

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE A REDAÇÃO DO TRABALHO
FINAL DE MESTRADO PROFISSIONAL DEFENDIDO POR
VALMIR APARECIDO RAEL
E APROVADO PELA COMISSÃO JULGADORA EM
26/02/2004
Anselmo Eduardo Diniz
ORIENTADOR

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**Ciclo de Melhoria Aplicado na Avaliação do
Comportamento de Diferentes Condições de
Refrigeração/Lubrificação em Fresamento em Alta
Velocidade de Corte**

200413859

Autor : Valmir Aparecido Rael
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz

02/04

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

**Ciclo de Melhoria Aplicado na Avaliação do
Comportamento de Diferentes Condições de
Refrigeração/Lubrificação em Fresamento em Alta
Velocidade de Corte**

**Autor : Valmir Aparecido Rael
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz**

**Curso: Engenharia Mecânica - Mestrado Profissional em Gestão da Qualidade
Área de concentração: Materiais e Processos de Fabricação.**

Trabalho final de Mestrado Profissional apresentado à comissão de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

**Campinas, 2004
S.P. - Brasil**

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	T/Unicamp
	R12c
V	EX
TOMBO BC/	53713
PROC.	16 P.117104
C	<input type="checkbox"/>
	D <input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	13,00
DATA	24/09/2004
Nº CPD	

Bib Id 322397

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

R12c

Rael, Valmir Aparecido

Ciclo de melhoria aplicado na avaliação do comportamento de diferentes condições de refrigeração/lubrificação em fresamento em alta velocidade de corte / Valmir Aparecido Rael.-- Campinas, SP: [s.n.], 2004.

Orientador: Anselmo Eduardo Diniz.

Dissertação (mestrado profissional) - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Mecânica.

1. Fluidos de corte. 2. Máquinas-ferramenta. 3. Usinagem. 4. Fresamento. 5. Aço – Tratamento térmico. I. Diniz, Anselmo Eduardo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Mecânica. III. Título.

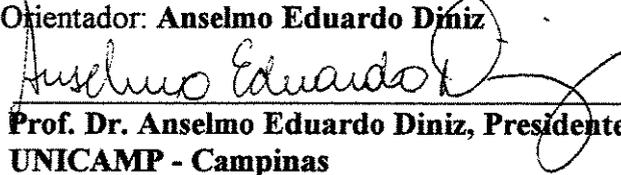
**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
COMISSÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Trabalho Final de Mestrado Profissional

**Ciclo de Melhoria Aplicado na Avaliação do
Comportamento de Diferentes Condições de
Refrigeração/Lubrificação em Fresamento em Alta
Velocidade de Corte**

Autor : Valmir Aparecido Rael

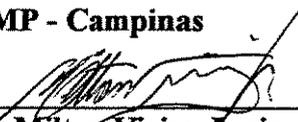
Orientador: Anselmo Eduardo Diniz



Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, Presidente
UNICAMP - Campinas



Prof. Dr. Olívio Novaski
UNICAMP - Campinas



Prof. Dr. Milton Vieira Junior
UNIMEP - Piracicaba

Campinas, 26 de Fevereiro de 2004.

Dedicatória:

Dedico aos meus pais e a todos os entes queridos, que sempre souberam apoiar, compreender, motivar e incentivar.

Em especial à minha querida esposa, que compartilhou este trabalho em todos os momentos, pela paciência e dedicação, pelo estímulo constante e pela abnegação das horas de lazer.

A todos os amigos, que de forma incondicional me incentivaram com seu carinho e compreensão.

Agradecimentos

À Deus primeiramente, por ter me proporcionado o dom da vida e assim obter a oportunidade de realização deste trabalho.

Agradeço também a instituição, professores e colegas, os quais me acolheram neste período, bem como a organização provedora dos recursos humanos, técnicos e logísticos que permitiram tal desenvolvimento. Assim, agradeço a todos que direta ou indiretamente estiveram envolvidos e incentivando a execução.

Ao Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz, meu orientador, pela motivação, incentivo, dedicação, paciência, compreensão, confiança, pela ajuda nos momentos cruciais e, acima de tudo pela amizade e humildade.

A empresa Blaser por ter disponibilizado não tão somente o fluido de corte para teste, mas membros técnicos de sua equipe para acompanhar e monitorar o experimento.

A empresa Celmar pela permissão de uso do equipamento gerador de MQF e pela disponibilidade de auxílio de seus técnicos.

A alta administração da organização sede laboratorial desse experimento e a todos amigos e colegas de trabalho que ajudaram na concretização deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

“O bom senso é a coisa mais bem repartida deste mundo, porque cada um de nós pensa ser dele tão bem provido, que mesmo aqueles que são mais difíceis de se contentar com qualquer outra coisa, não costumam desejar mais do que o que têm”.

R. Descartes

Resumo

RAEL, Valmir Aparecido, *Ciclo de Melhoria Aplicado na Avaliação do Comportamento de Diferentes Condições de Refrigeração/Lubrificação em Fresamento em Alta Velocidade de Corte*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 130 p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

A ênfase em melhoria contínua, priorizada pela organização, propiciou o desenvolvimento deste experimento intrínseco ao processo de usinagem, envolvendo os atuais sistemas de refrigeração/lubrificação e verificando suas vantagens e desvantagens técnicas, ambientais e de saúde relacionadas às partes interessadas. Utilizando-se de três diferentes sistemas de refrigeração/lubrificação aplicáveis ao processo de fresamento em alta velocidade de corte de aço endurecido (corte a seco, o fluido em abundância e a técnica da mínima quantidade de fluido de corte), sob diferentes velocidades de corte, buscou-se avaliar o comportamento técnico com o fim de verificar a possibilidade de minimizar/eliminar o uso de fluido de corte em abundância atualmente utilizado. A execução/avaliação se deu por meio de procedimento experimental fatorial desenvolvido sob a estrutura do método de melhoria contínua contemplado pela ISO, o ciclo *PDCA*. A análise estatística descritiva mostrou que tanto os parâmetros de corte como os fluidos experimentados geraram grande influência nas variáveis de resposta, sendo elas a vida da ferramenta medida em número de cavidades usinadas e a potência de corte consumida. Concluiu-se que os parâmetros de corte menos severos contribuíram para maior vida de ferramenta e menor consumo de potência, assim como apresentou o óleo vegetal utilizado na técnica da mínima quantidade de fluido de corte, seguido do corte a seco, a mesma correspondência.

Palavras Chave: Melhoria contínua, Fluidos de corte, Fresamento em alta velocidade, Vida da ferramenta.

Abstract

RAEL, Valmir Aparecido, *Improvement Cycle Applied to Analyse the Results from Different Coolant Conditions in High Speed Cutting*, Campinas,: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2004. 130 p. Trabalho Final de Mestrado Profissional.

The emphasis in continuous improvement, prioritized by the organization, allowed the development of this intrinsic experiment to the milling process, involving the current cooling/lubricating fluid systems and verifying its advantages and disadvantages regarding technical, environmental and health from the interested parts. Three different coolant systems were applied (dry cutting, abundant cutting fluid and the minimal quantity of fluid application) in high-speed milling of hardened steel with different speed cutting, searching for analyse their technical results in order to verify the possibility to reduce or eliminate the use of abundance coolant used nowadays. The analysis came from the experimental procedure developed under the structure of the continuous improvement method contemplated by ISO, the PDCA cycle. The descriptive statistical analysis showed that the cutting parameters and the cutting fluids have a strong influence in the output variables, known as being the tool life measured by the number of the cavities machined and the cutting power. The conclusions were that the decrease of speed cutting caused longer tool lives and lower cutting power, as well showed the same results by the vegetable oil used in the minimal cutting fluid application followed by the dry cutting.

Keywords: Continuous improvement, Cutting fluids, High speed cutting, Tool life.

Índice

Lista de Figuras	xiii
Lista de Tabelas	xv
1 - Introdução	1
1.1 - Justificativa do trabalho	6
1.2 - Objetivo geral	8
1.2.1 - Objetivos específicos	8
2 - Fluido de Corte	10
2.1 - Introdução	10
2.2 - Funções dos fluidos de corte	14
2.2.1 - Refrigeração da ferramenta em usinagem	15
2.2.2 - Refrigeração da peça em usinagem	15
2.2.3 - Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco (Lubrificação)	16
2.2.4 - Expulsão do cavaco da região de corte	19
2.2.5 - Melhor acabamento superficial da peça usinada	20
2.2.6 - Redução do consumo de energia durante o corte	21
2.2.7 - Redução do custo da ferramenta em operação	21
2.2.8 - Impedimento da corrosão da peça em processo de usinagem	22
2.3 - Propriedades dos fluidos de corte	22
2.4 - Classificação dos fluidos de corte	24
2.4.1 - Fluidos gasosos	25
2.4.2 - Fluidos aquosos	26

2.4.2.1 - Água	26
2.4.2.2 - Emulsões	26
2.4.2.3 - Sintéticos ou soluções químicas	29
2.4.3 - Óleos	30
2.4.3.1 - Óleos minerais puros	31
2.4.3.2 - Óleos graxos	34
2.4.3.3 - Óleos compostos	34
2.4.3.4 - Óleos de extrema pressão	35
2.5 - Seleção dos fluidos de corte	36
3 - Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte	37
3.1 - Introdução	37
3.2 - Usinagem a seco	38
3.2.1 - Ferramentas de corte para a usinagem a seco	41
3.2.1.1 - Coberturas para ferramentas destinadas a usinagem a seco	45
3.3 - Usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF)	51
4 - Fresamento em Alta Velocidade de Aço Endurecido	56
4.1 - Introdução	56
5 - Modelo de Melhoria Contínua	63
5.1 - Introdução	63
6 - Procedimento Experimental	67
6.1 - Introdução	67
6.2 - Planejamento	69
6.2.1 - Identificação	70
6.2.1.1 - Meta de melhoria	71
6.2.2 - Observação	71
6.2.3 - Análise	72
6.2.3.1 - Máquina-ferramenta	72
6.2.3.2 - Sistema de fixação	73

6.2.3.3 - Ferramentas de corte	75
6.2.3.4 - Material do ensaio e aparelho medidor de dureza	75
6.2.3.5 - Equipamento gerador da MQF e o respectivo fluido	77
6.2.3.6 - Fluido de corte em abundância	79
6.2.3.7 - Programa de usinagem	79
6.2.4 - Plano de ação	83
6.2.4.1 - Formulário de coleta de dados	84
6.2.4.2 - Definição operacional	85
6.2.4.3 - Medição do desgaste da ferramenta	86
6.2.4.4 - Medição da potência líquida consumida	87
6.3 - Execução	88
6.3.1 - Aplicação do corte a seco	90
6.3.1.1 - Avaliação estatística dos resultados parciais	92
6.3.2 - Aplicação do corte com fluido em abundância	95
6.3.3 - Aplicação da técnica MQF	95
7 - Resultado Experimental	97
7.1 - Verificação	97
7.1.1 - Análise do desgaste da ferramenta quando da aplicação do corte a seco	99
7.1.2 - Análise do desgaste da ferramenta quando da aplicação do corte com fluido em abundância	101
7.1.3 - Análise do desgaste da ferramenta quando da aplicação do corte com a técnica MQF	102
7.2 - Análise estatística do experimento	103
7.3 - Discussões dos resultados	108
7.3.1 - Análise da influência da refrigeração/lubrificação na vida da ferramenta	108
7.3.2 - Análise da influência da profundidade de usinagem na vida da ferramenta	110
7.3.3 - Análise da influência da profundidade de usinagem na potência de corte	111
7.3.4 - Análise da influência da refrigeração/lubrificação na potência de corte	111

7.4 - Observações	111
8 - Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros	113
8.1 - Padronização	113
8.2 - Conclusão	114
8.3 - Sugestões para trabalhos futuros	117
Referências Bibliográficas	118
Anexo	125
Exemplo do formulário de coleta de dados do tipo registro	126

Lista de Figuras

Figura 2.1: Áreas de aderência e escorregamento na interface cavaco/ferramenta.	17
Figura 2.2: As três direções possíveis de aplicação do fluido de corte, Seah et al. (1995).	18
Figura 2.3: Aresta postiça gerada em ferramenta de torneamento.	21
Figura 2.4: Diagrama mostrando a vida das ferramentas no torneamento de aço ABNT 8640 com ferramentas P35 revestidas, com aplicação de diversos fluidos de corte (Machado et al., 1997).	22
Figura 2.5: Emulsificador formando a ligação do óleo com a água (Scandiffio, 2000).	27
Figura 2.6: Composição química dos óleos minerais.	32
Figura 3.1: Possibilidade de mudança de usinagem úmida para usinagem a seco em torneamento (Momper, 2000).	41
Figura 3.2: Avaliação de cermet em torneamento de acabamento do material CK45N, usando PCVD, CVD e sem cobertura (Dreyer et al., 1999).	50
Figura 3.3: Forças de corte e avanço em vários tipos de fluido de corte, $v_c = 30\text{m/min}$ (Machado e Wallbank, 1997).	54
Figura 4.1: Variação da velocidade de corte em função do material da peça (Schulz, 1992).	58
Figura 4.2: Racionalização do Processo de fabricação de uma matriz (Sandvik, 1998).	60
Figura 4.3: Variáveis de processo relacionadas à tecnologia de corte (Finzer, 1997).	61
Figura 5.1: Representação do modelo de sistema de Gestão da Qualidade baseado em processo da norma NBR ISO 9001:2000.	64
Figura 6.1: Representação das etapas de cada fase do ciclo <i>PDCA</i> .	68
Figura 6.2: Ilustração da máquina-ferramenta utilizada e da respectiva célula de fresamento.	73
Figura 6.3: Ilustração do porta-ferramenta por interferência térmica do tipo <i>HSK 100-A</i> com a ferramenta de corte fixada.	74
Figura 6.4: Ilustração das características da ferramenta de corte utilizada.	75

Figura 6.5: Ilustração do material de ensaio.	77
Figura 6.6: Ilustração do durômetro digital.	77
Figura 6.7: Ilustração do aparelho gerador da mínima quantidade de fluido.	78
Figura 6.8: Ilustração do modelo eletrônico da matriz de forjamento da biela automotiva utilizada nos ensaios.	80
Figura 6.9: Ilustração do caminho de ferramenta do programa de usinagem.	81
Figura 6.10: Ilustração dos parâmetros de usinagem com fresa de ponta esférica.	82
Figura 6.11: Ilustração do aparelho utilizado para medição do desgaste.	87
Figura 6.12: Ilustração da ferramenta de corte em usinagem a seco.	91
Figura 7.1: Regiões de desgaste da ferramenta de corte submetido ao corte a seco.	100
Figura 7.2: Regiões de desgaste da ferramenta de corte submetida ao corte com fluido em abundância.	101
Figura 7.3: Regiões de desgaste da ferramenta de corte submetida ao corte com a técnica MQF utilizando óleo vegetal.	102
Figura 7.4: Gráficos de interação do fluido de corte na potência máxima consumida e no número de cavidades usinadas.	105
Figura 7.5: Distribuição F para os parâmetros.	107
Figura 7.6: Distribuição F para os fluidos e para a interação.	107

Lista de Tabelas

Tabela 2.1: Composição de aditivos nos tipos de óleos solúveis (Scandiffio, 2000).	30
Tabela 2.2: Comparação das principais características dos óleos parafínicos e naftênicos.	33
Tabela 3.1: Propriedade física das coberturas para ferramentas de corte (Urbanski <i>et al.</i> , 2000).	51
Tabela 6.1: Relação dos membros integrantes da equipe de trabalho.	69
Tabela 6.2: Composição Química do aço W. Nr. 1.2606.	76
Tabela 6.3: Equivalência do aço W. Nr. 1.2606 com normas internacionais.	76
Tabela 6.4: Relação dos parâmetros de corte inerentes a cada programa.	81
Tabela 6.5: Representação dos resultados obtidos nos ensaios com o corte a seco.	91
Tabela 7.1: Representação dos resultados obtidos no experimento.	98

Nomenclatura

Letras Latinas

a_e	penetração de trabalho	[mm]
a_p	profundidade de usinagem	[mm]
D	diâmetro da fresa	[mm]
d_e	diâmetro efetivo	[mm]
f_z	avanço por dente	[mm/min]
n	rotação da fresa	[rpm]
Q	taxa de remoção de cavaco	[mm ³ /min]
v_c	velocidade de corte	[m/min]
v_{ce}	velocidade efetiva de corte	[m/min]
v_B	desgaste de flanco	[mm]
v_f	velocidade de avanço	[mm/min]
z	número de dentes da fresa	
Z	eixo de coordenada da máquina-ferramenta	

Letras Gregas

μ	coeficiente de atrito
-------	-----------------------

Abreviações

CAD	Desenho auxiliado pelo computador
CAM	Manufatura auxiliada pelo computador
CNC	Comando numérico computadorizado
DMAIC	Define, measure, analyse, improve and control
HSM	High speed machining
HSC	High speed cutting
MQF	Mínima quantidade de fluido
PDCA	Plan, do, control and action
SIPOC	Supplier, input, process, output and costumer

Siglas

ABNT	Associação brasileira de normas técnicas
ANOVA	Análise de variância
ANP	Agência nacional de petróleo
CADRI	Certificado de autorização de destinação de resíduos industriais
CONAMA	Conselho nacional do meio ambiente
DOE	Delineamento de experimento
JUSE	Union of Japaneses Scientists and Engineers
OHSAS	Occupational health and safety assessment series
SGA	Sistema de gestão ambiental
SSO	Sistema de gestão de saúde e segurança ocupacional

Capítulo 1

Introdução

Desde o início do século passado, os processos industriais vêm sendo sistemática e cientificamente desenvolvidos e analisados. Além do mais, sempre se tentou alcançar a máxima eficiência associando as questões econômicas às condições e aos recursos utilizados para a manufatura. A tarefa de fabricar a matéria-prima e, por meio do uso de energia, manufaturá-la, inevitavelmente gera questionamentos a respeito de seus resíduos e desperdícios. Para tal, necessita-se buscar novos caminhos e soluções de forma a melhorar os processos atuais, substituindo os processos obsoletos e os convencionais por novos métodos que permitam o alcance de contaminação ambiental mínima, aliados às tecnologias satisfatórias que provêm alta confiabilidade e condições economicamente aceitáveis. Frente aos aspectos éticos e econômicos, atualmente deve-se considerar a ecologia no mesmo nível de atenção de todos os outros fatores, planejando e avaliando seus produtos e métodos de produção (Sokovic e Mijanovic, 2001).

A análise de dados oriundos de pesquisa científica no campo de ecologia e da qualidade, demonstrou que a maioria dos problemas se deve ao não acompanhamento tecnológico por parte de muitas organizações, aos processos industriais não solucionados e, obviamente, ao comportamento do ser humano. Entre tantas organizações de processos industriais diferenciados, as atuantes na produção em série fazem com que o foco se volte totalmente ao processo de manufatura, no qual se analisam as ferramentas de trabalho, os materiais de processo e a energia como variável do mesmo. Em muitos casos, os vários processos de manufatura, que devem

resultar em um produto que demonstre as características requeridas em termos de qualidade, eficiência econômica e crescente reciclabilidade, nem sempre são processos industriais adequadamente limpos. Geralmente produzem substâncias/resíduos e emissões classificados como sendo aspectos ambientais, e que, quando dispostos à natureza de maneira inadequada, geram impactos ambientais, afetando o solo, poluindo o ar, a água, etc... (Sokovic e Mijanovic, 2001; Diniz *et al.*, 1999; Machado e Wallbank, 1997).

Os processos industriais, como um todo, são uma perturbação à fonte de equilíbrio do sistema natural. A maioria dos desperdícios depositados na crosta da terra sofrerá algum processo de biodegradação, mas, a gravidade surge quando o depósito de desperdícios cresce mais rapidamente que a habilidade natural de neutralização dos mesmos, dando assim as perturbações do sistema natural; as quais podem prejudicar as gerações. Assim como nós consumimos os bens naturais mais rápido que a habilidade de renovação da natureza, o sistema produtivo ao mesmo tempo gera resíduos oriundos de processos não controlados e inadequados mais rapidamente do que o potencial de renovação natural (Sokovic e Mijanovic, 2001).

Os maiores problemas em pauta, atualmente, são os resultados posteriores ao uso de lubrificantes/refrigerantes, como o fluido de corte no caso das organizações manufatureiras. Novos conceitos, como por exemplo a usinagem sem refrigeração, começaram a ser discutidos no momento em que as organizações identificaram que os custos de parada para troca/descarte podiam representar de 2 a 17% do custo de produção de uma peça. Além desse fator, as organizações se conduziram a este caminho por acompanharem as especificações e diretrizes elencadas pelo Sistema de Gestão Ambiental, a ISO 14001, e também por, atualmente, haver maior consciência ecológica por parte dos usuários (Martinez e Saruls, 2000). Sabe-se que as grandes organizações industriais desenvolvem e aplicam conceitos ambientalmente amigáveis para o uso de lubrificantes/refrigerantes, mesmo porque possuem modelos de Gestão Ambiental e de Qualidade, quando por meio de diretrizes, usam de ciclos de melhoria contínua como o *PDCA* para explorarem e aplicarem as novas técnicas de lubrificação/refrigeração oferecidas pelo mercado, visando oferecer menores riscos à saúde e a segurança das partes interessadas. Já, as organizações de pequeno e médio porte chegam ao mesmo objetivo impulsionadas pela redução dos custos dos fluidos de corte. A alta relacionada aos custos de descarte desses resíduos,

juntamente com as restrições resultantes da legislação, as quais exigem o uso de procedimentos para descarte, estão fazendo com que as organizações implementem estratégias de lubrificação/refrigeração de modo a atender a necessidade econômica, as questões técnicas voltadas à qualidade do produto e, mais do que nunca, à qualidade do ambiente e de saúde dos envolvidos, tendendo ao máximo eliminar/reduzir seu uso (Haan *et al.*, 1997).

Portanto, as organizações são forçadas a desenvolverem tecnologias novas e alternativas, o que gera desafio tecnológico para os cientistas e engenheiros e aumenta a importância de se fabricar produtos de maneira ecologicamente aceitável. Cria-se assim para a organização um diferencial competitivo. O comportamento ecológico de uma organização também é influenciado a uma extensão considerável através de fatores externos como legislação estatal e opinião pública, os quais podem ter um impacto econômico significativo afetando as partes interessadas (Sokovic e Mijanovic, 2001). Segundo a NBR ISO 14001:1996, denominam-se partes interessadas todos os indivíduos ou grupos interessados ou afetados pelo desempenho ambiental de uma organização.

Internamente, no ambiente industrial, os aspectos ambientais afetam a saúde do homem devido ao contato do fluido refrigerante com sua pele e pela respiração e/ou ingestão de substâncias irritantes ao organismo, que, por ventura estejam em forma de névoa de óleo e de vapores poluentes. As doenças mais comuns provenientes do contato do ser humano com o fluido de corte são dermatites, alergias, eczemas, ressecamento da pele, perda da capacidade pulmonar, câncer gastrointestinal e ainda outros tipos de câncer (Diniz *et al.*, 1999; Machado e Wallbank, 1997; Fuchs, 1999).

Porém recentes técnicas e consciência de manufatura sustentável estão frequentemente em um curso de colisão com o uso de fluidos de corte. Usados em grandes quantidades eles acarretam em problemas de obtenção, armazenamento, disposição e manutenção. Aplicando o uso da técnica MQF na usinagem, o vapor, a névoa e a fumaça de óleo, dependendo da circunstância aplicada, são subprodutos indesejáveis, os quais caracterizam um aumento de poluição suspensa no ar e têm se tornado fator de preocupação. Esse fator assume significado considerável no recente clima de segurança de trabalho rígido e proteção ambiental. De acordo

com a Segurança Profissional e Administração de Saúde (OSHA), o nível regulamentado de exposição permissível para névoa no ambiente fabril é 5 mg/ m^3 e tende a ser reduzido para 0.5 mg/ m^3 , enquanto que para o caso de vapor de óleo o limite é 20 mg/m^3 (Diniz *et al.*, 1999; Varadarajan *et al.*, 2002). Com a finalidade de eliminar os riscos potenciais da técnica MQF, as organizações usuárias têm utilizado de máquinas-ferramenta enclausuradas e com sistema de exaustão, para assim absorverem o vapor gerado e reduzirem a poluição sonora do ambiente.

Os fluidos de corte podem ser acondicionados ou dispostos após o uso pela própria organização, se obedecidos os procedimentos aplicáveis legais, ou também podem ser executados por organizações homologadas e especializadas neste tipo de descarte (Sokovic e Mijanovic, 2001). Quando novo, o fluido de corte representa um risco certamente mais leve do que ao longo de seu uso. No seu uso prolongado pode haver o surgimento de substâncias secundárias que nascem e ou se desenvolvem no mesmo, como os microorganismos e até resíduos oriundos de metais da ferramentas e peças usinadas, detergentes de limpeza, solventes e resíduos orgânicos da fábrica (Sokovic e Mijanovic, 2001; Martinez e Saruls, 2000).

Claramente, a composição dos fluidos de corte é extremamente complexa e seus usuários nem sempre encontram facilidades em obter informação sobre a composição desses produtos, sobre seus riscos à saúde e o correto procedimento de manuseio. Assim, tabelas resumidas e arquivos que contemplem o quesito segurança e as especificações do produto seriam de grande valia aos usuários que se esforçam a cumprir suas obrigações com respeito aos regulamentos impostos por leis governamentais e pelos padrões da ISO 14001 (Sokovic e Mijanovic, 2001).

Para a avaliação de parâmetros ecológicos de fluido de corte, Sokovic e Mijanovic recomendaram obter informações por meio da análise do ciclo de vida do produto, o que em tese é feito pelo fornecedor. Estes dados podem ser identificados pelos seguintes modos:

- por pesquisa de laboratório na organização fabricante;
- por pesquisa em plantas que fazem uso e ou acondicionamento;
- por pesquisa em laboratórios que avaliam a usinabilidade oferecida e seus parâmetros ecológicos.

O último método de pesquisa é o mais aceitável do ponto de vista de planejamento dos testes experimentais e confiabilidade de resultados, pois o usuário final pode estar trabalhando em parceria com o fabricante. O teste tecnológico do fluido de corte consiste em submetê-lo a utilização em processos de usinagem como torneamento, rosqueamento, fresamento, etc... registrando seus essenciais efeitos sobre os parâmetros de saída, como:

- desgaste da ferramenta, forças cortantes;
- temperatura na interface cavaco/ferramenta;
- potência consumida;
- tipo de cavaco;
- qualidade da superfície usinada;
- vibrações (ferramenta, interface entre a máquina-ferramenta e a peça).

Além dos problemas mencionados, há também outros a serem considerados como: as perdas durante a usinagem; o uso para limpeza da máquina-ferramenta; e a existência de depósito de fluidos de corte usados em áreas de difícil acesso. Para evitar algumas dessas possibilidades acima, pode-se usar os novos métodos de trabalho oferecidos pelo mercado, tais como o corte a seco, com ar comprimido e com mínima quantidade de fluido, conhecido como MQF.

Uma renúncia completa aos fluidos de corte não será capaz num futuro previsível. Isto porque há uma grande dependência dos mesmos no processo industrial, no qual se tem a influência da matéria-prima, do material da ferramenta, dos recursos da máquina-ferramenta, da operação em regime, das condições de usinagem e até da procedência do fluido de corte aplicado, tudo isso como fator limitante (Sokovic e Mijanovic, 2001). Porém, novos processos de usinagem, como o fresamento em alta velocidade de corte, permitem a aplicação de alternativas ao fluido de corte em abundância, graças à disposição de máquinas-ferramenta, acessórios e ferramentas de corte desenvolvidas com conceito inovador.

Se as indústrias de manufatura praticassem a usinagem a seco ou outras alternativas minimizadoras, os problemas mencionados estariam satisfatoriamente resolvidos.

1.1 - Justificativa do trabalho

Com o propósito de melhorar continuamente, a organização, a qual é laboratório desse experimento, porque se compromete com a sociedade e com seus deveres vigentes nas políticas ambientais e de qualidade, é profunda conhecedora dos riscos e prejuízos cabíveis às questões de segurança, saúde ocupacional e ambiental. Portanto, isto faz com que a mesma faça uso efetivo do modelo de gestão adotado, e assim, patrocine ciclos de melhoria buscando a otimização de seus processos de maneira geral.

A alta direção, com o conhecimento de que a política de qualidade e a ambiental são de responsabilidade dela, conforme definido pela seção 3.2.7 da ISO 9000:2000, decidiu estudar a norma OHSAS 18001/99, a qual elenca as especificações para o sistema de gestão de segurança, e a BS 8800, que estabelece as diretrizes para o sistema de gerenciamento e saúde ocupacional, a fim de criar um sistema de gerenciamento interno voltado à saúde e à segurança ocupacional. Surgiu portanto, o SSO, sigla esta que identifica o Sistema de Gestão de Saúde e Segurança Ocupacional. A NBR ISO 14001:1996, apesar de contemplar o Sistema de Gestão Ambiental conhecido como SGA, não pretende abordar e não inclui requisitos relativos a aspectos de gestão de saúde ocupacional e segurança do trabalho. No entanto, ela não procura desencorajar uma organização que pretenda desenvolver a integração de tais elementos em seu sistema de gestão.

Atualmente, qualquer avaliação, com base no conteúdo vigente do SSO e do SGA, pode identificar o fluido de corte utilizado no processo de usinagem como sendo um potencial causador de doenças profissionais, por gerar riscos à segurança e à saúde dos usuários e partes interessadas. Ainda com foco no Sistema de Gestão Ambiental, pode-se notar que, pelo fato do fluido de corte ser um aspecto ambiental, tornou-se necessário lhe dar a devida atenção exposta pela resolução CONAMA n.º 009 de 31/08/93, a qual se encontra disponível em <http://www.lei.adv.br/conama01.htm>. Esta resolução trata do gerenciamento de óleos lubrificantes, e esclarece que os lubrificantes são uma realidade na empresa e constituem resíduos perigosos, além da mesma ser regra específica para seu tratamento normativo e impor as seguintes obrigações às organizações:

- Recolher e dar destinação ambiental adequada aos óleos lubrificantes usados ou contaminados (Art. 2º);
- Destinar óleos usados ou contaminados para refino por pessoa idônea e licenciada, ou para utilização aprovada pelo órgão ambiental competente (Art. 7º, Caput e §§ 1º e 2º c/c Art. 9º, III e V);
- Armazenar óleos lubrificantes de forma segura sempre em locais e recipientes adequados (Art. 9, I);
- Adotar as medidas necessárias para evitar que o óleo lubrificante usado venha a ser contaminado por produtos químicos, combustíveis, solventes e outras substâncias, salvo as decorrentes da sua normal utilização (Art. 9º, II).

Relacionado à destinação dos lubrificantes/refrigerantes, os mesmos podem ser separados por meio do processo de quebra química, utilizando-se de produtos químicos que favorecem e aceleram a separação da água do óleo, caso a composição do óleo permita tal separação. Outra opção se faz por meio de evaporação, na qual a emulsão é aquecida fazendo com que a água se separe do óleo na forma de vapor, restando ao final do processo os resíduos do óleo usado.

A organização em pauta, pratica a destinação desses resíduos através de empresa possuidora de licença de operação e devidamente homologada, recolhendo e efetuando a destinação conforme legislação. A portaria da Agência Nacional de Petróleo, a ANP n.º 125 de 30 de junho de 1999, estabelece a regulamentação para atividade de recolhimento, coleta e destinação do fluido lubrificante/refrigerante usado ou contaminado. A mesma define que todo óleo usado deve ser destinado ao rerrefino e somente deve ser recolhido por empresa devidamente cadastrada, as quais podem ser consultadas em <http://www.anp.gov.br>.

Sempre comprometida com a legislação e em busca de aperfeiçoamento, a alta administração decidiu patrocinar o desenvolvimento de mais este trabalho de melhoria contínua.

1.2 - Objetivo geral

Aplicação do ciclo *PDCA* descrito no modelo de Sistema de Gestão da Qualidade da NBR ISO 9001:2000 com a finalidade de implementar melhorias no processo de usinagem.

1.2.1 - Objetivos específicos

- Avaliar as condições de refrigeração/lubrificação disponíveis e a potencial substituta na área definida como sendo piloto, considerando os quesitos saúde, segurança ocupacional, meio ambiente e desempenho técnico.
- Compreender a real influência tanto das condições de refrigeração/lubrificação como dos parâmetros de corte nas características de qualidade, ou seja, nas variáveis de resposta do experimento.

Muitos processos existentes na organização, por possuírem sistema de refrigeração/lubrificação em tese potencialmente substituível, como no fresamento, rosqueamento, furação e torneamento, se praticados, por meio de máquinas obsoletas, requerem alto investimento inicial em máquina-ferramenta e acessórios inovadores, o que, a princípio, não seria interessante sem profundo conhecimento prático do custo-benefício que esses sistemas de refrigeração/lubrificação disponíveis no mercado possam oferecer.

Em busca desse conhecimento, definiu-se como sendo área piloto para o experimento, uma das unidades de negócio da organização, a matrizaria, justamente por possuir célula de fresamento em alta velocidade de corte, processo que exige máquinas-ferramenta e acessórios de alta tecnologia e devidamente dimensionados de tal forma a possibilitar o uso de sistemas substitutos ao corte com fluido em abundância, tais como o corte a seco e a técnica da mínima quantidade de fluido de corte, os quais oferecem menos risco ambiental e de manuseio, baixo custo de aquisição, custo muito inferior de manutenção e descarte, além da facilidade de administração.

No que diz respeito ao desempenho técnico, este experimento contemplou o uso de três diferentes condições de refrigeração/lubrificação no processo de fresamento em alta velocidade de corte de aço endurecido (corte a seco, o fluido em abundância e a técnica da mínima quantidade de fluido de corte). Os sistemas de refrigeração/lubrificação foram experimentados somente nas operações de fresamento em desbaste frontal devido à sua maior exigência dentro do processo de confecção do produto como um todo. O experimento também fez uso de três parâmetros de corte diferentes, os quais permitiram avaliar o comportamento de diferentes velocidades efetivas de corte frente a cada fluido de corte, o que é estratégico para a organização.

As características da qualidade, respostas oriundas do experimento, foram definidas em conformidade com a finalidade do experimento e tiveram, obrigatoriamente, para a sua geração confiável, todas as entradas do processo reconhecidas. A todo trabalho de melhoria, deve-se ponderar o custo e o tempo de obtenção do resultado proposto em função da precisão oferecida pelo processo de medição disposto pela organização, a fim de justificar a própria execução da proposta de melhoria junto aos patrocinadores. Como parte de um planejamento inicial, este experimento justificou sua necessidade pois além de não requerer alto investimento, propôs com base no resultado técnico obtido e, obviamente, após avaliação econômica considerando as questões ambientais e de saúde, instituir a padronização de uso do fluido de corte em todas as máquinas-ferramenta de fresamento em alta velocidade de corte que se destinam à usinagem em aço endurecido. Conhecendo o resultado técnico obtido, as demais unidades de negócio poderão estar estudando a aplicabilidade das alternativas utilizadas, levando em conta as condições e necessidades de cada uma em particular.

O método de trabalho proposto se baseou em pesquisas bibliográficas sobre o processo de fresamento em alta velocidade de corte, os atuais sistemas de refrigeração/lubrificação verificando suas vantagens e desvantagens técnicas, ambientais, de segurança e de saúde das partes interessadas. A execução se deu por meio de procedimento experimental fatorial desenvolvido sob a estrutura do método de melhoria contínua contemplado pela ISO, o ciclo *PDCA*. A avaliação foi desenvolvida de maneira objetiva, utilizando-se de análise estatística descritiva auxiliada pelo software estatístico denominado de Minitab.

Capítulo 2

Fluido de Corte

2.1 - Introdução

Os fluidos de corte têm sido incorporados ao processo de usinagem com o propósito de melhorar as características tribológicas inerentes ao mesmo, as quais estão presentes entre a superfície de contato da ferramenta e a peça (Sokovic e Mijanovic, 2001).

São conhecidos como fluidos de corte, a mistura de gases e líquidos usados em operações de corte em geral. Os gases mais comuns são o oxigênio e o vapor d'água encontrado na atmosfera (Shaw, 1968). A forma mais conhecida de se obter fluido de corte é adicionando óleo solúvel à água. Apesar do termo óleo solúvel ser errôneo, pelo fato de água e óleo não se misturarem, há neste processo água com partículas de óleos dispersas em seu interior. Comumente a proporção óleo-água, nesta mistura, é da ordem de 1:10 a 1:100. Além do óleo solúvel, existem também os populares óleos minerais e os óleos a base de enxofre (Diniz *et al.*, 2001; SME, 1986).

