

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

**ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE FÉRRAMENTAS DE
METAL-DURO K10 REVESTIDAS COM NITRETO DE TITÂNIO
PELO PROCESSO FÍSICO DE DEPOSIÇÃO POR VAPOR NO
ENSAIO DE TORNEAMENTO**

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA À UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA
CATARINA PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM
ENGENHARIA MECÂNICA

RODRIGO PANOSSO ZEILMANN

FLORIANÓPOLIS, OUTUBRO DE 1997.

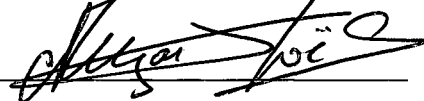
ANÁLISE DO COMPORTAMENTO DE FERRAMENTAS DE METAL-
DURO K10 REVESTIDAS COM NITRETO DE TITÂNIO PELO
PROCESSO FÍSICO DE DEPOSIÇÃO POR VAPOR NO ENSAIO DE
TORNEAMENTO

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO
TÍTULO DE MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA.
ESPECIALIDADE ENGENHARIA MECÂNICA, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO
FABRICAÇÃO, APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO CURSO DE PÓS-
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA.



Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner
Orientador

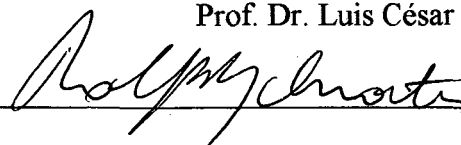
BANCA EXAMINADORA:



Prof. Dr. Joel Louis Rene Muzart



Prof. Dr. Luis César Fontana



Dr. Rolf Bertrand Schroeter

Aos meus pais e

minhas irmãs

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Adalberto Sary Ferres Zeilmann e Nelci Tereza Panosso Zeilmann, que são também os responsáveis pela subida que dou nos degraus da vida, incentivando, apoiando e demonstrando todo o sincero amor familiar.

A minha noiva Micheline Raquel de Barros, pelo amor e carinho, incansável apoio e dedicação, que resultaram no aprimoramento deste trabalho.

Ao Prof. Dr. -Ing. Walter Lindolfo Weingaertner, pela amizade, exemplo, dedicação, apoio e incansável orientação no trabalho.

À CAPES - Programa RHAE - Mecânica de Precisão, pela concessão das bolsas de estudo e recursos que viabilizaram este trabalho.

À Coordenação de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica -UFSC- pelo apoio financeiro que viabilizou os trabalhos.

À Aços Finos Piratini S. A. e à Sandvik do Brasil pela concessão de matéria-prima e ferramentas de corte, que possibilitaram os ensaios.

Aos Professores Dr. Luis César Fontana e Dr. Joel L. Muzart, pelo apoio. Ao colega Dr. Rolf Bertrand Schroeter, pelo apoio, dedicação e sinceridade.

Aos colegas Eng. César Luiz Schilindwein, Eng. Durval João de Barba, Eng. Irapuan Santos, M. Eng. Isnardo G. Jaimes, M. Eng. Jefferson de Oliveira Gomes, M. Eng. Luciano Bet, M. Eng. Luis Airton Consalter, M. Eng. Oder Silva, M. Eng. Ricardo Machado Peres, pela amizade e colaborações que ajudaram no trabalho.

Aos bolsistas de iniciação científica Amilton P. Vieira, Christiano Miranda, Fábio Bearzi, Helton Bertol, Isaias Masieiro Filho, Marco Antônio Koiti Aoki, Nélis Evangelista, e demais colaboradores e amigos. Ao amigo Hélio pelo apoio a qualquer hora.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS.....	viii
LISTA DE FIGURAS.....	ix
LISTA DE SIGLAS.....	xii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xiv
RESUMO.....	xvii
ABSTRACT.....	xviii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 ESTADO DA ARTE.....	4
2.1 Processo de Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida.....	4
2.1.1 Geometria da parte cortante da ferramenta de corte.....	8
2.1.2 Processo de corte.....	11
2.1.3 Solicitações na cunha de corte.....	14
2.2 Avarias e Desgastes das Ferramentas de Corte.....	16
2.2.1 Quebra.....	16
2.2.2 Desgastes da ferramenta.....	17
2.2.3 Mecanismos de desgaste das ferramentas de metal-duro.....	18
2.3 Materiais para Ferramentas de Corte.....	22
2.3.1 Aços-ferramenta (aços-carbono).....	24
2.3.2 Aço-rápido (HSS).....	25
2.3.3 Stellite.....	26

