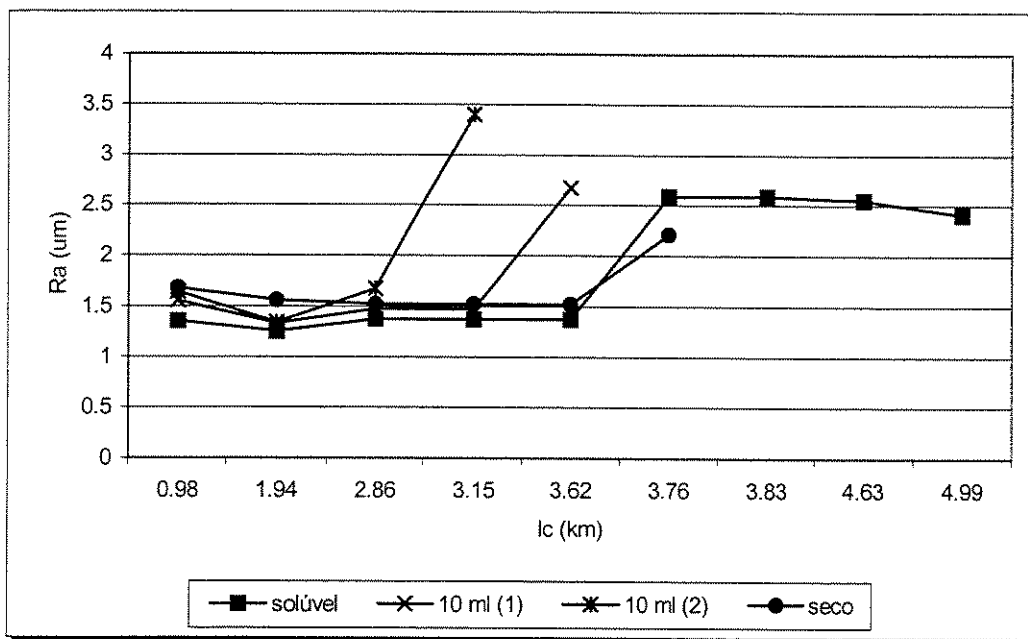


Figura 5.9 - Rugosidade (Ra) X comprimento de corte ( $v_c = 530$  m/min).

A figura 5.9 mostra o comportamento da rugosidade em função do comprimento de corte, utilizando velocidade de corte  $v_c = 530$  m/min. O ensaio utilizando a mistura ar/óleo foi realizado duas vezes com o objetivo de confirmar o resultado obtido.

Observa-se na figura que nesta velocidade de corte, o comportamento da rugosidade mantém-se mais estável se comparado com as velocidades de corte menores.

Para condição de refrigeração/lubrificação ar/óleo e a condição a seco, a rugosidade atingiu níveis mais elevados quando o desgaste de flanco estava próximo ou já tinha ultrapassado o valor de  $V_B = 0,3$  mm (figura 5.5), porém a rugosidade somente ultrapassou  $Ra = 3,2$  μm em apenas um ensaio.

Utilizando óleo solúvel, a rugosidade atinge níveis mais elevados antes do desgaste de flanco atingir  $V_B = 0,3$  mm e logo após esse momento, a rugosidade estabiliza-se e mantém-se até o desgaste de flanco ultrapassar  $V_B = 0,3$  mm.

Nota-se no geral que com velocidade de corte menor a rugosidade tem um comportamento mais disperso, independente do tipo de refrigeração/lubrificação.

Pode-se notar também que durante o transcorrer da vida da ferramenta a rugosidade não acompanha o crescimento do desgaste de flanco (como nos ensaios com velocidades menores), mas próximo ao ponto em que  $V_B$  aumentou subitamente de valor (ver figura 5.5), a rugosidade também cresceu subitamente. Provavelmente, quando  $V_B$  cresceu rapidamente não somente a

superfície de folga de ferramenta se desgastou, mas toda a ponta ficou deteriorada, refletindo assim nos valores da rugosidade.