As soluções a base de água surgiram quando o engenheiro mecânico F. W. Taylor em 1890, possibilitado pela invenção do aço rápido, o que gerou aumento nas velocidades de corte, sentiu a necessidade de resfriar a área de contato ferramenta/peça e utilizou primeiramente a água, depois

uma solução de água e soda, e posteriormente água e sabão para evitar a oxidação da peça e/ou da ferramenta (Diniz *et al.*, 2001). A água como fluido de corte possui alto poder de refrigeração, grande potencial de promoção de oxidação no conjunto máquina/peça/ferramenta, baixo custo de aquisição e baixo poder lubrificante (Vieira *et al.*, 2001). Com isso, identificou-se o positivo efeito de se usar o fluido de corte, pois usando água em usinagem de aço obteve-se até 33% de aumento na velocidade de corte (v_c) sem alterar a vida da ferramenta, tendo, como objetivo inicial, a redução do efeito indesejável da temperatura sobre a ferramenta (Ávila e Abrão, 2001).

Mas, devido ao alto poder de oxidação da água, procurou-se elaborar soluções aquosas (sais de sódio e cálcio), que molhassem melhor o metal e tivessem a vantagem de reduzir a capacidade de oxidação, além de apresentar certo poder lubrificante (Scandiffio, 2000). Esses sistemas água/óleo foram logo introduzidos pois oferecem a vantagem da refrigeração exposta pela água e a lubrificação imprimida pelos derivados de petróleo (Novaski e Rios, 2000). Porém, tanto a água como o óleo, aplicados separados ou não, não atingem todos pré-requisitos de um fluido de corte adequado às propriedades de refrigeração, lubrificação, estabilidade química, etc.

A partir de então, fluidos de corte têm sido desenvolvidos e estão atingindo uma grande variedade, focando o aumento da vida da ferramenta e a melhora no acabamento superficial da peça, conciliado ao seu poder de refrigeração e lubrificação (Seah *et al.*, 1995).

Algumas dificuldades, frente ao uso efetivo dos fluidos de corte, estão na intermitência do próprio processo. Possíveis variações de sobrematerial e espessura de cavaco, fatos comuns na operação de fresamento, fazem com que a aplicação do fluido gere choques térmicos, o que é particularmente prejudicial às ferramentas de corte em geral. Uma outra dificuldade na utilização dos fluidos de corte é a atenção que se deve dar as questões ambientais e de saúde dos envolvidos no processo (SME, 1986).

Numericamente, os custos de aquisição dos fluidos de corte adicionados aos custos de seu uso e descarte, podem ser de 1,5 a 4 vezes o custo das ferramentas de corte usadas na operação, o que faz com que, quando usados, sejam aplicados em operações realmente necessárias e de maneira otimizada (Mason, 2001). Uma forma simples de reduzir a quantidade de fluido de corte

é diminuindo a quantidade usada para o transporte dos cavacos, pois atualmente, apenas 30% do fluido de corte utilizado se destina à lubrificação e ao resfriamento da região de corte. O restante é usado para o transporte dos cavacos espalhados no barramento das máquinas-ferramenta (Micaroni, 2001).

Com muita ênfase estão sendo intensificadas as pesquisas e desenvolvimento das propriedades fisicomecânicas, tanto nos fluidos de corte como nas máquinas-ferramenta e ferramentas. Deve também haver ajustes das variáveis e parâmetros de processo de fabricação por usinagem, que devem ser compatíveis com as novas tendências amigáveis com o ambiente, atendendo às normas particulares, estaduais e as internacionais, como é o caso da ISO 14001.

Nesse âmbito, a escolha do fluido de corte correto e sua aplicação adequada deve atender à questão técnica para a usinagem dos materiais e também à questão ambiental (Sokovic e Mijanovic, 1997). Até há pouco tempo, os fluidos eram desenvolvidos e ajustados simplesmente baseados em suas funções técnicas, mas atualmente eles estão sendo reformulados de modo a terem combinações ambientalmente amigáveis, possivelmente ausentes de Pb, S ou Cl em sua composição (Sreejith e Ngoi, 2000).

Outros fatores como os custos operacionais da produção e as exigências legais quanto à preservação da saúde do ser humano, fazem com que cada vez mais se utilizem arduamente outras técnicas, como a usinagem sem fluido de corte, conhecida comumente como corte a seco, a usinagem com ar comprimido e a usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF), ou ainda com fluido de corte atomizado, pois se trata do uso de um volume mínimo de fluido de corte (10ml/h a 100ml/h) atomizado por ar comprimido (4 a 6 bars) e aplicado na região de corte (interface da ferramenta/peça) durante o processo de usinagem (Diniz *et al.*, 2001). Assim, até mesmo a adição de elementos químicos ao material da peça para melhorar sua usinabilidade sem comprometer as propriedades mecânicas está sendo experimentada, voltada ao objetivo de consolidar os benefícios apontados pelas técnicas de refrigeração/lubrificação alinhado as legislações vigentes. Além do mais, novos materiais para as ferramentas de corte e suas coberturas superficiais não cessam o desenvolvimento. Por meio dos materiais busca-se a

obtenção primordial de maior dureza aliada a alta tenacidade, e, por meio das coberturas, o aprimoramento de sua ação lubrificante e de resistência à temperatura.

Da mesma forma os fabricantes de fluidos de corte também estão desenvolvendo óleos com a finalidade de obterem uma maior vida útil em sua emulsão, ou seja, menor incidência de descarte em um determinado período, e menor agressividade aos operários que mantêm contato, evidentemente sem perder suas propriedades de refrigeração e lubrificação. (Diniz *et al.*, 2001). Deste desenvolvimento espera-se também que os fluidos de corte tenham uma produção limpa, sem emissões; que sejam produzidos com matérias-primas renováveis; que não apresentem efeito tóxico; carcinogênico; que sejam compatíveis ambientalmente, facilmente biodegradáveis sem geração de produtos nocivos; que não causem problemas relacionados ao descarte; e que as perdas sejam causadas somente por evaporação e arraste (Micaroni, 2001).

Dick e Foltz (1997) apresentaram uma série de práticas de gerenciamento de fluidos de corte as quais visam garantir a qualidade e obter maior eficácia. Alguns dos principais resultados deste trabalho apontam para uma maior durabilidade dos fluidos de corte emulsionados com significativa redução dos custos de descarte dos mesmos como consequência de um tratamento adequado de limpeza e aproveitamento da água utilizada na emulsão (Braga, 2001).

As várias possibilidades de atingir um processo de usinagem eficiente e eficaz, no que diz respeito à não utilização de fluido de corte ou ao seu uso atomizado, têm sido discutidas, mas não se deve esquecer dos benefícios possíveis trazidos pelos fluidos de corte, pois em muitos casos o uso do fluido realmente promove aumento de produção, melhora no acabamento superficial do produto e redução dos custos (Vieira *et al.*, 2001).

Com a conscientização das organizações fabricantes de fluido de corte, das organizações manufatureiras e da sociedade em preservar a natureza e a saúde, aliada à constante busca em redução dos custos operacionais e identificação de novas tecnologias que visam melhorar a qualidade final dos produtos, todos os projetos em chão-de-fábrica se voltam à exploração do corte a seco, do corte com ar comprimido e do corte com a técnica MQF, os quais se adequam às leis ambientais e de segurança, tornando as organizações mais competitivas, por serem técnicas

economicamente viáveis e por preservarem a saúde de todos.

Com este propósito já foram executados trabalhos dentro do contexto de torneamento de aços diversos, com uso de fluido em abundância, com ar comprimido e aplicando a técnica MQF. Porém, pouco até agora se fez na área de utilização ou não de fluidos de corte no fresamento de matrizes de aço endurecido. Sabe-se que o uso de fluido de corte em operações de fresamento traz muitas vezes, prejuízos à ferramenta, devido ao fato de que ele incentiva o choque térmico já inerente ao processo. Também não se costuma utilizar fluido de corte na usinagem de material endurecido, pois muitas vezes é até desejável que a peça, na região de corte, seja aquecida, a fim de que sua resistência reduza e facilite o cisalhamento do cavaco.

2.2 - Funções dos fluidos de corte

Todo processo de usinagem promove geração de calor, a qual se diferencia pela sua escala, sendo maior ou menor. Sua intensidade depende do material da peça, da cobertura da ferramenta, caso a mesma tenha, e dos parâmetros de corte atribuídos. Sendo assim, encontra-se uma das várias funções dos fluidos de corte, a de refrigeração; ou mais detalhadamente, a remoção do calor da ferramenta, peça e cavaco.

Mas, somente a refrigeração das partes não é suficiente para se obter êxito na usinagem. É necessário também que se procure reduzir a energia gerada pelo atrito cavaco/ferramenta e ferramenta/peça, através da função de lubrificação existente nos fluidos. Com isso se consegue retardar o aquecimento, reduzindo os esforços, a potência de máquina e a formação de aresta postiça (Diniz *et al.*, 2001).

A seguir estão elencadas as funções exercidas pelos fluidos, das primárias às secundárias, de acordo com Ferraresi, 1977.

2.2.1 - Refrigeração da ferramenta em usinagem

Como visto, apesar de ser em escala diferenciada, todos os fluidos possuem a função de remoção de calor da zona de corte, conjunto peça/ferramenta, por meio da troca de calor, o que faz com que o mesmo seja retirado por condução e distribuído a sua volta (Ávila, 2001). Esta é a característica que faz com que a ferramenta e a peça não se aqueçam excessivamente na interface cavaco/ferramenta, dificultando os fenômenos geradores do desgaste da ferramenta, como difusão, abrasão e oxidação. Assim, manter ou controlar a temperatura com a utilização adequada de um fluido de corte significa obter melhora no desempenho da ferramenta (Ferraresi, 1977).

2.2.2 - Refrigeração da peça em usinagem

Em se tratando do produto final, quanto menos se aquecer menor o teor de dilatação térmica, o que faz com que se obtenha medidas finais com tolerâncias mais apertadas, maior facilidade de manuseio por parte do operador e menor dano térmico na estrutura metalúrgica da peça.

Na maioria das operações, fluidos de corte com ação refrigerante trabalham no sentido de aumentar a vida das ferramentas. Mas, quando a peça possui paredes finas que exigem bom grau de acabamento, ou melhor, baixa rugosidade, necessita-se da existência da ação lubrificante, muito embora, devido a sua baixa viscosidade, tal ação fique dificultada (Diniz *et al.*, 2001).

Em furação, tem-se uma maior exigência de refrigeração da zona de corte se comparada ao processo de torneamento e fresamento (Kelly e Cotterell, 2002). Já no processo de retificação, o rebolo é o componente mais afetado pelo calor gerado por ser refratário; porém fica toda atenção voltada à peça, para que não sofra tensões residuais que venham a gerar não-conformidade em sua qualidade dimensional e superficial.

2.2.3 - Redução do coeficiente de atrito entre a ferramenta e o cavaco (Lubrificação)

Esta característica de lubrificação é ponto fundamental quando se trata da usinagem em materiais que tendem a gerar o fenômeno da *BUE* (*Built-Up Edge* - Aresta Postiça de Corte), ou seja, a soldagem do cavaco na ferramenta, o que é evidenciado na usinagem de alumínio e em alguns casos onde há baixas temperaturas e velocidades de corte. A permanência da lubrificação gera uma ação anti-fricção e anti-solda atuando contra a aresta postiça (Fuchs, 2000).

Três fontes distintas são responsáveis pela quantidade excessiva de calor gerada na zona de corte na operação de usinagem. São elas: a deformação plástica juntamente com o cisalhamento do material da peça, o deslizamento e o atrito do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta e, por fim, o atrito no contato ferramenta/peça (Seah *et al.*, 1995).

A lubrificação tem como objetivo reduzir o coeficiente de atrito, fruto do contato entre cavaco e ferramenta, e ferramenta e peça, o que facilita o fluxo do cavaco aumentando sua velocidade e o ângulo de cisalhamento, reduzindo a força e a potência de corte e, conseqüentemente, minimizando a geração de calor (Diniz *et al.*, 2001). A lubrificação também é facilitada em baixas velocidades de corte, já que, para que este efeito ocorra, é necessário que o fluido penetre nas interfaces ferramenta/cavaco e ferramenta/peça, num fluxo contrário ao fluxo do cavaco e da peça (Diniz *et al.*, 2001).

A maneira pela qual o fluido alcança a região de contato cavaco/ferramenta é uma questão polêmica entre os pesquisadores. Segundo Trent (apud Motta e Machado, 1995), o fluido não pode penetrar na zona de aderência¹, interface cavaco/superfície, e sua ação se dá apenas na zona de escorregamento² (Figura 2.1), entre o cavaco e a ferramenta. Já Merchant (apud Motta e Machado, 1995), diz que a penetração do fluido se dá pelo fenômeno da capilaridade, o qual tem a colaboração da vibração entre ferramenta, peça e cavaco, passando pela zona de aderência em direção à ponta da ferramenta.

¹ As altas tensões de compressão, altas taxas de deformação e a pureza do material da peça promovem a ligação atômica nesta interface.

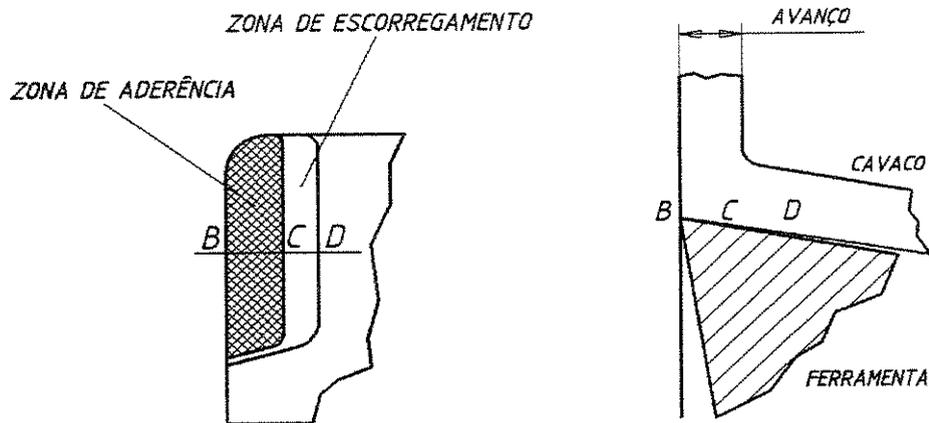


Figura 2.1: Áreas de aderência e escorregamento na interface cavaco/ferramenta.

No entanto, para alcançar a região de corte, o fluido muitas vezes é submetido a um aumento de pressão, o que exige que o mesmo possua alta capacidade de não se vaporizar antes de atingir a região de corte (Diniz *et al.*, 2001).

A eficiência de um fluido de corte depende não somente da sua penetração, mas da capacidade de reação entre a interface cavaco/ferramenta, reduzindo a agressividade entre os materiais e formando um filme lubrificante entre eles.

Em altas velocidades de corte, os fluidos passam a atuar mais como refrigerantes, atenuando a função de lubrificação. Segundo Williams (apud Micaroni, 2001) este efeito ocorre devido ao fluxo de fluido que tende em direção à ponta da ferramenta, por ação capilar, ser anulado ou direcionado para fora da interface. Testes voltados à identificação do melhor posicionamento para impulsão do fluido de corte foram realizados por Pigott e Colwell (apud Micaroni, 2001).

A aplicação de fluido de corte pode causar uma mudança na distribuição e localização das regiões de maior temperatura. Essa mudança está diretamente ligada à mudança de forma do cavaco e ao desgaste da ferramenta (Seah *et al.*, 1995). Dentre as várias possíveis direções de

² Condição de quase aderência, na qual a velocidade na interface apesar de muito baixa, não é zero.

aplicação de fluido de corte, três são as principais (Figura 2.2).

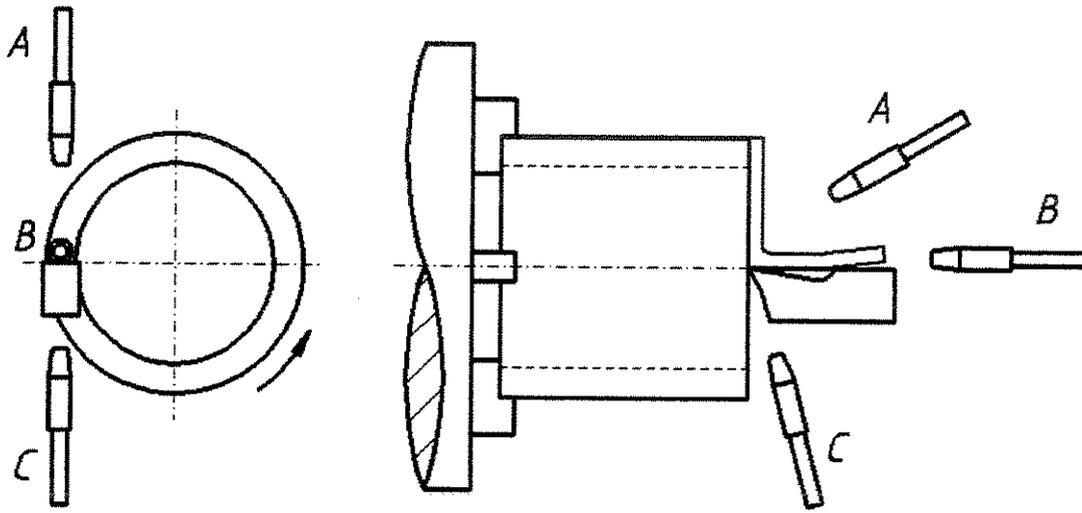


Figura 2.2: As três direções possíveis de aplicação do fluido de corte, Seah et al. (1995).

Taylor mostrou que o desgaste da ferramenta pode ser reduzido quando o fluido é aplicado na direção A; Niebusch e Strieder dizem que não só a direção A, mas também a direção C conduzem a um menor desgaste da ferramenta (Seah *et al.*, 1995).

O resultado obtido por Pigott e Colwell (apud Micaroni, 2001) foi confirmado quando testado por Smart, Trent e Lauterbach, que afirmam que o menor desgaste da ferramenta se manifesta por meio do uso de alta pressão de fluido direcionado à posição C. Este resultado justifica-se pelo fato de que o cavaco e a superfície da saída da ferramenta estão constantemente em contato, e o espaço entre eles só é acessível às micro partículas de fluidos através da alta pressão exercida. Já na posição C, como não existe um contato tão íntimo entre ferramenta e peça, fica mais fácil para o fluido atingir regiões mais próximas do contato ferramenta/peça, bastando para isto, vencer a turbulência do ar gerada pela rotação da peça.

De qualquer forma, quando o fluido de corte não penetra na região adequadamente, o desempenho do processo, como um todo, diminui pela falta da retirada de calor e redução da lubrificação, o que, em alguns casos, pode danificar termicamente a peça por queima e tensionamento superficial. Até pouco tempo atrás, não havia surgido um método prático e

econômico para quantificar o desempenho da aplicação do fluido refrigerante. Este argumento foi reforçado por uma nota da Força Aérea dos Estados Unidos, que recomendou o desenvolvimento de uma maneira eficiente de quantificação e aplicação do fluido de corte. A otimização da forma de aplicação do fluido de corte no processo é um fator de extrema importância com relação ao custo global envolvido no processo, além de sua relação com o meio ambiente (Monici *et al.*, 2001).

2.2.4 - Expulsão do cavaco da região de corte

A eliminação do cavaco gerado é fator preponderante, pois sua presença poderá danificar a ferramenta ou a superfície da peça. A alta pressão do fluido de corte facilita a expulsão do cavaco em todos os processos geradores do mesmo. Em furação, especialmente em furação profunda, por meio de brocas especiais com orifícios na superfície de folga, submete-se o fluido à alta pressão, para assim alcançar a região de corte (Ferraresi, 1977). Esse é o único meio vantajoso de se retirar o cavaco da região de corte, via fluxo fluido de corte (Diniz *et al.*, 2001). Já em furação em processo inverso (de baixo para cima), o fluido exercerá suas funções primárias, como refrigerar e lubrificar.

No que diz respeito à furação em materiais que produzem cavaco em forma de pó, aconselha-se o uso somente do ar comprimido com o intuito de expulsar o cavaco, pois o fluido, neste caso, poderá conduzir partes desses minúsculos cavacos aos barramentos do equipamento, o que poderá danificá-lo com o tempo (Diniz *et al.*, 2001). Atualmente, este recurso de expulsão é muito usado em fresamento de superfícies complexas, por meio de Centros de Usinagem verticais e em alguns casos nos horizontais, isto dependendo potencialmente dos valores angulares existentes no perfil da gravura a ser gerada, pois quanto maior os ângulos de saída da peça, maior a facilidade de queda ou escape do cavaco.

Um exemplo de que a expulsão de cavaco é primordial validou-se com o teste de furação da liga de Alumínio Silício SAE 323, em material de alta ductilidade. Braga (2001) utilizando brocas inteiriças de metal duro K10, tipo NS, e usando um Centro de Usinagem Vertical de 3 eixos modelo SV-40, da MORI SEIKI, provou que o corte sem fluido desta liga é impossível, já

que o cavaco gerado adere aos canais helicoidais da broca, entupindo-os e provocando a quebra da broca após a usinagem de poucos furos. Já com a utilização da técnica MQF com vazão bem baixa de óleo (10ml/h) o corte foi viabilizado e apresentou desempenho similar àquele que se tem quando se utiliza fluido de corte em abundância.

Por esta razão, após os ensaios complementares, onde oscilou revestimento da broca e pressão do fluido, pode-se concluir que com uma vazão de 10ml/h de óleo mineral num fluxo de ar comprimido foi suficiente para lubrificar, mostrando que, para este processo, deve-se conciliar o ar e o óleo, não sendo necessário simplesmente expulsar o cavaco através do ar ou do óleo em excesso (Braga, 2001).

2.2.5 - Melhor acabamento superficial da peça usinada

A ação do fluido de corte, de uma forma geral, tem um impacto positivo no que diz respeito à redução dos danos térmicos à estrutura da peça a ser usinada. Porém, deve-se escolher o material da ferramenta levando-se em conta o material da peça, dinâmica do conjunto ferramenta/máquina/peça e o fluido de corte considerando-se as características operacionais (Ferraresi, 1977), como é o caso da furação usando brocas sem quebra cavaco, em que a variação da força radial pode gerar furos ovalizados e com grande amplitude de vibração (Braga, 2001). Mais precisamente, fluidos com alta característica refrigerante, sistema água/glicol, por exemplo, evitam a dilatação da peça e proporcionam a obtenção de tolerâncias dimensionais apertadas e melhor acabamento superficial, sendo mais crítica em peças com dimensões pequenas (Diniz *et al.*, 2001).

Novos materiais para ferramentas e novas coberturas superficiais estão sendo desenvolvidos em paralelo ao desenvolvimento de novos materiais de peça com usinabilidade melhorada, e também fluidos com maior poder de refrigeração/lubrificação. Com isto, visam a redução do coeficiente de atrito, o que minimizará automaticamente o potencial da existência da aresta postiça de corte e por fim melhorará o acabamento superficial, pois a geometria da peça não sofrerá a alteração gerada pela existência da aresta postiça de corte que compromete efetivamente o grau de acabamento da peça (Figura 2.3).



Figura 2.3: Aresta postiça gerada em ferramenta de torneamento.

O uso de fluido de corte retarda a deterioração da ferramenta quando a velocidade de corte é aumentada e também reduz o atrito na interface cavaco/ferramenta, provocando uma diminuição dos esforços para a remoção do cavaco, o que gera uma melhora da rugosidade da peça (Ferraresi, 1977). No caso específico da formação da aresta postiça de corte, muitas vezes minimiza-se simplesmente aumentando a velocidade de corte (Shaw, 1968).

2.2.6 - Redução do consumo de energia durante o corte

Quando se consegue reduzir o atrito na zona de corte, contato ferramenta/peça, reduz-se também a energia despendida para a realização do corte (Ferraresi, 1977). Mas, se a refrigeração/lubrificação causada à peça pelo fluido de corte não permitir a diminuição da resistência mecânica e dureza da peça, o que ocorre em alguns materiais, este efeito inverso pode causar a diminuição da potência consumida (Diniz *et al.*, 1999).

2.2.7 - Redução do custo da ferramenta em operação

O custo da ferramenta geralmente está inserido no custo hora-máquina, e será menor quanto menor for o desgaste/consumo de ferramentas de corte na obtenção do produto/lote. O fluido refrigerante, quando aplicado corretamente, reduz o custo da ferramenta por atribuir menor desgaste em mesmo período de tempo (Ferraresi, 1977). Um notório exemplo deste caso, dá-se quando se trabalha com ferramentas de aço rápido, pois as mesmas perdem sua capacidade de corte em baixas temperaturas (em torno de 600 °C).

Machado *et al.* (1997) demonstraram conforme figura 2.4, que, o uso de fluido de corte tem proporcionado maior vida da ferramenta que o corte sem fluido, independente da velocidade de

corte, em se tratando de torneamento em aço ABNT 8640, com ferramenta de metal duro P35, triplo-revestidas com TiC , Al_2O_3 e TiN (Diniz *et al.*, 2001).

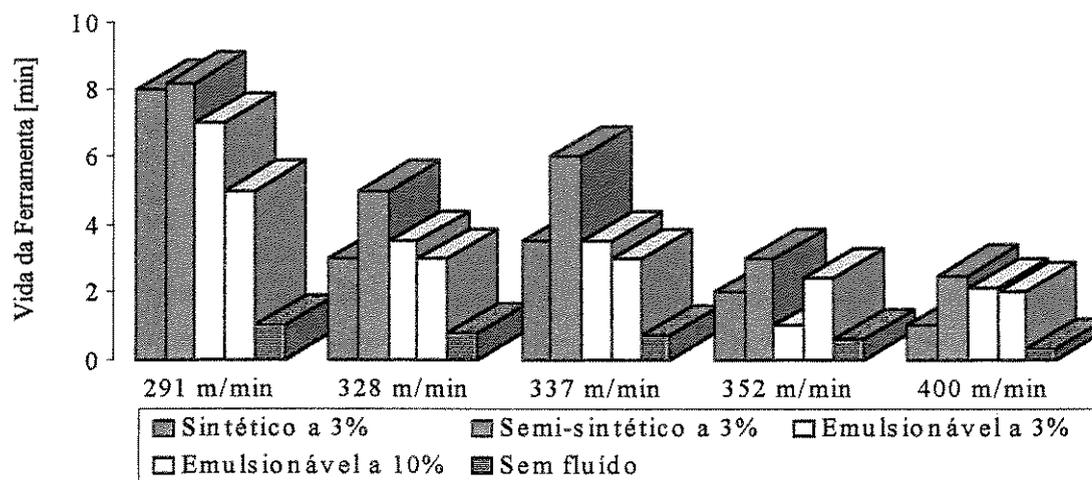


Figura 2.4: Diagrama mostrando a vida das ferramentas no torneamento de aço ABNT 8640 com ferramentas P35 revestidas, com aplicação de diversos fluidos de corte (Machado *et al.*, 1997).

Pode-se observar claramente que o fluido de corte semi-sintético a 3% de concentração se destacou por apresentar melhor desempenho em vida de ferramenta, independente da velocidade de corte utilizada.

2.2.8 - Impedimento da corrosão da peça em processo de usinagem

Em processo em que há grande intervalo de tempo entre as operações que compoem o produto final, o fluido de corte com sua característica lubrificante faz com que a peça não sofra tamanha influência da atmosfera ou de vapores ácidos, permitindo assim ação protetora (Ferraresi, 1977).

2.3 - Propriedades dos fluidos de corte

Para que os fluidos de corte exerçam devidamente suas funções, devem possuir algumas propriedades de acordo com seu grau de refrigeração e lubrificação.

Como refrigerante, os fluidos de corte diminuem a temperatura gerada durante o corte, tanto pelo aumento da dissipação de calor, como também pela redução de calor proporcionado pela propriedade de lubrificar (Novaski e Rios, 2000). Para que a remoção de calor da região de corte, da peça e da ferramenta, ocorra de maneira eficiente, esses fluidos devem apresentar as seguintes propriedades (Diniz *et al.*, 2001):

- baixa viscosidade a fim de que flua facilmente não causando resistência ao escoamento, permitindo uma boa circulação do fluido pelo equipamento;
- alta capacidade de absorção de calor (isto depende da viscosidade, calor específico, condutividade térmica e em certo grau, do calor latente de vaporização);
- alta molhabilidade (capacidade de "molhar" bem o material para estabelecer um bom contato térmico, a fim de se obter um resfriamento).

Para a finalidade de lubrificação, os fluidos de corte devem possuir certas características (Diniz *et al.*, 2001):

- resistir a pressões e temperaturas elevadas sem vaporizar;
- boas propriedades anti-fricção e antisoldante;
- viscosidade adequada: a viscosidade deve ser suficientemente baixa a ponto de permitir uma fácil circulação do fluido e também favorecer a decantação rápida dos cavacos e contaminantes em geral, e suficientemente alta de modo a permitir uma boa aderência do fluido às arestas da ferramenta de corte. A formação de um filme entre as partes em contato é condição necessária para que ocorra a lubrificação.

Ao atuar como lubrificante, o fluido de corte age para reduzir a zona de aderência e sua eficiência vai depender da quantidade efetiva que atinge e penetra, em curto espaço de tempo, na interface cavaco/ferramenta, formando um filme resistente através dos mecanismos de adsorção física ou de reação química. A película lubrificante, para ter atuação significativa, deve ter menor resistência ao cisalhamento do que a resistência do material na interface (Novaski e Rios, 2000).

São exigidas ainda mais propriedades do fluido de corte, independentemente da sua função

principal, tais como:

- ausência de odores desagradáveis;
- isenção da tendência de manchar a peça ou a máquina;
- ser estável durante o uso e o armazenamento;
- capacidade de proteger a peça e a máquina contra os efeitos corrosivos da umidade atmosférica, ou de outras causas possíveis;
- isenção da tendência de gerar precipitados sólidos que se depositam nas guias e barramentos da máquinas e/ou entopem os tubos de circulação do fluido de corte;
- não deve apresentar tendência à formação de fumaça;
- não causar dano à pele humana e nenhum outro risco à saúde;
- ser suficientemente transparente.

Dentre todas essas propriedades, vale ressaltar que a transparência do fluido é fator considerável em muitos casos, pois facilita o acompanhamento visual da operação de usinagem, o que, às vezes, implica em questões de segurança, principalmente em se tratando de máquinas operatrizes obsoletas que não possuem sistemas de monitoramento de desgaste e vida de ferramenta e a visão do processo é originalmente dificultada.

2.4 - Classificação dos fluidos de corte

Apesar de não existir entre os autores e fabricantes de fluido de corte uma padronização em sua classificação (Ferraresi, 1977), segue-se a classificação usualmente definida (Ávila e Abrão, 2001; Machado e Wallbank, 1997):

- Gasosos
- Aquosos:
 - Água;
 - Emulsões;
 - Soluções químicas.

- Óleos:
 - Óleos minerais puros;
 - Óleos graxos;
 - Óleos compostos;
 - Óleos de extrema pressão;
 - Óleos de uso múltiplo.

2.4.1 - Fluidos gasosos

Dentre os fluidos gasosos, o ar é o mais conhecido e utilizado entre as organizações de manufatura. Como refrigerante, sua *performance* é fraca se comparada aos fluidos refrigerantes líquidos, mas se destaca em sua ação mecânica por meio da remoção dos cavacos da região de corte. Em teste executado por Pahlitzsch em 1953 (Ferraresi, 1977) ao utilizar o ar como refrigerante no fresamento, obteve-se bons resultados. Em velocidade de corte de 30 m/min e ar refrigerado na temperatura entre -40 °C e -60 °C a vida média da ferramenta aumentou em 400% em relação aos fluidos líquidos. Já a -8 °C, a vida elevou-se em 40%. Assim, conclui-se que sua capacidade de refrigeração se incrementa mediante o fato de ser refrigerado para uso.

A maioria das organizações, quando fazem uso do ar como fluido refrigerante, usam-no em temperatura ambiente. Sua aplicação se dá geralmente em materiais que geram cavacos curtos e ou quebradiços, como é o caso do ferro fundido cinzento. Se for utilizado fluido líquido, o pó resultante da usinagem destes materiais pode ser conduzido pelo líquido a partes muito importante da máquina, vindo a reduzir a vida útil do equipamento (Diniz *et al.*, 2001). Outra aplicação típica é na usinagem de cavidades de matrizes em material endurecido. Nestas operações não se utiliza fluido líquido para não refrigerar a peça e, assim, conseguir-se uma certa redução da resistência ao cisalhamento do cavaco. Porém, como se deseja retirar o cavaco da cavidade para que a fresa não o puxe de volta para a região de corte, o ar comprimido é a alternativa normalmente mais utilizada para esse fim.

2.4.2 - Fluidos aquosos

2.4.2.1 - Água

Apesar de ter sido o primeiro fluido de corte utilizado, e mesmo sendo acessível a baixo custo, não inflamável, atóxica, possuir baixa viscosidade, alta taxa de evaporação e alto calor específico, seu baixo poder umectante e lubrificante junto ao relevante poder de corrosão faz com que seja substituída por óleos puros (íntegrais) e óleos emulsionáveis, com o propósito de conciliar a refrigeração à lubrificação (Ferraresi, 1977; Novaski e Rios, 2000).

2.4.2.2 - Emulsões

Emulsões são os fluidos em que uma certa quantidade de óleo está distribuída na água (pode ser o inverso também). Óleo, seja de qualquer origem, em sua forma primária é incompatível com água e não é possível que se encontre "mistura" em qualquer proporção, pois têm natureza polar diferente (óleo é uma substância apolar e a água é fortemente polar). Sendo assim, agentes emulsionantes possibilitam que pequenas gotas de óleo fiquem uniformemente dispersas em água, formando emulsões estáveis de óleo em água (Novaski e Rios, 2000). Quanto maior o percentual de água na emulsão, maior seu poder de refrigeração, o que valida o inverso, deixando-o com maior capacidade de lubrificação. A proporção de óleo/água nesses compostos varia de 1:10 a 1:100. Essa porcentagem de óleo emulsionável é usualmente composta por aditivos emulsificadores, os quais são divididos em iônicos e não iônicos. Os emulsificadores iônicos dissociam-se em íons positivos e negativos quando dissolvidos em água e são descritos como aniônicos ou catônicos, dependendo da atividade da superfície. Os típicos emulsificadores aniônicos são sabões alcalinos de ácidos graxos ou naftênicos que são comumente usados em óleo de corte emulsionáveis (Scandiffio, 2000).

A composição dos óleos emulsionáveis é complexa e usualmente contém dois ou mais emulsificadores, agentes acopladores, estabilizadores, aditivos de lubricidade e de detergência. São usados ainda biocidas, que inibem o crescimento de bactérias e fungos, os quais devem ser

compatíveis com a pele humana e atóxicos (Micaroni, 2001). Esses emulsificadores são responsáveis pela redução da tensão superficial da água (Scandiffio, 2000) e assim formam uma película monomolecular relativamente estável na interface óleo/água (Diniz *et al.*, 2001), conforme figura 2.5, não permitindo que as gotículas individuais dispersas na água se aglutinem e se separem da emulsão como óleo puro, mantendo-se homogênea de coloração branca e leitosa.

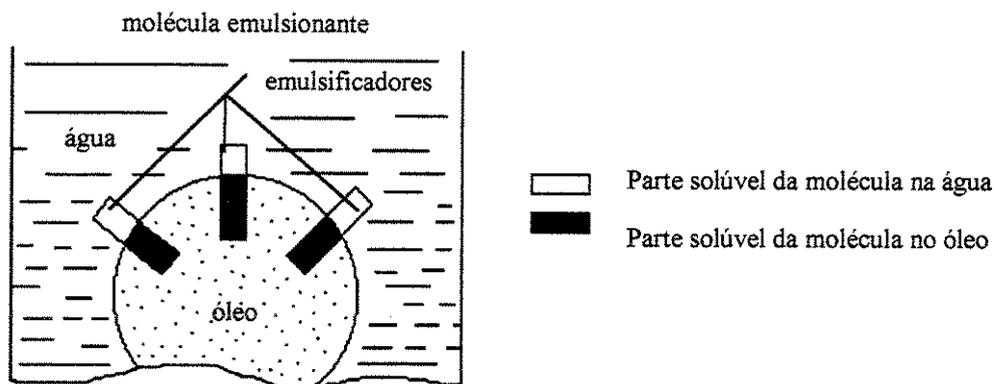


Figura 2.5: Emulsificador formando a ligação do óleo com a água (Scandiffio, 2000).