2.3.4 Metal-duro.....	27
2.3.5 Cermets.....	34
2.3.6 Cerâmicas óxidas.....	34
2.3.7 Cerâmicas mistas.....	35
2.3.8 Cerâmicas à base de nitretos.....	36
2.3.9 Nitreto de boro cúbico (CBN).....	36
2.3.10 Diamante.....	37
2.4 Usinabilidade dos Materiais.....	39
2.4.1 O termo usinabilidade.....	39
2.4.2 Classificação dos testes de usinabilidade.....	40
2.5 Processos de Revestimento de Ferramentas de Corte.....	45
2.5.1 Introdução.....	45
2.5.2 Deposição química de vapor - CVD.....	47
2.5.3 Deposição física de vapor - PVD.....	49
3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.....	53
3.1 Equipamentos Utilizados nos Ensaios Experimentais.....	53
3.2 Material Utilizados nos Ensaios Experimentais.....	54
3.2.1 Características do material usinado.....	54
4 DEPOSIÇÃO DO FILME DE REVESTIMENTO E ENSAIOS DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	58
4.1 Deposição do Filme de Revestimento nas Ferramentas H1P K10.....	58
4.1.1 Deposição reativa de TiN.....	60
4.1.2 Deposição não reativa de Ti com posterior nitretação.....	63

4.2 Ensaio de Vida das Ferramentas de Corte.....	67
4.2.1 Introdução.....	67
4.2.2 Procedimento e caracterização do ensaio.....	67
5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE.....	71
5.1 Ferramenta H1P K10.....	71
5.2 Ferramenta GC 415.....	74
5.3 Ferramenta H1P K10 - Revestida na UFSC.....	78
6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES.....	83
7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	84
8 ANEXOS.....	88
8.1 Tornos Utilizados.....	88
8.1.1 Torno usado para a confecção dos corpos de prova e execução dos pré-testes	88
8.1.2 Torno usado para execução do experimento.....	88
8.2 Suporte Porta-Ferramenta e Ferramentas.....	89
8.2.1 Suporte porta-ferramentas.....	89
8.2.2 Ferramentas.....	90
8.3 Sistema para a Medição dos Desgastes da Ferramenta.....	91

LISTA DE TABELAS**CAPÍTULO 2**

TABELA 2.1 - Características do metal-duro.....	29
---	----

CAPÍTULO 3

TABELA 3.1 - Composição química do aço SAE 316.....	54
---	----

TABELA 3.2 - Micro-dureza do aço SAE 316.....	56
---	----

TABELA 3.3 - Resistência à tração e alongamento do aço SAE 316.....	56
---	----

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2

FIGURA 2.1 - Esquema representativo de uma ferramenta com geometria de corte definida (DIN 6581).....	6
FIGURA 2.2 - Sistema de referência na ferramenta (DIN 6581).....	7
FIGURA 2.3 - Principais ângulos e raios da ferramenta de corte.....	8
FIGURA 2.4 - Marca de desgaste de flanco VB para diferentes ângulos de incidência (α)	10
FIGURA 2.5 - Regiões importantes na raiz do cavaco na usinagem.....	11
FIGURA 2.6 - Mecanismo de formação de cavaco.....	13
FIGURA 2.7 - Decomposição de forças no torneamento longitudinal cilíndrico.....	15
FIGURA 2.8 - Desgastes da ferramenta.....	18
FIGURA 2.9 - Mecanismos de desgaste como função da temperatura.....	19
FIGURA 2.10 - Relação entre a dureza e a tenacidade para diversos materiais de ferramentas de corte.....	24
FIGURA 2.11 - Representação esquemática da estrutura do metal-duro.....	30
FIGURA 2.12 - Pastilha de metal duro revestido.....	31
FIGURA 2.13 - Comparação dos mais importantes métodos de ensaio de usinabilidade...	41
FIGURA 2.14 - Curvas de desgaste da ferramenta. VB x t.....	43
FIGURA 2.15 - Diagrama di-log de vida T x velocidade de corte v_c (m/min).....	44
FIGURA 2.16 - Estrutura e funções de compostos revestidos.....	46
FIGURA 2.17 - Processos de revestimento.....	46

FIGURA 2.18 - Sistema de deposição PVD (tipo “Magnetron Sputtering”).....	50
FIGURA 2.19 - Cinética de partícula: (A) “Sputtering” convencional; (B) “Magnetron Sputtering”.....	51

CAPÍTULO 3

FIGURA 3.1 - Microestrutura do aço inoxidável austenítico SAE 316, correspondente à corrida A35621.....	55
--	----