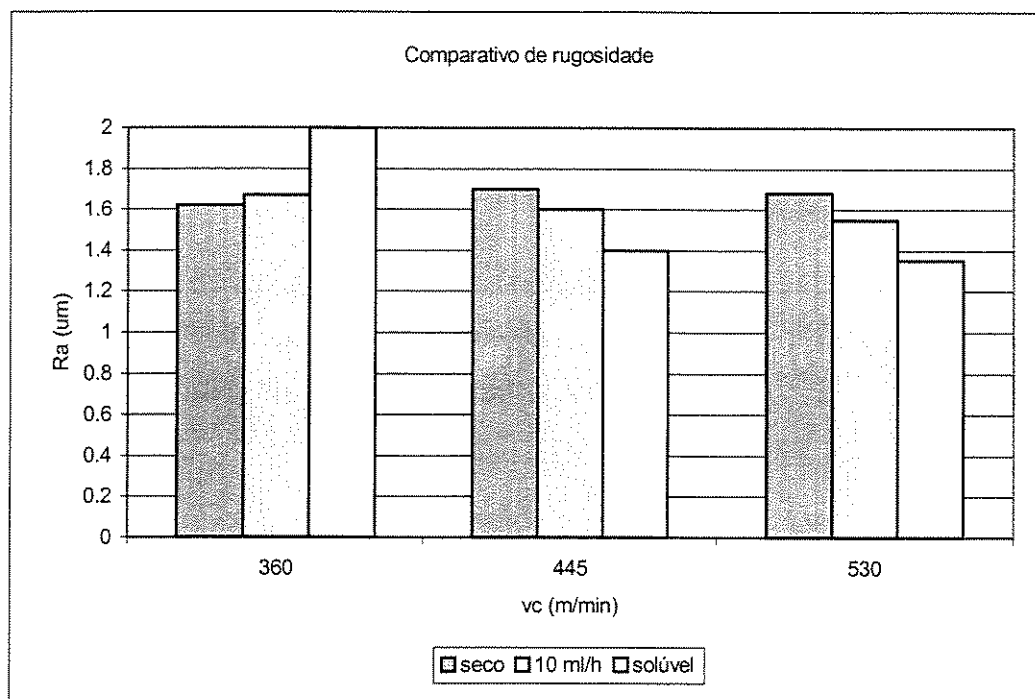


Figura 5.10 - Comparativo de rugosidade com três velocidades de corte no início de vida.

Na figura 5.10 pode-se observar a rugosidade dos corpos de prova com a ferramenta no início de vida. Nota-se que na velocidade de corte de 360 m/min a usinagem a seco obteve melhor performance comparada com as duas outras condições de refrigeração/lubrificação. O que pode-se concluir é que com esta velocidade de corte, tanto a lubrificação como a refrigeração não influenciaram positivamente na rugosidade.

Já com as velocidades de corte de 445 e 530 m/min, os ensaios que utilizaram inundação de óleo solúvel, obtiveram melhores resultados, concluindo-se que, na medida que a velocidade de corte aumenta o acabamento melhora e a refrigeração torna-se um fator importante para a diminuição da rugosidade.

Para se tentar explicar este fenômeno pode-se especular que, quando a velocidade de corte é baixa, pouco calor é gerado, a refrigeração causada pelo óleo solúvel mantém a peça e o cavaco em baixas temperaturas e, portanto, mantendo sua resistência próxima à original, o que dificulta a formação do cavaco e prejudica a obtenção de menores valores de rugosidade. Já com

velocidades altas, como a geração de calor pelo processo é alta, os cortes a seco e com Mínima Quantidade de Lubrificante permitem que a temperatura suba demais, diminuindo muito a resistência e a dureza do material na região do corte, o que causaria um efeito de empastamento do cavaco, prejudicando a rugosidade.

Deve-se lembrar que esta análise é relativa à usinagem com ferramenta em início de vida (praticamente sem desgaste). À medida que o desgaste cresce os valores de rugosidade para as três condições de refrigeração/lubrificação passou a ter comportamentos e valores muito similares (figuras 5.7, 5.8, 5.9) e para todas as velocidades de corte testadas, independentemente da refrigeração/lubrificação.