Em usinagem, os óleos emulsionáveis geralmente usados são do tipo óleo em água, sendo o óleo a fase interna e a água a fase externa. O percentual de óleo depende do serviço a ser realizado, mas, em geral varia de 3 a 20% (Micaroni, 2001). Visto serem as emulsões essencialmente água, para evitar seus efeitos nocivos, geralmente são adicionados aditivos anticorrosivos, como o nitrito de sódio, o que, juntamente com a presença de óleo mineral e emulsificadores, minimizam o baixo poder de umedecimento e a ação corrosiva apresentada pela água (Diniz *et al.*, 2001; Jain e Shukla, 1994). Em casos de usinagem com altos avanços e profundidade de corte, bem como quando se tem uma forte possibilidade de geração de aresta postiza de corte, indica-se o uso de emulsões com aditivos de extrema pressão e, estando com alta quantidade de aditivo, poderão até substituir os óleos minerais por terem efeitos altamente lubrificantes (Novaski e Rios, 2000).

A água utilizada para a emulsão deve ser de boa qualidade. Águas originárias das cidades, onde se encontram os fornecedores de fluidos de corte, de maneira geral são adequadas, pois passam por testes laboratoriais nos quais a qualidade dos insumos orgânicos, ácidos minerais e a sua própria dureza são avaliadas. O controle da dureza da água é fundamental, porque se a água

for extremamente dura³, pode reagir com os emulsificadores gerando espuma que flutua sobre a superfície da emulsão (El Baradie, 1996). Assim, a composição da emulsão deve ser balanceada para assegurar a estabilidade das propriedades originais até ser usada.

Os fluidos de corte emulsionáveis basicamente se dividem em dois tipos:

- O mineral ou convencional: é composto por óleo mineral de petróleo e aditivos solúveis que são: emulgadores, anticorrosivos, lubrificantes, aditivos de extrema pressão (E.P.), biocidas e anti-espumantes (Scandiffio, 2000).
- Os semi-sintéticos ou microemulsões: são compostos de óleo disperso em água, em que a quantidade de óleo é relativamente pequena. A existência de óleo de base mineral (forma emulsão e não solução) e óleo sintético (emulsão estável de alta durabilidade, bom acabamento e pouca espuma) faz com que se obtenha todas as características desejadas de um óleo de corte. O fluido semi-sintético quando composto por aditivos de extrema pressão (E.P.) permite que, mesmo com baixa quantidade de óleo, ele mantenha sua característica de lubrificação (Novaski e Rios, 2000; Scandiffio, 2000). Apresenta opção de uso de corante, mas em geral possui coloração translúcida tendendo a transparente e não tão leitosa (Diniz *et al.*, 2001). Mas a variável cor depende do tipo de óleo e concentração dos emulsificadores, pois enquanto o diâmetro das gotas de óleo dispersas em emulsão varia de 0,2 µm a 10 µm ou mais, nas microemulsões está na faixa de 0,01 µm a 0,2 µm. Quanto menor o diâmetro das gotas mais clara é a microemulsão. Sua concentração pode variar de 2 a 10% oferecendo boa resistência à corrosão, ao ataque microbiano, como também excelente estabilidade termodinâmica e boa capacidade de resfriamento (Mícaroni, 2000). Possui alto custo e apresentam problemas relacionados ao descarte, porém, pode-se separar a emulsão (água/óleo) através de quebra ácida (Novaski e Rios, 2000). Assim o custo do descarte é menor simplesmente por ser descartado em menor volume.

³ Qualidade das águas naturais com maior teor de cálcio e magnésio. Estes minerais podem reagir com os emulsificadores formando sabões insolúveis, podendo resultar em perda da capacidade de emulsificação e redução da vida útil da emulsão.

2.4.2.3 - Sintéticos ou soluções químicas

São soluções químicas ou fluidos sintéticos os compostos monofásicos de óleos dissolvidos completamente na água, os quais reagem quimicamente gerando fases únicas (Diniz *et al.*, 2001). Estes, também conhecidos como fluidos químicos, são totalmente isentos de óleo de qualquer origem, seja animal, vegetal ou mineral, não necessitando de alta concentração de emulgadores porque geralmente formam uma solução homogênea quando misturado à água, o que faz com que não seja possível separá-lo posteriormente como o semi-sintético (Novaski e Rios, 2000). Esses fluidos são compostos de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubricidade, biocidas, inibidores de corrosão entre outros adicionados a água (Diniz *et al.*, 2001). Os mesmos não oferecem condições para o crescimento de microorganismos, pois sua alta estabilidade⁴ microbiológica gera maior vida útil e reduz o número de troca de fluido em até 80% (Diniz *et al.*, 2001; Novaski e Rios, 2000). Algumas soluções sintéticas não permitem a incorporação dos óleos lubrificantes (*tramp oil*) que contaminam o tanque do fluido, pois têm a qualidade de promover a flotação de todo o material oleoso que tenha vazado do sistema de lubrificação da máquina, tornando possível a total remoção deste resíduo indesejável ao sistema.

Os óleos sintéticos mais comuns oferecem boa proteção à corrosão e boa capacidade de refrigeração. Apesar de ter maior custo inicial na forma concentrada, eles podem ser usados em diluições elevadas (20 a 100:1), o que gera maior vida útil que as emulsões. Porém, quando os fluidos sintéticos que contêm apenas inibidores de corrosão, e as propriedades de extrema pressão não necessárias, eles são chamados de refrigerantes químicos ou soluções verdadeiras e, logicamente, apresentam boas propriedades refrigerantes (Diniz *et al.*, 2001). Outra vantagem do fluido sintético se dá em ele apresentar baixa tensão superficial, pois assim tem a qualidade de chegar mais rápido até à área de corte e com maior poder de penetração. Também, ao atingir altas temperaturas os mesmos evaporam sem deixar resíduos (Bersenkowitsch, 2000), sendo assim facilmente removíveis das peças (Novaski e Rios, 2000). Novaski e Rios, ao fazer uso deste fluido em furacão em aço austenítico com broca helicoidal de metal duro revestida com *TiN*, identificou um menor desgaste de flanco da ferramenta se comparada ao fluido semi-sintético. Já

⁴Machado e Silva (1998) ressaltam que as soluções químicas permanecem estáveis até mesmo em água dura.

a figura 2.4 demonstra que o fluido sintético, naquele específico caso de torneamento, comportou-se em geral melhor do que as emulsões e do que o corte a seco, porém não foi superior ao semi-sintético (Diniz *et al.*, 2001). Na tabela 2.1, pode-se observar as características de cada tipo de fluido de corte, bem como a presença e concentração de aditivos (Scandiffio, 2000).

Tabela 2.1: Composição de aditivos nos tipos de óleos solúveis (Scandiffio, 2000).

Componentes	Base mineral	Semi-sintético	Sintético
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
Anticorrosivos	Média concentração	Alta concentração	Alta concentração
Biocidas	Sim	Sim	Sim
Anti-espumantes	Sim	Sim	Não
Água	Não	Sim	Sim
Aditivos de E.P.	Sim/Não	Sim/Não	Não

Esta tabela evidencia que o fluido de corte sintético é isento de óleo de qualquer origem, e que por se tratar de uma solução química, não exige anti-espumante e aditivos de extrema pressão.

2.4.3 - Óleos

Os óleos puros de corte, chamados também de óleos ou fluidos integrais (Diniz *et al.*, 2001; Ferraresi, 1977), não são misturados em água para uso na operação de usinagem. São classificados em ativos e inativos, sendo que nos ativos acrescentam-se 2% de enxofre com a finalidade de formar uma película antisoldante, o que fará suportar altas pressões e altas temperaturas na interface cavaco/ferramenta (Ferraresi, 1977). Recomenda-se usar o óleo puro

em operações nas quais o calor transformado por atrito é muito grande, principalmente em operações de desbastes pesados, pois quanto mais baixa sua viscosidade, maior seu poder de refrigeração, o que faz com que se necessite de um óleo que adira à ferramenta formando uma película de óxido reduzindo o coeficiente de atrito (Diniz *et al.*, 2001). Porém, isto pode gerar aumento nos custos de fabricação devido à dificuldade de remoção do mesmo da peça (Novaski e Rios, 2000).

Os fluidos integrais são compostos basicamente pelo óleo (veículo) e de aditivos. Os aditivos são compostos que podem ser adicionados aos óleos minerais, os quais alteram suas características físicas e químicas, a fim de adequá-las à aplicação desejada. Os aditivos comumente adicionados aos fluidos são (Sokovic e Mijanovic, 2001; Varadarajan *et al.*, 2002):

- agentes de extrema pressão (E.P.).
- agentes anti-espumantes.
- material anti-névoa.
- melhoradores de índice de viscosidade.
- aditivos anti-desgaste: formam um filme lubrificante.
- agentes antioxidantes: reduzem a formação de substâncias ácidas diminuindo a quantidade de oxigênio absorvido pelo óleo.

Agentes emulsificadores, biocidas⁵, substâncias que reduzem o odor e agentes corantes podem também ser adicionados aos fluidos.

2.4.3.1 - Óleos minerais puros

Com o advento da indústria petrolífera, vários tipos de óleos minerais estão disponíveis no mercado. A qualificação destes óleos depende da origem do petróleo cru e do processo de refinamento submetido (Shaw, 1968). Mediante o refinamento, obtêm-se os hidrocarbonetos,

cujas propriedades dependem do comprimento da cadeia, estrutura e grau de refinamento (Diniz *et al.*, 2001). Devem ser usados puros e em operações de usinagem em que se faz necessária uma maior lubrificação, como é o caso do brunimento, brochamento, rosqueamento e furação profunda; são também indicados para a usinagem de metais não ferrosos como o alumínio, magnésio, latão, bronze e ligas leves (Micaroni, 2001; Scandiffio, 2000). Possuem custo de aquisição inferior aos óleos graxos e compostos, além do que oferecem menor sujeição à oxidação (Diniz *et al.*, 1999; El Baradie, 1996), o que permite fazer com que os menos viscosos sejam utilizados em retificação. Sua deficiência de resfriamento se minimiza pela propriedade química impressa pela viscosidade, o que reduz o calor gerado por atrito na área de corte (Novaski e Rios, 2000). Deve-se ajustar sua viscosidade a sua capacidade de resfriamento de acordo com a aplicação.

Os óleos minerais dividem-se em três tipos principais, os quais terão a representação química de sua composição demonstrada pela figura 2.6 (Shaw, 1968).

- a) Parafínicos: constituídos por hidrocarbonetos saturados de cadeia aberta, reta ou ramificada. (figura 2.6 a)
- b) Naftênicos: também conhecidos como ciclo-parafinas, apresentam cadeias cíclicas saturadas. (figura 2.6 b)
- c) Aromáticos: predominância de cadeias aromáticas, ou seja, compostos cíclicos insaturados. (figura 2.6 c)

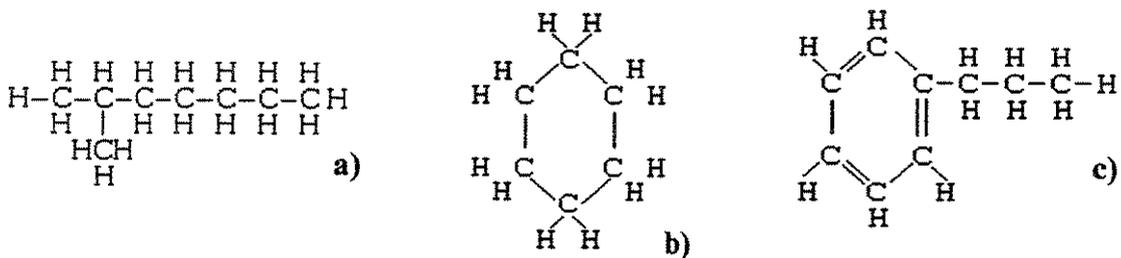


Figura 2.6: Composição química dos óleos minerais.

⁵ Possui a função de manter sob controle a proliferação das bactérias por meio de bactericida e dos fungos por meio de fungicida, pois o não monitoramento pode levar a perda da emulsão e até o entupimento do sistema, visto os fungos gerarem placas de cor branca e cinza (Sokovic e Mijanovic, 2001; Novaski e Rios, 2000).

Dependendo do tipo de cadeia predominante têm-se as características dos óleos minerais. Mas, no caso do fluido de corte integral, deve-se levar em consideração as características físicas e químicas, além da desejável inofensividade à pele das pessoas que têm contato. A tabela 2.2 apresenta uma comparação das principais características dos óleos parafínicos e naftênicos (Scandiffio, 2000).

Tabela 2.2: Comparação das principais características dos óleos parafínicos e naftênicos.

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

São considerados óleos naftênicos os que possuem mais de 70% de moléculas naftênicas. Esses óleos são isentos de cera e facilmente emulsionáveis, sendo utilizado na produção de óleos básicos com índice de viscosidade de baixo à médio. Seu uso tem sido reduzido em função de ter apresentado problemas à saúde humana (cadeias cíclicas saturadas). Já os óleos minerais de base aromática não são empregados na fabricação de fluidos de corte (cadeias cíclicas insaturadas) (Micaroni, 2001).

Os óleos minerais são a base da grande maioria dos fluidos de corte integrais (Monici *et al.*, 2001). Suas características são diretamente afetadas pelo tipo de material utilizado, pelos aditivos e oxidantes que podem ser acrescentados (Diniz *et al.*, 1999; Ferraresi, 1977), os quais devem se relacionar com o tipo de operação, velocidade de corte e calor transformado na usinagem, a fim de identificar a melhor escolha do óleo mineral (Scandiffio, 2000).

2.4.3.2 - Óleos graxos

São de origem animal ou vegetal e foram largamente utilizados como lubrificantes de corte. Possuem boa molhabilidade e capacidade de lubrificação, mas sua capacidade antisoldante é baixa (El Baradie, 1996). Em função do alto custo de aquisição e da dificuldade de obtenção, têm sido substituídos pelos óleos compostos ou pelos óleos de extrema pressão (E.P.). Os óleos graxos mais comuns são:

- óleo de tocinho: derivado de gordura animal.
- óleo de semente de colza: origem vegetal.
- óleo de semente de mamona: origem vegetal.
- óleo de baleia: origem animal.

São usados em operações de usinagem de ligas não ferrosas tenazes, nas quais o uso de óleos sulfurados⁶ produziria manchas indesejáveis (Ferraresi, 1977).

O óleo vegetal em particular apresenta propriedades interessantes como a fluidez, capacidade de reduzir o atrito e o desgaste da ferramenta de corte, ponto de fulgor elevado, boa resistência ao cisalhamento, inexistência de toxicidade e biodegradabilidade. Porém, em algumas formulações apresenta alta capacidade de oxidação e seu custo é cerca de cinco vezes superior aos óleos derivados de petróleo. Sob forma atomizada apresenta baixa propensão à formação de névoa e não reciclável (Blaser, 2003).

2.4.3.3 - Óleos compostos

Originados da mistura dos óleos minerais aos vegetais, são efetivamente usados na usinagem de alguns tipos de latão e cobre. Possuem a vantagem dos óleos graxos e têm maior estabilidade química, não se deterioram ou se tornam mais viscosos com o tempo, e sua viscosidade pode ser ajustada pelo óleo mineral (Scandiffio, 2000).

⁶ Óleo mineral com enxofre puro dissolvido.

2.4.3.4 - Óleos de extrema pressão

São óleos que possuem em sua composição elementos que fazem com que eles suportem elevadas pressões de trabalho sem evaporar da região de corte, característica necessária em operações geradoras de altas forças de corte. A função básica desses elementos é formar um composto na superfície de contato com uma resistência ao cisalhamento inferior àquela do metal em trabalho, evitando a soldagem e o aparecimento da aresta postiça de corte (Diniz *et al.*, 1999). A eficiência dos aditivos E.P. reduz à medida em que se aumentam as velocidades de corte. Em geral, os óleos de maior viscosidade ou com alta concentração de aditivos E.P. tendem aumentar o desgaste da ferramenta por ação corrosiva (Micaroni, 2001). Recomenda-se manter o óleo puro com aditivos E.P. em baixas temperaturas para assim reduzir o potencial de corrosão e de geração de espuma (El Baradie, 1996).

Dentre os tipos de agentes de E.P., destacam-se:

- Enxofre: muito 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 (Scandiffio, 2000).
- Cloro: adicionado ao óleo sob a forma de parafina clorada; é bastante eficiente em operações severas em aço, formando cloretos na superfície do metal. Atualmente seu uso é restrito por questões ambientais e de saúde humana, tem-se assim a tendência de substituição por aditivos à base de enxofre e cálcio (Diniz *et al.*, 2001; Sokovic e Mijanovic, 2001). El Baradie (1996) comenta que se o fluido contendo cloro não for mantido circulando a baixa temperatura, ele pode vir a manchar certas partes da máquina, devido à reação do cloro com as partes brilhantes do equipamento.
- Fósforo: apresenta-se sob várias formas, podendo vir combinado com ésteres, e também como ditiodifosfato de zinco, que age como antioxidante e principalmente como antidesgastante. 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 (Scandiffio, 2000).

- **Matéria graxa:** é constituída em sua maioria de ácidos graxos, que podem ser de origem animal ou vegetal e, graças a seus agrupamentos 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 (Scandiffio, 2000).

2.5 - Seleção dos fluidos de corte

Apesar de contempladas as características dos fluidos, deve-se ter a devida atenção à seleção de um fluido de corte que mais seja adequado à operação de usinagem. A versatilidade de produtos atualmente oferecidos pelo mercado é tão alta que faz com que se leve em consideração alguns critérios que visam auxiliar a escolha correta do fluido de corte, ou a que mais atenda às características técnicas, ambientais e de saúde das partes interessadas. A tarefa de selecionar o fluido de corte não é tão simples, para tal, deve-se conhecer tudo o que se deseja do produto/peça em pauta e qual o recurso de manufatura mais recomendável, para assim, conciliar as condições/recursos disponíveis dentro da organização aos fatores abaixo (El Baradie, 1996):

- **Compatibilidade:** aplicabilidade de um fluido de corte para uma diversidade de materiais de peça;
- **Usinabilidade:** capacidade do fluido de corte atuar na geração do produto desejado, sob a forma, dimensão e acabamento enquanto estende a vida da ferramenta de corte;
- **Aceitabilidade:** características avaliadas pelo operador no que diz respeito ao efeito do fluido de corte sobre a saúde, quanto ao odor, tato e aparência;
- **Descartabilidade:** avaliação voltada ao custo de descarte e a facilidade de manuseio, disposição e aceitação;
- **Inflamabilidade:** capacidade do fluido de corte se inflamar, o que não deve ocorrer;
- **Retorno financeiro:** influência sobre os custos de produção e a eficiência da organização como um todo;
- **Possuir alta condutividade térmica e alto calor específico;**
- **Deve ser de fácil reciclagem e não promover corrosão.**

Capítulo 3

Usinagem a Seco e com Mínima Quantidade de Fluido de Corte

3.1 - Introdução

A alta participação dos insumos usados na refrigeração/lubrificação das operações de usinagem nos custos do processo, a crescente conscientização ecológica e o rigor da legislação que incide na compra, manutenção e descarte dos mesmos, contribuíram para o aumento do questionamento sobre o uso desses recursos e alavancaram o desenvolvimento de técnicas destinadas a substituí-los ou minimizá-los (Schulz *et al.*, 2000). A tecnologia de usinagem a seco aliada à alta velocidade de corte, dispensa totalmente a necessidade de refrigeração ou, pelo menos, a usa em quantidade mínima. Assim, deixam de ser executadas as funções principais da refrigeração e lubrificação aplicadas no processo de usinagem: resfriamento, lubrificação, dissipação de calor e transporte dos cavacos (Schulz, 2000). Com o aumento da velocidade de corte naturalmente diminui o efeito lubrificante dos fluidos de corte. Por outro lado, a redução do atrito na interface cavaco/ferramenta diminui as forças de corte e a temperatura da ferramenta, reduzindo a adesão ou soldagem local (Micaroni, 2001).

Com este raciocínio, para assegurar a confiabilidade do processo, ou seja, manter os ganhos obtidos na utilização dos fluidos de corte (maior vida da ferramenta e melhor qualidade de peça),

deve-se pesquisar novas abordagens compatíveis com a operação, com o usuário e com o meio ambiente (Novaski e Rios, 2000).

3.2 - Usinagem a seco

Relacionada à questão operacional, tratando-se de condições mais severas de trabalho, em que a ferramenta é submetida a uma maior carga térmica, o corte a seco acarreta em níveis mais altos de desgaste por adesão, abrasão, difusão e oxidação, reduzindo em geral a vida da ferramenta em função das dificuldades decorrentes da falta de refrigeração e lubrificação (Scandiffio, 2000; Junior *et al.*, 2001).

O corte a seco propicia temperaturas elevadas na interface cavaco/ferramenta. Segundo Schulz *et al.* (2000) atinge, na maioria das vezes, valores acima de 600 °C, o que pode afetar a formação do cavaco, pois estudos comprovaram que o cavaco em torneamento de aço ABNT 1045 detém formas diferenciadas dependendo do fluido de corte utilizado (Scandiffio, 2000).

Com a falta de resfriamento, manifesta-se o aumento da temperatura acelerando o desgaste da ferramenta e, como consequência, tensões internas na peça, além de possíveis desvios dimensionais e de forma, efeitos de difusão da camada, fusão dos cavacos e aderência de cavacos em ferramentas e peças (Schulz, 2000; Filho *et al.*, 2001). Também, com a ausência da facilidade da ação mecânica de expulsão dos cavacos pelo fluido, pode causar obstrução no espaço de saída dos mesmos e assim gerar a quebra da ferramenta, fato comum em furação, e danos à superfície usinada, além da possibilidade de haver o recorte de cavacos já formados (Diniz *et al.*, 1999; Junior *et al.*, 2001).

O aquecimento dos componentes da máquina pode provocar erros de precisão dimensional devido à dilatação térmica. Portanto, deve-se assegurar que os cavacos quentes não fiquem depositados em grandes quantidades sobre os componentes da máquina. As soluções possíveis e acessíveis podem ser a aspiração dos cavacos ou sopro por meio de ar comprimido (Schulz, 2000; Junior *et al.*, 2001).

Steve Colson, da organização fabricante de máquinas Makino, observa, por exemplo, que os dispositivos de um centro de usinagem para movimentar cavacos devem ser capazes de retirar eficientemente os cavacos secos da área de usinagem sem o fluxo do fluido. As proteções, vedações e coberturas telescópicas de máquinas podem precisar ser alteradas, para proteger os fusos de esferas recirculantes e as guias do efeito dos cavacos quentes e secos, nocivos ao equipamento (Mason, 2001). Esses cavacos, por se encontrarem livres de resíduos e estarem secos, significam que estão prontos para a venda e posterior reciclagem, ao contrário do cavaco molhado, o qual requer processamento e filtração (Junior *et al.*, 2001).

O primeiro passo em busca da conciliação entre as questões técnicas, o impacto ambiental e a saúde humana, está na adequação dos parâmetros de corte e dos conceitos de equipamentos afetados pela usinagem a seco, e no dinâmico desenvolvimento das ferramentas de corte (Schulz, *et al.*, 2000).

Porém, o corte a seco pode apresentar resultados positivos como a redução do choque térmico gerado pelo fluido, o principal responsável pelo surgimento das trincas térmicas e dos lascamentos nas ferramentas de corte, principalmente em usinagem de corte interrompido, característica natural do fresamento (Mason, 2001; Junior *et al.*, 2001; Scandiffio, 2000).

Diniz *et al.* (1999), relatam que a geração de calor no corte dos materiais a seco, tem como consequência o amolecimento da região de corte, o que favorece a usinagem. Mas, se tratando do corte de materiais dúcteis com ferramentas de metal duro ou aço rápido, o aumento da temperatura será prejudicial, pois o material base receberá uma maior quantidade de calor sem que haja uma redução significativa das forças.

Usinagem com ferramentas cerâmicas normalmente deve ser feita a seco, pois o fluido pode promover choques térmicos com eventual fratura das ferramentas. Da mesma forma, a usinagem de materiais endurecidos é outro clássico exemplo em que a aplicação de um fluido pode prejudicar muito o rendimento do processo. O fluido de corte quando aplicado no processo de usinagem, deveria funcionar como refrigerante apenas da ferramenta de corte. Mas o método de aplicação, normalmente sobre/cabeça, faz com que o fluido atinja toda a região de formação do

cavaco, refrigerando também a peça⁷. Assim, o efeito de amolecimento oferecido pelo calor é prejudicado, fazendo com que o material exija maior quantidade de energia para cisalhar e formar o cavaco, promovendo maiores forças e temperaturas na interface (Diniz e Machado, 2000).

Em fresamento de materiais endurecidos, usando ferramentas de metal duro e fluido de corte, têm-se, como principal desgaste, os sulcos de origem térmica, denominados por Ferraresi (1997) como sendo "sulcos distribuídos em forma de pente", os quais são originados pela flutuação cíclica da temperatura, devido à natureza do processo de se desenvolverem ao longo da aresta (Diniz e Machado, 2000).

A alteração do processo de trabalho com refrigeração em abundância para o corte a seco, requer ajustes em suas condições de usinagem. Em geral, primeiramente se reduz a velocidade de corte, isto pelo fato dela ser a variável que mais influência na vida da ferramenta. Assim, para se manter o mesmo volume de cavaco removido na unidade de tempo, deve-se aumentar o avanço na mesma proporção da redução da velocidade de corte, permitindo que o volume de cavaco na unidade de tempo seja equiparável, ocorrendo assim, aproximadamente, o mesmo com o calor gerado na unidade de tempo, porém com maior área da ferramenta para receber este calor. Com o aumento do avanço, causa-se, automaticamente, a piora do acabamento superficial. Em operações de acabamento recomenda-se aumentar o raio da ponta da ferramenta para manter a rugosidade da peça dentro da conformidade aceitável, como a anterior (Diniz e Micaroni, 2002).

Dentre os materiais conhecidos, o ferro fundido foi o primeiro material a ser usinado a seco em operações de torneamento, mas atualmente se pode usinar a seco materiais mais duros. Na figura 3.1, pode-se ver a possibilidade de mudança do torneamento com fluido de corte para o torneamento a seco.

⁷ Em alguns casos se faz necessário a refrigeração da peça (peças com paredes finas).

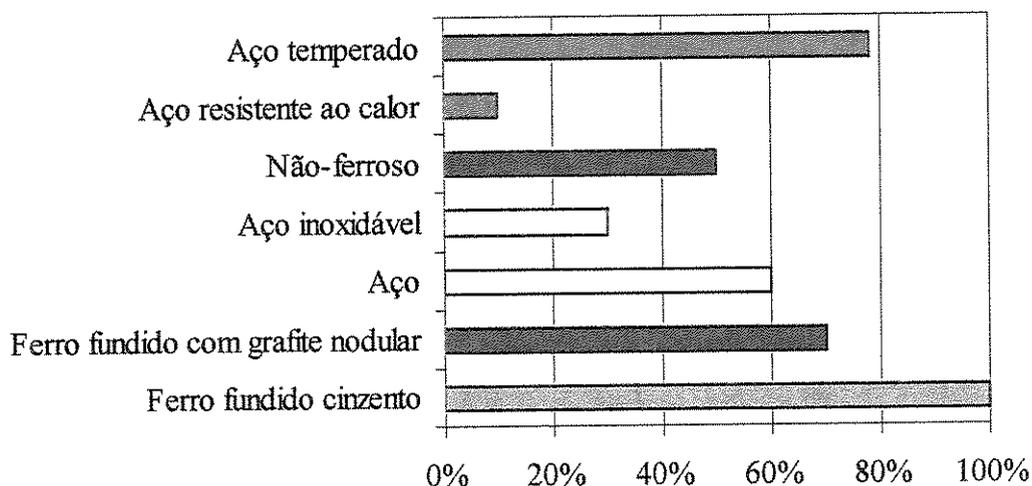


Figura 3.1: Possibilidade de mudança de usinagem úmida para usinagem a seco em torneamento (Momper, 2000).

Nota-se que o material que possui o segundo maior percentual de possibilidade de aplicação da usinagem a seco é o aço temperado. Um exemplo de sucesso de implantação de corte a seco foi obtido pela Ford, que passou a torneiar a seco os eixos de entrada para caixas de transmissão em aço-liga cementado SAE 5120 (130-180 HB). Foram introduzidas novas geometrias de pastilha, os parâmetros de corte foram alterados e retirados os coletores convencionais de cavaco. Com isso, conseguiram maior desempenho e consequentemente redução dos custos de usinagem da ordem de U\$\$ 11.460,00 por ano, na usinagem de 2.900 unidades/dia (Mason, 2001).

A mudança do ambiente úmido para seco não precisa reduzir a eficiência quando as aplicações são implementadas corretamente com a máquina certa e material adequado da ferramenta de corte (Mason, 2001).

3.2.1 - Ferramentas de corte para a usinagem a seco

As exigências sobre as ferramentas no corte a seco são causadas principalmente pela elevação da temperatura no processo. Portanto, o material da ferramenta a ser selecionado para a operação de corte a seco é tão importante quanto a geometria da ferramenta escolhida, pois o

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

mesmo deve possuir estabilidade química e alta resistência, e dureza a temperatura ambiente e a quente (Diniz *et al.*, 2001), alta resistência a ruptura, a compressão, ao choque térmico e às reações químicas (Filho *et al.*, 2001). Assim, este segmento desperta o desenvolvimento de ferramentas com materiais refratários que possam suportar altas temperaturas, como as cerâmicas e os *cermets*, e o uso de ferramentas fabricadas com materiais ultraduros como o diamante policristalino (*PCD*) e o nitreto cúbico de boro (*CBN*) (Sreejith e Ngoi, 2000; Urbanski *et al.*, 2000).

Materiais de ferramentas como o aço rápido e o metal duro, têm baixa dureza e não são recomendados quando a dureza da peça excede 50 HRC (Urbanski, *et al.*, 2000; Feistritz, 2001). Mas, atualmente se aplica revestimentos como o *TiNAl* sobre o metal duro de micro grão, o qual se comporta muito bem em fresamento de aço endurecido. O *PCD* tem quase todos os requisitos, mas em temperaturas acima de 800 °C reage quimicamente com o ferro perdendo o gume cortante (Filho *et al.*, 2001; Diniz *et al.*, 2001). Assim, é recomendado para a usinagem de alumínio, materiais sintéticos e outros metais não-ferrosos (Feistritz, 2001). O *PCD* possui rápida condução de calor e permite ser utilizado como revestimento em outras ferramentas de corte (Sreejith e Ngoi, 2000).

Dos materiais para ferramentas, o nitreto cúbico de boro policristalino (*PCBN*) pode ser utilizado na usinagem de aços endurecidos (mesmo em condições severas - corte interrompido), aços-ferramenta, aços rápidos, ligas ferrosas resistentes a altas temperaturas à base de cobalto, metais duros e revestimentos duros com altas percentagens de carbetos de tungstênio. De uma maneira geral, o *PCBN* é aplicado nos casos em que o diamante policristalino não pode ser usado e o metal duro não possui as propriedades adequadas para realizar a tarefa. Existem diferentes tipos de *PCBN* no mercado e cada fabricante usa diferentes materiais e quantidades de aglomerantes, diferentes tamanhos e distribuição das partículas, dividindo-os em categorias de acordo com a aplicação. Em operações de desbaste o *PCBN* normalmente utilizado possui maior concentração de nitreto cúbico de boro e menor teor cerâmico. Já em operações de acabamento, utiliza-se *PCBN* com uma fase cerâmica adicionada, para se aumentar a estabilidade química da ferramenta (Filho *et al.*, 2001).

As ferramentas de cerâmica, possuem maior resistência à difusão que o *CBN*, boa dureza a quente e alta resistência à abrasão, mas, em função da sua baixa resistência ao choque térmico e alta fragilidade, não são aplicadas em operações que fazem uso de fluido de corte e nem em trabalhos severos (Filho *et al.*, 2001; Diniz *et al.*, 2001).

Para velocidades de corte abaixo de 1000 m/min, *cermets* e metais duros proporcionam bons resultados, pois acima disso apresentam falha prematura. O *CBN* pode ser utilizado em velocidades de corte acima de 4000 m/min, em geral com baixas taxas de avanço. Sua aplicação é vantajosa em operações de acabamento, principalmente no caso de moldes e matrizes de grandes dimensões (Finzer, 1997).

Na esfera de desenvolvimento acelerado de ferramentas para o setor de fresamento em alta velocidade de corte, destacam-se as ferramentas de metal duro inteiriças com ou sem refrigeração interna, as quais são produzidas com batimento e tolerâncias menores que 5 μm , geralmente de duas a seis arestas cortantes (Urbanski *et al.*, 2000). Essas ferramentas se destacam por possuírem geometrias robustas (pequena altura de corte e maior diâmetro de haste), a fim de serem capazes de reduzir o potencial de deflexão existente em altas relações⁸ de fixação no fresamento em alta velocidade de corte, em que se trabalha com baixas profundidades de corte (avanço axial) e pequenos passos laterais (avanço radial), porém, muitas vezes, com altas relações de fixação.

Neves (2002) ilustrou os testes executados por Dewes (1999), em que apresenta o resultado de testes efetuados com 10 diferentes fornecedores de ferramentas de metal duro micro grão. Avaliaram-se diversas fresas de diâmetro de 6 mm de ponta esférica, todas fixadas nas mesmas condições e com o mesmo batimento. As ferramentas testadas eram revestidas com *TiN*, *TiCN*, *TiNAl* e *TiN/AlN*; também foram testadas ferramentas sem revestimento. O material da peça era o aço AISI H13 com dureza de 49 a 52 HRc e usou-se ar comprimido como fluido refrigerante. A velocidade de corte do ensaio foi de 200 m/min o que corresponde à rotação de 19195 rpm e o avanço por dente foi de 0,1 mm. Os valores de a_p e a_e eram idênticos a 0,5 mm e o sentido de corte foi o concordante. As fresas foram montadas numa máquina *HSC* de três eixos de forma que o ângulo da superfície usinada em relação ao centro da fresa era de 90° e o critério de fim de

vida foi desgaste de flanco de 0,3 mm. Notou-se que os valores de vida mais longos ocorreram para o revestimento de *TiNAl* e que substanciais diferenças na vida da ferramenta foram obtidas de diferentes produtos comerciais. Essas diferenças foram da ordem de até 300% entre produtos de mesmo revestimento e substrato. Isto vem comprovar o que foi identificado por Schulz *et al.* (2000) em testes, que verificaram que as razões para este comportamento diferente foram a qualidade da adesão da camada propriamente dita, cujas características variam muito de fabricante para fabricante e advém dos diversos processos de revestimentos, do pré-condicionamento, da composição química da camada e também da grande influência do acabamento superficial da ferramenta antes e pós cobertura.

O mais importante dos desenvolvimentos se volta à obtenção de materiais para ferramentas que possuam alta dureza e tenacidade. No caso do metal duro, *WC-Co*, têm-se atualmente diversas classes, as quais são diferenciadas pelo tamanho dos grãos: fino (0,8-1,3 μm), sub-micro (0,5-0,8 μm), ultra fino (0,2-0,5 μm) e nano (<0,2 μm). A medida que se diminui o tamanho de grão do metal duro aumentam-se a dureza, a resistência ao desgaste e a tenacidade do material (Dreyer *et al.*, 1999; Sreejith e Ngoi, 2000).

O substrato das ferramentas de metal duro para corte a seco ou com a técnica MQF deve ser produzido por um pó ultrafino, com tamanho do grão menor que 0,3 μm , afim de aliar alto nível de tenacidade a uma vantajosa resistência térmica, possibilitando assim a obtenção de arestas de corte mais afiadas e com grande ângulos de saída e de folga. Estas características resultam em temperaturas e forças de corte sensivelmente reduzidas, se comparadas com as ferramentas de metal duro tradicionais (Cselle, 1995; Hummel, 2000).