CAPÍTULO 4

FIGURA 4.1 - Reator de deposição por “Magnetron Sputtering”).....	58
FIGURA 4.2 - Falha no revestimento sobre o gume de uma ferramenta de corte revestida.....	59
FIGURA 4.3 - Dispositivo de fixação de insertos para as deposições no reator experimental.....	60
FIGURA 4.4 - Esquema do processo de deposição reativa de TiN por “Magnetron Sputtering”).....	61
FIGURA 4.5 - Ferramenta HIP K10 (10000X - MEV).....	62
FIGURA 4.6 - Revestimento da ferramenta HIP K10 (Sandvik).....	62
FIGURA 4.7 - Revestimento da ferramenta GC 415 (4000X - MEV).....	63
FIGURA 4.8 - Esquema do processo não reativo de Ti.....	64
FIGURA 4.9 - Nitretação do revestimento de Ti.....	64
FIGURA 4.10 - Reator de nitretação.....	65
FIGURA 4.11 - Penetração do nitrogênio entre os átomos de Ti.....	66

FIGURA 4.12 - Esquema do revestimento com gradiente de elementos de formação da estrutura.....	66
FIGURA 4.13 - Representação esquemática da fixação do corpo de prova na máquina- ferramenta e dimensões inicial e final do mesmo.....	69

CAPÍTULO 5

FIGURA 5.1 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10.....	72
FIGURA 5.2 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10.....	73
FIGURA 5.3 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10.....	74
FIGURA 5.4 - Curvas de desgaste para a ferramenta GC 415.....	75
FIGURA 5.5 - Curvas de desgaste para a ferramenta GC 415.....	76
FIGURA 5.6 - Curvas de desgaste para a ferramenta GC 415.....	77
FIGURA 5.7 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10 revestida na UFSC.....	78
FIGURA 5.8 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10 revestida na UFSC.....	79
FIGURA 5.9 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10 revestida na UFSC.....	80

LISTA DE SIGLAS

Al_2O_3 - Óxido de alumínio

C - Carbono

CBN - Cubic Boron Nitride

CVD - Chemical Vapor Deposition

DIN - Deutsche Industrienorm o. Deutsches Institut für Normung

HfN - Nitreto de háfnio

HSS - High Speed Steel

HV - Dureza Vickers

LASER - Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

LMP - Laboratório de Mecânica de Precisão

NbC - Carboneto de nióbio

NR - Ferramenta não revestida

PCD - Policristalin Diamond

PKD - Polykristalliner Diamant

PVD - Physical Vapor Deposition

RC - Ferramenta revestida Comercial

RU - Ferramenta revestida na Universidade Federal de Santa Catarina

Si_3NO_4 - Nitreto de silício

Ti - Titânio

TaC - Carboneto de tântalo

TiC - Carboneto de titânio

Ti(CN) - Carbonitreto de titânio

TiN - Nitreto de Titânio

W - Tungstênio

WC - Carboneto de tungstênio

ZrC - Carboneto de zircônia

ZrN - Nitreto de zircônia

ZrO₂ - Óxido de zircônia

LISTA DE SÍMBOLOS

a_p	[mm]	profundidade de usinagem
ρ	[mm]	raio de gume da ferramenta
α	[$^{\circ}$]	ângulo de incidência = ângulo de folga
β	[$^{\circ}$]	ângulo de corte = ângulo de cunha
κ	[$^{\circ}$]	ângulo de direção do gume principal = ângulo de posição
γ	[$^{\circ}$]	ângulo de saída
λ	[$^{\circ}$]	ângulo de inclinação
α'	[$^{\circ}$]	ângulo de incidência do gume secundário
ϵ_B	[]	grau de deformação plástica
ϵ_O	[]	grau de deformação
ϵ_Z	[]	grau de deformação com escoamento
$1-m_c$		coeficiente angular da força de corte
b	[mm]	largura de usinagem
C_v		vida da ferramenta para $v_c = 1\text{m/min}$ [constante]
D	[mm]	deslocamento do gume
E	[N/mm ²]	módulo de elasticidade
f	[mm]	avanço
F		fator de Tuckey
F	[N]	força de usinagem
F_c	[N]	força de corte
F_f	[N]	força de avanço

F_p	[N]	força passiva
h	[mm]	espessura de usinagem antes do corte
h_{ch}	[mm]	espessura do cavaco depois do corte
k		coeficiente angular da curva de vida
k		índice da relação entre a profundidade e o afastamento médio da cratera
$k_{c1.1}$	[N/mm ²]	força específica de corte para a seção de 1mm ²
KL	[mm]	faixa entre o gume e o início da cratera (lábio da cratera)
KM	[mm]	distância da cratera ao gume
KT	[mm]	profundidade de cratera
P_e	[N.m/min]	potência efetiva de corte
r_e	[mm]	raio de quina = raio de ponta
R_a	[μ m]	desvio médio aritmético = rugosidade R_a
R_t	[μ m]	altura máxima das irregularidades = rugosidade R_t
R_z	[μ m]	média aritmética das profundidades isoladas de rugosidade Z_i dos cinco trechos contíguos de medição = rugosidade R_z
SV_α	[mm]	deslocamento do gume no sentido da face
SV_γ	[mm]	deslocamento do gume no sentido do flanco
T	[min]	tempo de corte
T	[min]	vida da ferramenta
VB	[mm]	desgaste de flanco
$VB_{MÉD}$	[mm]	desgaste de flanco médio
v_c	[m/min]	velocidade de corte