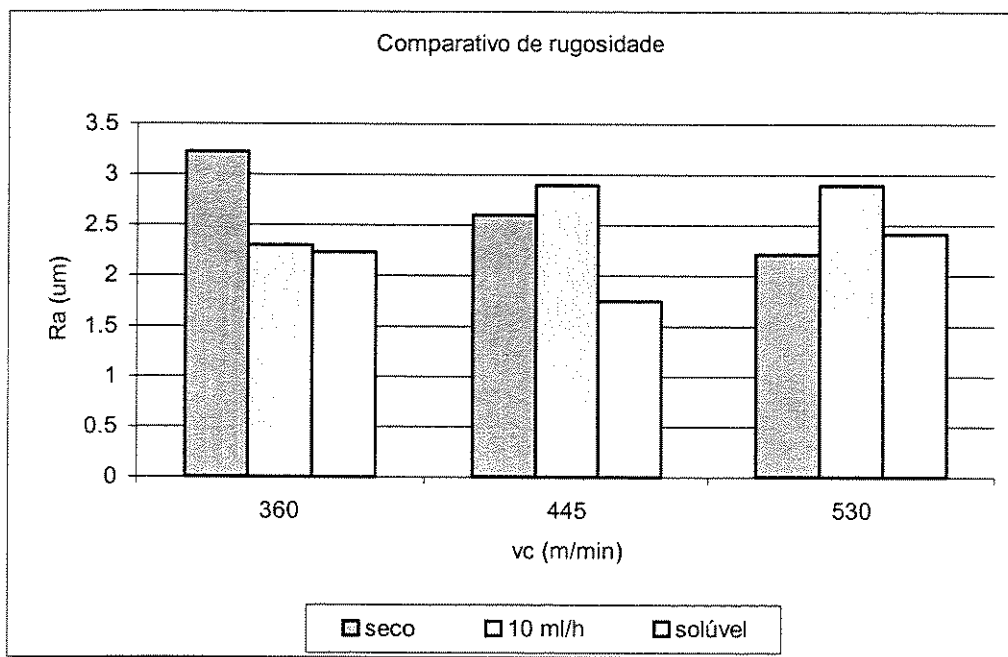


Figura 5.11 - Comparativo de rugosidade com três as velocidades de corte no final de vida da ferramenta.

Na figura 5.11 pode-se observar a rugosidade dos corpos de prova no final de vida da ferramenta. Nota-se que nas velocidades de corte de 360 e 445m/min, a condição de refrigeração/lubrificação com óleo solúvel obteve melhor resultado, concluindo que nestas velocidades de corte tanto a refrigeração como a lubrificação influenciaram positivamente na rugosidade.

Na velocidade de corte de 530m/min a condição a seco obteve o melhor resultado. Este fato ocorreu provavelmente devido ao desgaste da ponta da ferramenta ter sido mais uniforme comparado com as outras condições. Todas as condições de refrigeração/lubrificação nas três velocidades de corte, no final de vida da ferramenta, obtiveram valores de rugosidade a níveis aceitáveis para operação de torneamento, e devido a este fato, houve dificuldade da utilização da rugosidade como parâmetro principal de determinação de final de vida da ferramenta.

### 5.2.3. ANÁLISE DA POTÊNCIA DE CORTE

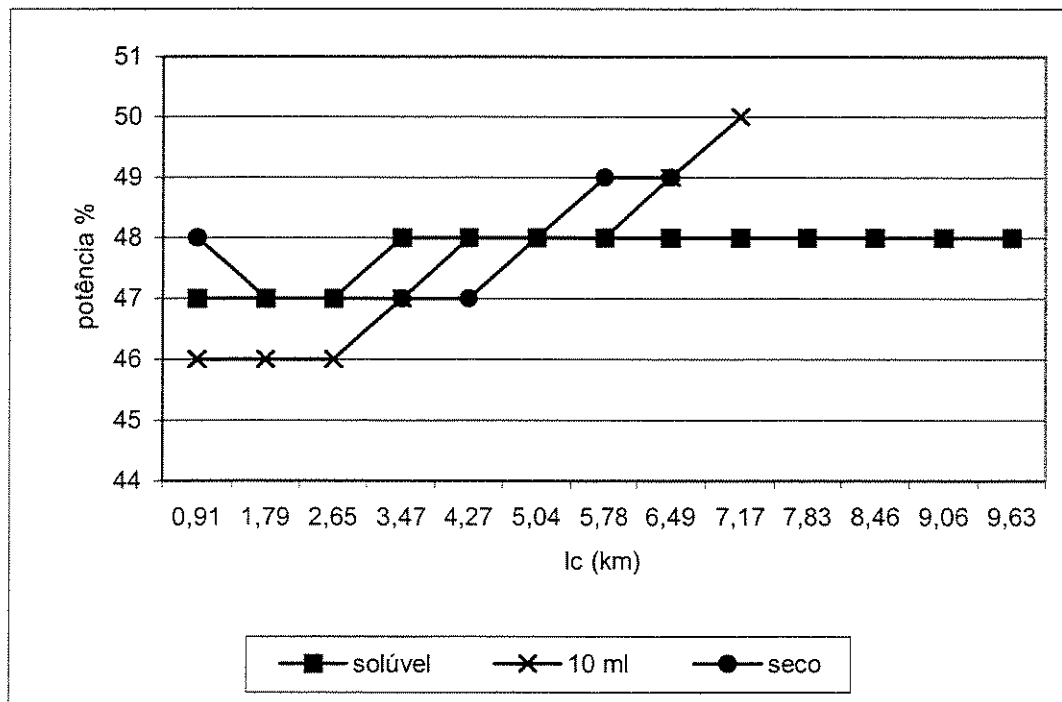


Figura 5.12 - Potência consumida X comprimento de corte ( $v_c = 360$  m/min).