As questões técnicas e econômicas fazem com que sejam usadas, ou não, ferramentas descartáveis, geralmente as intercambiáveis⁹. De um lado, a precisão necessária da operação (grau de acabamento e diâmetro da fresa), o que muitas vezes não é oferecida pelo inserto intercambiável, e por outro lado, o alto custo de aquisição das ferramentas de metal duro

⁸ Relação entre o comprimento em balanço e o diâmetro da fresa.

⁹ Ferramentas que possuem sistema de troca-rápida, compostas de suportes de fixação e insertos.

inteiriça, principalmente de diâmetros acima de 16 mm, são pontos de estudo para a viabilização da aquisição (Cselle, 2001).

Associando a seleção correta do material da ferramenta de corte, a otimização da geometria¹⁰/microgeometria da aresta da ferramenta ao revestimento sobre o substrato das ferramentas, obtêm-se resultados particularmente promissores para a usinagem a seco (Schulz, et al., 2000). Mas em certos materiais onde não se pode usinar a seco devido ao potencial de adesão do cavaco à ferramenta, ligas de alumínio por exemplo, uma quantidade mínima de lubrificação freqüentemente fornece a solução (Schulz, 2000).

3.2.1.1 - Coberturas para ferramentas destinadas a usinagem a seco

Essas coberturas, revestimentos conhecidos por serem classificados como endurecedores ou lubrificantes sólidos, de acordo com suas propriedades atuam reduzindo o atrito, a adesão e minimizando as perdas decorrentes da supressão das funções principais dos fluidos de corte. A camada de cobertura permite que ocorra a separação entre a ferramenta e o cavaco, pois atua como isolante térmico, não permitindo que o calor penetre indiscriminadamente no substrato. O coeficiente de atrito, que surge na interface recém-criada entre esse par de materiais, é muito pequeno e atua no sentido de reduzir as forças decorrentes da fricção. Dessa forma, também se reduz a geração de calor na zona de contato (Schulz *et al.*, 2000).

Todo revestimento subsequente de uma ferramenta pelo processo de deposição química a vapor, "*Chemical Vapour Deposition*", o *CVD*, e também pela deposição física a vapor, "*Physical Vapour Deposition*", o *PVD*, provoca um aumento do raio da aresta de corte, porém o *PVD* em menor intensidade. Isso significa que o perigo da formação de rebarbas juntamente à manifestação de desgaste e o aumento da força de corte, é proporcional ao aumento do arredondamento do canto de corte. Para evitar isso, as ferramentas devem ser muito bem afiadas antes do revestimento, o que significa que haverá necessidade de usar estruturas de grãos de

¹⁰ Deve-se avaliar a existência de quebra-cavacos para um melhor controle e descarga do cavaco e de ângulos positivos de maneira a reduzir a energia de corte não contribuindo para o desgaste prematuro da aresta (Sreejith e Ngoi, 2000; Scandiffio, 2000).

metal duro ultrafino, o que beneficia a usinagem por ter sua microgeometria melhor definida (Hummel *et al.*, 2001).

A tecnologia *CVD* tem avançado e atualmente permite a aplicação de multicamadas de revestimento de maneira combinada, como *TiC*, *TiN*, *TiCN* e *Al₂O₃* (Prengel *et al.*, 1998). O número de camadas pode ultrapassar dez com camadas individuais menores até que 2 μm (Dreyer *et al.*, 1999). As multicamadas depositadas sobre os substratos das ferramentas de metal duro aumentam a dureza, a tenacidade e melhoram a resistência ao desgaste no corte a seco em relação às camadas tradicionais.

Inicialmente, este processo de aplicação utilizava temperaturas na ordem de 900 a 1100°C, justificando sua denominação de *HT-CVD* (*High Temperature* - Alta Temperatura). Sendo assim, podia gerar uma fase quebradiça na interface substrato/cobertura reduzindo ainda sua tenacidade. Após desenvolvimentos, foi criada a técnica chamada de *MT-CVD* (*Moderate Temperature* - Temperatura Moderada), que permitiu a redução da temperatura do processo de recobrimento para a ordem de 750 a 900 °C (Prengel *et al.*, 1998).

Complexas coberturas de *CVD* realçam as propriedades de dureza do revestimento de *TiCN* pelo processo *MT-CVD*, com a excelente resistência a alta temperatura do óxido de alumínio (*Al₂O₃*). Esta combinação de revestimentos tem obtido sucesso tanto em fresamento como em torneamento, particularmente pelo fato do *Al₂O₃* oferecer excelentes propriedades a alta temperatura, incluindo boa resistência ao desgaste por difusão, alta dureza à quente e superior resistência à oxidação (Prengel *et al.*, 1998). Revestimentos cerâmicos a base de *Al₂O₃* geralmente são usados em combinação com outros tipos de camadas. Isto vale igualmente para os revestimentos de materiais duros, como por exemplo as camadas de diamante policristalino (*PCD*) e nitreto cúbico de boro (*CBN*) (Schulz *et al.*, 2000).

O diamante é o material mais duro de que se tem conhecimento e possui coeficientes de atrito muito pequenos e parece ser o material ideal para camadas protetivas contra o desgaste de diversos tipos. Como o *PCD* é constituído de aproximadamente 5% de metal de liga mole, a sua dureza não chega à dureza do diamante puro. Já a diferença de dureza entre o diamante natural e

o diamante aplicado pelo processo *CVD* é que as camadas de diamante *CVD* são compostas de muitos cristais com dimensões microscópicas, com diâmetros de 1 a 20 μm , sendo esses cristais bem menos resistentes às deformações, ou seja, têm menos dureza do que um cristal de diamante compacto. Por outro lado, um cristal de diamante pode apresentar dureza diferenciada conforme a direção cristalográfica e a presença de impurezas (Feistritz, 2001).

Os revestimentos de diamante ainda são caros e geralmente processados em lotes. O *DLC* (*Diamond Like Carbon* - Diamante com Propriedades de Carbono), o *HC* (*Hard Carbon* - Carbono de Alta Dureza) e o diamante como coberturas nas ferramentas de metal duro têm um grande potencial para o corte a seco, principalmente no fresamento. Contudo, a baixa estabilidade destes revestimentos no corte de materiais ferrosos sob altas temperaturas ainda é um obstáculo para aplicação em maior escala. A principal diferença entre eles está na dureza: 2.500, 5.000-8.000 e 10.000 Hv, respectivamente (Micaroni, 2001).

Dentre os materiais utilizados para recobrir o metal duro, o que mais proporciona 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 *CVD*. O mesmo é atualmente recomendado como um revestimento de uso geral para furação, assim como o carbonitreto de titânio (*TiCN*) é indicado como uma ótima alternativa para a usinagem de aços de alta liga (Diniz *et al.*, 1999).

O processo *PVD*, introduzido em ferramentas de aço rápido na década de 80, é conhecido por ser um processo que possui baixa temperatura de aplicação, a qual gira em torno de 300 a 600°C. Este processo permite manter a superfície que sofreu a aplicação relativamente lisa (rugosidade inferior a aplicação *CVD*) por possuir baixa granulometria, não promove geração de camadas quebradiças, consegue uma maior agudez às arestas de corte e tensões internas favoráveis no material base (Prengel *et al.*, 1998). As arestas revestidas estando mais pronunciadas e agudas, facilitam a usinagem de materiais com baixo teor de carbono em operações de fresamento, rosqueamento e furação.

A aplicação da cobertura de *TiN* pelo processo *PVD*, vem atualmente sendo usada em ferramentas de metal duro e outros substratos, como é o caso do *cermet*, até porque o mesmo é

sensível a altas temperaturas de aplicação. O crescimento da tecnologia *PVD* tem originado posteriormente a comercialização de composições como *TiCN* (Carbonitreto de Titânio) e *TiAlN* (Nitreto de Titânio e Alumínio), e *TiZrN* (Nitreto de Titânio e Zircônio) e *CrN* (Carbonitreto de Cromo) (Prengel *et al.*, 1998).

O material utilizado para recobrir o metal duro que tem menor condutividade térmica é o AL_2O_3 (Óxido de alumínio). Com ele, 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, certamente ocorreria em larga escala, dadas as altas temperaturas envolvidas na operação (Diniz *et al.*, 1999).

Aços altamente temperados exigem muito da dureza e da tenacidade das ferramentas utilizadas. Para a usinagem de materiais endurecidos (>58 HRC), os carbetsos de granulação mais fina revestidos de nitreto de titânio e alumínio (*TiAlN*), provaram ser especialmente adequados (Schulz, 2000).

A elevada resistência térmica do *TiAlN* faz deste revestimento adequado para usinagem a seco e usinagem a alta velocidade de corte, porque em trabalhos sob este regime, os usuários desejam trabalhar sem o uso de líquido refrigerante em abundância para proteger o ambiente e reduzir custos. Com ambas tecnologias desenvolve-se muito mais calor que em condições normais, o que induz o material da ferramenta de corte a possuir elevada dureza aliada ao revestimento, a fim de haver boa isolamento entre os cavacos e o corpo da ferramenta. Entre todos os revestimentos a base de titânio, a melhor isolamento térmica é dada pelo revestimento de *TiAlN*, que confere à ferramenta um relevante aumento na vida (Cselle *et al.*, 1995). Esse revestimento possui alta resistência e alta estabilidade térmica, além de condutividade térmica muito baixa (Hummel, 2000).

As camadas lubrificantes possuem como base uma camada de material duro, sobre a qual é depositada uma camada de material macio, como o MoS_2 (Bissulfeto de Molibdênio) ou uma

segunda camada de material duro com propriedades lubrificantes (por exemplo, carbono contendo metal - WC/C). Esses últimos combinam baixos valores de coeficiente de atrito ($\mu=0,2$) com alta dureza, e são usados parcialmente combinados (revestimentos constituídos de várias camadas) (Schulz *et al.*, 2000).

A camada *TiNAl* pode ser combinada com uma cobertura macia de *MoS₂* formando as multicamadas com alta resistência ao calor e assim adquirindo baixo coeficiente de fricção. O revestimento de *MoS₂* pode ser usado para reduzir a formação de aresta postiça de corte e facilitar a evacuação dos cavacos em processos fechados. As coberturas *TiN*, *TiCN* e *TiNAl* são mais resistentes ao desgaste, possuindo, no entanto, maior coeficiente de atrito que o revestimento *MoS₂* e necessitando quase sempre de um fluido lubrificante durante a usinagem (Micaroni, 2001).

O revestimento *WC/C* pelo processo *PVD* é um produto que possui dureza igual à do *TiCN* ou *TiNAl*, mas o seu coeficiente de atrito com o aço seco é mais baixo: 0,2 contra 0,3 até 0,6 para o *TiCN* e 0,4 até 0,55 para o *TiNAl*. Possui mesma resistência ao calor que o *TiNAl*, com ambos trabalhando em temperaturas até cerca de 800 °C (Mason, 2001).

Investigações sobre a influência da cobertura no desgaste das ferramentas de *cermet* mostraram que somente se consegue explorar o potencial da *cermet* com a presença dessas coberturas resistentes ao desgaste. O processo geralmente utilizado é o *PVD* e o *PCVD*, "*Plasma Chemical Vapour Deposition*", porém não demonstra vantagem quando aplicada à monocamada fina, ao passo que a aplicação de multicamadas resulta em melhor desempenho. O desenvolvimento de *MT-CVD*, em aplicações de finas multicamadas, tem apresentado boa adesão e sucesso na aplicação (Dreyer *et al.*, 1999), como demonstrado pela figura 3.2 através do resultado dos testes realizados em torneamento de aço CK45N utilizando insertos de *cermet*.

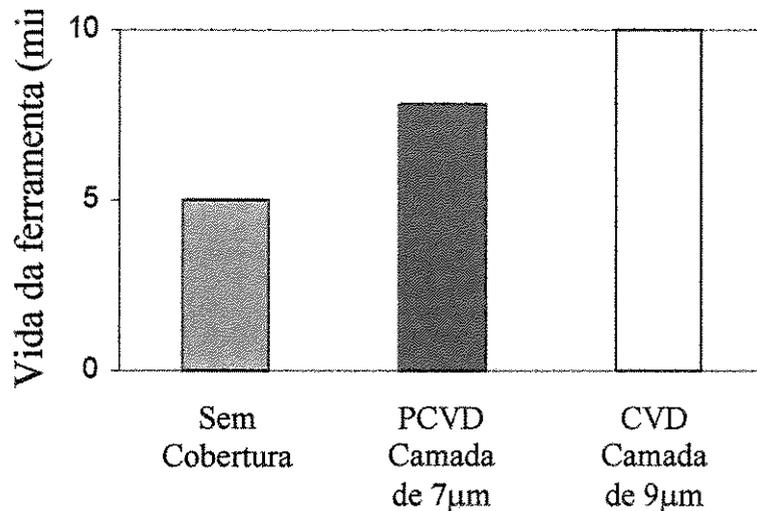


Figura 3.2: Avaliação de cermet em torneamento de acabamento do material CK45N, usando PCVD, CVD e sem cobertura (Dreyer et al., 1999).

Estes testes foram feitos em operação de acabamento a seco, com $v_c = 400\text{m/min}$, $a_p = 2,0\text{ mm}$ e $f = 0,2\text{ mm}$. Pode-se notar que a vida da ferramenta coberta pelo método *MT-CVD* atingiu o dobro em relação ao uso de *cermet* sem cobertura.

Deve haver uma adequação da espessura da cobertura, pois se a mesma for muito espessa, terá grande tendência de perder a função principal de sua composição. Em contrapartida, se for muito fina, os efeitos da usinagem tendem a se manifestar mais rapidamente no substrato. Assim, os modernos processos de *CVD* conseguem fazer deposições da ordem de 5 a 20 μm de espessura, o processo de *PVD* atinge menos de 5 μm e a cobertura de diamante geralmente apresenta espessura entre 20 e 40 μm (Prengel et al., 1998).

Atualmente, mais de 70% das ferramentas de metal duro, são revestidas pelo processo *CVD*, *PVD* ou pela combinação de ambos. As coberturas de metal duro mais largamente difundidas são TiC e Al_2O_3 (*CVD*), TiAl (*PVD*), TiN e TiCN (*CVD* e *PVD*) e os processos *CVD* para os revestimentos em diamante. Além dessas coberturas, o mercado oferece muitas outras opções, das quais algumas se encontram com suas propriedades físicas descritas na tabela 3.1.

Tabela 3.1: Propriedade física das coberturas para ferramentas de corte (Urbanski *et al.*, 2000).

Coberturas	Microdureza (Hv)	Resistência a oxidação (°C)	Coefficiente de fricção
TiN	1930-2200	600	0,4 - 0,5
CrN	1650-2150	700	0,5
TiCN	2700-3000	400	0,3
TiAlN	3000-3500	800	0,7
TiN/AlN	4000	950	-
TiAlCN	3200	600	-
AlTiN	2700	840	0,42

3.3 - Usinagem com mínima quantidade de fluido (MQF)

As limitações do corte a seco podem ser reduzidas com a técnica da mínima quantidade de fluido, em que uma pequena vazão de óleo é pulverizada num fluxo de ar comprimido. Essa técnica se dá quando o volume de fluido aplicado não ultrapassa 60 ml/h (Diniz *et. al.*, 2001). Nesta tecnologia, a função de lubrificante é assegurada pelo óleo e a de refrigeração principalmente pelo ar comprimido. Essa pequena quantidade de fluido pode ser suficiente para reduzir o atrito no corte e diminuir a tendência à aderência em materiais com tais características (da Silva *et al.*, 2001).

A tecnologia de mínima quantidade de fluido é relativamente nova entre as técnicas de fabricação comercialmente utilizadas. A sua integração às máquinas existentes é relativamente fácil, pois os pré-requisitos não são muito difíceis de serem atendidos. As duas variantes desta tecnologia, a interna e a externa, funcionam segundo o princípio de Venturi. O jato de ar desprende o óleo, convertendo-o em gotículas quase "sem massa", o qual é aplicado diretamente na região de corte (Cselle, 2001).

Nos casos ideais, os dispositivos se encontram ligados ao comando da máquina, o que permite uso da concentração correta de óleo no fluxo de ar para a usinagem correspondente. A

alimentação pode ser interrompida para os tempos mortos, o que leva a um menor consumo de ar comprimido e de material lubrificante. Nesses sistemas geralmente são usados materiais ecologicamente corretos, a exemplo de álcool graxo, éster ou óleos naturais. Esses meios especiais devem evitar riscos para a saúde, principalmente para os pulmões, por causa dos aerossóis (Dörr e Sahm, 2000).

Comparativamente com a refrigeração plena, esta técnica não apresenta as perdas, emissões e prejuízo ao ambiente, além de outras vantagens substanciais (Cselle, 2001; Mason, 2001):

- efeitos de lubrificação melhores do que com emulsão;
- é evitado o choque térmico;
- os cavacos são liberados secos, evitando custos de descarte e recuperação;
- o aerossol só fica particulado na alimentação em circuito fechado, e é absorvido por exaustores;
- pequena quantidade de óleo, não havendo custos com descarte e manutenção.

Porém, existem vários questionamentos a respeito deste assunto, pois ao mesmo tempo em que se promovem pelo rótulo ecológico, alguns pontos devem ser mais profundamente discutidos, tais como (Diniz *et al.*, 2001):

- Poluição ambiental: levantam-se no ambiente local muitas partículas de óleo, o que exige cuidados especiais antes da implantação do sistema. Assim, se requer máquinas enclausuradas e com bom sistema de exaustão;
- Consumo: mesmo com baixos níveis de vazão considera-se o fluido sem retorno;
- Barulho: as linhas de ar comprimido, neste processo, geram alto nível de ruído, o que pode ser prejudicial à saúde e ao ambiente comunicativo.

O fato de possuir pontos negativos facilmente superados, faz com que o mercado alemão absorva anualmente cerca de 10.000 aparelhos e máquinas com o uso desta técnica, apresentando tendência de crescimento graças à viabilidade do sistema. O prognóstico pode parecer ousado, mas dentro de poucos anos a utilização da mínima quantidade de fluido substituirá a refrigeração

abundante dos novos centros de usinagem em 5% na Alemanha (Cselle, 2001), podendo atingir uma redução superior a 20% nos próximos 15 anos (Mang, 2000).

O sistema MQF é composto de compressor, regulador de pressão, rotômetro, dosador e bico aspersor. Ar e óleo são conduzidos separadamente até o bico e podem ser ajustados independentemente. O posicionamento do bico aspersor durante a usinagem pode afetar significativamente a capacidade de refrigeração e lubrificação, tendo como consequência o desgaste prematuro da ferramenta de corte (Junior *et al.*, 2001). Em centros de usinagem, onde constantemente se usam ferramentas de diversas alturas, quando se trabalha com MQF alimentada externamente à ferramenta, deve-se regular o bico aspersor a cada troca. Algumas máquinas adaptadas ao uso externo de MQF, possuem dispositivo elétrico de adução para os ejetores, assim a cada ferramenta trocada, os bicos, por meio de giro, se deslocam do raio do braço do trocador de ferramenta, e, quando efetuada a troca, os mesmos se posicionam de maneira angular se ajustando ao comprimento da nova ferramenta (Dörr e Sahn, 2000).

Pesquisas realizadas com operações de fresamento de cavidades de aeronaves permitiram demonstrar que uma lubrificação externa com mínima quantidade de fluido não apresenta dificuldades, em princípio, tanto no fresamento convencional quanto no fresamento de alto desempenho de ligas de forjadas de alumínio. Algumas máquinas operatrizes mais antigas e a maioria das máquinas novas oferecem a possibilidade de conduzir o lubrificante em quantidades mínimas através do fuso (Hummel *et al.*, 2001).

A fábrica alemã da Dasa comprovou em seus testes que, na produção de peças com cavidades muito estreitas e profundas, é possível utilizar MQF tanto externa como internamente ao fuso, e garantir a segurança do processo (Hummel *et al.*, 2001).

O uso desta técnica diminui a força de corte e avanço quando usinando aço médio carbono, a baixa velocidade de corte, principalmente para avanços maiores que 0,25 mm/volta, como mostra a figura 3.3 (Machado e Wallbank, 1997).

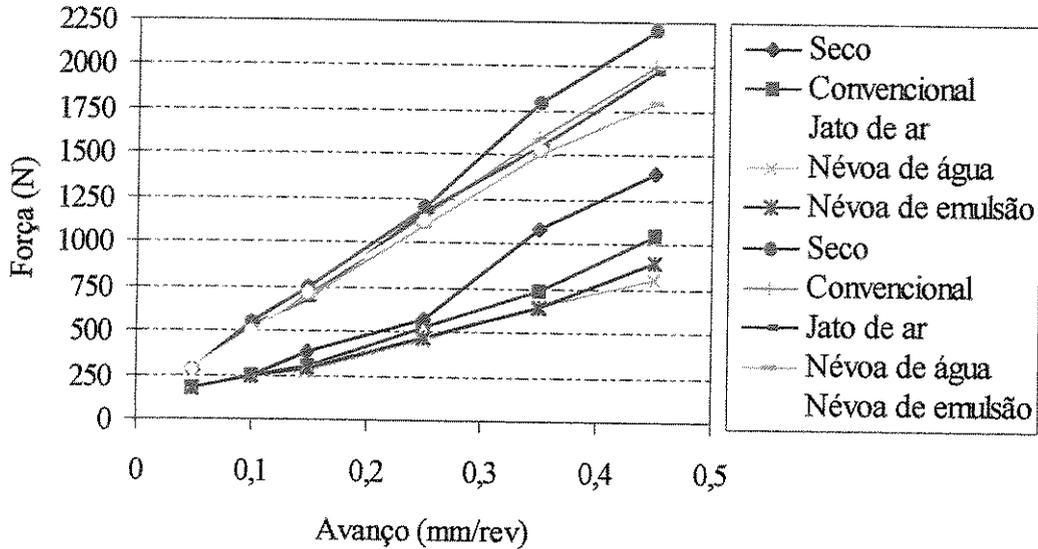


Figura 3.3: Forças de corte e avanço em vários tipos de fluido de corte, $v_c = 30\text{m/min}$ (Machado e Wallbank, 1997).

Esses autores verificaram que, com a técnica MQF usando ar+água ou ar+óleo, surgiram notáveis reduções no parâmetro R_a e na espessura do cavaco na usinagem em baixas velocidades, comparando-se o corte a seco com o convencional. Em velocidades de corte superiores a 100 m/min os resultados não foram semelhantes devido à pouca influência do fluido de corte nas componentes de força da usinagem. Notou-se que mesmo a técnica MQF sofreu dificuldades para exercer seu papel lubrificante se tratando de processo de dinâmica elevada, porém a amplitude da variação das componentes de força foi reduzida com sua aplicação, mostrando que o "spray" garante maior penetrabilidade na interface, o qual foi constatado pela redução do desvio padrão dos valores médios das componentes de força (Diniz e Machado, 2000).

Braga *et al.* (1999) também obtiveram sucesso na aplicação da técnica MQF em furação de ligas de alumínio. Devido à alta ductilidade do alumínio, a usinagem sem fluido de corte gerava entupimento dos canais helicoidais da broca, ocorrido pela aderência dos cavacos, fato este que, na maioria das vezes, causa a quebra da broca. Foram realizados diversos ensaios de furação em liga de alumínio-silício (7% de silício), utilizando brocas inteiriças de metal duro e comparando a utilização do óleo solúvel abundante com a mínima quantidade de fluido (10 ml/h de óleo em fluxo de 4,5 bars de ar). Em todos os ensaios por eles realizados, o desgaste da ferramenta quando se utilizou MQF não foi maior que quando da utilização do óleo solúvel e os parâmetros

de qualidade da peça, como tolerância dimensional e de forma (circularidade do furo) e rugosidade, também não se deterioraram com a introdução da técnica MQF.

Foram realizados por Heisel e Lutz (1998) ensaios de torneamento de aço DIN 100Cr6 (AISI L3) utilizando três condições de corte: a seco, com MQF e com refrigeração abundante. Utilizaram insertos de metal duro revestidos com nitreto de titânio (*TiN*), tendo o éster como fluido de corte. Os parâmetros de corte foram velocidade de corte de 200 m/min, avanço de 0.25 mm/volta e profundidade de 1 mm. Assim, detectou-se que a ferramenta resfriada e lubrificada com a mistura de óleo e ar apresentou uma vida cerca de 10% superior a que recebeu refrigeração em abundância.

Portanto, existe o desenvolvimento intensificado e contínuo desta tecnologia, com o objetivo voltado à questão ambiental e à questão da preservação da saúde do ser humano (Filho *et al.*, 2001).

Capítulo 4

Fresamento em Alta Velocidade de Aço Endurecido

4.1 - Introdução

Os processos de usinagem têm uma importância significativa dentro dos atuais sistemas produtivos de fabricação. Segundo Neves (2002), Davies, 1999, salientou que no *1st CIRP International Workshop on Modeling of Machining Operations*, Atlanta GA 19 May 1998, Dr. Eugene Merchant, um dos maiores contribuintes para o estudo científico da usinagem, estimou que 15% do valor de todos os componentes mecânicos fabricados no mundo são originados pelos processos de usinagem. Visto a questão técnica, a maioria dos processos de usinagem é gerado enquanto os materiais se encontram em seu estado recozido ou normalizado, o que facilita o mecanismo de cisalhamento. Deve-se isso aos tratamentos térmicos (têmpera, revenimento, cementação, nitretação, etc.), aos quais a maioria dos produtos são submetidos a fim de melhorarem as propriedades mecânicas, gerarem restrições ao processo de usinagem convencional com ferramenta de geometria definida, restando a possibilidade do uso dos processos de usinagem abrasivos, como a retificação, o brunimento e a eletroerosão. Tanto os processos abrasivos, como o processo de eletroerosão, exigem que se trabalhe com baixas taxas de remoção de material em função dos danos superficiais e interfaciais que podem comprometer a qualidade final do produto e até mesmo a sua aplicação.

Algumas matrizerias e/ou ferramentarias ainda usam máquinas-ferramenta rígidas com elevado torque (baixa rotação) no eixo árvore para operações de desbaste das ferramentas de conformação (moldes e matrizes). Porém, em posse desses recursos considerados convencionais, na tentativa de usinarem diretamente os materiais endurecidos, teriam sérias dificuldades, principalmente com relação ao desgaste acelerado das ferramentas de corte.

O fluxo de informações e os passos de processamento usados na produção convencional de moldes e matrizes podem ser divididos em (Fallböhmer *et al.*, 1996):

- projeto do molde/matriz, incluindo transferência e modificações da geometria;
- geração do programa de usinagem (trajetória das ferramentas);
- usinagem de desbaste do molde/matriz ou de um eletrodo para eletroerosão;
- usinagem de acabamento, incluindo pré-acabamento quando necessário e eletroerosão;
- acabamento manual, incluindo polimento manual e automatizado;
- teste de ferramenta (*try-out*).

Cada fase demanda uma quantidade de investimento e o custo relativo dessas diversas etapas varia de uma forma de ferramenta para outra. Entretanto, o custo total de uma ferramenta pode ser estimado pela soma de seus custos individuais.

As exigências sobre tempo e eficiência são cada vez mais altas. Para alcançar esse objetivo, deve-se alterar a taxa de remoção de cavaco (Q), pois é o fator que determina o custo total da produção (taxas mais elevadas geram custos menores). Assim, são impostos parâmetros mais severos em operações de desbaste e pré-acabamento em aço no estado recozido. Posteriormente, no estado temperado, realiza-se o acabamento por meio de fresamento e algumas vezes fazem-se detalhes em eletroerosão. O acabamento final, neste caso, exige o polimento manual, isto devido as distorções geradas no tratamento térmico e a necessidade de se atingir a forma requerida com acabamento superficial satisfatório. No entanto, essa operação, por ser manual, não garante a precisão geométrica e dimensional da peça.

Portanto a usinagem no estado temperado, tanto no acabamento como no desbaste, permite

uma racionalização do processo, pois provoca a redução dos tempos de preparação e evita a influência dos problemas inerentes às distorções geométricas geradas pelo tratamento térmico. Ainda, este processo vai ao encontro da tendência mundial de se produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo, sem gerar substâncias prejudiciais ao meio ambiente, a segurança e a saúde das partes interessadas. Porém, seu resultado é dependente do desenvolvimento de máquinas-ferramenta, ferramentas de corte e seus respectivos revestimentos.

O fresamento com conceito de usinagem em alta velocidade de corte, conhecido respectivamente por *HSM* (*High Speed Machining* ou *High Speed Milling*) e também como *HSC* (*High Speed Cutting*), foi desenvolvido pelo Dr. Carl J. Salomon durante uma série de experimentos de 1924 a 1931. Salomon, baseado nos efeitos da temperatura, notou que as forças de corte tendiam a decrescer em altas velocidades. No entanto, pôde-se usufruir de máquinas-ferramenta e acessórios devidamente dimensionados, somente a partir da década de 80, após o desenvolvimento tecnológico do processo com fins industriais pelo professor Herbert Schulz, da Technology University of Darmstadt, com patrocínio do Ministério de Ciência e Tecnologia da Alemanha. Por definição, a usinagem em alta velocidade de corte associa-se ao processo de usinagem em materiais com rotações e velocidades de corte de 5 a 10 vezes mais altas quando comparadas às velocidades de corte e rotações praticadas usualmente (Sandvik, 1998). A determinação da faixa de alta velocidade de corte é baseada no material a ser usinado (figura 4.1).

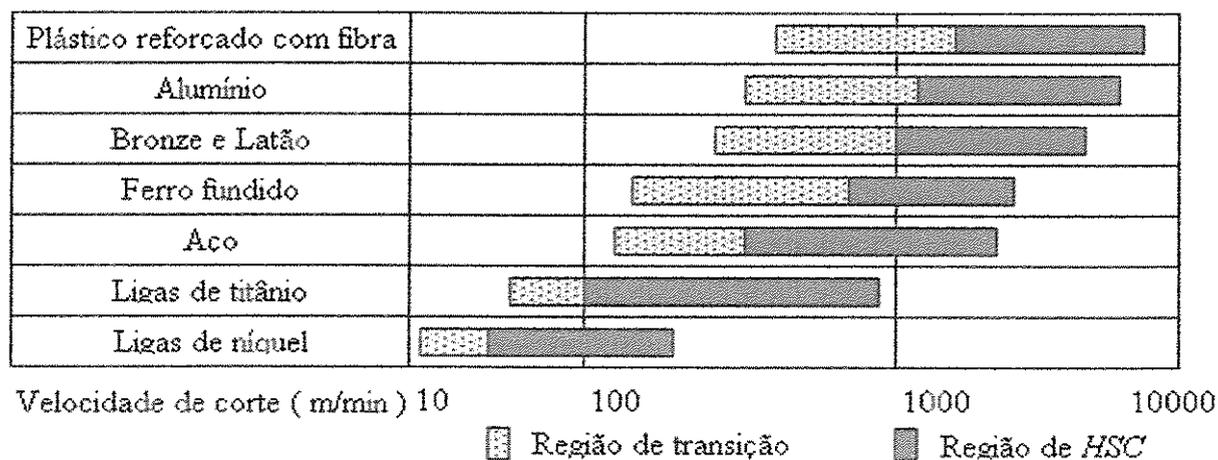


Figura 4.1: Variação da velocidade de corte em função do material da peça (Schulz, 1992).

A motivação para a utilização do fresamento em alta velocidade tem sido a crescente busca por qualidade e produtividade industrial, itens que capacitam as organizações a ganharem competitividade no mercado mundial. Desde então, avanços tecnológicos, voltados às máquinas-ferramenta e seus comandos numéricos, às ferramentas de corte e suas respectivas coberturas, e tecnologia de corte, permitiram a difusão deste processo dinâmico. Primeiramente utilizado nas indústrias aeroespaciais para usinagem de ligas leves, hoje se tornou comumente usado nas indústrias de manufatura de conformação, como moldes e matrizes (da Silva *et al.*, 2001).

A técnica *HSM* permite usinar materiais endurecidos, desde que não possuam cantos vivos internamente construídos sob superfícies inclinadas ou em raios, nem relações de balanço de ferramenta exagerados (Schulz *et al.*, 2000). O conhecimento desta tecnologia proporciona ganhos de ordem tecnológica, a exemplo de melhoria na exatidão das peças, especialmente em usinagem de peças delgadas; melhoria dos mecanismos de formação de cavaco; incremento na qualidade superficial das peças e diminuição das forças de corte proporcionalmente à alta velocidade de corte (da Silva, *et al.*, 2001). O aumento da velocidade de corte diminui o efeito lubrificante dos fluidos. A redução do atrito na interface cavaco/ferramenta diminui as forças de corte e a temperatura da ferramenta, reduzindo a adesão ou soldagem local (Micaroni, 2001).

Na usinagem de materiais endurecidos, as forças de corte não são necessariamente altas, uma vez que a deformação plástica do cavaco é relativamente pequena e, também, devido à pequena área de contato deste cavaco com a ferramenta, o que gera a redução das distorções térmicas da peça. Não obstante, as forças de corte na usinagem de materiais endurecidos são de 30 a 80 % maiores do que aquelas desenvolvidas quando se usinam materiais de menor dureza, o que nos obriga a escolher cuidadosamente, o material da ferramenta, sua geometria/microgeometria e seu revestimento (Lima, 2000).

Neves (2002) pôde identificar que o parâmetro mais influente na força de corte é a penetração de trabalho e que a vida da ferramenta é muito influenciada pela velocidade de corte e praticamente não é tão influenciada pelo balanço, o qual influencia muito na vibração da ferramenta. Essa detecção surgiu da utilização de blocos de aço de W. Nr. 1.2606 com dureza de 52 ± 2 HRc e fresa de topo de ponta esférica de metal duro micro grão inteiriça com cobertura

TiNAl em um processo de fresamento em desbaste frontal, tanto no sentido concordante de corte como no discordante, submetendo a ferramenta a certos balanços e velocidades de corte aplicando como fluido refrigerante o ar comprimido.

Assim como é evidente que determinadas adequações dos parâmetros de corte devem existir em conformidade com a aplicação, é conhecida que a técnica *HSM* reduz o *lead-time* (tempo do produto em processo) com a eliminação de operações anteriormente usadas (geralmente eletroerosão e retífica), reduz a formação de rebarbas, pelo fato da peça estar endurecida, e permite o emprego de usinagem a seco ou MQF assegurando repetibilidade e previsibilidade no processo, além de simplificar o ferramental (Schulz *et al.*, 2000). Na figura 4.2 notam-se as possíveis reduções no processo produtivo.

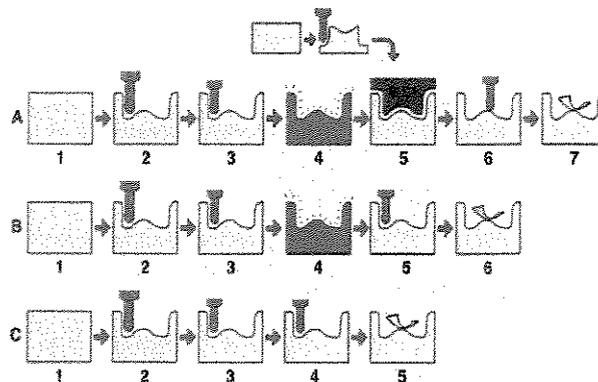


Figura 4.2: Racionalização do Processo de fabricação de uma matriz (Sandvik, 1998).

- A) Processo inicial: (1) blank macio, (2) desbaste, (3) semi-acabamento, (4) tratamento térmico, (5) eletroerosão (6) acabamento das regiões de fácil acessibilidade, (7) acabamento manual.
- B) Mesmo processo onde a etapa de eletroerosão foi substituída pelo acabamento da cavidade com “*HSM*”. Redução de uma etapa do processo.
- C) Mesmo processo onde o (1) blank já recebeu o tratamento térmico e está com dureza final de utilização, (2) desbaste, (3) semi-acabamento, (4) acabamento final, todos realizados com uma única fixação, (5) acabamento manual reduzido ou mesmo eliminado.

A vantagem competitiva deste processo se dá sob o aspecto da racionalização do processo juntamente com a precisão dimensional alcançada e com a previsibilidade na oferta do produto ao mercado (maior controle dos gastos), tópico este muito importante, mesmo porque existe uma forte tendência na redução do ciclo de vida dos produtos.