W_e	[N.m]	trabalho efetivo de corte
$X_{\text{médio}}$		média dos valores

RESUMO

O contínuo progresso da indústria manufatureira exige pesquisa e desenvolvimento de ferramentas de corte eficazes e capazes de satisfazer as necessidades de trabalho na indústria. Baseado nessa necessidade este trabalho faz uma análise comparativa entre ferramentas de corte revestidas e não revestidas na usinagem do aço inoxidável austenítico SAE 316. Neste são executados ensaios de torneamento externo cilíndrico de longa duração com as ferramentas de corte H1P K10 não revestida, H1P K10 revestidas na Divisão de Plasma do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC com um filme de nitreto de titânio e GC 415 com tripla camada de revestimento comercial. Os resultados obtidos mostram que com a ferramenta revestida na UFSC pelo processo físico de deposição a vapor obtém-se praticamente o mesmo tempo de corte que as ferramentas revestidas comerciais.

ABSTRACT

The continual progress in the manufacturing industries requires research and developments for efficient metal cutting that can satisfy the need of work in the industry. Based in this need, the work does the analysis between the coated and uncoated carbide for turning austenitic stainless steel SAE 316. In this work are made long duration turning tests with: uncoated carbide H1P K10, H1P K10 coated at the Plasma Facilities of the Federal University of Santa Catarina (UFSC) with a TiN thin film and the commercial coated carbide GC 415 that has three layers. The results show that the metal cutting with the coated carbide at UFSC had practically the same tool life for a established wear life as of the commercial coated carbide.

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO

Há aproximadamente 12 a 50 mil anos o homem vem trabalhando com ferramentas [1]. Estas inicialmente eram de pedra e possuíam seus gumes afiados por lascamentos, possibilitando que o homem as utilizasse para cortes gerais, para a caça e para a sua autodefesa. Desde então, o homem vem usando ferramentas de corte. Deve-se considerar que o conceito de ferramenta mecânica é amplo, podendo ser um simples machado que o lenhador utiliza para a sua sobrevivência, uma faca, um conjunto como o arado ou até uma ferramenta de diamante para a usinagem de lentes anesféricas. Percebe-se então que as ferramentas possuem um grande campo de atuação em grandes áreas de aplicação.

A fabricação das ferramentas envolve tecnologia e grandes investimentos em pesquisas. Na área de ferramentas de corte observa-se um desenvolvimento com o passar dos tempos que está longe de poder ser considerado concluído.

A Revolução Industrial, marco social das mudanças de condições de trabalho da humanidade, trouxe diretamente ligada à industrialização da manufatura, a exigência de ferramentas que pudessem dar suporte à fabricação produtiva e econômica de bens de consumo, fazendo com que o homem aprimorasse as ferramentas até então existentes.

Em 1900, durante a Exposição Mundial de Paris, F. W. Taylor apresentou a ferramenta de aço-rápido (HSS), que representou um enorme aumento na qualidade em relação às ferramentas até então existentes. Em 1927, a empresa Krupp fez sucesso com o lançamento do seu produto Widia (Wie Diamant - como diamante), obtido pela metalurgia do pó.

Durante as Guerras Mundiais, os países na corrida armamentista buscaram novas

ferramentas e aperfeiçoamentos que resultaram em linhas de pesquisa e empresas especializadas na fabricação de ferramentas.

As ferramentas de usinagem buscam cada vez mais um limiar que lhes dê uma vida econômica com as máximas condições de trabalho e uma melhor associação das propriedades mecânicas exigidas.

Atualmente, boa parte das ferramentas de usinagem são revestidas com filmes de:

- nitreto de titânio (TiN);
- carboneto de titânio (TiC);
- óxido de alumínio (Al_2O_3);
- carbonitreto de titânio (Ti(CN));
- nitreto de silício (Si_3NO_4).

Recentemente foram desenvolvidas técnicas de revestimento com:

- nitreto de boro cúbico (CBN);
- diamante (PKD).