A figura 5.12 mostra o comportamento da potência de corte consumida em função do comprimento de corte. A velocidade de corte utilizada para este ensaio foi de 360 m/min.

Observa-se na figura que na condição de 10 ml/h, a potência teve um aumento de cerca de 10,0 % entre o início e o fim de vida da ferramenta, o que possibilitaria a utilização desse parâmetro para a determinação de fim de vida da ferramenta.

Na usinagem a seco e com inundação de óleo solúvel, a diferença de potência entre o início e o fim de vida da ferramenta apresentou pouca variação (aproximadamente 2,0 %). A diferença é que com a condição a seco, observa-se um comportamento crescente e com inundação de óleo solúvel, esse comportamento é estável.

Devido a este comportamento, inviabilizou-se a possibilidade de usar este parâmetro como determinante de fim de vida da ferramenta principalmente quando o óleo solúvel em abundância é utilizado como refrigerante (que é a condição mais indicada), dado os menores valores de desgaste obtidos nesta condição.

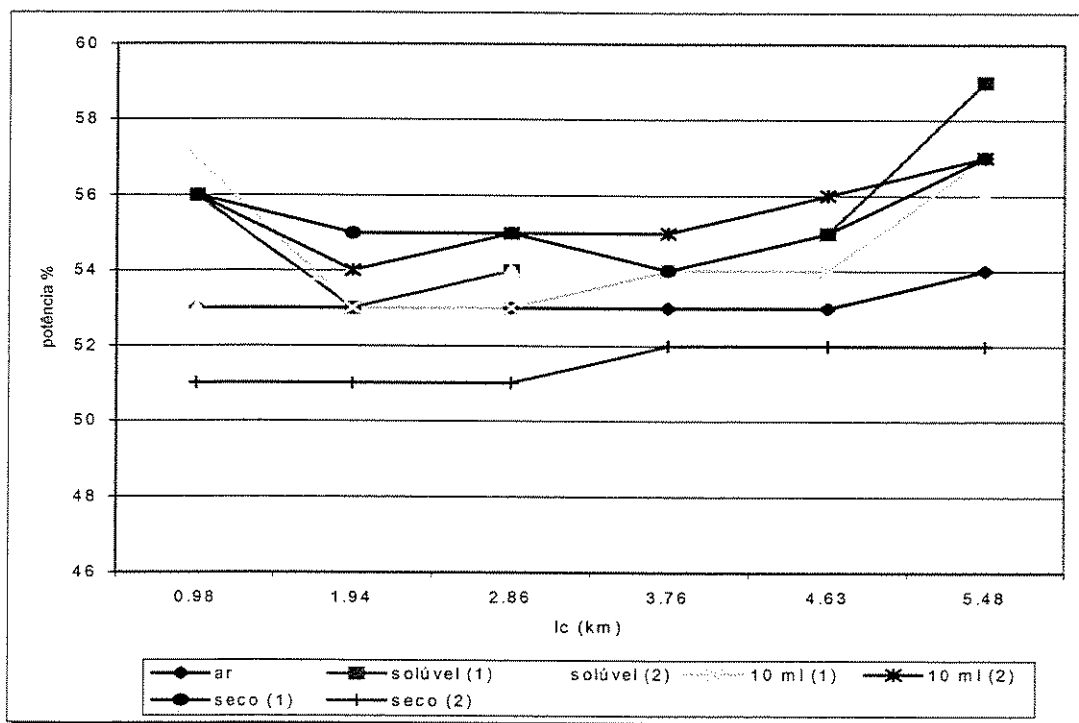


Figura 5.13 - Potência consumida X comprimento de corte ( $v_c = 445 \text{ m/min}$ ).

A figura 5.13 apresenta o comportamento da potência de corte consumida em função do comprimento de corte, com velocidade de corte  $v_c = 445 \text{ m/min}$ .