As taxas de velocidades, utilizadas no fresamento em alta velocidade de corte, não só dependem das variáveis comuns aos processos gerais como: o tipo do material, o tipo de operação de corte, o tipo de ferramenta e o material cortante, como também sofrem uma influência significativa da tecnologia empregada. Como a ação de corte do processo de usinagem, à alta velocidade, depende de modo sensível do tipo de tecnologia disponível, a tecnologia de corte será responsável pelo desenvolvimento de todos os outros componentes que fazem parte do processo (Novaski e Silva, 2000). Portanto, a máquina-ferramenta deve ser vista como um sistema integrado, onde não somente as ferramentas de corte e suas respectivas coberturas devem acompanhar a nova tecnologia, mas todos os elementos que devem compor este sistema, conforme ilustrado pela figura 4.3.

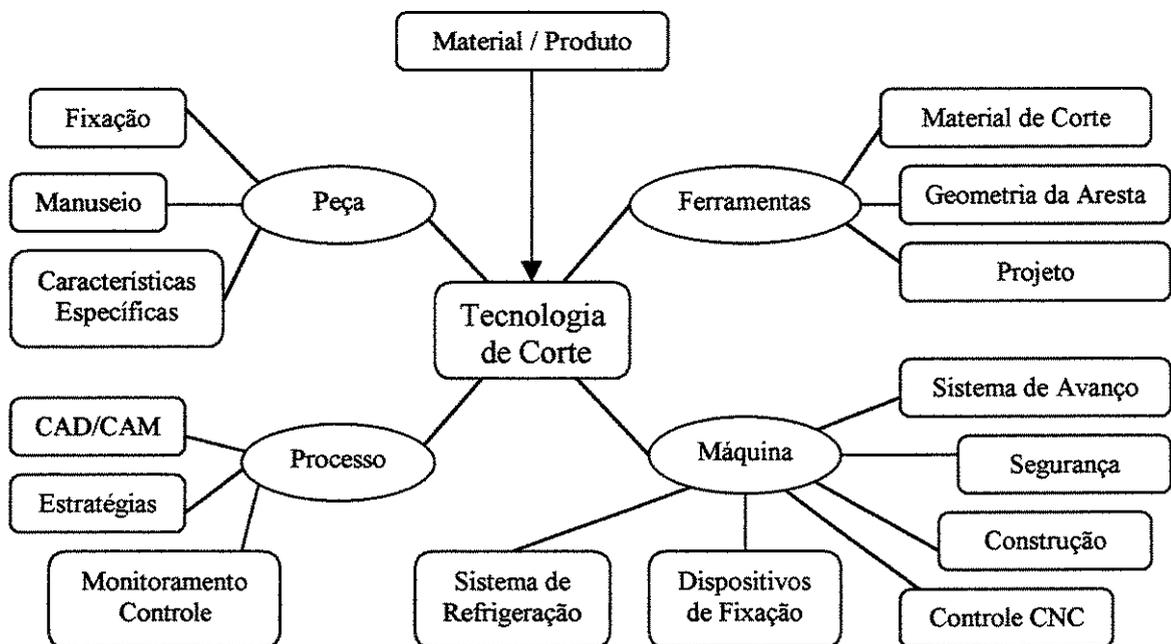


Figura 4.3: Variáveis de processo relacionadas à tecnologia de corte (Finzer, 1997).

O fresamento, em alta velocidade de corte, também possui notáveis e relevantes exigências que devem ser consideradas. Entre elas, incluem-se o alto custo de aquisição da máquina-ferramenta, suas ferramentas e acessórios, balanceamento das ferramentas, alto nível de desgaste das ferramentas de corte e os custos voltados à manutenção/substituição do eixo-árvore, um dos componentes principais e especialmente de baixa durabilidade (tipicamente de 5.000 a 10.000 horas) e alto custo (da Silva *et al.*, 2001).

Quanto à redução da vida da ferramenta, esforços adicionais estão sendo despendidos para minimizar essa influência negativa do processo. O estado atual de conhecimento mostra que há cinco diferentes abordagens que devem ser aplicadas simultaneamente sempre que possível. Deixando de lado a otimização da tecnologia de corte de metais, a criação de condições mais eficientes de ataque pela ferramenta, a escolha do material de corte apropriado e a aplicação da ferramenta apropriada para a maioria das tarefas diversificadas de manufatura, é, acima de tudo, a escolha da estratégia de corte de metais adequada que contribui consideravelmente para reduzir o desgaste da ferramenta (Schulz *et al.*, 2000).

Assim, o fresamento em alta velocidade tem contribuído para que haja reduções do tempo de manufatura da ordem de 80% e economia de custos da ordem de 30% (Schützer *et al.*, 2000), especialmente em matrizes para forjamento, onde o acabamento superficial não exige a mesma rugosidade aplicada nos moldes de injeção plástica. A partir de um determinado grau de rugosidade, e dependendo do ângulo da parede da matriz de forjar, pode haver a propensão à escoação do lubrificante utilizado no processo de forjamento ao fundo da matriz. Caso isto ocorra, haverá deficiência na lubrificação, o que causará provavelmente dificuldade de extração do produto em processo, propiciando a redução da vida útil da matriz. Desta forma, o trabalho posterior de polimento tende a ser ainda mais reduzido, e, em alguns casos, dependendo da aplicação, pode até ser eliminado, conforme Sandvik, 1998.

Capítulo 5

Modelo de Melhoria Contínua

5.1 - Introdução

A condição básica de sobrevivência de toda empresa privada é a geração de lucros a partir de suas atividades, que é crescente na medida em que aumenta a eficiência do processo produtivo. Para a eficiência dos processos não basta simplesmente as organizações serem certificadas, mas sim fazerem uso efetivo de um modelo de Sistema de Gestão da Qualidade como os modelos contemplados pelas normas ISO, como por exemplo o modelo da NBR ISO 9001:2000 demonstrado pela figura 5.1.

Este modelo tem como base o ciclo de melhoramento contínuo denominado de *PDCA*, acrônimo¹¹ constituído pelas iniciais de quatro verbos da língua inglesa: "P" de *Plan* que significa planejar, "D" de *Do* que corresponde a fazer, "C" de *Control* que implica em controlar e "A" de *Action* que significa atuar corretivamente sempre que sejam detectados desvios em relação ao padrão (Maranhão, 2001). Este método foi proposto inicialmente por Walter A. Schewart e difundido na década de 50 no Japão por Deming (Scholtes, 1999). Ainda, além dele mostrar a ligação dos processos (requisitos) da norma, seu ciclo pode ser entendido como um fluxo natural

das funções de uma organização que visa a promoção de melhoria contínua através da forma conhecida de se dizer "rodar o PDCA".

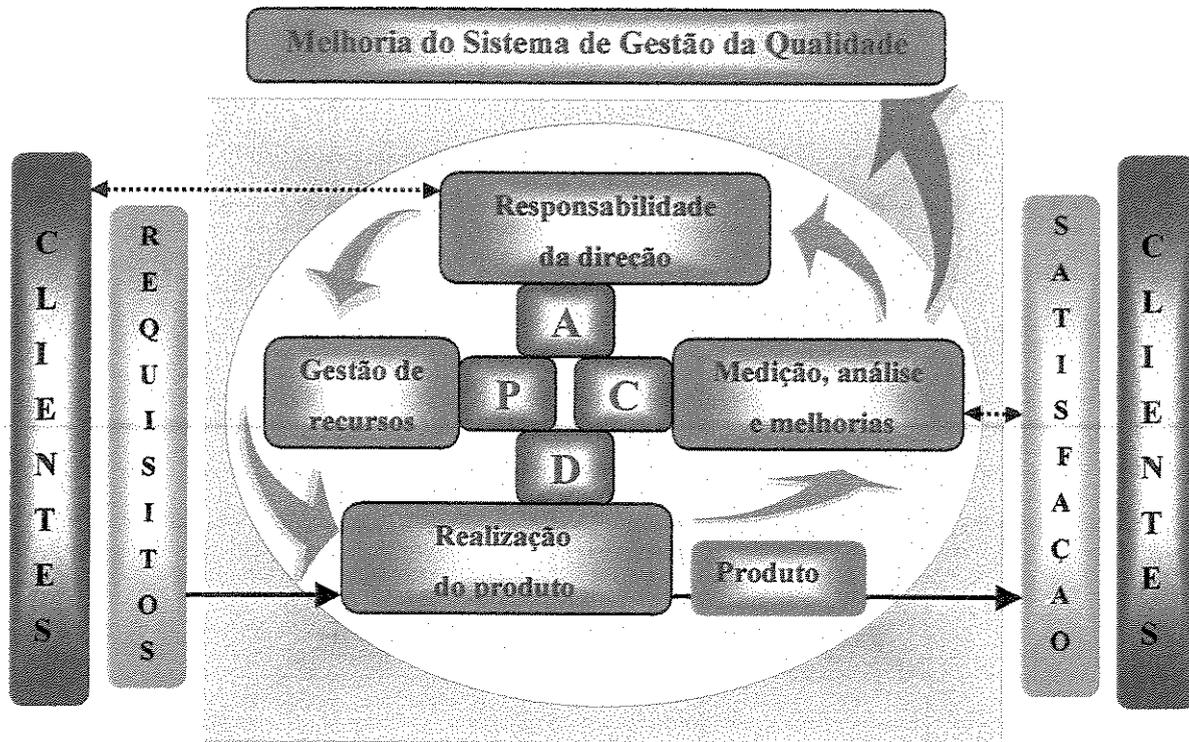


Figura 5.1: Representação do modelo de sistema de Gestão da Qualidade baseado em processo da norma NBR ISO 9001:2000.

Correlacionando o ciclo *PDCA* com os requisitos da norma NBR ISO 9001, pode-se dizer que o requisito **Gestão de Recursos** é o *Plan* do ciclo *PDCA*. Neste deve-se evidenciar o planejamento referente à provisão de recursos, infra-estrutura e ambiente de trabalho necessário para fornecer resultados de acordo com a política da organização e requisitos do cliente. O *Do* refere-se à **Realização do Produto**, ou seja, como são realizadas as atividades de projeto e desenvolvimento, planejamento de processo, operações de produção e serviços, controle dos dispositivos de medição e processos relacionados ao cliente. O *Control* é o requisito **Medição, análise e melhoria**, o qual se refere ao monitoramento e medição do desempenho do sistema de gestão da qualidade, dos processos e do produto em relação à política da organização e requisitos

¹¹ Palavra formada pela primeira letra (ou mais de uma) de cada uma das partes sucessivas de uma locução ou pela maioria dessas partes.

do cliente. O *Action* refere-se à **Responsabilidade da direção** em analisar criticamente o desempenho do sistema de gestão da qualidade. A Alta direção da organização deve executar ações com base nas oportunidades de melhoria identificadas nas medições, para aumentar continuamente a eficácia do sistema de gestão da qualidade e conseqüentemente a satisfação dos clientes. As ações para melhoria devem estimular o replanejamento da gestão de recursos necessários para a realização do produto. A qualidade começa com a intenção que é determinada pela administração (Deming, 1999).

Nota-se assim que a ISO 9001:2000 é muito objetiva e foca principalmente a satisfação do cliente, a melhoria contínua e a conformidade do produto em comparação com a norma ISO 9000:1994. Por outro lado, a ISO 9001:2000 é menos prescritiva que a ISO 14001 no que se refere ao conteúdo da política. Apesar de ambas exigirem que a política seja apropriada às atividades da organização, a ISO 14001 evidencia a inclusão de quatro tipos específicos de comprometimento na política ambiental, sendo eles o comprometimento com a melhoria contínua, com a prevenção contra poluição, com a conformidade com a legislação e com os regulamentos ambientais pertinentes e ainda a conformidade com outros requisitos.

Além desse modelo de gestão, Campos (1992) destacou outros conhecidos métodos de solução de problemas, como o "*QC Story*" utilizado pela *JUSE* (*Union of Japanese Scientists and Engineers*), e o método *DMAIC*, o qual se define pela junção das letras iniciais das palavras em inglês "*Define*", "*Measure*", "*Analyse*", "*Improve*" e "*Control*", correspondentes a definir, medir, analisar, melhorar e controlar. O método *DMAIC* é muito conhecido atualmente por ser derivado do programa denominado "Seis Sigma", o qual é oriundo da empresa Motorola e também adotado pela organização em estudo neste trabalho. Este programa foi introduzido na década de 80 com base em um trabalho de *benchmarking* que tinha como objetivo reduzir as taxas de falhas em seus produtos eletrônicos manufaturados. O mesmo já possuiu várias organizações adeptas, como é o caso da General Eletric que atribuiu ao uso desse método o mérito do fato de se obter, após 105 anos de empresa, um lucro fenomenal (Maestrelli e Miguel, 2001).

Logo, independente do modelo que a organização use, desde que este tenha o mesmo

propósito do modelo contemplado pela ISO, o tópico "Gestão da Qualidade Total", muito comentado ultimamente, deve ser um sistema que vise integrar esforços para o desenvolvimento, a manutenção e o aprimoramento da qualidade de vários grupos na organização, de forma a beneficiar o desenvolvimento do marketing, da engenharia, da produção e da assistência dentro de níveis mais econômicos, possibilitando a satisfação integral aos clientes, sejam eles externos ou internos.

A busca pela qualidade total deve permear a vida em sua complexidade, principalmente nas organizações, além do que, as organizações pregadoras de qualidade sabem que a mesma é um pré-requisito para a geração de vantagem competitiva. Para tanto, pode-se verificar que muitos são os trabalhos desenvolvidos e as conclusões obtidas a respeito da Qualidade por vários praticantes e autores da "Qualidade". E não é à toa que existe extrema diversidade de definições, mas todas visam ser simples e fáceis de serem assimiladas por todos os níveis das organizações. Essas devem também ser precisas para não gerarem interpretações duvidosas; e abrangentes para demonstrarem sua importância em todas as atividades produtivas.

Os princípios básicos da qualidade total surgiram em resposta à falência das diversas formas de gestão utilizadas nos últimos 90 anos, pois não permitiram ter, entre outras coisas, a produtividade necessária para enfrentar as transformações sociais que vêm sendo aplicadas em muitas organizações, tendo como objetivo incorporar às pessoas e à própria organização, um comportamento de busca contínua de melhoria.

Capítulo 6

Procedimento Experimental

6.1 - Introdução

Este trabalho enfoca a melhoria contínua, quando se trabalhou com a otimização da operação de fresamento em alta velocidade de corte utilizando diferentes condições de refrigeração/lubrificação, por meio do método de análise e solução de problemas integrado ao ciclo *PDCA* de melhoria contínua, que é contemplado pela ISO. O ciclo usado para estruturação do trabalho se trata de um método gerencial de tomada de decisões para garantir o alcance das metas necessárias à sobrevivência da organização. Em todas as fases deste ciclo foi necessário utilizar as ferramentas apropriadas para coletar e avaliar dados ou descrever o sistema, processo ou partes do processo relacionados com o ponto de melhoria a ser abordado, a aplicação do fluido de corte. Pode-se dizer que cada fase teve suas etapas correspondentes com o objetivo de gerenciar o trabalho de melhoria, segundo a figura 6.1.

Como na maioria dos trabalhos envolvendo qualidade, a equipe de trabalho é a maior responsável pelo sucesso do resultado. Para não se correr o risco de haver uma exceção, a equipe de trabalho foi definida com o auxílio de uma ferramenta da qualidade conhecida como *SIPOC*, acrônimo definido por: "S" de *Supplier* que significa fornecedor, "I" de *Input* correspondente as entradas, "P" de *Process* ou processo, "O" de *Output* ou saída e "C" de *Customer* ou clientes.

Com esta ferramenta, pôde-se então identificar quais são as entradas e as saídas inerentes ao processo em estudo e determinar as áreas mais diretamente envolvidas e interessadas, para que a partir daí fossem definidos os membros da equipe com base na incidência de atuação atual em atividades relacionadas ao fluido de corte, o principal fator de interesse desse experimento.

O experimento se fez utilizando-se do processo de fresamento em alta velocidade de corte em condições de desbaste de cavidade de uma biela automotiva, e teve como variáveis de resposta a potência líquida máxima consumida e o número de cavidades de matriz usinadas por vida da ferramenta. Utilizou-se como forma de avaliação dos resultados alguns recursos oferecidos pelo software estatístico Minitab, como o delineamento de experimento e a análise de variância.

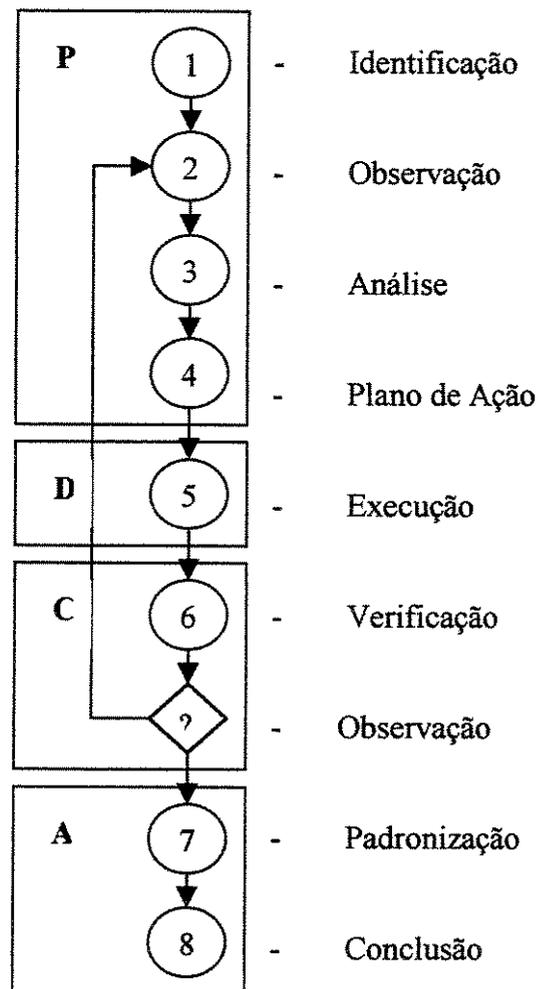


Figura 6.1: Representação das etapas de cada fase do ciclo *PDCA*.

6.2 - Planejamento



Estatisticamente sabe-se que nenhum produto de um processo é idêntico a outro devido à variabilidade inerente a cada processo; e que, para avaliar a performance do processo e a qualidade do que se pretende produzir, deve-se coletar dados sobre o processo ou produto (Petenate, 2002). Sabe-se também que, em experimentos fatoriais, a interação de três ou mais fatores geralmente não é significativa. Assim ter-se-á para este experimento fatorial somente a interação de 2ª ordem, tendo como fatores de interesse o fluido de corte e o parâmetro de corte.

A alta administração patrocinou o desenvolvimento deste trabalho de melhoria contínua com ênfase em fluido de corte, o qual foi desenvolvido no departamento de matrizaria, mais especificamente na célula de fresamento em alta velocidade de corte, pelo fato da mesma dispor de equipamentos que possibilitam a avaliação de métodos de aplicação de fluidos substitutos ao fluido em abundância. Nesta primeira fase, conhecendo-se o dever de primeiramente planejar e estruturar o trabalho de melhoria de forma a garantir a confiabilidade do resultado final a ser obtido, obedecendo às etapas definidas pela figura 6.1, foi montada a equipe de trabalho em conformidade com a abrangência do estudo. Assim, teve-se como participantes uma pessoa de cada área do departamento determinado como piloto, como relacionado na tabela 6.1.

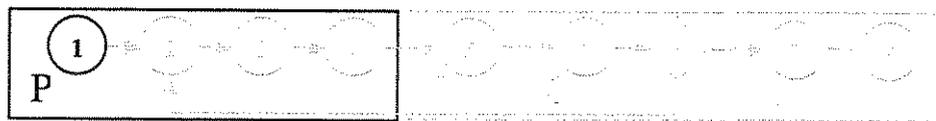
Tabela 6.1: Relação dos membros integrantes da equipe de trabalho.

Função no departamento	Atuação na equipe
Engenheiro mecânico	Coordenador responsável
Programador CAD/CAM	Programação CNC
Operador de logística	Suporte
Supervisor da Engenharia	Apoiador/motivador
Operador de Centro HSM	Operacional
Mecânico de manutenção	Instalação/manutenção
Supervisor de produção	Apoiador/motivador
Planejador operacional	Planejamento HSM

A equipe, inicialmente, concordou que nada devia ser avaliado e definido de maneira subjetiva, porém todas as sugestões seriam bem vindas, sejam elas, a princípio, fundamentadas ou não. A condução de determinada ação e tomada de decisão ficou por conta da avaliação estatística, quando todos os parâmetros seriam criteriosamente avaliados e as metodologias consolidadas e revisadas a todo tempo.

A partir de então, foi enfatizada a proposta de trabalho de maneira a envolver todos os membros da equipe, invocando colaboração, empenho e comprometimento com a meta de melhoria, a qual é alcançada seguindo o ciclo *PDCA*.

6.2.1 - Identificação



O processo de fresamento em alta velocidade de corte da célula estudada atualmente utiliza fluido de corte em abundância em torno de 75% das aplicações, corte a seco em 15% e os 10% restantes correspondem à usinagem com ar comprimido, geralmente quando se utiliza de ferramentas intercambiáveis. Essa falta de padronização ocorre devido ao fato de não ter sido feita uma avaliação minuciosa dos benefícios que cada um oferece frente à aplicação requerida, não havendo, portanto, um método definido como sendo a melhor aplicação baseada em resultados, ficando assim a escolha do fluido a ser usado por conta do operador da máquina-ferramenta no momento.

Como somente se pode atribuir melhorias a um determinado processo conhecendo-o, o experimento planejado avaliará as duas condições de refrigeração/lubrificação de maior incidência de uso em campo e também a técnica de mínima quantidade de fluido de corte. Outro fator de interesse tem sido o parâmetro de corte, para o qual se estipulou trabalhar com três níveis, o que geraria um experimento fatorial 3^2 . Considerando-se 3 replicações para cada ensaio, número este definido em comum acordo entre os membros da equipe através do conhecimento do processo visando o grau de confiabilidade do resultado, ter-se-ia como consequência 27 ensaios.

6.2.1.1 - Meta de melhoria

A meta: avaliar tecnicamente o resultado da utilização da técnica MQF e do corte a seco frente ao uso de fluido em abundância por meio de um sistema de melhoria contínua, é oriunda do plano estratégico da organização, quando, por meio da avaliação conduzida pelo sistema de Gestão Ambiental e de Segurança e Saúde Ocupacional da organização, apontou-se o fluido de corte como sendo um potencial ponto de melhoria, pois, além de ser um aspecto ambiental, o mesmo é um risco à segurança e à saúde das partes interessadas.

6.2.2 - Observação



Periodicamente a equipe tem se reunido com o objetivo de expor o estágio do trabalho, eliminar os eventuais obstáculos encontrados, trilhar novas ações com prazos e responsabilidades e, principalmente, salientar a essencial importância da participação de cada membro da equipe em busca do resultado. Com esse foco, todas as ações foram decididas por consenso entre todos da equipe fortalecendo as definições e fazendo com que os membros se sentissem parte integrante do processo e assim se motivassem a participar integralmente desse desafio.

É importante salientar que atualmente, após ter expirado a vida útil do fluido de corte em abundância, a organização providencia a parada da máquina-ferramenta para limpeza dos resíduos e aciona uma empresa homologada e cadastrada junto à ANP e possuidora de licença de operação, a qual é emitida pela Cetesb, que recolhe os resíduos e efetua a destinação conforme legislação. Por sua vez, a organização também necessita do "CADRI", o certificado de autorização de destinação de resíduos industriais, que também é emitido pela Cetesb.

As paradas de máquina-ferramenta para a troca do fluido de corte em abundância demandam, no caso da célula em estudo, em média 10 horas e são efetuadas em certos casos em períodos mensais, o que resulta em uma perda muito substancial, além da organização pagar pela destinação desse resíduo justamente por não possuir tratamento interno. Normalmente, no momento de destinação, a empresa contratada é obrigada a emitir o laudo desse resíduo à empresa contratante, que automaticamente agrega essa atividade administrativa a alguns de seus

funcionários.

Foi estritamente determinado pela equipe que o coordenador responsável pelo experimento e, no mínimo, mais um membro da equipe estivessem acompanhando integralmente o desenvolvimento do experimento, bem como apontando todos os dados oriundos do experimento em um formulário de coleta de dados definido após análise crítica das necessidades.

6.2.3 - Análise



As respostas do processo também puderam demonstrar que o número de replicações foram suficientes, isto porque todo ensaio teve suas variáveis de entrada reconhecidas por meio dos recursos disponíveis na própria organização. Ao concluir cada ensaio, foram primeiramente avaliados os dados em relação à existência de causas especiais, pois dependendo do ocorrido, novos ensaios deveriam ser realizados em seqüência. Para tanto, foram relacionados e reconhecidos todos os fatores potencialmente influentes ao experimento, principalmente em fresamento de material endurecido usando o conceito *HSM*, no qual se deve ter compatibilidade entre todas as entradas do processo, as quais estão elencadas a seguir.

- máquina-ferramenta (adequação ao processo, condições);
- sistema de fixação (ferramenta/máquina, peça/máquina);
- ferramenta de corte (composição, condições);
- material da peça (composição, dureza);
- sistema de lubrificação/refrigeração do corte (tipo, qualidade);
- programa de usinagem (parâmetros de corte utilizados).

As duas últimas são variáveis de entrada (independentes) deste experimento.

6.2.3.1 - Máquina-ferramenta

Os ensaios de fresamento foram realizados no centro de usinagem horizontal CNC modelo

MC 98 - A40, fabricado pela empresa Makino Inc. em 2000, projetado para usinagem de moldes e matrizes com potência no eixo árvore de 15 Kw, torque 32 N.m, rotação programável de 200 a 15000 rpm, curso dos eixos $x = 900$ mm, $y = 800$ mm e $z = 750$ mm, com velocidade de avanço dos eixos programável de 1 a 24000 mm/min equipado com comando numérico Fanuc Professional3. Esse equipamento, apesar de ter sido fabricado em 2000, possui originalmente somente os sistemas de refrigeração/lubrificação por meio de fluido em abundância e por ar, sendo o ar comprimido somente disponível internamente ao fuso. A escolha desta máquina-ferramenta se deu em função da dimensão do material a ser usinado e também pelo fato da mesma ser enclausurada, o que faria com que o possível vapor gerado nas aplicações fosse absorvido pelo sistema de exaustão.

Somente as atuais máquinas-ferramenta oferecidas pelo mercado dispõem de sistema que possibilite a técnica de usinagem com mínima quantidade de fluido de corte de forma original. Tanto na máquina-ferramenta utilizada, como em todas as outras da mesma célula de fresamento, ilustradas pela figura 6.2, não oferecem a possibilidade de se usar a técnica de usinagem com mínima quantidade de fluido de corte, havendo a necessidade de adaptação à máquina-ferramenta de um equipamento específico.

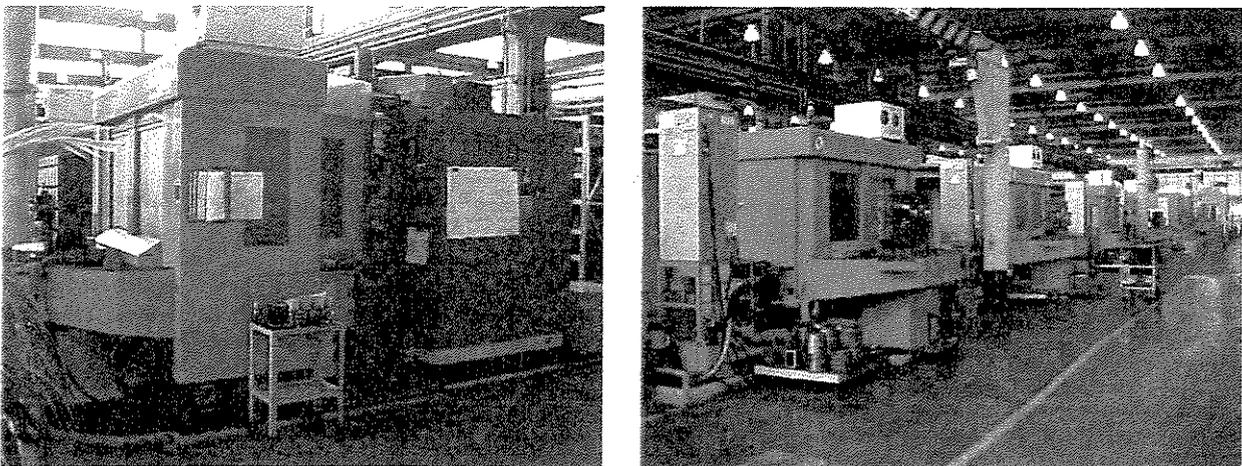


Figura 6.2: Ilustração da máquina-ferramenta utilizada e da respectiva célula de fresamento.

6.2.3.2 - Sistema de fixação

O fato do experimento ser realizado sempre na mesma máquina-ferramenta, com ferramentas novas de mesma dimensão e sobre o mesmo material, possibilitou o controle da variável da fixação, ao se realizar todos os ensaios com exatamente o mesmo porta-ferramenta. O porta-ferramenta utilizado foi do tipo *HSK 100-A*, conforme ilustrado na figura 6.3. Seu sistema de fixação é por interferência térmica, conhecido como *Shrink Fit System*, o qual demanda um aparelho especial para fixação. O sistema *HSK*, um dos modelos de interface entre o porta-ferramenta e o fuso da máquina, ajusta, além da face ao fuso, a superfície do cone de fixação. Esse sistema aliado ao *Shrink Fit*, interface entre o porta-ferramenta e a ferramenta de corte, torna o conjunto de fixação mais apropriado às aplicações em fresamento *HSM*, pois permite um desvio radial máximo da fresa de 0,003 mm em altas velocidades centrífugas, mas ainda não oferece a passagem de ar através do mesmo.

Não é parte interessante ao experimento avaliar o uso de ar comprimido, porque, para se usar o sistema de fixação *Shrink Fit* as ferramentas de metal duro inteiriças necessariamente deveriam possuir furo para passagem de ar, o que, no momento, não é utilizado pela organização, pois, além de serem ferramentas mais frágeis por concepção, implicam em menor número de afiações por unidade e ainda possuem alto custo de aquisição se comparadas às comuns. Desta forma, a aquisição desse modelo de ferramenta ainda não faz parte do escopo técnico.

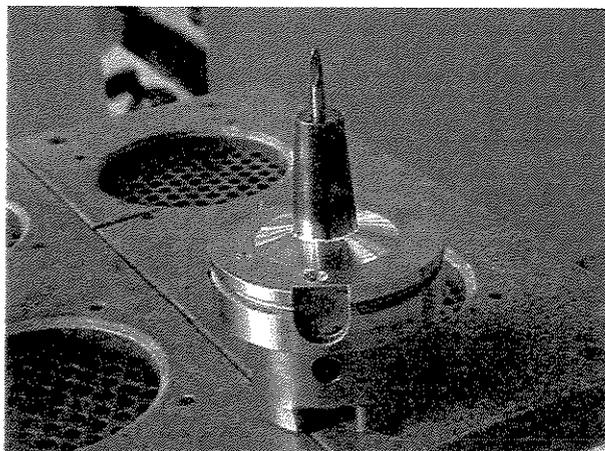


Figura 6.3: Ilustração do porta-ferramenta por interferência térmica do tipo *HSK 100-A* com a ferramenta de corte fixada.

6.2.3.3 - Ferramentas de corte

As ferramentas de corte utilizadas nos ensaios e representadas pela figura 6.4 são originárias da empresa Hanita Cutting Tools e são recomendadas para uso em fresamento, tanto para desbaste como acabamento de aço endurecido. Sua especificação é HN44105522022S da série HN 7151, o que corresponde a uma fresa de topo de ponta esférica inteiriça de metal duro sub-microgrão com 6 mm de diâmetro nominal de corte, duas arestas de corte, com revestimento de *TiNAl* e ângulo de hélice de 15°. Seu comprimento total de 50 mm permite trabalhar seguramente com comprimento livre (balanço da ferramenta em processo) de 15 mm, altura esta determinada pela profundidade da cavidade e mantida para todos os ensaios. Foram aplicadas a cada ensaio somente ferramentas novas, mesmo sabendo que as ferramentas reafiadas apresentam, em determinada aplicação, o mesmo rendimento da nova, por serem reafiadas com mesma tecnologia e sofrerem a aplicação do mesmo revestimento original, após afiação.

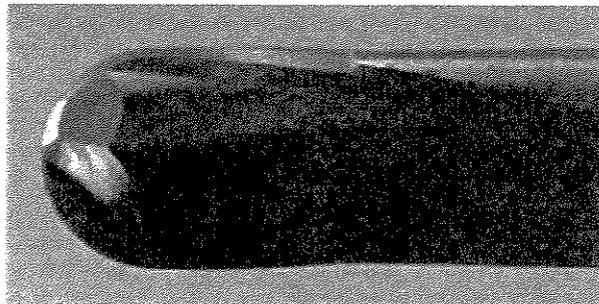


Figura 6.4: Ilustração das características da ferramenta de corte utilizada.

6.2.3.4 - Material do ensaio e aparelho medidor de dureza

A matéria prima para o ensaio, constituiu-se de um bloco de aço W. Nr. 1.2606 tratado termicamente a vácuo com dureza de 52 ± 1 HRC, resultando em uma tensão de ruptura à tração de 1927 a 2044 N/mm². A definição deste material e de sua dureza foi determinada em função de pesquisa executada sobre o cenário produtivo da organização, que demonstrou ter este material no momento grande utilização na fabricação de matrizes que trabalham sob processo de forjamento à quente utilizando-se de prensas. Este material é um aço para construção de

ferramentas para trabalho a quente de aplicação geral, com boa resistência mecânica em alta temperatura, com moderada tenacidade e resistência ao choque térmico. É adequado para aplicações em que não há condições favoráveis de refrigeração. Sua composição química média está descrita na tabela 6.2 e a sua equivalência com outras normas na tabela 6.3.

Tabela 6.2: Composição Química do aço W. Nr. 1.2606.

C	Si	Mn	Cr	Mo	Ni	V	W	Outros
0.36	1.05	0.45	4.30	1.45	-	0.28	1.30	-

Tabela 6.3: Equivalência do aço W. Nr. 1.2606 com normas internacionais.

W. Nr	ABNT/AISI/SAE	DIN	AFNOR	UNE	STAS	JIS
1.2606	H12	X37CrMoW51	Z38CDWV5	F.537	36VSiWMoCr53	SKD62

A dimensão deste material (490 mm x 350 mm x 270 mm), foi estipulada com base na quantidade de cavidades previstas pela experiência na aplicação, números de aplicações considerando-se uma segurança no caso do número de replicações ser insuficiente, e levando em conta a área e a altura da cavidade aliada ao pré-requisito de conclusão de todos ensaios no mesmo bloco, o qual é ilustrado pela figura 6.5. Entretanto, para cada face do bloco utilizada, o material sofreu necessariamente rebaixamento para gerar espaço para usinagem de outra cavidade. A cada rebaixamento a dureza foi controlada por meio do durômetro portátil digital Time TH 130. Este avançado equipamento demonstrado pela figura 6.6, permite identificar a dureza de todos os metais nas durezas Vickers, Brinell, Rockwell e Shore. O fato do mesmo ser compacto e de simples manuseio o torna recomendável para trabalhos em campo.

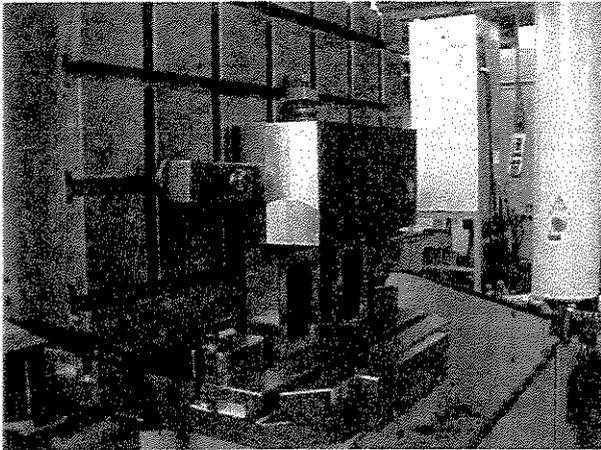


Figura 6.5: Ilustração do material de ensaio.