Estes revestimentos garantem melhores propriedades de corte para a ferramenta. Na área da metalurgia podem melhorar uma série de propriedades, tais como:

- resistência ao desgaste;
- dureza superficial;
- resistência à fadiga;
- resistência à degradação térmica;
- resistência à difusão;
- resistência à abrasão;
- outras propriedades [2, 3].

Com isto, obtém-se um maior tempo efetivo de corte e, conseqüentemente, uma maior

produtividade por gume do inserto do metal-duro.

Os vários materiais de revestimentos podem ser utilizados em uma única ferramenta, tendo cada revestimento uma função definida e, às vezes, complementar à outra. Estes filmes de revestimento são depositados sobre substratos através de processos físicos (PVD - Physical Vapor Deposition) ou processos químicos (CVD - Chemical Vapor Deposition) [2].

Este trabalho tem por objetivo analisar as ferramentas H1P K10 revestidas por “Magnetron Sputtering” com uma camada de TiN, ferramentas revestidas comerciais GC 415 com três camadas de revestimento e ferramentas H1P K10 não revestidas.

Para esta análise comparativa devem ser realizados ensaios de usinabilidade de torneamento externo longitudinal cilíndrico. Para tanto, são fornecidas informações a respeito do comportamento das curvas de desgaste de flanco médio (VB) das ferramentas de corte.

CAPÍTULO 2

2 ESTADO DA ARTE

2.1 Processo de Usinagem com Ferramenta de Geometria Definida

O processo de usinagem com ferramenta de geometria definida é o processo de usinagem que emprega ferramentas de corte que possuem a parte cortante geometricamente definida.

A forma da ferramenta de corte tem como objetivo:

- reduzir a força de penetração e avanço através do aumento do ângulo de incidência;
- reduzir a força de corte através do aumento do ângulo de saída;
- aumentar a resistência mecânica da ferramenta de corte através do aumento dos ângulos de cunha e de quina;
- aumentar a estabilidade do gume através de chanfros no gume principal e secundário bem como pelo aumento do ângulo de cunha;
- reduzir a marca de desgaste da ferramenta de corte através do aumento do ângulo de incidência;
- reduzir os esforços e o atrito na face pelo aumento do ângulo de saída;
- obter superfície de boa qualidade na peça através da diminuição do raio de gume e aumento da raio de quina;
- simplificar a afiação.

De acordo com Weingaertner e Schroeter [4] a forma das ferramentas não é a mesma para

todas as condições de corte e resulta de um compromisso entre exigências às vezes contraditórias.

Para viabilizar o estudo do processo de usinagem necessita-se estudar tanto o mecanismo de formação de cavacos como também a influência da variação dos parâmetros geométricos da ferramenta sobre este mecanismo, bem como sobre as características do processo e o resultado de trabalho.

Quando se inicia o processo de corte, o gume da cunha da ferramenta penetra no material da peça, que se deforma elástica e plasticamente. Após ultrapassar a tensão de cisalhamento máxima do material, este começa a escoar. Em dependência da geometria da cunha de corte, o material deformado passa a formar um cavaco que desliza sobre a face da cunha de corte da ferramenta.

Em todos os processos de usinagem com remoção de cavaco, características do processo como formação de cavaco, saída do cavaco, força de corte, desgaste da ferramenta e o resultado do trabalho são influenciados consideravelmente pela geometria da ferramenta. Em decorrência deste fato é que a geometria da ferramenta deve ser adaptada ao material da peça, ao material da ferramenta e às condições específicas do processo [1].

A cunha de corte é uma parte muito importante da ferramenta que deve ser analisada cuidadosamente, devido à sua grande influência sobre as características do processo e o resultado de trabalho. A figura 2.1 mostra uma ferramenta de torneamento explicitando as superfícies, gumes, chanfros e quinas. Define-se que cunha de corte é a porção da parte ativa da ferramenta incluída entre a face e o flanco, podendo a mesma ser associada ao gume principal ou ao gume secundário [5].

A parte do gume que se projeta no sentido da direção de avanço é denominada de gume principal e a que se projeta na direção normal à direção de avanço é denominada de gume

secundário. A interseção dos dois gumes é denominada de quina da ferramenta.

A face da ferramenta é a superfície sobre a qual flui o cavaco. Chama-se flanco às superfícies que se justapõem às superfícies de corte formadas durante a usinagem [1].