Observa-se na figura que na maioria dos ensaios, houve um pequeno crescimento da potência perto do fim de vida da ferramenta, e também que a potência consumida ficou praticamente estável, num estágio intermediário da vida da ferramenta, com valores em geral abaixo dos primeiros valores registrados. Após a potência ter-se estabilizado, a mesma

apresentou um comportamento crescente e na condição com óleo solúvel chegou a variar aproximadamente 10,0%.

Nas outras condições, o crescimento da potência variou abaixo de 10,0%, o que faria com a margem de erro fosse muito grande para este parâmetro ser utilizado para determinar o fim de vida da ferramenta. Há que se considerar que a condição que apresentou maior variação de potência nesta velocidade de corte (inundação de óleo solúvel) não foi a mesma de quando a velocidade de corte era  $v_c = 360$  m/min (10 ml/h), o que dificulta ainda mais a utilização da potência de corte como único parâmetro a ser usado para determinação do fim de vida da ferramenta.

Os ensaios utilizando inundação de óleo solúvel e mistura ar/óleo foram realizados duas vezes para se garantir a confiabilidade dos resultados.

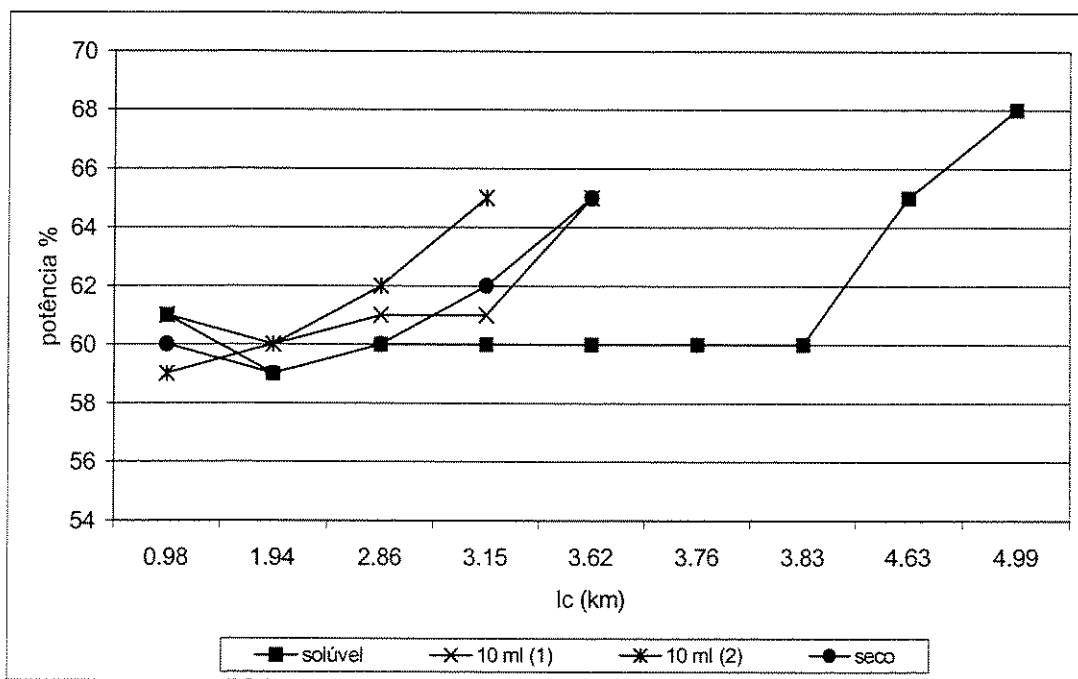


Figura 5.14 - Potência consumida X comprimento de corte ( $v_c = 530$  m/min).

A figura 5.14 mostra o comportamento da potência consumida de corte em função do comprimento de corte. A velocidade de corte utilizada para este ensaio foi de  $v_c = 530$  m/min, e o ensaio utilizando a condição com 10 ml/h foi executado duas vezes.

Pode-se observar que no início de vida da ferramenta, as potências são bastante similares o que conduz à conclusão que tanto a refrigeração quanto a lubrificação não eram fatores

importantes nesse momento. No entanto, à medida que o comprimento de corte ( $l_c$ ) e o desgaste de flanco ( $V_B$ ) aumentam, a potência se dispersa e a condição com inundação de óleo solúvel destaca-se novamente, confirmando que à partir do comprimento de corte  $l_c = 3.15$  km, a refrigeração apresenta-se como fator muito importante.