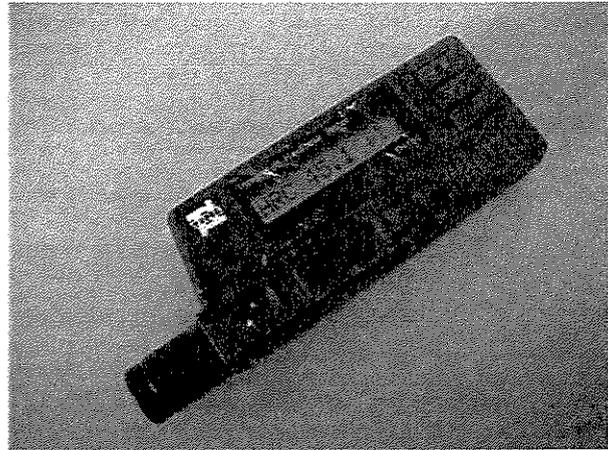


Figura 6.6: Ilustração do durômetro digital.

6.2.3.5 - Equipamento gerador da MQF e o respectivo fluido

Como visto, a máquina-ferramenta usada para o experimento não possui originalmente o sistema que possibilita o uso da técnica de usinagem com mínima quantidade de fluido de corte de forma original. Sabe-se que o mercado oferece aparelhos que possibilitam esta técnica, e que não possuem alto custo de aquisição e são ainda, a título de teste, disponibilizados às organizações.

Para os ensaios em pauta, assim se fez: adaptou-se externamente à cabine da máquina, mais precisamente na parte traseira, o aparelho MD-1200 da empresa americana Trico (figura 6.7), o qual foi gentilmente cedido ao experimento pela empresa Celmar. O mesmo possui alimentação externa e permite a regulação dos dois bicos aspersores de modo a direcionar o jato à ponta da ferramenta. Porém, da forma que foi instalado, possui comando de acionamento independente do fuso da máquina. Esse aparelho apresenta controles simples e fáceis de serem utilizados, evitando a necessidade de complicados ajustes de sincronização, bem como os controles independentes permitem uma maior flexibilidade no ajuste do líquido e ar para cada bocal. A sua escala de líquido, calibrada em gotas por minuto, permite ajustes reproduzíveis, economizando tempo no ajuste das velocidades de fluxo para diversas aplicações. Seus bicos aspersores são compostos de mangueiras articuláveis que possuem a função de permitir o direcionamento do fluido à área de

corde, porém são conduzidos separadamente até o bico, onde formam a névoa.

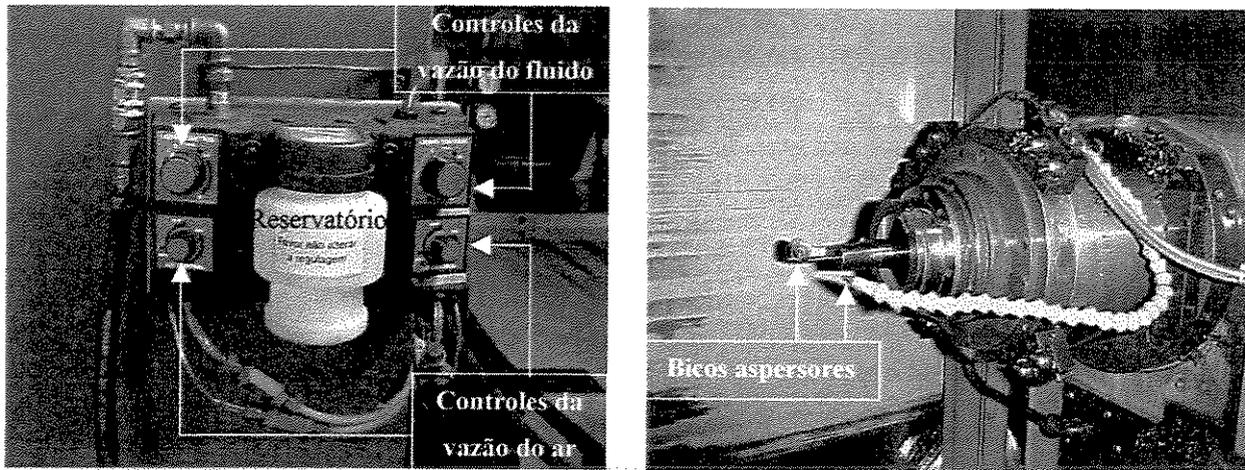


Figura 6.7: Ilustração do aparelho gerador da mínima quantidade de fluido.

Foi imprescindível monitorar a distância entre o bico aspersor e a ponta da ferramenta, além do ângulo de ejeção do fluido atomizado. Para este fim, tomou-se como referência a profundidade da cavidade a ser usinada. Portanto, essa distância não pôde ser inferior a 15 mm para que não houvesse colisão com a peça em usinagem, e nem tampouco superior a 20 mm, pois, neste caso, poderia haver divergência no alcance da interface ferramenta/peça gerando instabilidade no processo, fato este que influenciaria nos resultados. Uma vez definida como sendo 18 mm essa distância e também com a aspersão direcionada ao centro da ferramenta, essas variáveis não foram alteradas durante o experimento.

Para a aplicação da técnica MQF utilizou-se o fluido de corte à base de ésteres vegetais denominado Vascomill MKS42 - 2500 - 01 da empresa Blaser, o qual, além de ser recomendado para a utilização em fresamento de aço temperado, também foi indicado por usuários da mesma aplicação por apresentar excelente resultado relacionado à vida útil da ferramenta de corte. Este óleo vegetal possui basicamente as seguintes características:

- Dados físico-químicos:
 - Densidade a 20 °C = 0,95 g/cm³;
 - Viscosidade a 40 °C = 42 mm²/s;

- Ponto de fulgor = 210 °C;
- Parte vegetal = 87%;
- Teor de cloro = 0%;
- Teor de zinco = 0%;
- Teor de enxofre = 1,2%;
- Cor = marrom claro.

O índice de consumo deste fluido, 14 ml/h, foi definido em teste preliminar que visou identificar a vazão que melhor correspondesse à pressão de ar de 6 bars oferecida pela rede, levando em consideração a vida da ferramenta, a eventual névoa gerada no interior da máquina-ferramenta e o possível recorte do cavaco.

6.2.3.6 - Fluido de corte em abundância

Para os ensaios utilizando-se fluido de corte em abundância, foi aplicado o fluido sintético Dairoll PA 87 da empresa Daido Química. O Dairoll PA 87 é um óleo do tipo solução recomendado para usinagem e sua formulação foi desenvolvida combinando-se bom desempenho operacional à baixa nocividade à saúde e ao meio ambiente. A concentração utilizada foi a habitual de 3%. Durante seu uso normal a evaporação e as perdas por arraste requerem correções periódicas da composição. Tem como recomendação do fabricante o uso em uma concentração de 2 a 10% a uma temperatura ambiente em torno de 40 °C. Compõe-se basicamente de ácidos orgânicos, aminas, anti-espumante, bactericida, fungicida e água. Possui odor característico, aspecto homogêneo e não é volátil à temperatura ambiente que é recomendada para a utilização. Portanto, caso haja vaporização deve-se instalar exaustores para evitar inalação. Neste caso não há inconveniências pois a máquina, além de ser enclausurada, possui exaustor.

6.2.3.7 - Programa de usinagem

Todos programas de usinagem se resumem no desbaste de somente uma cavidade de uma matriz de forjar, especificamente de uma biela automotiva, conforme a ilustração da figura 6.8.

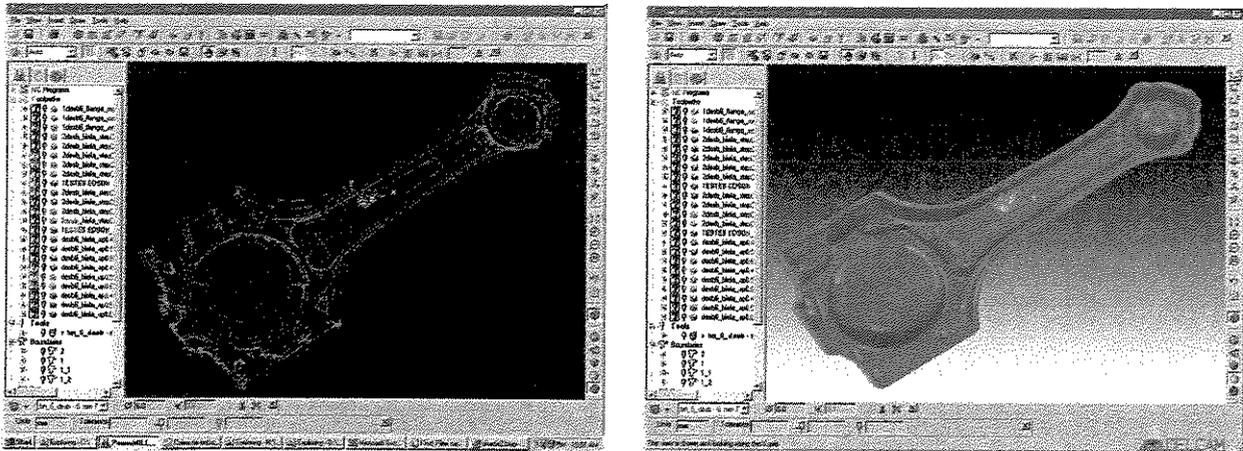


Figura 6.8: Ilustração do modelo eletrônico da matriz de forjamento da biela automotiva utilizada nos ensaios.

Essa cavidade possui construção especificada pelo cliente e dispõe do volume de $55.287,93 \text{ mm}^3$, o qual foi removido totalmente por cada um dos três diferentes conjuntos de parâmetros de corte utilizados nos ensaios. A escolha dos parâmetros de corte para a realização dos ensaios levou em consideração os dados de catálogos de todos os fabricantes de fresas de metal duro sub-microgrão, os manuais de treinamento de transferência de tecnologia da Makino, os parâmetros atualmente praticados pelas organizações que se utilizam desse processo, os dados encontrados na literatura, as características da estratégia de corte, os dados relacionados à usinabilidade do material de ensaio, as características da ferramenta e a experiência já adquirida. Portanto foram definidos três diferentes programas de usinagem, os quais se diferem tão somente pela velocidade efetiva de corte, consequência dos diferentes valores de a_p , os quais são resultantes de 8%, 9% e 10% do diâmetro nominal da ferramenta. Cada programa contempla a usinagem de somente uma cavidade, conforme tabela 6.4.

Tabela 6.4: Relação dos parâmetros de corte inerentes a cada programa.

Nome do Programa	n (rpm)	v_c (m/min)	a_p (mm)	d_c (mm)	v_{ce} (m/min)	f_z (mm)	v_f (mm/min)	a_c (mm)	tempo (min)	Q (mm ³ /min)
Biela.001	13.500	254,46	0,48	3,26	138,07	0,1	2700	2,4	19,2	3110,4
Biela.002	13.500	254,46	0,54	3,43	145,64	0,1	2700	2,4	16,9	3499,2
Biela.003	13.500	254,46	0,6	3,6	152,68	0,1	2700	2,4	15,1	3888

Todos os programas foram gerados com o mesmo plano de segurança de 10 mm (distância de aproximação da ferramenta a peça em avanço rápido), 5 mm como valor do plano de recuo em caso de mudança de trajetória e 1 mm para a retroação (mudança dos níveis de usinagem na coordenada Z). Ainda, todos possuem a mesma forma de ataque (abordagem inicial da ferramenta a peça no sentido da coordenada Z) em forma de hélice com diâmetro correspondente a duas vezes o diâmetro nominal da ferramenta de corte e ângulo de entrada de 2°. Os movimentos se iniciam da extremidade da cavidade para seu interior e mantêm-se o tempo todo no sentido concordante de corte. A ilustração do caminho de ferramenta gerado pelo software de CAM pode ser verificada pela figura 6.9.

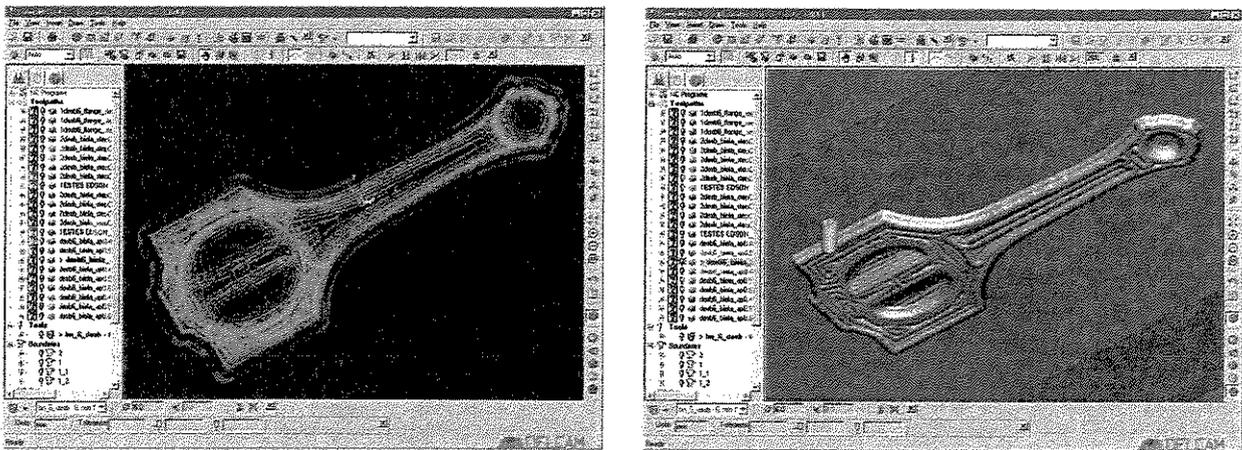


Figura 6.9: Ilustração do caminho de ferramenta do programa de usinagem.

Observa-se nas definições que a rotação (n), primeiro fator geralmente alterado a fim de aumentar ou reduzir a velocidade de corte, neste caso foi mantida para os três diferentes programas. Como o diâmetro efetivo de corte denominado de (d_e), valor este definido pela profundidade de corte (a_p), é correspondente ao maior diâmetro da circunferência medido na região de contato da aresta de corte da ferramenta com a superfície da peça, um aumento na profundidade de usinagem resulta em aumento no diâmetro efetivo de corte, o qual conseqüentemente altera a velocidade de corte efetiva, como mostrado na tabela 6.4. Normalmente a rotação de trabalho (n) é calculada em função do diâmetro efetivo (d_e), já a velocidade de avanço (v_f) é o produto dos fatores avanço por dente da fresa (f_z), número de dentes da fresa (z) e da rotação de trabalho (n). O volume de material removido na unidade de tempo (Q) é o resultado do produto dos fatores profundidade de usinagem (a_p), penetração de trabalho ou passo lateral (a_e) e velocidade de avanço (v_f). A evolução da variação destes parâmetros com o crescimento da profundidade de usinagem, pode ser vista na figura 6.10.

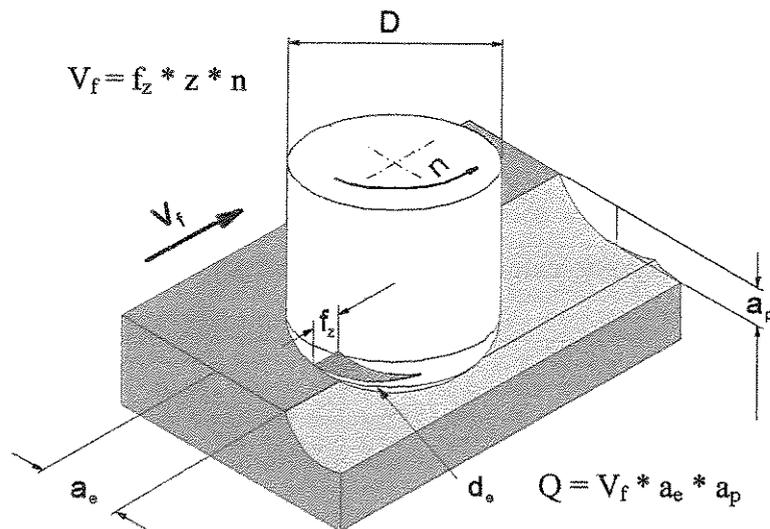
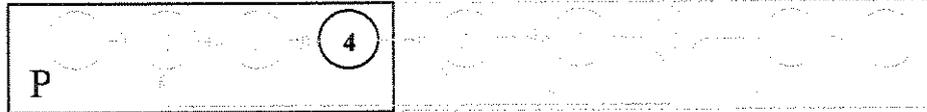


Figura 6.10: Ilustração dos parâmetros de usinagem com fresa de ponta esférica.

O aumento de volume de material removido pode ser obtido com o aumento do avanço por dente, com o aumento da penetração de trabalho até o seu valor máximo e também com o aumento da profundidade de usinagem.

6.2.4 - Plano de ação



O experimento é um convite para que um evento informativo ocorra. Portanto, foram submetidos todos os ensaios à mesma máquina-ferramenta, sob a mesma matéria-prima, com ferramentas de corte novas e utilizando-se de parâmetros de corte e fluidos de corte conhecidos. Teve-se como variáveis de entrada dos ensaios a profundidade de usinagem em três níveis, que, com sua variação causava a variação do diâmetro efetivo, da velocidade de corte efetiva e do volume de material removido na unidade de tempo, e a condição de refrigeração/lubrificação também em três níveis (corte a seco, com fluido em abundância e MQF).

Neste âmbito ter-se-ia 27 ensaios, o que se dá pelo fato do número de replicações de cada ensaio previamente estabelecido ser 3, definindo assim um experimento fatorial 3^2 replicado 3 vezes. O número de replicações foi definido em função da possibilidade de haver avarias na ferramenta de corte de maneira aleatória, seja devido à existência de cavaco em uma determinada região da peça que permita o recorte, ou até pela própria característica de corte interrompido inerente ao processo de fresamento, o que viria a causar alta dispersão. As duas variáveis numéricas de resposta, ou as características de qualidade, definidas para esses dois fatores de interesse foram o "número de cavidades usinadas" por vida de ferramenta e a "potência líquida máxima consumida". As mesmas foram verificadas conforme definição operacional a ser vista na página 86 e segundo os propósitos abaixo:

- Potência de corte líquida máxima consumida: basicamente pelo fato do conhecimento de que o esforço de corte em usinagem tende a crescer com o desgaste da ferramenta, e também a variar devido à lubrificação das interfaces cavaco/ferramenta e ferramenta/peça, pretendeu-se conhecer o valor da potência líquida máxima consumida na aplicação de diferentes fluidos e velocidades efetivas de corte, sob a qual foi conhecida em percentual de utilização da máxima potência da máquina-ferramenta. O valor considerado para a análise foi a máxima potência consumida na usinagem em cada ensaio.

- Número de cavidades usinadas: visa identificar a vida da ferramenta de corte em cada ensaio, sendo, se necessário, mensurada conseqüentemente em volume de material removido na unidade de tempo.

Para a obtenção do valor de potência líquida máxima consumida, necessitou-se reconhecer o valor necessário para giro da ferramenta sem corte efetivo, a fim de ser subtraído do valor máximo armazenado no comando da máquina-ferramenta.

Para facilitar o entendimento e a avaliação estatística descritiva, foram codificados os níveis dos fatores definindo-se A e B como sendo as identificações dos fatores de interesse, e sucessivamente considerando-se em ordem numérica crescente os correspondentes níveis desses fatores, conforme segue:

A = Condição de refrigeração/lubrificação

A1 = Corte a seco;

A2 = Fluido em abundância;

A3 = Técnica MQF com 14 ml/h

B = Parâmetro de corte

B1 = ($a_p = 0,48$ - Programa Biela.001);

B2 = ($a_p = 0,54$ - Programa Biela.002);

B3 = ($a_p = 0,6$ - Programa Biela.003)

Para esta formatação foram migrados todos os dados colhidos em ensaio por meio do formulário de coleta de dados.

6.2.4.1 - Formulário de coleta de dados

O padrão para o formulário de coleta de dados foi elaborado de maneira que não exigisse muito apontamento desnecessário, mas que também não permitisse a falta de informações relevantes. Assim, foram coletados tanto os dados contínuos oriundos da potência de corte como

os dados de contagem pertinentes ao número de cavidades usinadas, ambos no mesmo formulário de coleta de dados do tipo registro, o qual pode ser visto no anexo 1. Os valores de potência líquida máxima consumida foram obtidos após a subtração do valor necessário para giro da ferramenta sem corte efetivo.

6.2.4.2 - Definição operacional

As características de qualidade, como o desgaste da ferramenta, foram avaliadas tão somente ao término de cada programa de usinagem padrão em pauta, correspondente a uma cavidade, salvo os casos em que a ferramenta por ventura veio a quebrar durante a usinagem. Ocorrendo quebra, que pode ser caracterizado pela incidência de fagulhamento, o programa foi interrompido onde estava e teve contabilizada a informação anterior, tanto quanto ao número de cavidades usinadas como a potência líquida máxima de corte consumida, a qual foi monitorada a cada profundidade de corte a fim de verificar sua evolução. Porém somente foi utilizado para avaliação conclusiva o valor máximo final obtido em cada ensaio.

Determinou-se como sendo um ensaio, a usinagem de um número qualquer de cavidades com os mesmos parâmetros de corte, com a mesma ferramenta de corte e sob a mesma condição de refrigeração/lubrificação, limitado ao fator determinante do fim de vida da ferramenta. Atribui-se fim de vida o fato da ferramenta de corte apresentar receio de quebra ou a própria quebra, o que geralmente ocorre ao ultrapassar desgaste de flanco de 0,5 mm, ou de maneira simbolizada pode-se dizer que há geralmente a quebra quando $V_B > 0,5$ mm, momento este em que a ferramenta dentro do procedimento atual da organização, é normalmente encaminhada ao fornecedor de afiação. Portanto, fica estabelecido que receio de quebra é o momento em que a ferramenta apresenta excessivo fagulhamento, ponto este que manifestará valor de desgaste próximo ao V_B de 0,5 mm estipulado.

Fixou-se assim um desgaste $V_{Bmáx} = 0,5$ mm como sendo valor máximo para permissão de início de usinagem de uma nova cavidade. Assim, o fim de um ensaio se dava quando, ao fim da usinagem de uma cavidade, o desgaste de flanco da ferramenta tivesse ultrapassado este valor, ou quando durante a usinagem de uma cavidade, a ferramenta quebrasse.

Quanto maior o número de cavidades usinadas e menor o consumo de potência sob o mesmo parâmetro de corte e condição de refrigeração/lubrificação, melhor seria o comportamento técnico do parâmetro e da condição de refrigeração/lubrificação submetidos a essas determinadas condições de trabalho.

Após a finalização de cada ensaio, coube à equipe avaliar a conformidade das respostas frente ao almejado, principalmente no sentido de haver uma eventual necessidade de ajuste no contexto do procedimento experimental, rodando, a todo estágio do experimento, o ciclo *PDCA*.

Atribuiu-se fim aos procedimentos experimentais o exato momento em que foram cessados todos os ensaios, e avaliados como suficientes os números de replicações em função dos resultados.

6.2.4.3 - Medição do desgaste da ferramenta

O desgaste da ferramenta, como sendo uma referência para determinar a parada do ensaio, durante os ensaios foi verificado por lupa com graduação centesimal, disponibilizada pelo fornecedor da ferramenta. Uma vez identificado o momento de parada do ensaio, o desgaste da ferramenta foi confirmado através do aparelho Presetter Zoller Smile V300. Esse aparelho possui tecnologia de processamento de imagem "*all-in-one*" com monitor colorido, superfície de comando gráfico, precisão de indicação de 0,005 mm, câmera com objetiva telecêntrica, cruz de coordenada dinâmica e gerador de raios, os quais permitem medir automaticamente e pré-ajustar ferramentas, porém da forma que se encontra instalado não possibilitou a captura de imagens. Normalmente faz-se uso deste tipo de aparelho ilustrado pela figura 6.11 para Pre-set de ferramentas a serem usadas em máquinas que não possuem seu próprio sistema de pre-set integrado, como no casos de tornos CNC.

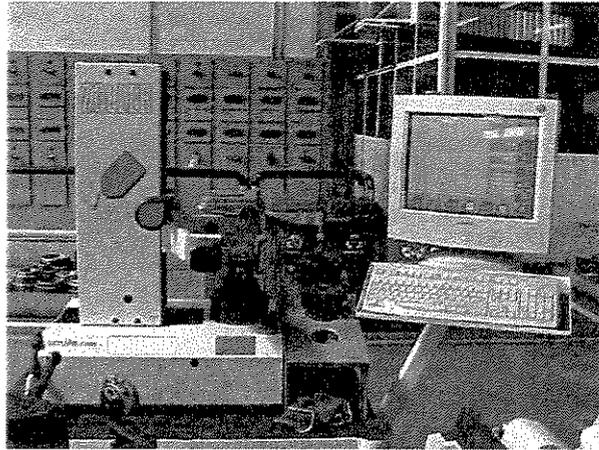


Figura 6.11: Ilustração do aparelho utilizado para medição do desgaste.

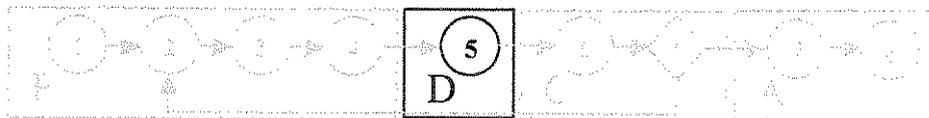
Assim, impossibilitada a captura das imagens das ferramentas de corte, a avaliação mais precisa dos desgastes das ferramentas foi executada no laboratório da Faculdade de Engenharia Mecânica da UNICAMP, onde foram medidos e registrados por meio das imagens obtidas pelo estereomicroscópio 6 Photo (aumento de até 25x) que estava acoplado a um microcomputador. Essa montagem viabilizou a medição de desgaste sobre as imagens capturadas. Os desgastes das ferramentas foram medidos individualmente em cada uma das arestas, onde se pôde confirmar a conformidade de cada um deles frente aos valores obtidos através do Zoller, pois, caso fosse evidenciado desgaste que permitisse a continuidade do ensaio, isto seria rigorosamente obedecido.

6.2.4.4 - Medição da potência líquida consumida

O valor referente à potência líquida consumida foi obtido em percentual pelo painel de comando da própria máquina-ferramenta após cada alteração do nível de trabalho atribuído pelo programa, coordenada Z, após a subtração do valor exigido pelo motor somente para manter a ferramenta girando a 13.500 rpm. Capturou-se este valor em porcentagem da potência máxima da máquina após a ativação do modo "Estudo" no campo de "Carga do Fuso", o qual tem a função de armazenar o maior valor de potência consumida durante a usinagem de cada cavidade. Porém, para a avaliação final, utilizou-se somente o valor máximo líquido obtido em cada ensaio, que foi encontrado após a subtração do valor necessário para giro da ferramenta sem corte efetivo pelo

valor armazenado no comando da máquina-ferramenta após a conclusão da usinagem da última cavidade, limite atribuído pelo desgaste da ferramenta de corte.

6.3 - Execução



Após determinada a data inicial do experimento e programação de utilização da máquina-ferramenta junto à pessoa responsável pelo planejamento, definiu-se que seria executado inicialmente o teste preliminar necessário para a identificação da vazão a ser usada na técnica MQF, e, em seguida, realizar-se-ia o sorteio que definiria a ordem de aplicação dos fatores de interesses.

Para que tudo pudesse fluir conforme planejado, verificou-se se realmente havia real conhecimento das variáveis de entrada abordadas desse processo e se as mesmas estavam conforme o previsto, basicamente por dois motivos. Primeiro para se certificar da confiabilidade dos resultados e segundo para garantir que os ensaios não se estendessem tanto a ponto de se tornarem onerosos demais, comprometendo o planejamento. Ciente dessa conformidade, foi iniciado o teste preliminar visando identificar a melhor vazão de óleo vegetal para ser adotada na técnica MQF.

Primeiramente identificou-se a correspondência entre a unidade utilizada pelo aparelho do sistema MQF instalado e a unidade almejada. Portanto, como o aparelho medidor contabiliza o número de gotas/min e pretendeu-se usar a unidade ml/hora, foram coletadas amostras do fluido de corte Vascomill através de um tubo de ensaio graduado, utilizando-se o fluxo de ar comprimido na pressão de 6 bars, condição de pressão definida para o experimento. O conteúdo de óleo do fluxo de ar-óleo foi coletado durante duas horas. O aparelho estava calibrado para fornecer 32 gotas/minuto, e em duas horas recolheu-se 28 ml no tubo. Assim, chegou-se à conclusão que, sob esta vazão, o aparelho fornecia 14 ml/h, sendo cada gota de óleo correspondente a $7,3 \cdot 10^{-3}$ ml.

Após ter identificado a equivalência entre gotas/min e ml/h respectiva a essa condição de trabalho, a próxima etapa foi estabelecer o valor ml/h a ser utilizado efetivamente no

procedimento experimental, sabendo-se que o mesmo deveria atingir o melhor resultado possível se tratando da vida útil da ferramenta de corte.

Ao acionar o fuso da máquina, observou-se que a mesma exige 25% da potência oferecida pelo motor simplesmente para manter a ferramenta girando a 13.500 rpm, sem o efetivo corte, dado este necessário para se fazer a analogia final baseada na potência líquida.

Com o objetivo de identificar a condição de trabalho mais satisfatória para a utilização nos ensaios, foram utilizadas três ferramentas de corte novas, avaliando assim a quantidade de fluido de corte aliada ao rendimento da ferramenta de corte e o nível de névoa eventualmente gerado no interior da máquina-ferramenta. Evidenciada a conformidade das arestas de corte das ferramentas, foi selecionado para uso no teste preliminar o parâmetro de corte codificado como B3, pelo fato do mesmo possuir condições de corte mais severas que os demais, fato que traria os resultados de maneira mais rápida. Assim, utilizando o determinado parâmetro de corte sob uma vazão de 3,5 ml/h de fluido a ferramenta apresentou desgaste de $V_B = 0,45$ mm usinando apenas 5 cavidades, já com 7 ml/h usinou 10 cavidades com $V_B = 0,6$ mm. Com o máximo de vazão permitida pelo aparelho, 14 ml/h, obteve-se com 15 cavidades usinadas um $V_B = 0,55$ mm. Aliando a similaridade dos desgastes e a imperceptível névoa gerada pela vazão máxima de óleo à diferença significativa entre o número de cavidades usinadas em cada uma das três condições, a equipe julgou ser esse resultado suficiente para optar por se trabalhar com a vazão de 14 ml/h no experimento.

Conforme exposto, os bicos de aspersão que acompanham o equipamento são originalmente compostos de mangueiras articuláveis e notou-se, já no teste preliminar, que as mesmas oscilaram nos momentos em que a máquina-ferramenta se deslocava em avanço rápido. Baseado nisto, foi acionado o fornecedor do equipamento e as mesmas foram substituídas por tubos de cobre, os quais permitiram uma melhor regulagem e maior rigidez em uso, eliminando o receio de que a oscilação viesse a interferir nos resultados, rigidez esta que durante todo o experimento permitiu que os bicos ejetores permanecessem em posição constante.

Após o teste preliminar, o sorteio determinou que o experimento iniciar-se-ia com o corte a seco, seguido do corte com fluido em abundância e do corte com a utilização da técnica MQF com a vazão pré-definida de 14 ml/h.

6.3.1 - Aplicação do corte a seco

O ensaio teve início fazendo uso do parâmetro B1, ou seja, com $a_p = 0,48$ mm correspondente a $v_{ce} = 138,07$ m/min. Tanto a primeira como a segunda replicação demandou a usinagem de 10 cavidades, visto que a ferramenta de corte utilizada para a primeira replicação veio a romper ao tentar usinar a próxima cavidade. A ferramenta utilizada na segunda replicação apresentou desgaste de $V_B = 0,55$ mm, instituindo receio de quebra. Já na terceira replicação notou-se que a ferramenta usinou 9 cavidades e apresentou receio de quebra com $V_B = 0,47$ mm, com isso determinou-se o encerramento desse ensaio.

Com a utilização do parâmetro B2, $a_p = 0,54$ mm e correspondente $v_{ce} = 145,64$ m/min, a primeira replicação obteve 6 cavidades usinadas, quando, ao iniciar a usinagem da próxima cavidade, a mesma se rompeu. Nas próximas replicações obteve-se a usinagem de 8 cavidades com desgaste de $V_B = 0,6$ mm e $0,52$ mm respectivamente, receando a quebra.

Utilizando-se do parâmetro B3, $a_p = 0,6$ mm e correspondente $v_{ce} = 152,68$ m/min, notou-se que tanto a primeira replicação como a segunda apresentaram receio de quebra após usinarem 6 cavidades apresentando $V_B = 0,48$ mm e $0,57$ mm respectivamente. Na terceira replicação a ferramenta de corte apresentou quebra exatamente no final da cavidade de n.º 6, sendo contabilizada por ter completada a usinagem dessa cavidade. Como ilustração do processo de usinagem a seco segue a figura 6.12, onde é notável a excelente visibilidade permitida por esse processo de usinagem.

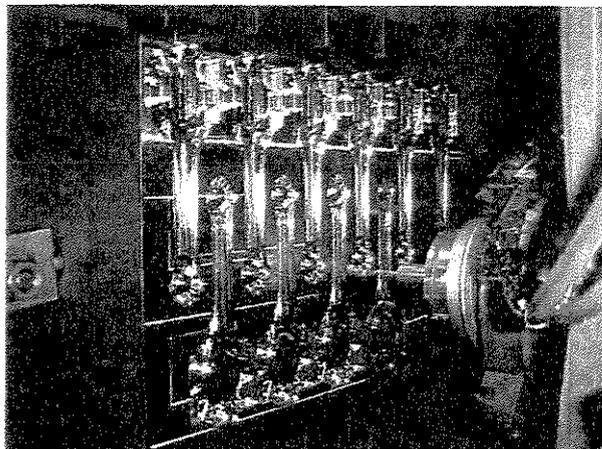


Figura 6.12: Ilustração da ferramenta de corte em usinagem a seco.

A composição desses ensaios com todos os resultados se resume na tabela 6.5.

Tabela 6.5: Representação dos resultados obtidos nos ensaios com o corte a seco.

Réplicas: I - II - III	N.º de cavidades usinadas				Potência líquida máxima consumida (%)				Desgaste da ferramenta V_B (mm)		
	I	II	III	\bar{x}	I	II	III	\bar{x}	I	II	III
Tratamento (níveis)											
A1 - B1	10	10	9	9,666	7,7	7,6	7,5	7,6	Quebra	0,55	0,47
A1 - B2	6	8	8	7,333	7,7	7,7	7,8	7,733	Quebra	0,6	0,52
A1 - B3	6	6	6	6	7,7	7,8	7,9	7,8	0,48	0,57	Quebra

Baseada nos resultados obtidos, a equipe levantou a questão de que poderia ser afirmado com base no conhecimento do processo de usinagem e avaliando os resultados da coluna do número de cavidades, que, quanto maior a severidade do programa, menor gradativamente é a vida da ferramenta, ou seja, menor o número de cavidades usinadas.

Em virtude de determinada observação, foi considerada uma análise antecipada desses ensaios que utilizaram três níveis do fator parâmetro de corte sob uma única condição de

refrigeração/lubrificação, o corte a seco, codificado como A1.

6.3.1.1 - Avaliação estatística dos resultados parciais

Interpretou-se portanto até este momento como sendo um experimento fatorial 3^1 que replicado 3 vezes geraram 9 ensaios. Com os mesmos pretendeu-se principalmente avaliar a necessidade real de se fazer uso do parâmetro de corte codificado como B2, visto continuamente apresentar resultado intermediário aos parâmetros B1 e B3 no tocante à vida da ferramenta de corte, segundo a observação levantada pela equipe.

Assim, para afirmação dessa hipótese, foram avaliados os dados obtidos usando de estatística descritiva, de maneira analítica e prática, com o auxílio do software Minitab.

Estudando primeiramente as respostas, a potência líquida máxima consumida e o número de cavidades usinadas, obteve-se o coeficiente de correlação entre elas através de teste a um nível de significância de 5%. Isto significa dizer que, através do P-value encontrado, informação que mede a evidência estatística contra a hipótese nula de que a verdadeira correlação na população é zero, quando seu valor menor que 0,05, significa dizer que se tem menos de 5% de chance de errar ao afirmar que são significativos. Os valores acima de 10% normalmente não são significativos, o que faz com que os valores entre 5 e 10 % sejam relevantes.