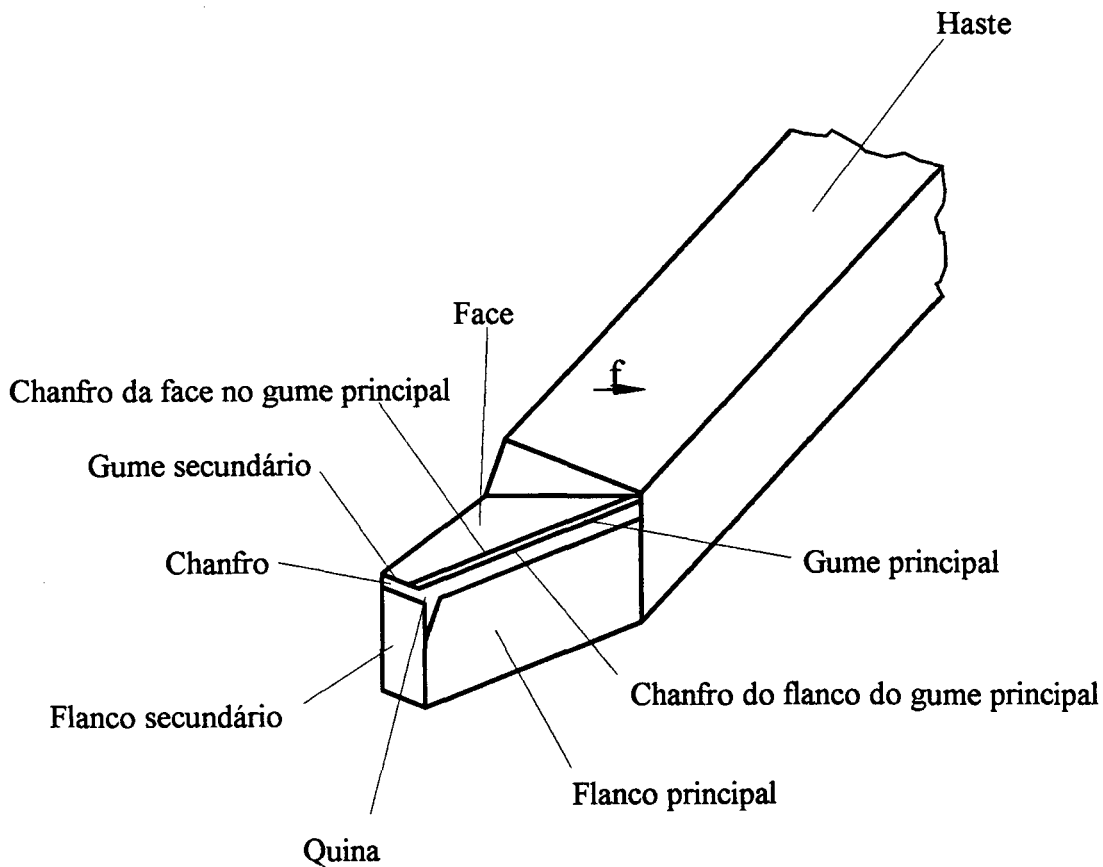


FIGURA 2.1 - Esquema representativo de uma ferramenta com geometria de corte definida

(DIN 6581)

Para definir e especificar os ângulos de uma ferramenta de corte são necessários sistemas de planos de referência. O sistema de referência na ferramenta é necessário para definir a

geometria da ferramenta para sua fabricação e medição. O sistema de referência efetivo é necessário para especificar a geometria da ferramenta, quando ela está realizando uma operação de corte.

O sistema de referência na ferramenta está mostrado na figura 2.2 e se baseia nas dimensões geométricas da ferramenta estática, sem considerar a cinemática do processo de usinagem.

O sistema de referência efetivo considera a velocidade de avanço durante o processo de usinagem. A superfície de referência é, em decorrência disso, normal à direção efetiva do corte que resulta da soma da velocidade de corte e de avanço [1].