Nota-se na figura que a potência varia próximo de 10,0 % entre o início e o fim da vida da ferramenta na maioria dos ensaios com um crescimento maior próximo ao fim da vida, mas devido a esta variação ser muito pequena não pode-se utilizar a potência como critério principal de fim de vida da ferramenta, e sim usá-la como um parâmetro auxiliar ao operador, para que o mesmo possa decidir o momento da substituição da pastilha.

Mas, há que se notar que foi com esta velocidade de corte (que é a maior de todas utilizadas) que a diferença da potência entre o início e o fim da vida da ferramenta foi a maior entre todas as velocidades utilizadas. Porém, ao se comparar a figura 5.14 com a figura 5.5 ( $V_B \times l_c$  para  $v_c = 530$  m/min) vê-se que os últimos pontos de cada curva da figura 5.14 já são relativos a valores de desgaste bem acima de  $V_B = 0,3$ mm. Então realmente, os pontos a serem utilizados para análise de fim de vida da ferramenta são os penúltimos de cada curva. Mesmo assim, o que foi citado continua válido, isto é, esta é a melhor condição para a utilização da potência como um parâmetro de auxílio ao operador para determinação do fim de vida da ferramenta.

## Capítulo 6

### Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

Dado o exposto no capítulo 5, pode-se concluir que, para o torneamento de aço SAE 1045 com pastilhas de metal duro recobertas e condições similares às utilizadas neste trabalho, temos os seguintes aspectos:

- Em termos de desgaste da ferramenta, a melhor condição de refrigeração/lubrificação do processo, dentre as testadas, é aquela com óleo solúvel em abundância.
- A utilização da Mínima Quantidade de Lubrificante não apresentou vantagens nem mesmo quando comparado com o corte com resfriamento via ar comprimido e com o corte totalmente a seco.
- Em termos dos valores de rugosidade no início da vida da ferramenta, para a menor velocidade de corte testada, a condição de refrigeração/lubrificação que apresentou a melhor performance foi o corte a seco, seguido pela Mínima Quantidade de Lubrificante e depois pelo óleo solúvel abundante. Já nas duas maiores velocidades de corte, esta ordem foi invertida.
- À medida que o desgaste da ferramenta cresce, o comportamento da rugosidade se torna aleatório e passa a ser independente da condição de refrigeração/lubrificação.
- A potência elétrica não variou sensivelmente com as condições de refrigeração/lubrificação e nem com o desgaste da ferramenta, não podendo, em linhas gerais, ser utilizada como parâmetro único na determinação do fim da vida da ferramenta.
- Com certeza, o sistema MQL não deve ser utilizado, pois não representou um acréscimo à performance do processo com relação ao corte a seco. A decisão sobre a escolha do corte a

seco ou com óleo solúvel em abundância depende de uma análise não somente econômica, mas que também se leve em conta os danos ecológicos e à saúde dos operadores causados pelos óleos refrigerantes.

Para se dar continuidade a este trabalho, seria interessante a realização de experimentos nos seguintes moldes:

- Comparar os cortes a seco, com mínima quantidade de lubrificante e com refrigeração em abundância com condições de corte diferentes, principalmente com maiores avanços e menores velocidades de corte;
- Fazer experimentos similares a estes com outros materiais de peça (não ferrosos e ferros fundidos, por exemplo) e outro processos de usinagem como furação e fresamento;
- Testar novos materiais para ferramentas como metal duro com micro grãos e/ou com cobertura de TiNAl no corte a seco e com Mínima Quantidade de Lubrificante.

## **Referências Bibliográficas**

- AGOSTINHO, O. L. et al. **Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões**. São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., cap. 3, p. 192 - 220, 1977.
- BERSENKOWITSCH, H.; Medidas de segurança no manuseio de agentes refrigerantes. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, n. 409, p. 24-33, fevereiro, 2000.
- BRAGA, D. U. ; DINIZ, A. E. ; COPPINI, N. ; MIRANDA, G. W. A. , Utilização da técnica de mínima lubrificação por névoa na furação da liga de alumínio-silício SAE- 323. **IV Congresso Iberoamericano de Engenharia Mecânica - CIDIM** - novembro, 1999.
- BRAGA, D. U., **Monitoramento do processo de torneamento via parâmetros elétricos do motor da máquina**, Tese de Mestrado, UNICAMP 1992.
- CASTROL INDUSTRIAL S.A., **Fluidos de Corte**, Manual de Treinamento, 124 p., 1999.
- CASTROL INDUSTRIAL S.A., **Ilocut 171**, características e especificações, 1999.
- COSTA, C. E., **Monitoramento do processo de torneamento via corrente elétrica do motor principal da máquina e via vibração da ferramenta**, Tese de Mestrado, UNICAMP 1995.
- CSELLE, T., New Directions in Drilling. **Manufacturing Engineering**, Albstadt, Germany and Brookfield, WI, p. 77-80, Aug. 1995.