Correlations: N° Cavidades; Potência

Pearson correlation of Potência and N° Cavidades = $r = -0,598$

P-Value = 0,089

Um número chamado de coeficiente de correlação mede a força da relação linear entre as duas variáveis, a potência líquida máxima consumida e o número de cavidades usinadas. A letra r é usada para representar esse coeficiente e seus valores variam de -1.0 a +1.0. Se os pontos no gráfico são colineares com inclinação positiva, então $r=1$; se a inclinação é negativa, então $r=-1$. Valores de $r=1$ ou -1 raramente ocorrem porque em situações reais os pontos nunca caem sobre uma linha reta. Portanto, nesse caso, obteve-se valor r como sendo -0,598, o que demonstra uma

tendência linear decrescente. Além do que, o P-value sendo 0,089, fornece evidência de que a correlação da população não é zero, o que implicaria em dizer analiticamente que há correlação entre a potência e o número de cavidades usinadas. Porém sabendo-se que correlação não é o mesmo que causalidade, ou seja, relação de causa e efeito, seria prematuro usar dessa afirmação. Provar relações de causa e efeito é muito mais difícil do que somente mostrar um coeficiente de correlação alto. Para isto coube avaliar, orientado pelo conhecimento do processo de usinagem, e através da análise de variância, mais conhecida como ANOVA, a provável relação entre o número de cavidades usinadas e os parâmetros de corte, detalhe este imprescindível para a verificação da influência de a_p na vida da ferramenta.

One-way ANOVA: N° Cavidades versus Parâmetros - Combinações A1

Analysis of Variance for N° Cavidades

Source	DF	SS	MS	F	P
Parâmetros	2	20,667	10,333	18,60	0,003
Error	6	3,333	0,556		
Total	8	24,000			

Individual 95% CIs For Mean

Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----		
B1	3	9,667	0,577			(-----*-----)
B3	3	6,000	0,000	(-----*-----)		
B2	3	7,333	1,155		(-----*-----)	
				-----+-----+-----+-----		
Pooled StDev =		0,745		6,4	8,0	9,6

Essa análise demonstrou que há uma relação extremamente forte entre os parâmetros de corte e o número de cavidades usinadas, pelo fato do P-value ser 0,003, o que significa dizer que se tem aproximadamente 0,3% de chance de errar ao afirmar que tal fator é significativo. Da mesma forma, foi estudada a influência dos parâmetros de corte na potência líquida máxima consumida.

One-way ANOVA: Potência versus Parâmetros - Combinações A1

Analysis of Variance for Potência

Source	DF	SS	MS	F	P
Parâmetros	2	0,06222	0,03111	4,00	0,079
Error	6	0,04667	0,00778		
Total	8	0,10889			

Individual 95% CIs For Mean

Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----
B1	3	7,6000	0,1000	(-----*-----)
B3	3	7,8000	0,1000	(-----*-----)
B2	3	7,7333	0,0577	(-----*-----)
Pooled StDev = 0,0882				-----+-----+-----+-----+-----
				7,50 7,65 7,80 7,95

Portanto, pode-se afirmar que os parâmetros de corte influenciam tanto na vida da ferramenta, que é medida pelo número de cavidades usinadas, quanto na potência líquida máxima consumida, pelo fato do P-value ser 0,079, o que implica dizer que é relevante a relação entre eles. Esta avaliação parcial do experimento (combinações A1), demonstrou que o parâmetro de corte gera maior efeito na vida da ferramenta do que na potência líquida máxima consumida, devido ao fato de possuírem os mesmos graus de liberdade (valor DF), e seu valor de P-value ser menor. Desta forma, pode-se dizer que o número de cavidades usinadas e a potência líquida máxima consumida estão altamente correlacionados e não necessariamente causam uma a outra, havendo simplesmente "causalidade".

Sustentada nessa informação, a equipe determinou a alteração da composição do experimento visando reduzir o tempo a ser despendido para o experimento sem perder o conteúdo do resultado. Para isso, foi definido que os seguintes ensaios, ou seja, com o fluido de corte em abundância e com a técnica MQF, deixariam de fazer uso do parâmetro B2 pelo fato de ser um programa composto de parâmetros de corte intermediários aos demais. Porém, caso o resultado em termos de número de cavidades usinadas quando utilizado os parâmetro B1 e B3 em qualquer

uma das condições de refrigeração/lubrificação não correspondesse proporcionalmente ao resultado obtido no corte a seco, o parâmetro B2 seria necessariamente aplicado.

Desconsiderando-se o resultado obtido com o programa Biela.002 no corte a seco no que diz respeito à sua análise estatística descritiva junto aos demais ensaios, deixa-se de ter um experimento fatorial 3^2 que replicado 3 vezes geraria 27 ensaios e passa-se a ter um experimento fatorial $3^1 \times 2^1$. Ilustra-se dessa forma porque se tem, a partir de então, três níveis para a condição de refrigeração/lubrificação e dois níveis para o parâmetro de corte, os quais multiplicados geram 6 ensaios ou combinações, que multiplicados pelas replicações resultam em 18 ensaios.

6.3.2 - Aplicação do corte com fluido em abundância

Baseado no aprendizado gerado no ensaio do corte a seco, foram aplicados somente os parâmetros B1 e B3. No ensaio com o parâmetro B1 obteve-se a usinagem de 6 cavidades com a ferramenta de corte demonstrando receio de quebra com $V_B = 0,53$ mm. Na segunda replicação a ferramenta de corte usinou 7 cavidades e manifestou $V_B = 0,6$ mm. Na terceira replicação a ferramenta de corte se rompeu na cavidade de n.º 7, sendo contabilizadas somente 6 cavidades. Utilizando-se do parâmetro B3, tanto a primeira replicação como a segunda apresentaram desgaste de $V_B = 0,5$ mm e $0,62$ mm respectivamente, além de gerarem grave lascamento após usinarem 3 cavidades. O mesmo resultado em termos de número de cavidades foi demonstrado pela terceira replicação, porém com quebra efetiva no início da usinagem da próxima cavidade.

6.3.3 - Aplicação da técnica MQF

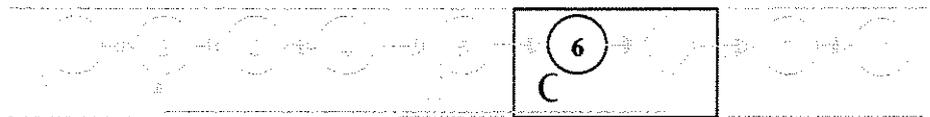
Confirmada a regulagem de 14 ml/h definida em teste preliminar e a distância entre o bico aspersor e a ferramenta de corte, bem como o direcionamento do fluido, iniciaram-se os ensaios utilizando-se dos parâmetros B1 e B3. Utilizando-se do parâmetro B1, a primeira ferramenta de corte mostrou-se capaz de usinar 24 cavidades, mas se rompeu na seguinte. A segunda replicação correspondeu a usinagem de 23 cavidades com $V_B = 0,55$ mm e a terceira 22 cavidades com $V_B =$

0,58 mm, ambas receando a quebra. Sob o uso do parâmetro B3, a primeira ferramenta de corte mostrou-se capaz de usinar 16 cavidades, mas também se rompeu na seguinte. As demais demandaram a usinagem de 15 cavidades cada, onde a segunda apresentou $V_B = 0,60$ mm e a terceira $V_B = 0,48$ mm, ambas decretando receio de quebra e assim consumando o encerramento dos ensaios planejados, cabendo em seguida a avaliação.

Capítulo 7

Resultado Experimental

7.1 - Verificação



A execução do experimento superou o tempo previsto em duas semanas, sendo concluída na semana 49 do ano de 2003, ainda que não foram executados os inicialmente previstos 27 ensaios. Este atraso ocorreu devido ao fato de muitas vezes ter havido interrupções estratégicas nos ensaios, o que fez com que a máquina-ferramenta fosse utilizada certas vezes somente durante meio expediente de trabalho e ainda, muitas vezes, com intervalo semanal de uso.

Durante a execução do experimento foram observados todos os itens contemplados no campo de análise no tocante à conformidade definida para cada um deles. A partir daí, toda e qualquer alteração prevista no processo, como por exemplo, o processo de uma simples troca de ferramenta, teve seus detalhes considerados e eliminados.

A tabela 7.1 mostra um resumo dos resultados obtidos em termos de vida da ferramenta, medida em número de cavidades usinadas, de potência de corte líquida máxima consumida e em termos de desgaste da ferramenta ao fim de sua vida.

Tabela 7.1: Representação dos resultados obtidos no experimento.

Réplicas: I - II - III	Nº de cavidades usinadas				Potência líquida máxima consumida (%)				Desgaste da ferramenta V_B (mm)		
	I	II	III	\bar{x}	I	II	III	\bar{x}	I	II	III
Tratamento (níveis)											
A1 - B1	10	10	9	9,666	7,7	7,6	7,5	7,6	Quebra	0,55	0,47
A1 - B2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A1 - B3	6	6	6	6	7,7	7,8	7,9	7,8	0,48	0,57	Quebra
A2 - B1	6	7	7	6,66	7,1	7,3	7,4	7,26	0,53	0,6	Quebra
A2 - B2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A2 - B3	3	3	3	3	7,5	7,6	7,7	7,6	0,5	0,62	Quebra
A3 - B1	24	23	22	23	7,0	6,8	6,9	6,9	Quebra	0,55	0,58
A3 - B2	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
A3 - B3	16	15	15	15,3	7,1	7,2	7,0	7,1	Quebra	0,60	0,48

Interpretando estatisticamente o número de combinações utilizadas, pode-se dizer que houve efetivamente um procedimento fatorial $3^1 \times 2^1$ resultando em 18 ensaios. Verificou-se que houve de certa forma um pequeno pico na potência consumida em todo término da cavidade, fato este explicável devido ao fato do modelo eletrônico do produto biela possuir detalhes geométricos em determinadas áreas que comparados ao diâmetro da ferramenta de corte utilizada, fez com que a mesma, em seu percurso, atingisse uma área maior de contato, o que ocasionou o aumento de esforço.

O fato de ter ocorrido coincidentemente em cada ensaio a quebra de uma ferramenta de corte possibilitou de certa forma conhecer seu limite de vida em cada combinação e assim saber que o receio de quebra estipulado em $V_{B\text{máx}} = 0,5$ mm espelhava realmente o fim de vida real.

Ponto este muito interessante, pois em campo deve-se conhecer o momento propício para cessar o uso da ferramenta de corte, para assim obter o maior número de afiações possíveis.

Como a máquina-ferramenta usa cerca de 25% de sua potência máxima somente para manter a ferramenta girando na rotação ensaiada, e a potência máxima consumida entre todos os ensaios foi de 32,9%, pode-se se dizer que, nessas condições de uso, a ferramenta em efetivo trabalho utilizou no máximo tão somente 7,9% da potência da máquina para efetuar o corte.

O desgaste apresentado por todas as ferramentas de corte ao fim de cada ensaio, em função da estratégia de corte, desbaste frontal, e geometria da ferramenta, ferramenta de topo esférico, sempre se mostrou na região efetiva de corte, não sofrendo assim a ponta da ferramenta desgaste significativo.

A avaliação do resultado da ferramenta, no tocante ao desgaste, pode ser verificada em seguida de maneira seletiva. Para tanto, foram desprezadas as ferramentas que sofreram quebra e selecionada, para análise em microscópio óptico, uma ferramenta de corte participante de cada conjunto de ensaio envolvendo o fluido de corte em abundância, o corte a seco e a técnica MQF, isso porque as ferramentas utilizadas em cada condição de refrigeração/lubrificação respectivo apresentaram o mesmo mecanismo de desgaste. Procurou-se selecionar então as ferramentas de desgaste mais expressivo dentro de cada nível de condição de refrigeração/lubrificação. Assim coincidentemente têm-se as ferramentas de corte participantes da segunda replicação utilizando-se do parâmetro de corte B3.

7.1.1 - Análise do desgaste da ferramenta quando da aplicação do corte a seco

A aplicação do corte totalmente a seco demonstrou ter uma certa tendência nos resultados, quando, quanto mais severas as condições de corte, menor o número de cavidades usinadas.

As fotografias da aresta de corte da ferramenta somente foram extraídas na etapa final do experimento, o que permitiu avaliar o mecanismo de desgaste das mesmas. As fotos da superfície de folga apresentaram regiões desfocadas em função da curvatura da aresta de corte.

As ferramentas de corte utilizadas para o corte a seco normalmente apresentaram, após a usinagem da terceira cavidade, um pequeno sulco na aresta de corte. A figura 7.1.A representa a superfície de saída da ferramenta e nela pode-se observar algumas marcas oriundas de contato entre cavaco e ferramenta, formadas assim pelo deslizamento do cavaco. Conforme Schulz (2000) e Filho *et al.* (2001), devido à falta de resfriamento, manifestou-se o aumento da temperatura visível na região inferior esquerda da figura 7.1.A, fato percebido tão facilmente pela mudança de coloração da superfície, o que acelerou o desgaste da ferramenta. A figura 7.1.B procurou demonstrar a superfície de saída da ferramenta.

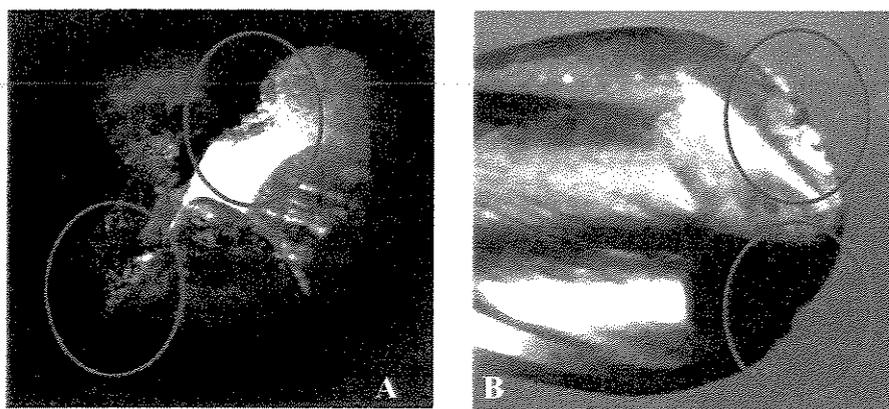


Figura 7.1: Regiões de desgaste da ferramenta de corte submetido ao corte a seco.

A dimensão do desgaste de flanco ilustrado acima atingiu 0,57 mm. Observa-se que na superfície de saída, com o crescimento do desgaste de entalhe, pode-se verificar uma região onde o material realmente desapareceu, bem visível inclusive pela sombra gerada. Mas, nota-se que, com a rapidez da evolução do desgaste, os danos na superfície de folga não refletiram somente o desgaste expresso na superfície de saída, mas também o lascamento que possivelmente se originou da aceleração do desgaste de entalhe.

O mesmo mecanismo de desgaste descrito ocorreu em todos os ensaios com o corte a seco, porém em reduzida intensidade nos parâmetros de corte que utilizavam de menores velocidades efetivas de corte.

7.1.2 - Análise do desgaste da ferramenta quando da aplicação do corte com fluido em abundância

O resultado em número de cavidades usinadas com o fluido de corte em abundância foi muito inferior a todos os outros resultados em todas as replicações. Com o fim de entender melhor o ocorrido com as ferramentas de corte, estudou-se através das figuras 7.2.A e 7.2.B o mecanismo de desgaste gerado.

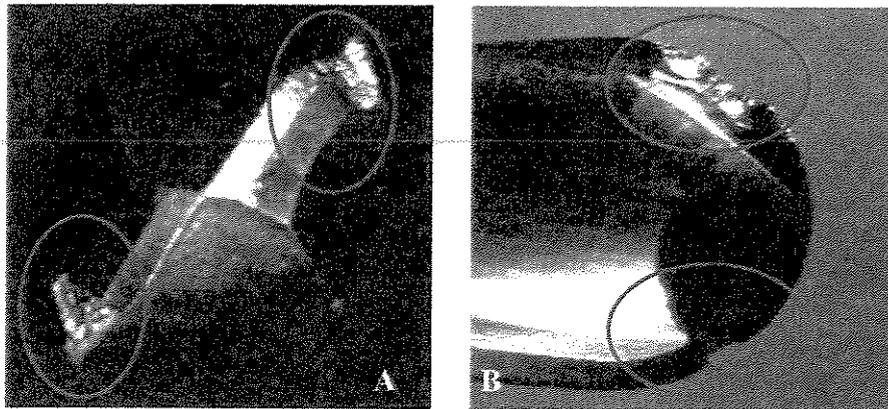


Figura 7.2: Regiões de desgaste da ferramenta de corte submetida ao corte com fluido em abundância.

Conforme Diniz et al. (1999), a usinagem em fresamento HSM requer, para facilitar o processo de cisalhamento do cavaco, a geração de temperatura suficiente para certa redução da resistência do material da peça e do cavaco na região de corte, condição esta que, devido ao alto poder de refrigeração do fluido expulso em abundância, não foi atingida.

Ainda, o uso de fluido em abundância incentiva a variação de temperatura devido ao alto resfriamento da aresta de corte no espaço de tempo que ela passa fora da peça em cada volta, o que causa choques térmicos e conseqüentemente, propicia a formação de trincas e microlascamentos nas arestas de corte, o que, por fim, gera os lascamentos de grande porte mostrados na figura. A dimensão do desgaste/lascamento apresentado atingiu 0,62 mm. A mesma forma padrão de fim de vida da ferramenta, com lascamento acentuado percebido na superfície de saída apresentada pela figura 7.2.B, ocorreu para as demais ferramentas. Como o lascamento é

uma avaria que quase sempre se manifesta de maneira aleatória, possivelmente a ocorrência de um lascamento maior que o apresentado foi o responsável pela quebra das ferramentas, ocorridas em outros ensaios utilizando-se de fluido em abundância.

7.1.3 - Análise do desgaste da ferramenta quando da aplicação do corte com a técnica MQF

A figura 7.3 mostra a condição da ferramenta ao fim de sua vida. Neste ensaio, a ferramenta ao atingir este ponto tinha desgaste de flanco igual a $V_B = 0,6$ mm.

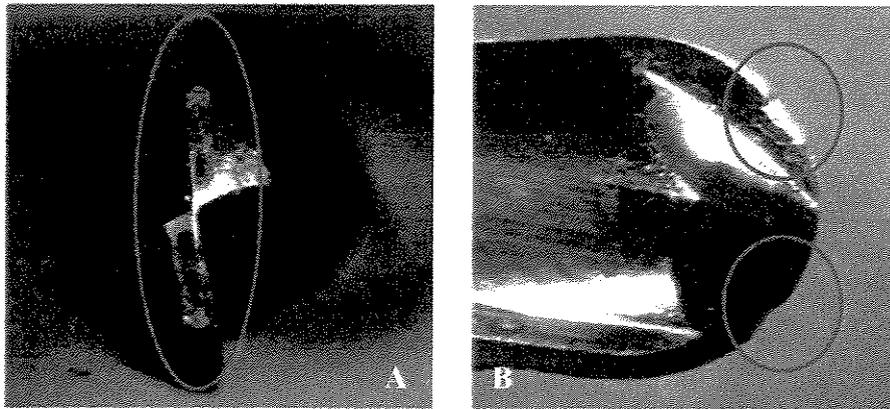


Figura 7.3: Regiões de desgaste da ferramenta de corte submetida ao corte com a técnica MQF utilizando óleo vegetal.

Parte do óleo vegetal atomizado em direção à ponta da ferramenta ficou aderida à região limítrofe do percurso da ferramenta. Como este óleo vegetal apresenta como característica natural um alto índice de lubrificidade, além de facilitar o cisalhamento do cavaco fez com que a ferramenta não se aquecesse excessivamente, mesmo porque com o cisalhamento facilitado o calor gerado na interface é menor. A existência de menor temperatura na interface sem a existência de choque térmico retardou o mecanismo gerador do desgaste da ferramenta, pois possuir um gradiente de temperatura menor significa melhorar o desempenho da ferramenta (Ferroresi, 1977).

One-way ANOVA: N° Cavidades versus Parâmetros - Combinações A3

Analysis of Variance for N° Cavidades

Source	DF	SS	MS	F	P
Parâmetros	1	88,167	88,167	132,25	0,000
Error	4	2,667	0,667		
Total	5	90,833			

Individual 95% CIs For Mean
Based on Pooled StDev

Level	N	Mean	StDev	-----+-----+-----+-----+-----
B1	3	23,000	1,000	(-----*-----)
B3	3	15,333	0,577	(---*---)
				-----+-----+-----+-----+-----
				15,0 18,0 21,0 24,0

Nota-se nessa avaliação que ambas condições apresentaram P-value como sendo 0,000, o que determina altíssima relação entre os parâmetros de corte e o número de cavidades, resultado este também apresentado pelo corte a seco.

Para a avaliação da interação dos fluidos de corte com os parâmetros de corte, relacionado à potência líquida máxima consumida e ao número de cavidades usinadas, utilizou-se da técnica de delineamento de experimento, conhecida como DOE. Essa técnica permite avaliar tanto a interação entre as variáveis como seus principais efeitos. A interação está sendo representada pela figura 7.4, a qual está subdividida em A e B.

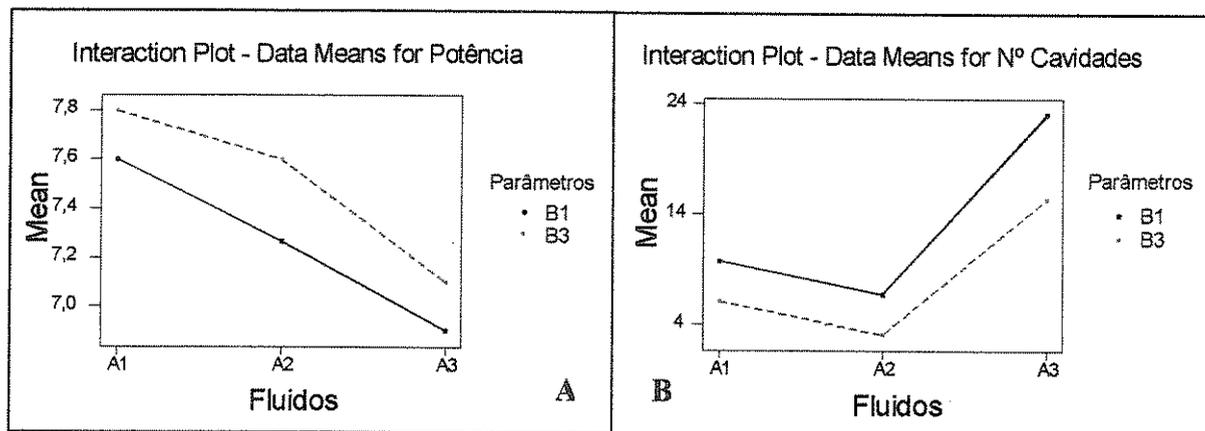


Figura 7.4: Gráficos de interação do fluido de corte na potência máxima consumida e no número de cavidades usinadas.

Esta figura ressalta que o fato de não ter havido cruzamento entre as linhas e as mesmas estarem praticamente paralelas entre si, identifica que os sistemas de refrigeração/lubrificação, ou seja, os fluidos de corte, têm influência quase proporcional a cada um dos parâmetros de corte testados, tanto com relação à potência consumida quanto ao número de cavidades usinadas, considerando certo destaque positivo para o fluido A3 quando utilizado o parâmetro B1. Porém, como a reta composta pelos parâmetros B1 da figura 7.4B demonstra uma tendência em se cruzar, tanto entre os pontos A1 e A2 como entre os pontos A2 e A3, o P-value da interação dos parâmetros com os fluidos tende a zero. Neste caso, cabe a análise prática, pois como o fluido não é linear não haverá o cruzamento que simbolizaria a interação. Já, para a potência líquida máxima consumida, como a inclinação da reta é menor, o valor de P-value tende ser maior. Toda essa avaliação pode ser confirmada de maneira analítica, conforme segue.

General Linear Model: N° Cavidades; Potência versus Parâmetros; Fluidos

Factor	Type	Levels	Values
Parâmetros	fixed	2	B1 B3
Fluidos	fixed	3	A1 A2 A3

Analysis of Variance for N° Cavidades, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
--------	----	--------	--------	---	---

Parâmetros	1	112,50	112,50	337,50	0,000
Fluidos	2	685,78	342,89	1028,67	0,000
Parâmetros*Fluidos	2	16,00	8,00	24,00	0,000
Error	12	4,00	0,33		
Total	17	818,28			

Percebe-se que o número de cavidades por vida de ferramenta sofre tanta influência do parâmetro de corte quanto do fluido de corte, podendo ser confirmado pelo fato de ter sido encontrado P-value igual a 0,000, tanto para os parâmetros como para as condições de refrigeração/lubrificação. Quanto à interação de ambos, conforme previsto, apesar do P-value ser 0,000, predomina a análise prática executada sobre a figura 7.4, a qual mostrou que pelo fato do fluido de corte não ser linear, não há interação.

Mas, baseado somente no valor P-value, não há a possibilidade de afirmar qual fator é mais significativo, principalmente quando ambos possuem o mesmo resultado, exceto quando se interpreta o resultado da distribuição F. Essa distribuição é a fração entre determinadas variâncias, e de significância estatística. Para o DOE, F é a fração da média quadrática de determinado fator pela média quadrática do erro. A comparação que pode ser feita com o F calculado é a diferença entre os valores de F para cada fator ou interação, sendo quanto maior o valor, maior o efeito do fator no resultado do experimento. A comparação é feita se utilizando de tabela, tipicamente em três níveis de risco. São eles: $\alpha=0,05$, que corresponde a confiabilidade de 95%, $\alpha=0,01$, correspondente a 99% e $\alpha=0,001$, respectivamente correspondente a 99,9% de confiabilidade.

Assim como na distribuição normal, a distribuição F é infinita, quanto mais o valor F calculado se encontrar a direita da cauda do gráfico, a probabilidade de ter ocorrido ao acaso torna-se menor. O gráfico desta distribuição é gerado em conformidade com o grau de liberdade de cada fator, o qual é demonstrado pelo DF. Desta maneira, na figura 7.5 tem-se a representação da distribuição F para os parâmetros de corte, e na figura 7.6, o correspondente aos fluidos de corte e a interação, visto ambos possuírem o mesmo grau de liberdade. Ambas distribuições são aplicadas como auxílio na averiguação do fator que mais influenciou na vida da ferramenta e na potência líquida máxima consumida.

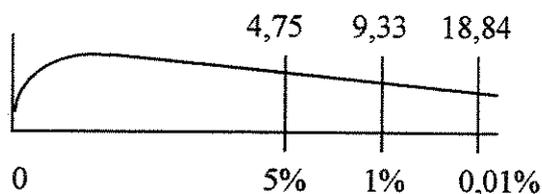


Figura 7.5: Distribuição F para os parâmetros.

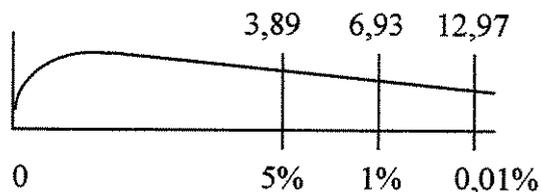


Figura 7.6: Distribuição F para os fluidos e para a interação.

No que diz respeito à vida da ferramenta, sabendo-se que o F calculado para os parâmetros é 337,50 e para o fluidos é 1.028,67, conclui-se com alto grau de confiança que ambos são significativos, pois estão bem a direita da cauda. Este resultado reforça a conclusão de que não há interação dos parâmetros com os fluidos, isto devido ao fato do valor F calculado para a interação ser 24,00, o que apesar de se mostrar abaixo de 0,01%, é muito inferior aos demais. Portanto, como o F calculado para o fluido de corte é maior, afirma-se que este fator surtiu maior efeito do que o parâmetro de corte.

A mesma análise utilizando-se das figuras 7.5 e 7.6 é feita com relação a potência líquida máxima consumida, após a análise de variância abaixo.

Analysis of Variance for Potência, using Adjusted SS for Tests

Source	DF	Seq SS	Adj MS	F	P
Parâmetros	1	0,26889	0,26889	22,00	0,001
Fluidos	2	1,49778	0,74889	61,27	0,000
Parâmetros*Fluidos	2	0,01778	0,00889	0,73	0,503
Error	12	0,14667	0,01222		
Total	17	1,93111			

Least Squares Means

	.. N° Cavidades.		.. Potência ..		
Parâmetros	Mean	SE Mean	Mean	SE Mean	StDev
B1	13,111	0,19245	7,256	0,03685	0,321
B3	8,111	0,19245	7,500	0,03685	0,324

Fluidos

A1	7,833	0,23570	7,700	0,04513	0,141
A2	4,833	0,23570	7,433	0,04513	0,216
A3	19,167	0,23570	7,000	0,04513	0,141

Em se tratando de potência líquida máxima consumida, o P-value de 0,503 obtido na interação demonstra não ser significativa, facilitando a interpretação de que não há interação. Obtendo-se o F calculado para os parâmetros como sendo 22,00 e para os fluidos 61,27, conclui-se também que ambos possuem alto grau de confiança em afirmar serem significativos. Porém, como o F calculado para o fluido é maior, tanto para a vida de ferramenta como para a potência líquida máxima consumida, o fator fluido de corte, determinado pelas condições de refrigeração/lubrificação, provou ser o fator que mais influenciou nos resultados obtidos em todo o experimento.

Observa-se que os valores médios da potência de corte líquida máxima consumida cresceram com a severidade dos parâmetros e decresceram quanto maior o número de cavidades usinadas, fato explicado pela causalidade. Por tendência os programas de menor a_p por possuírem menor área de contato ferramenta/peça exigiram menor potência da máquina e conseguiram apresentar um maior número de cavidades usinadas.

7.3 - Discussões dos resultados

A análise da figura 7.4B mostra dois pontos interessantes, quais sejam: a) a aplicação do MQF (situação A3) proporcionou a vida mais alta da ferramenta dentre todos os sistemas de refrigeração/lubrificação testados, seguido pelo corte a seco (A1) e, finalmente, pelo corte com fluido em abundância (A2); b) o aumento da profundidade de corte de 0,48 mm para 0,60 mm (B1 para B3) diminuiu a vida da ferramenta. Segue uma breve discussão das causas destes resultados.

7.3.1 - Análise da influência da refrigeração/lubrificação na vida da ferramenta

O fato dos ensaios com fluido de corte em abundância terem proporcionado a menor vida da ferramenta era esperado. Diniz (2001) e De Melo (2000) já tinham afirmado que o uso de fluido em abundância em operações com corte interrompido, como o fresamento, prejudica a vida da ferramenta, pois a alternância de sua temperatura gerada pelos sucessivos aquecimentos (durante o período em que a aresta está no corte – período ativo) e resfriamentos (no período em que a aresta da ferramenta passa fora da peça – período inativo) e incentivada pelo maior resfriamento da ferramenta causado pelo fluido de corte, que atinge a aresta principalmente quando a mesma se encontra em seu período inativo, causa tensões térmicas que vão gerar trincas e outras avarias na ferramenta. Assim, durante o corte a seco a amplitude de variação da temperatura é menor e menor é a tensão de origem térmica na ferramenta, causando vida da ferramenta maior que no corte com fluido em abundância.

O que não se sabia de antemão era a influência da utilização do MQF na vida da ferramenta. O fato do uso desta técnica ter proporcionado a maior vida da ferramenta, maior até que o corte a seco, pode ser explicado da seguinte maneira: a capacidade de refrigeração do MQF é pequena. Braga (2001) demonstrou que a taxa de remoção de calor do fluxo ar-óleo do MQF é a mesma daquela que se obtém quando se tem somente ar comprimido, pouco maior do que aquela que se obtém no corte a seco e muito menor que aquela que se obtém quando se tem fluido em abundância. Assim, o MQF somente pode apresentar bons resultados em termos de vida da ferramenta se alguma lubrificação da interface de contato cavaco-ferramenta e ferramenta/peça for possível e isto somente é possível se o óleo realmente conseguir atingir estas interfaces. No tipo de operação que se teve neste trabalho (fresamento de cavidades de matrizes) isto é possível, pois o comprimento de contato aresta da ferramenta/peça é pequeno em cada rotação da ferramenta, devido à pequena relação entre a profundidade de corte radial (a_e) e o diâmetro da fresa (D). Diniz (2001) mostra que, no fresamento, o ângulo de contato entre aresta e peça em cada volta (φ_0) pode ser dado pela equação 7.1.

$$\cos \varphi_0 = 1 - \frac{2a_e}{D} \quad (7.1)$$

No caso deste trabalho em que se teve $a_e = 2,4$ mm e $D = 6$ mm, tem-se ϕ_0 aproximadamente igual a $78,5^\circ$. Assim, em cada volta da ferramenta, a mesma passava cortando a peça $78,5^\circ$ e $281,5^\circ$ fora da peça. Durante o período que ela passava fora da peça em cada volta ela recebia o jato de ar-óleo integral do MQF que não causava grande resfriamento (o que, se ocorresse causaria a variação de temperatura prejudicial à vida da ferramenta) mas fazia com que, quando ela entrava de volta no corte, ela estivesse impregnada de óleo tanto na sua superfície de saída, quando na superfície de folga. Como o comprimento de contato não era muito grande, este óleo era capaz de lubrificar as interfaces de contato durante todo o tempo (ou pelo menos, em boa parte do tempo) em que a mesma passava em contato com a peça, removendo cavaco. Assim, a temperatura da ferramenta era menor, o que fez com que ela resistisse mais aos fenômenos geradores de desgaste como difusão e abrasão.

7.3.2 - Análise da influência da profundidade de usinagem na vida da ferramenta

Diniz (2001) afirma que, dentre as condições de usinagem, velocidade de corte, avanço e profundidade de usinagem, é esta última que menos influência tem na vida da ferramenta. Esta afirmação, a princípio não condiz com os resultados obtidos, pois a figura 7.4B mostra uma forte influência da profundidade (a_p) na vida da ferramenta. Porém, no tipo de operação que se teve neste trabalho, devido à configuração esférica da ponta da ferramenta, quando se aumenta a_p , aumenta-se o diâmetro efetivo da ferramenta e, assim, aumenta-se a velocidade de corte, quando se mantém a rotação constante, como foi o caso dos ensaios deste trabalho. Assim, a diminuição da vida da ferramenta com o aumento da profundidade de usinagem foi realmente causado pelo aumento da velocidade de corte, o que concorda com o previsto pela literatura que afirma a forte influência desta na vida da ferramenta.

A análise da figura 7.4A também mostra dois pontos interessantes, quais sejam: a) o aumento da profundidade de corte de 0,48 mm para 0,60 mm (B1 para B3) aumentou o consumo da potência de corte; b) a aplicação do MQF (situação A3) proporcionou menor consumo de potência dentre todos os sistemas de refrigeração/lubrificação testados, seguido pelo corte com fluido em abundância (A2) e, finalmente, pelo corte a seco (A1). Segue uma breve discussão das causas destes resultados.

7.3.3 - Análise da influência da profundidade de usinagem na potência de corte

O aumento da profundidade de corte, tendo os outros dados de corte fixos, fez com que se aumentasse o volume de cavaco removido na unidade de tempo, resultando em maior potência.

7.3.4 - Análise da influência da refrigeração/lubrificação na potência de corte

O fato dos ensaios em que se utilizou MQF terem consumido as menores potências de corte, comprovam a eficiente lubrificação do processo gerada por este sistema. Esta lubrificação diminuiu os atritos entre ferramenta e peça e entre cavaco e ferramenta, o que diminuiu os esforços de corte. Este fato deve ser somado à pequena refrigeração que este sistema propicia, o que permitiu que a temperatura do cavaco e da peça na região de corte tivesse valores altos, fazendo com que a resistência à remoção do cavaco fosse pequena e, assim, a potência caísse.

O que merece uma discussão mais detalhada é o fato dos ensaios em que se utilizou fluido em abundância terem proporcionado potências menores que os ensaios a seco. Quando se utiliza corte a seco, a temperatura do cavaco e da peça na região de corte é maior que quando se utiliza fluido em abundância, o que faz com que resistência à remoção do cavaco seja menor, o que, a princípio, deveria gerar um menor esforço de corte. Por outro lado, o fluido em abundância, apesar de ter uma ação predominantemente refrigerante, tem alguma ação lubrificante, o que, como visto, tende a diminuir os esforços de corte. Como a potência consumida quando se utilizou fluido em abundância foi menor que no corte a seco, acredita-se que a lubrificação gerada por este fluido predominou sobre a diminuição da temperatura na região de corte, o que fez a potência cair em relação ao corte a seco.