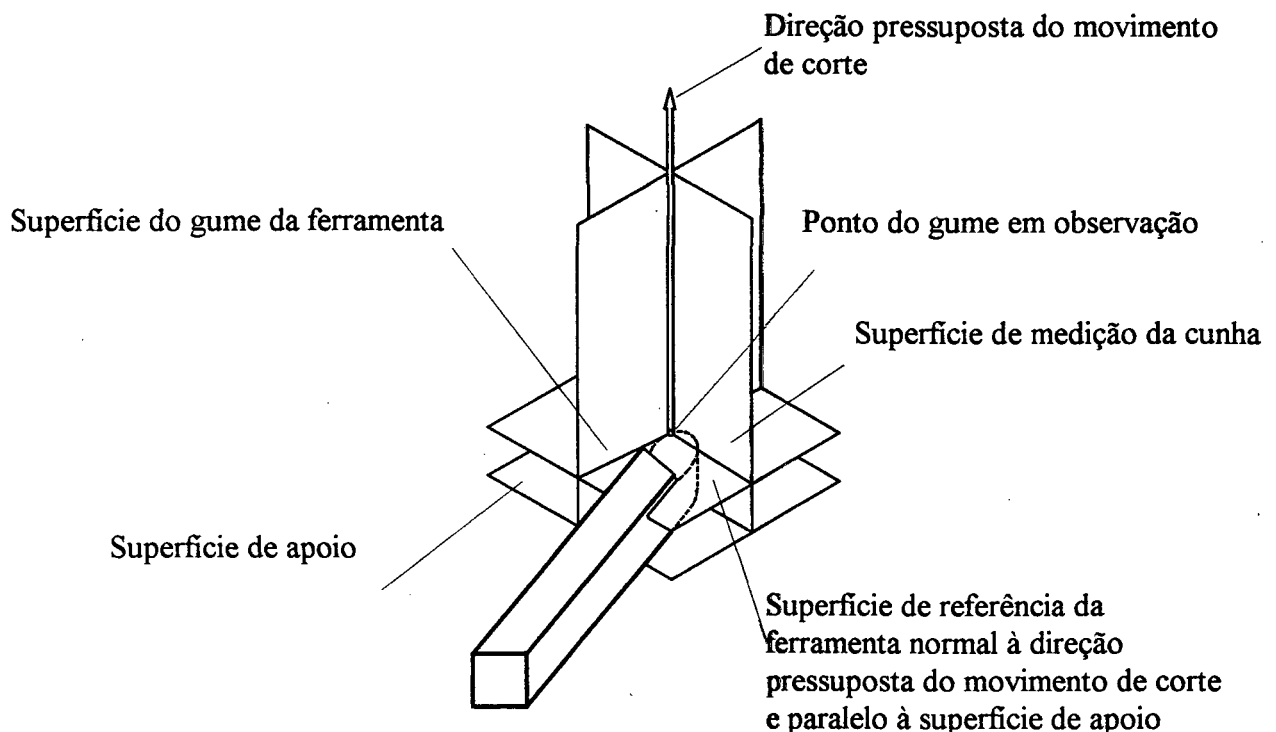


FIGURA 2.2 - Sistema de referência na ferramenta (DIN 6581)

2.1.1 Geometria da parte cortante da ferramenta de corte

A geometria da parte cortante da ferramenta de corte é descrita por ângulos e raios, conforme a figura 2.3.

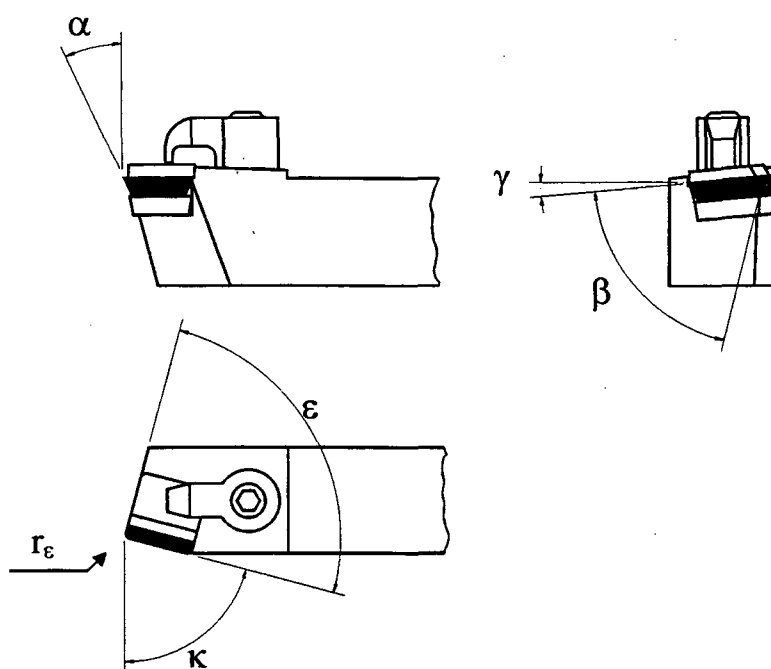


FIGURA 2.3 - Principais ângulos e raios da ferramenta de corte

Os ângulos da parte cortante servem para a determinação da posição e forma do gume, da face e dos flancos [5]. Os ângulos no gume principal e no gume secundário são diferenciados pelo índice 'n' para o gume secundário [1]. Os ângulos na parte cortante são α , β , γ , κ , λ e ϵ . Os raios são ϵ_r e δ .

O ângulo de direção do gume κ é o ângulo entre a superfície de corte e a superfície de trabalho, medido na superfície de referência [1]. O emprego de um ângulo de direção menor do que 90° faz com que o corte se inicie afastado da quina da ferramenta, num lugar em que o gume é mais resistente e mais apto a absorver o impacto inicial. No caso de um ângulo de direção de 90° o corte se inicia subitamente em toda a extensão do gume ativo, o que pode provocar a quebra ou lascamento do mesmo [5].