- DANIEL, C. M.; OLSON, W. W.; SUTHERLAND, J. W., Research Advances in Dry and Semi-Dry Machining. **Desingn for Environmentally Safe Automotive Products and Processes - SAE - Special Publications**, v. 1263, p. 17-26, 1997.
- DINIZ, A. E. et al., **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. São Paulo, MM Editora, 242p., 1999.
- DINIZ, A. E., **A Rugosidade Superficial da Peça em Processos de Torneamento: Critério de Fim de Vida e Fatores de Influência**, Tese de Doutorado, UNICAMP 1989.
- DUNLAP, C. , Should you try dry? **Cutting tool engineering**, v. 49, n. 1, p. 22-33, feb., 1997.
- FERRARESI, D. ; **Fundamentos da Usinagem do Metais**, Editora Edgard Blucher -cap. 11 p.512- 538, São Paulo, 1977.
- GRANGER, C., Dry Machining's Double Benefit. **Machinery and production engineering**, v. 152, p. 14-20, jun. 1994.
- UAW, Union of American Workers, **Cancer Risks Associated with Machining Fluids.** , Germany, 2p. apr. 1998, [www.uaw.org](http://www.uaw.org), Disponível na Internet.
- UAW, Union of American Workers, **Safety Facts You Should Know if You Work with Machining Fluids.**, 3p. apr. 1998, [www.uaw.org](http://www.uaw.org), Disponível na Internet
- KLOCKE, F.; EISENBLÄTTER, G., Dry Cutting. **Annals of the CIRP**, v. 46, n.2, p. 519-526, 1997.
- KLOCKE, F.; KRIEG, T.; GERSCHWILER, K.; FRITSCH, R.; ZINKANN, V.; PÖHLS, M.; EISENBLÄTTER, G., Improved cutting processes with adapted coating systems. **Annals of the CIRP**, v. 47, n.1, p. 65-68, 1998.

- KUSTAS, F. M. ; FEHREHNBACHER, L. L. ; KOMANDURI, R. , Nanocoatings on cutting tools for dry machining. **Annals of the CIRP**, v. 46, n.1, p. 39-42, 1997.
- MACHADO, A.R.; WALLBANK, J., The effect of extremely low lubricant volumes in machining. **An International Journal of the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear -WEAR-**, United Kingdom, n.210, p. 72-82, Jul. 1996.
- MOMPER, F. J., Usinagem a seco de materiais endurecidos. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, n. 410, p. 30-37, março, 2000.
- MÜLLER-HUMMEL, P.; Status of Studies to Avoid Cutting Fluids in Aeronautic Aluminium parts production, **4<sup>TH</sup> International Conference on Behaviour of Materials in Machining**, p.110 - 119, Nov. 1998.
- NOVASKI, O. ; DÖRR J., Usinagem quase a seco. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, n. 406, p. 34-41, novembro, 1999.
- RODRIGUES de PAULA, M. A. ; ABRÃO, A. M., Derivados do óleo de mamona como fluido de corte. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, v. 400, p. 104-112, maio, 1999.
- SANDVIK DO BRASIL S.A., **Catálogo de Ferramentas para Torneamento**, 1998.
- SHELL S.A., **Fluidos de Corte**, Curso de Lubrificação Industrial, São Paulo, 39p., 1986.
- SILVA, E. J.; BIANCHI, E. C., Procedimentos-padrão para o uso correto de fluidos de corte. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, n. 410, p. 88-103, março, 2000.
- TITEX PLUS, Hightech - um caminho de alta tecnologia para ferramentas de corte, **Sandvik do Brasil S.A. Ind. & Com.**, São Paulo, Brasil.

## **Bibliografias consultadas**

ARONSON, R. B., Machine tool 102: serving the machine tool. , **Manufacturing Engineering**, v.115, n.1, p.47-55, Jul. 1995.

ARONSON, R. B., Why Dry Machining?, **Manufacturing Engineering**, v.114, n.1, p.33-36, Jan. 1995.

AZUSHIMA, A.; YONEYAMA, S.; YAMAGUCHI, T.; KUDO, H., Direct observation of microcontact behavior at the interface between tool and workpiece in lubricated upsetting. **Annals of the CIRP**, v. 45, n.1, p. 205-210, 1996.