7.4 - Observações



O reconhecimento e o agradecimento à equipe pelo resultado obtido é fator mercedor de muita atenção e, nesse momento, aproveitou-se para colher da própria equipe sugestões de

melhoria para o gerenciamento de novos trabalhos desse porte, além de ser submetida à mesma uma simples avaliação de si própria, no que diz respeito ao relacionamento em equipe.

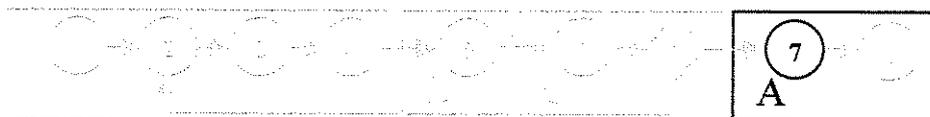
As sugestões de melhorias foram diversas e serão já utilizadas para a continuidade desse mesmo trabalho, onde, apesar de ter sido atingida a meta estabelecida, o mesmo deve prosseguir buscando a efetiva implantação dos resultados a nível de padronização da célula de fresamento, e propagar os resultados e a cultura iniciada às outras unidades de negócio, incentivando a avaliarem da mesma forma os processos potencialmente substitutos dos fluidos de corte nocivos ao ambiente e à saúde das partes interessadas.

Quanto à avaliação geral, a equipe se mostrou satisfeita pela condução do trabalho, pois foi gerado automaticamente um estreitamento nas relações profissionais e pessoais entre os membros participantes, as quais, transferidas ao cotidiano, favorecem o desenvolvimento das atividades como um todo.

Capítulo 8

Conclusões e Sugestões para Trabalhos Futuros

8.1 - Padronização



Apesar de ter sido avaliada tecnicamente a utilização da técnica MQF e do corte a seco frente ao uso de fluido em abundância por meio de um procedimento experimental, em que a técnica MQF fazendo uso de óleo vegetal, apresentou o melhor resultado em termos de vida de ferramenta, ainda deve ser utilizada a mesma máquina-ferramenta submetida aos ensaios para avaliar o comportamento dessa técnica frente às condições de trabalho adversas, porém com devido acompanhamento da equipe. Contudo, em campo, ter-se-á o desafio de, muitas vezes, avaliar o comportamento dessa técnica frente à usinagem em matrizes que, por já terem sido utilizadas em forjamento, possuem além da nitretação superficial, o que é imprescindível para demandar melhor resultado à vida da matriz, micro trincas superficiais, superfície encruada devido ao impacto gerado pelo processo de forjamento, e, eventualmente resistência mecânica não homogênea. Ainda em campo, como a incidência de variação de diâmetros e comprimentos das ferramentas de corte é muito grande, deve-se estudar uma forma de melhorar a disposição dos bicos aspersores do aparelho gerador da técnica MQF, de maneira que não usufrua de relevante tempo para regulagem e garanta o direcionamento à interface, ponto este não relevante ao experimento pelo fato dos mesmos permanecerem necessariamente fixos.

Consciente de que no momento estão sendo colhidas as respostas oriundas de ensaios sob as condições descritas, seria precoce para a organização, neste momento, padronizar o uso da técnica MQF em todas as máquinas-ferramenta dessa célula, porque isso requer além de um investimento inicial em equipamentos geradores da MQF, uma avaliação abrangente e delicada, em que se deve conhecer o cenário produtivo e projetá-lo de maneira a considerar o resultado experimental, o resultado em campo e as deficiências relacionadas à parada da máquina-ferramenta para troca do fluido em abundância, o custo de manutenção e descarte e, principalmente, as questões ambientais e de saúde das partes interessadas.

Como, porém, o resultado obtido por meio do corte a seco foi muito atrativo se comparado ao corte com fluido em abundância, além de não haver nenhuma restrição ao uso do mesmo, conclui-se que o trabalho com corte a seco já pode e deve ser estendido para todas as máquinas de mesma tecnologia também sob acompanhamento da equipe.

8.2 - Conclusão



O teste preliminar voltado ao uso da técnica MQF foi fundamental para verificar não só a melhor vazão para uso em ensaio, mas para antecipar a substituição dos bicos aspersores que provocariam instabilidade no sistema, podendo influenciar nos resultados finais.

Ao verificar que o parâmetro de corte possui correlação com a vida da ferramenta medida em número de cavidades, justificou-se o fato de não ter concluído o experimento fatorial 3^2 planejado inicialmente, o que implicaria em onerar o procedimento desnecessariamente.

Esses resultados foram suficientes para observar que mediante o número de cavidades usinadas correspondente a cada nível do parâmetro de corte, pode-se afirmar que quanto maior a velocidade efetiva de corte, neste caso causalidade da profundidade de corte, menor o número de cavidades usinadas e por causalidade maior a potência líquida máxima consumida. Porém, não deve se esquecer que a maior taxa de remoção é expressa pelo programa correspondente a maior velocidade efetiva de corte.

O melhor resultado, avaliando-se a média obtida em termos de número de cavidades usinadas quanto em potência consumida, foi expresso pela técnica MQF usando óleo vegetal a 14 ml/h submetido ao parâmetro de corte menos severo, codificado como B1, ou seja, com $a_p = 0,48$ mm e correspondente $V_{ce} = 138,07$ m/min. Já, o pior resultado médio relacionado à potência consumida ficou em posse do trabalho a seco utilizando-se do parâmetro de corte mais severo, codificado como B3, ou seja, com $a_p = 0,6$ mm e correspondente $V_{ce} = 152,68$ m/min. O pior resultado em termos de vida de ferramenta ocorreu no ensaio com fluido em abundância usando de fluido sintético submetido ao parâmetro de corte mais severo, codificado como B3, ou seja, com $a_p = 0,6$ mm e correspondente $V_{ce} = 152,68$ m/min.

Reconhecer a vida da ferramenta de corte em cada condição de usinagem é fundamental para determinar seguramente o tempo de usinagem respectivo a cada programa e a forma de monitoramento, pois determinado o momento correto de cessar o uso da ferramenta de corte, evita-se a quebra, o que resulta na possibilidade de se trabalhar com maior número de afiações, gerando economia. Além do que, permite à organização gerenciar a produção de maneira a se ajustar à necessidade do cliente, quando, em casos de gargalo, poderão ser desenvolvidos e utilizados programas de usinagem com maior taxa de remoção, abrindo mão por causalidade da maior vida de ferramenta, concluindo a usinagem mais rapidamente.

Vale salientar que o fato da ferramenta sob determinadas condições poder gerar maior número de cavidades, ou seja, maior vida de ferramenta, não significa que essa condição é a economicamente viável. Essa informação depende desde da taxa de remoção utilizada no programa de usinagem, conforme descrito acima, até uma decisão estratégica gerencial.

Identificou-se através da distribuição F que a condição de refrigeração/lubrificação, ou seja, o fluido de corte, é o fator que exerce maior influência nas variáveis de resposta, bem evidente pelo desempenho da aplicação do óleo vegetal atomizado.

A alta lubricidade do óleo vegetal fez com que o atrito existente na interface fosse reduzido e, conseqüentemente, ocorresse também a redução do esforço de corte. Este detalhe ajuda a explicar porque a técnica MQF, por meio do uso de óleo vegetal, apresentou valores médios de

número de cavidade usinadas em torno de 144% superior ao corte a seco e 296% ao corte com fluido em abundância. Já o corte a seco se mostrou 62% superior ao fluido em abundância também no que diz respeito à vida da ferramenta de corte.

Sabendo-se que a técnica MQF usou, para concluir todos os ensaios, cerca de 470 ml do fluido, e que esse conteúdo foi suficiente para usinar 115 cavidades em aproximadamente 33,5 horas, pode-se dizer que deve ser avaliado seu efeito econômico julgando o aumento da vida da ferramenta de corte aliada à não nocividade ao meio ambiente e a todas as partes interessadas.

Todo experimento deve possuir potencial expansivo relacionado à aplicabilidade e levar em conta os recursos disponíveis e o tempo a ser despendido, para se obter qualidade assegurada dos resultados. Desta maneira, fica esclarecido que toda organização deve patrocinar, motivar e monitorar os programas de melhoria de modo a expandir seus resultados às demais unidades de negócio, gerando banco de dados e incentivando o desafio de conduzir novos trabalhos desenvolvidos em equipe.

A equipe definida para atuação em melhoria deve necessariamente conhecer o processo em estudo, principalmente quando se aplica análise descritiva estatística como forma de avaliação dos resultados, pois em certas condições pode-se afirmar que há relação entre determinados fatores, casos esses que podem ser causalidade comprometendo a tomada de decisão.

A execução de todo este trabalho de melhoria utilizando-se da estruturação sugerida pelas etapas do ciclo de melhoria contínua contemplado pela ISO, o ciclo *PDCA*, permitiu o reconhecimento de toda a tecnologia de corte utilizada como entrada do processo, o que por consequência possibilitou a geração de dados confiáveis, os quais avaliados através da estatística descritiva, de maneira analítica, gráfica e prática, permite afirmar com convicção a confiabilidade dos resultados obtidos.

O aprendizado obtido no decorrer desse desenvolvimento propiciará influência substancial na decisão das organizações que visam implementar ou otimizar o processo de fresamento HSM

em aço endurecido, pois o mesmo expõe as questões técnicas, de saúde e ambientais referentes aos fluidos de corte avaliados, bem como o desempenho técnico em específica aplicação.

8.3 - Sugestões para trabalhos futuros

A conclusão obtida abre precedente para dar continuidade a desenvolvimentos nesta linha de pesquisa, assim, pelo fato de ser um processo em ascensão, pode-se sugerir os seguintes trabalhos:

Dar continuidade a este trabalho de melhoria contínua gerando o estudo de viabilidade econômica com abrangência em padronização do sistema de refrigeração/lubrificação existente na célula de fresamento em alta velocidade de corte desta unidade de negócio.

Avaliar a rugosidade superficial oferecida pelos fluidos de corte estudados em condições de acabamento.

Estudar a possibilidade de se usar ar comprimido refrigerado à técnica MQF, a fim de incorporar um pouco de refrigeração à alta lubricidade oferecida pelo óleo vegetal.

Avaliar os benefícios que a aplicação efetiva do corte a seco e da técnica MQF podem promover em termos de "Marketing Ambiental".

Referências Bibliográficas

- Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro. NBR ISO 14001; Sistemas de gestão ambiental - Especificações e diretrizes para uso. Rio de Janeiro, 1996, 14p.
- Associação Brasileira De Normas Técnicas, Rio de Janeiro. NBR ISO 9001:2000; Sistemas de gestão da qualidade - Requisitos. Rio de Janeiro, 2000, 19p.
- Ávila, R. F., Abrão, A. M. The effect of cutting fluids on the machining of hardened AISI 4340 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, v.119, pp.21-26, 2001.
- Bersenkowitsch, H. Medidas de segurança no manuseio de agentes refrigerantes. *Máquinas e Metais*, v.409, pp.24-34, fevereiro, 2000.
- Blaser Swissslube do Brasil Ltda. Campinas: Fluidos para usinagem = Ferramentas líquidas, Seminário, 2003.
- Braga, Durval Uchôas. *A técnica de mínima quantidade de fluido de corte aplicada no processo de furação de uma liga de alumínio-silício*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2001, 178p. Tese (Doutorado).
- Campos, V. F. *Controle da Qualidade Total*. Rio de Janeiro: Ed. Bloch, 1992, 229p.
- Cselle, T., Barimani, A. Today's applications and future development of coatings for drills and rotating cutting tools. *Surface And Coatings Technology*, v.76-77, p.712-718, 1995.

- Cselle, T. New directions in drilling. *Manufacturing Engineering*. SME Publications, v.115, n.2, pp. 77-80, Aug. 1995.
- Cselle, T. As opções do mercado para o desenvolvimento de ferramentas. *Máquinas e Metais*, v.430, pp.32-45, novembro, 2001.
- da Silva, L. R., Coelho, R. T., Junior, A. B., Bezerra, A. A., Mendonça, W. G. Estudo da geometria de corte para torneamento de inonel. *Máquinas e Metais*, v.427, pp.32-55, agosto, 2001.
- Deming, W. E., *Qualidade: A Revolução da Administração*. Rio de Janeiro: Ed. Marques Saraiva S.A., 1990, 367p.
- Diniz, A. E., Coppini, N. L., Marcondes, F. C. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: MM Editora, 1999, 242p.
- Diniz, A. E., Machado, A. R. Corte a seco, com mínima quantidade de fluido e com fluido em abundância: usos, aplicações, vantagens e desvantagens. São Paulo: Usinagem 2000, Feira e Congresso, 2000, v.1, pp.1-19.
- Diniz, A. E., Coppini, N. L., Marcondes, F. C. *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo: MM Editora, 2001, 244p.
- Diniz, A. E., Micaroni, R. Cutting conditions for finish turning process aiming: the use of dry cutting. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, v.42, pp.899-904, 2002.
- Dörr, J., Sahm, A. A mínima quantidade de lubrificantes avaliada pelos usuários. *Máquinas e Metais*, v.418, pp.20-39, novembro, 2000.
- Dreyer, K., Westphal, H., Sottke, V., Tabersky, R., Widia GmbH. New developments for hardmetals, cermets and coatings in experiment and practice. *International Journal of*

Machine Tools & Manufacture, v.42, pp.899-904, 1999.

El Baradie, M. A. Cutting fluids: part II. Recycling and clean machining. *Journal of Materials Processing Technology*, v.56, pp.798-806, 1996.

Fallböhmer, P., Altan, T. Survey of the die and mold manufacturing industry. *Journal Of Materials Processing Technology*, v.59, pp.158-168, 1996.

Feistritzter, S. Ferramentas com revestimentos de diamante. *Máquinas e Metais*, v.426, pp.30-39, julho, 2001.

Ferraresi, D. *Fundamentos da usinagem dos metais*. São Paulo: Ed. Edgard Blucher Ltda., 1977, Cap. 11, 751p.

Filho, F. T., Ferreira, J. R., Santos, J. N., Diniz, A. E. O uso (ou não) da refrigeração/lubrificação no torneamento de aço endurecido. *Máquinas e Metais*, v.423, pp.260-283, abril, 2001.

Fuchs do Brasil S.A, São Paulo, SP. Lubrificantes com assistência e tecnologia internacional. Setembro. 28,1999.

Haan, D. M., Batzer, S. A., Olson, W. W., Sutherland, J. W. An experimental study of cutting fluid effects in drilling. *Journal of Materials Processing Technology*, v.71, pp.305-313, 1997.

Finzer, T. The hsc technology. Campinas: Usinagem com altíssima velocidade de corte, Seminário, 1997.

Heisel, U., Lutz, M. Pesquisa de fluidos de refrigeração e de lubrificação. *Máquinas e Metais*, v.388, pp.40-49, maio, 1998.

Hummel, P. M. HSC impõe exigências às máquinas-ferramenta. São Paulo: Usinagem-brasil,

2000. www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos/artigostecnicos20.htm, 16/12/2001

Hummel, P. M., Lilla, A. Berky, E. A usinagem do alumínio sem fluido refrigerante. *Máquinas e Metais*, v.427, pp.22-31, agosto, 2001.

Jain, V. K., Shukla, D. S. Study of the EP activity of water-soluble inorganic metallic salts for aqueous cutting fluids. *Wear*, v.193, pp.226-234, 1996.

Junior, A. B., Silva, L. R., Bezerra, A. A., Coelho, R. T. Desgaste de ferramentas de torneamento usando HSC e MQL. *Máquinas e Metais*, v.423, pp.284-295, abril, 2001.

Kelly, J. F., Cotterell, M. G. Minimal lubrication machining of aluminium alloys. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.120, pp.327-334, 2002.

Lima, F. E. Usinagem de materiais endurecidos. São Paulo: Usinagem-brasil, 2000. www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos/artigostecnicos27.htm, 16/12/2001.

Machado, A. R., Wallbank, J. The effect extremely low lubricant volumes in machining. *Wear*, v.210, pp.76-82, 1997.

Mang, T. Ecological and cost-efficient solutions for metal cutting fluids and machine tool lubrication. São Paulo: Usinagem 2000, Feira e Congresso, 2000, v.1, pp.1-21

Maranhão, M., ISO série 9000: Manual de implementação: versão ISO 2000. Rio de Janeiro: Ed. Quality Mark, 2001.

Maestrelli, N. C., Miguel, P. A. C. Programa Seis Sigma e a sua aplicação na manufatura. *Máquinas e Metais*, v.423, pp.308-318, abril, 2001.

Martinez, F. G., Saruls, R. Usinagem com e sem refrigeração: verdades e mitos. São Paulo: Usinagem-brasil, 2000. www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos/artigostecnicos55.htm

16/12/2001

Mason, F. Usinando a seco... ou quase a seco. *Máquinas e Metais*, v.424, pp.160-173, maio, 2001.

Micaroni, R. *Otimização dos parâmetros de usinagem visando a viabilização do torneamento a seco do aço ABNT 1045 em operações de acabamento*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2001, 119p. Tese (Mestrado).

Momper, F. J. Usinagem a seco e de materiais endurecidos. *Máquinas e Metais*, v.470, pp.30-37, março, 2000.

Monici, R. D., Bianchi, E. C., de Aguiar, P. R. Como e quanto lubrificar e refrigerar no processo de retificação. *Máquinas e Metais*, v.427, pp.104-116, agosto, 2001.

Monici, R. D., Bianchi, E. C., de Aguiar, P. R., Valarelli, I. D. Retificação cilíndrica externa com rebolos convencionais e de CBN utilizando MQL. *Máquinas e Metais*, v.441, pp.128-141, outubro, 2002.

Neves, Davi. *Uma contribuição ao fresamento de matrizes com fresa de topo esférico*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2002, 129p. Tese (Mestrado).

Novaski, O., Rios, M. Vantagens do uso de fluido sintético na usinagem. São Paulo: Usinagem-brasil, 2000. www.usinagem-brasil.com.br/artigostecnicos/artigostecnicos30.htm, 16/12/2001

Novaski, O., Silva, F. R. A tecnologia do fresamento em altas velocidades. São Paulo: Usinagem 2000, Feira e Congresso, 2000, v.1, pp.1-17.

Petenate, A. J. *Fundamentos de técnicas estatísticas aplicadas*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2002.

- Prengel, H. G., Pfouts, W. R., Santhanam, A. T. State of the art in hard coatings for carbide cutting tools. *Surface And Coatings Technology*, v.102, pp.183-190, 1998.
- Pires, S. R. I. Produtividade e Qualidade em Engenharia de Produção e Industrial. *Ciência & Tecnologia*, pp.7-13, 1991.
- Salles, J. A. A. A Reorganização da Produção Industrial a partir da Automação Microeletrônica. *Ciência & Tecnologia*, pp.31-37, 1991.
- Sandvik Coromant., *Fabricação de moldes e matrizes*. São Paulo: Guia de aplicação, 1998, 208p.
- 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 de Campinas, 2000, 63p. Tese (Mestrado).
- Scholtes, P. R., *O Manual do Líder: um guia para inspirar sua equipe e gerenciar o fluxo de trabalho no dia-a-dia*. Rio de Janeiro: Qualitymark Editora Ltda, 1999, 504 p.
- Schulz, H. High Speed Machining. *Annals Of The Cirp*, v.41, (2), pp.637-643, 1992.
- Schulz, H. A tecnologia da manufatura no limiar do milênio. *Máquinas e Metais*, v.415, pp.138-156, agosto, 2000.
- Schulz, H., Emrich A. K., Finzer, T., Dörr J. Quais são e para que servem os revestimentos. *Máquinas e Metais*, v.416, pp.38-45, setembro, 2000.
- Schützer, K., Souza, A. F., Stanik, M. Aplicação da usinagem com altíssima velocidade de corte na manufatura de moldes e matrizes. São Paulo: Usinagem 2000, Feira e Congresso, 2000, v.1, pp.1-13.

- Seah, K. W. H., Li, X., Lee, K. S. The effect of applying coolant on tool wear in metal machining. *Journal of Materials Processing Technology*, v.48, pp.495-501, 1995.
- Shaw, M. C. *Metal cutting principles*. 3.ed. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 1968, Cap. 7, pp.7.1-7.43.
- Silva, I. B. *Modelo de Sistema Integrado de Produto e Processo com Melhoria Contínua da Qualidade*. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade de Campinas, 2000, 239p. Tese (Doutorado).
- Sokovic, M., Mijanovic, K. Ecological aspects of cutting fluids and its influence on quantifiable parameters of cutting processes. *Journal of Materials Processing Technology*, v.109, pp.181-189, 2001.
- Sreejith, P. S., Ngoi, K. A. Dry machining: Machining of the future. *Journal Of Materials Processing Technology*, v.101, pp.287-291, 2000.
- Urbanski. J. P., Koshy, P., Dewes, R. C., Aspinwall, D. K. High speed machining of moulds and dies for net shape manufacture. *Material and Designs*, v.21, pp.395-402, 2000.
- Varadarajan, A. S., Philip, P. B., Ramamoorthy, B. Investigations on hard turning with minimal cutting fluid application (HTMF) and its comparison with dry and wet turning. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, v.42, pp.193-200, 2002.
- Vieira, J. M., Machado. A. R., Ezugwu, E. O. Performance of cutting fluids during face milling of steels. *Journal of Materials Processing Technology*, v.116, pp.244-251, 2001.

Anexo

Exemplo do formulário de coleta de dados do tipo registro

Programa Biela.001 = B1		Fluido: Corte a seco = A1		Réplica nº 1	
Cavidade nº 1		Cavidade nº 2		Cavidade nº 3	
Data: 31 / 07 / 2003		Data: 31 / 07 / 2003		Data: 31 / 07 / 2003	
Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)	Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)	Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)
Z - 0,48	30,0	Z - 0,48	30,2	Z - 0,48	30,4
Z - 0,96	30,0	Z - 0,96	30,2	Z - 0,96	30,4
Z - 1,44	30,1	Z - 1,44	30,2	Z - 1,44	30,4
Z - 1,92	30,1	Z - 1,92	30,3	Z - 1,92	30,4
Z - 2,4	30,2	Z - 2,4	30,3	Z - 2,4	30,4
Z - 2,88	30,2	Z - 2,88	30,3	Z - 2,88	30,5
Z - 3,36	30,2	Z - 3,36	30,3	Z - 3,36	30,5
Z - 3,84	30,3	Z - 3,84	30,4	Z - 3,84	30,5
Z - 4,32	30,4	Z - 4,32	30,4	Z - 4,32	30,5
Z - 4,8	30,4	Z - 4,8	30,4	Z - 4,8	30,6
Z - 5,28	30,5	Z - 5,28	30,4	Z - 5,28	30,6
Z - 5,76	30,5	Z - 5,76	30,5	Z - 5,76	30,6
Z - 6,24	30,5	Z - 6,24	30,5	Z - 6,24	30,7
Z - 6,72	30,5	Z - 6,72	30,5	Z - 6,72	30,7
Z - 7,2	30,5	Z - 7,2	30,5	Z - 7,2	30,7
Z - 7,68	30,5	Z - 7,68	30,6	Z - 7,68	30,7
Z - 8,16	30,5	Z - 8,16	30,6	Z - 8,16	30,8
Z - 8,64	30,5	Z - 8,64	30,6	Z - 8,64	30,8
Z - 9,12	30,6	Z - 9,12	30,6	Z - 9,12	30,8
Z - 9,6	30,6	Z - 9,6	30,6	Z - 9,6	30,9
Z - 10,08	30,6	Z - 10,08	30,6	Z - 10,08	31,0
Z - 10,56	30,6	Z - 10,56	30,6	Z - 10,56	31,0
Z - 11,04	30,6	Z - 11,04	30,7	Z - 11,04	31,0
Z - 11,52	30,6	Z - 11,52	30,7	Z - 11,52	31,1
Z - 12,0	30,7	Z - 12,0	30,7	Z - 12,0	31,1
Z - 12,48	30,7	Z - 12,48	30,7	Z - 12,48	31,1
Z - 12,96	30,7	Z - 12,96	30,7	Z - 12,96	31,1
Z - 13,44	30,7	Z - 13,44	30,8	Z - 13,44	31,2
Z - 13,92	30,7	Z - 13,92	30,8	Z - 13,92	31,2
Z - 14,4	30,7	Z - 14,4	30,9	Z - 14,4	31,3
Z - 14,88	30,7	Z - 14,88	30,9	Z - 14,88	31,3
Máx. Potência: 30,7 %		Máx. Potência: 30,9 %		Máx. Potência: 31,3 %	
(<input checked="" type="checkbox"/>) Ocorrências ()		(<input checked="" type="checkbox"/>) Ocorrências ()		(<input checked="" type="checkbox"/>) Ocorrências ()	
Desgaste V _B = desprezível	Quebra em Z =	Desgaste V _B = desprezível	Quebra em Z =	Desgaste V _B = desprezível	Quebra em Z =
Interromper o ensaio ?		Interromper o ensaio ?		Interromper o ensaio ?	
Sim () Não (<input checked="" type="checkbox"/>)		Sim () Não (<input checked="" type="checkbox"/>)		Sim () Não (<input checked="" type="checkbox"/>)	
Responsável : Valmir Rael		Responsável : Valmir Rael		Responsável : Valmir Rael	
Obs:		Obs:		Obs:	

Programa Biela.001 = B1		Fluido: Corte a seco = A1		Réplica nº 1	
Cavidade nº 4		Cavidade nº 5		Cavidade nº 6	
Data: 31 / 07 / 2003		Data: 31 / 07 / 2003		Data: 31 / 07 / 2003	
Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)	Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)	Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)
Z - 0,48	30,6	Z - 0,48	30,7	Z - 0,48	30,9
Z - 0,96	30,6	Z - 0,96	30,7	Z - 0,96	30,9
Z - 1,44	30,6	Z - 1,44	30,8	Z - 1,44	30,9
Z - 1,92	30,6	Z - 1,92	30,8	Z - 1,92	31,0
Z - 2,4	30,6	Z - 2,4	30,8	Z - 2,4	31,0
Z - 2,88	30,7	Z - 2,88	30,8	Z - 2,88	31,0
Z - 3,36	30,7	Z - 3,36	30,8	Z - 3,36	31,0
Z - 3,84	30,7	Z - 3,84	30,9	Z - 3,84	31,1
Z - 4,32	30,7	Z - 4,32	30,9	Z - 4,32	31,1
Z - 4,8	30,7	Z - 4,8	30,9	Z - 4,8	31,2
Z - 5,28	30,8	Z - 5,28	31,0	Z - 5,28	31,2
Z - 5,76	30,8	Z - 5,76	31,0	Z - 5,76	31,2
Z - 6,24	30,8	Z - 6,24	31,0	Z - 6,24	31,2
Z - 6,72	30,8	Z - 6,72	31,1	Z - 6,72	31,3
Z - 7,2	30,8	Z - 7,2	31,1	Z - 7,2	31,3
Z - 7,68	30,9	Z - 7,68	31,1	Z - 7,68	31,4
Z - 8,16	30,9	Z - 8,16	31,1	Z - 8,16	31,4
Z - 8,64	31,0	Z - 8,64	31,2	Z - 8,64	31,4
Z - 9,12	31,0	Z - 9,12	31,2	Z - 9,12	31,5
Z - 9,6	31,0	Z - 9,6	31,2	Z - 9,6	31,5
Z - 10,08	31,0	Z - 10,08	31,2	Z - 10,08	31,6
Z - 10,56	31,1	Z - 10,56	31,3	Z - 10,56	31,6
Z - 11,04	31,1	Z - 11,04	31,3	Z - 11,04	31,7
Z - 11,52	31,1	Z - 11,52	31,3	Z - 11,52	31,7
Z - 12,0	31,2	Z - 12,0	31,3	Z - 12,0	31,7
Z - 12,48	31,2	Z - 12,48	31,4	Z - 12,48	31,8
Z - 12,96	31,2	Z - 12,96	31,5	Z - 12,96	31,8
Z - 13,44	31,3	Z - 13,44	31,5	Z - 13,44	31,8
Z - 13,92	31,3	Z - 13,92	31,6	Z - 13,92	31,9
Z - 14,4	31,4	Z - 14,4	31,6	Z - 14,4	31,9
Z - 14,88	31,4	Z - 14,88	31,6	Z - 14,88	31,9
Máx. Potência: 31,4 %		Máx. Potência: 31,6 %		Máx. Potência: 31,9 %	
(X) Ocorrências ()		(X) Ocorrências ()		(X) Ocorrências ()	
Desgaste $V_B = 0,05 \text{ mm}$	Quebra em $Z =$	Desgaste $V_B = 0,10 \text{ mm}$	Quebra em $Z =$	Desgaste $V_B = 0,13 \text{ mm}$	Quebra em $Z =$
Interromper o ensaio ? Sim () Não (X)		Interromper o ensaio ? Sim () Não (X)		Interromper o ensaio ? Sim () Não (X)	
Responsável : Valmir Rael		Responsável : Valmir Rael		Responsável : Valmir Rael	
Obs:		Obs:		Obs:	

Programa Biela.001 = B1		Fluido: Corte a seco = A1		Réplica nº 1	
Cavidade nº 7		Cavidade nº 8		Cavidade nº 9	
Data: 31 / 07 / 2003		Data: 31 / 07 / 2003		Data: 31 / 07 / 2003	
Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)	Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)	Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)
Z - 0,48	31,4	Z - 0,48	31,5	Z - 0,48	31,6
Z - 0,96	31,4	Z - 0,96	31,5	Z - 0,96	31,6
Z - 1,44	31,4	Z - 1,44	31,5	Z - 1,44	31,6
Z - 1,92	31,4	Z - 1,92	31,5	Z - 1,92	31,7
Z - 2,4	31,4	Z - 2,4	31,5	Z - 2,4	31,7
Z - 2,88	31,5	Z - 2,88	31,6	Z - 2,88	31,7
Z - 3,36	31,5	Z - 3,36	31,6	Z - 3,36	31,8
Z - 3,84	31,5	Z - 3,84	31,6	Z - 3,84	31,8
Z - 4,32	31,5	Z - 4,32	31,6	Z - 4,32	31,8
Z - 4,8	31,6	Z - 4,8	31,7	Z - 4,8	31,9
Z - 5,28	31,6	Z - 5,28	31,7	Z - 5,28	31,9
Z - 5,76	31,6	Z - 5,76	31,7	Z - 5,76	31,9
Z - 6,24	31,7	Z - 6,24	31,7	Z - 6,24	31,9
Z - 6,72	31,7	Z - 6,72	31,8	Z - 6,72	31,9
Z - 7,2	31,7	Z - 7,2	31,8	Z - 7,2	31,9
Z - 7,68	31,8	Z - 7,68	31,8	Z - 7,68	32,0
Z - 8,16	31,8	Z - 8,16	31,8	Z - 8,16	32,0
Z - 8,64	31,8	Z - 8,64	31,8	Z - 8,64	32,1
Z - 9,12	31,8	Z - 9,12	31,9	Z - 9,12	32,1
Z - 9,6	31,8	Z - 9,6	31,9	Z - 9,6	32,2
Z - 10,08	31,9	Z - 10,08	31,9	Z - 10,08	32,2
Z - 10,56	31,9	Z - 10,56	32,0	Z - 10,56	32,2
Z - 11,04	32,0	Z - 11,04	32,0	Z - 11,04	32,3
Z - 11,52	32,0	Z - 11,52	32,1	Z - 11,52	32,3
Z - 12,0	32,1	Z - 12,0	32,1	Z - 12,0	32,3
Z - 12,48	32,1	Z - 12,48	32,2	Z - 12,48	32,3
Z - 12,96	32,1	Z - 12,96	32,3	Z - 12,96	32,4
Z - 13,44	32,2	Z - 13,44	32,3	Z - 13,44	32,4
Z - 13,92	32,2	Z - 13,92	32,3	Z - 13,92	32,5
Z - 14,4	32,3	Z - 14,4	32,4	Z - 14,4	32,5
Z - 14,88	32,3	Z - 14,88	32,4	Z - 14,88	32,6
Máx. Potência: 32,3 %		Máx. Potência: 32,4 %		Máx. Potência: 32,6 %	
(X) Ocorrências ()		(X) Ocorrências ()		(X) Ocorrências ()	
Desgaste V _B = 0,25 mm	Quebra em Z =	Desgaste V _B = 0,32 mm	Quebra em Z =	Desgaste V _B = 0,40 mm	Quebra em Z =
Interromper o ensaio ? Sim () Não (X)		Interromper o ensaio ? Sim () Não (X)		Interromper o ensaio ? Sim () Não (X)	
Responsável : Valmir Rael		Responsável : Valmir Rael		Responsável : Valmir Rael	
Obs:		Obs:		Obs:	

Programa Biela.001 = B1		Fluido: Corte a seco = A1		Réplica nº 1	
Cavidade nº 10		Cavidade nº 11		Cavidade nº	
Data: 31 / 07 / 2003		Data: 31 / 07 / 2003		Data: / /	
Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)	Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)	Nível de trabalho (mm)	Máx. Potência (%)
Z - 0,48	31,7	Z - 0,48	31,9	Z - 0,48	
Z - 0,96	31,7	Z - 0,96	32,0	Z - 0,96	
Z - 1,44	31,7	Z - 1,44	32,0	Z - 1,44	
Z - 1,92	31,7	Z - 1,92	32,1	Z - 1,92	
Z - 2,4	31,7	Z - 2,4	32,1	Z - 2,4	
Z - 2,88	31,8	Z - 2,88	32,1	Z - 2,88	
Z - 3,36	31,8	Z - 3,36	32,1	Z - 3,36	
Z - 3,84	31,8	Z - 3,84	32,1	Z - 3,84	
Z - 4,32	31,8	Z - 4,32	32,2	Z - 4,32	
Z - 4,8	31,8	Z - 4,8	32,2	Z - 4,8	
Z - 5,28	31,8	Z - 5,28	32,4	Z - 5,28	
Z - 5,76	31,9	Z - 5,76	32,4	Z - 5,76	
Z - 6,24	31,9	Z - 6,24	32,5	Z - 6,24	
Z - 6,72	31,9	Z - 6,72	32,5	Z - 6,72	
Z - 7,2	31,9	Z - 7,2	32,5	Z - 7,2	
Z - 7,68	32,0	Z - 7,68	32,6	Z - 7,68	
Z - 8,16	32,0	Z - 8,16	32,7	Z - 8,16	
Z - 8,64	32,0	Z - 8,64	32,8	Z - 8,64	
Z - 9,12	32,0	Z - 9,12	32,9	Z - 9,12	
Z - 9,6	32,1	Z - 9,6	33,2	Z - 9,6	
Z - 10,08	32,1	Z - 10,08	33,5	Z - 10,08	
Z - 10,56	32,2	Z - 10,56		Z - 10,56	
Z - 11,04	32,2	Z - 11,04		Z - 11,04	
Z - 11,52	32,3	Z - 11,52		Z - 11,52	
Z - 12,0	32,3	Z - 12,0		Z - 12,0	
Z - 12,48	32,4	Z - 12,48		Z - 12,48	
Z - 12,96	32,4	Z - 12,96		Z - 12,96	
Z - 13,44	32,5	Z - 13,44		Z - 13,44	
Z - 13,92	32,5	Z - 13,92		Z - 13,92	
Z - 14,4	32,6	Z - 14,4		Z - 14,4	
Z - 14,88	32,7	Z - 14,88		Z - 14,88	
Máx. Potência: 32,7 %		Máx. Potência: 33,5 %		Máx. Potência: %	
<input checked="" type="checkbox"/> Ocorrências ()		() Ocorrências <input checked="" type="checkbox"/>		() Ocorrências ()	
Desgaste $V_B = 0,47 \text{ mm}$	Quebra em Z =	Desgaste $V_B = .$	Quebra em Z = - 10,08 mm	Desgaste $V_B =$	Quebra em Z =
Interromper o ensaio ? Sim () Não <input checked="" type="checkbox"/>		Interromper o ensaio ? Sim <input checked="" type="checkbox"/> Não ()		Interromper o ensaio ? Sim () Não ()	
Responsável : Valmir Rael		Responsável : Valmir Rael		Responsável :	
Obs:		Obs: Foram consideradas a usinagem de 10 cavidades, exigindo de 7,7 % da potência líquida (32,7%-25%)		Obs:	