BATZER, S.; SUTHERLAND, J., Dry Cure - Coolant Ills., **Cutting Tool Engineering**, [www.cuttingtoolengineering.com/9806/9806drycure.htm](http://www.cuttingtoolengineering.com/9806/9806drycure.htm), jun. 1998, Disponível na Internet.

BYRNE, G. ; SCHOLTA, E. , Environmentally Clean Machining Processes - A Strategic Approach., **Annals of the CIRP**, v. 42, n. 1, p. 471-474, 1993.

HANS, J. H., Dry Machining - A Promising Option, **American Machinist**, v. 141, n. 8, p. 92-94, Aug. 1997.

HEISEL, U.; LUTZ, M., Pesquisa de fluidos de refrigeração e de lubrificação. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, n.388, p. 40-49, maio, 1998.

- KOEPPER, C., Between Wet Cutting and Dry is Damp Cutting., **Modern Machine Shop**, v.69, n.12, p.90-96, May 1997.
- LIM, C. Y. H.; LIM, S. C.; LEE, K. S., Wear of TIC coated carbide tools in dry turning. **An International Journal of the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear -WEAR-**, United Kingdom, n.225-229, p. 354-367, 1999.
- LIM, S. C.; LEE, S. H.; LIU, Y. B.; SEAH, K. H. W., Wear maps for uncoated high-speed steel cutting tools. **An International Journal of the Science and Technology of Friction, Lubrication and Wear -WEAR-**, United Kingdom, n.170, p. 137-144, Jun., 1993.
- MACHADO, A. R.; BOEHS, L.; GIANINI, W. L., Torneamento com metal duro e cerâmica. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, n.257, p. 29-35, maio, 1987.
- MACHADO, A.R.; WALLBANK, J.; SILVA, M.B., On The Mechanism Of Lubrication in Single Point Cutting, **4<sup>TH</sup> International Conference on Behaviour of Materials in Machining**, p.79-89, Nov., 1998.
- MAEKAWA, K.; OHSHIMA, I.; GOTOH, Y., Are Cutting Fluids Effective in Continuous High-Speed Machining?, **4<sup>TH</sup> International Conference on Behaviour of Materials in Machining**, p.90-99, Nov., 1998.
- MARCONDES, F.C., **A História do Metal Duro**, Unida Artes Gráficas e Editora Ltda., março 1990. 234 p.
- MAZURKIEWIEZ, M., Intelligent Cooling For Modern Industry, **4<sup>TH</sup> International Conference on Behaviour of Materials in Machining**, p. 100-109, Nov.,1998.
- NARUTAKI, N.; YAMANE, Y.; TASHIMA, S.; KUROKI, H., A new advanced ceramic for dry machining. **Annals of the CIRP**, v. 46, n.1, p. 43-48, 1997.

- NETTO, A. B., Óleos de corte: a vez dos "verdes". **Metal Mecânica - IPESI** - São Paulo, Brasil, n. 327, p. 33-37, 1999.
- PEVRE, J. P.; VINTERHOLLER, O., Revestidas por CVD ou PVD, as ferramentas têm vida melhor. **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, n.344, p. 68-79, setembro, 1994.
- REVISTA MÁQUINAS E METAIS - A micropulverização posta à prova, São Paulo, Brasil, n..405, p. 64-69, outubro, 1999.
- REVISTA MÁQUINAS E METAIS - Elementos para seleção e uso de fluidos de corte, São Paulo, Brasil, p. 16-21, maio, 1990.
- SANDVIK DO BRASIL S.A., **Torneamento de Acabamento**, Guia de Aplicação, 80p., 1996.
- SINHOFF, V. ; ALTMÜLLER, S. ; EISENBLÄTTER, G. , A usinagem a seco em alta velocidade: revolução ou evolução? **Máquinas e Metais**, São Paulo, Brasil, n. 404, p. 22-27, setembro, 1999.
- TÖNSHOFF, H.K.; ARENDT, C.; URBAN, B., Steels for Dry Machining, **4<sup>TH</sup> International Conference on Behaviour of Materials in Machining**, p. 144 - 155, nov. 1998.
- VENKATESH, V. C.; SATCHITHANANDAM, M., A discussion on tool life criteria and total failure causes. **Annals of the CIRP**, v. 29, n.1, p. 19-22, 1980.
- WERTHEIM, R.; ROTBERG, J.; BER, A., Influence of High-Pressure Flushing through the Rake Face of the Cutting Tool. **Annals of the CIRP**, v. 41, n.1, p. 101-106, 1992.