O ângulo de quina ε é o ângulo entre a superfície do gume principal e do gume secundário, medido na superfície de referência [5].

O ângulo de inclinação lateral λ é o ângulo entre o gume principal e a superfície de referência, medidos na superfície de corte. Este ângulo possui as funções de controlar a direção de saída do cavaco, proteger a quina da ferramenta contra impactos e atenuar vibrações [5].

O ângulo de cunha β é o ângulo entre o flanco principal e a face medido na superfície de medição da cunha. A soma dos ângulos de incidência e de saída diminuído de 90° resulta no ângulo de cunha β [1].

O ângulo de incidência α é o ângulo entre o flanco e a superfície de corte, medido na superfície de medição da cunha. O desgaste do flanco (caracterizado neste trabalho pela marca de desgaste de flanco médio VB) é influenciado consideravelmente pelo ângulo de incidência. Se o ângulo de incidência tender a 0° , a marca de desgaste de flanco aumenta de forma mais rápida, devido ao menor volume de desgaste removido na cunha, figura 2.4 [5]. Se α for pequeno, a força de avanço passiva é grande e o gume não pode penetrar convenientemente no material. Se o ângulo de incidência for demasiadamente grande, o gume pode quebrar ou flambar.

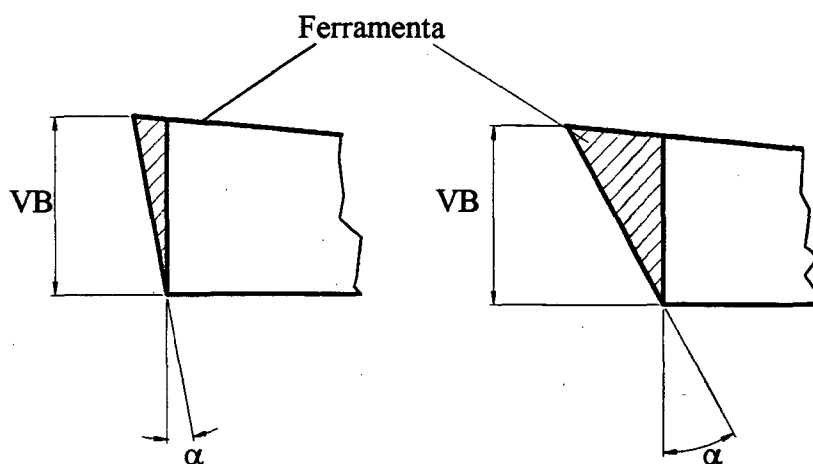


FIGURA 2.4 - Marca de desgaste de flanco VB para diferentes ângulos de incidência (α)

O ângulo de saída γ é o ângulo entre a face e a superfície de referência, medido na superfície da cunha. Ele pode ser tanto positivo como negativo. O ângulo de saída é responsável pelo corte do material em questão. O ângulo γ influencia consideravelmente a estabilidade da cunha. Ferramentas demasiadamente positivas podem quebrar devido ao enfraquecimento da cunha. Como vantagens de um ângulo de saída positivo tem-se a diminuição da força de corte e força de avanço, bem como uma considerável melhora na qualidade da superfície da peça.

Ângulos de saída negativos aumentam a estabilidade da ferramenta. A deformação plástica na usinagem com ferramentas de ângulo de saída negativos é maior, e em decorrência disso temos uma maior força de usinagem e uma solicitação térmica da cunha maior. Assim o desgaste de cratera será maior na face, que por sua vez pode levar a uma vida mais curta da ferramenta [1]. Para materiais dúcteis, ângulos de saída positivos levam a uma tendência de cavacos contínuos.

O raio de quina r_e é localizado na intersecção do gume principal e secundário. Em conjunto com o avanço ele define a rugosidade cinemática do componente usinado. O raio de

gume δ define a capacidade de corte e a espessura mínima de usinagem.

2.1.2 Processo de corte

Há três regiões de grande interesse na raiz do cavaco e que são mostradas na figura 2.5. A primeira estende-se ao longo do plano de cisalhamento e é a região entre o material deformado e o material indeformado ou do cavaco e o material da peça. A segunda área inclui a interface entre o cavaco e a face da ferramenta, enquanto que a terceira área inclui a superfície acabada ou usinada e a superfície adjacente da ferramenta (flanco). Na primeira região temos a maior transformação de energia, ao passo que na segunda temos a maior temperatura e a terceira define a rugosidade característica da peça [6].

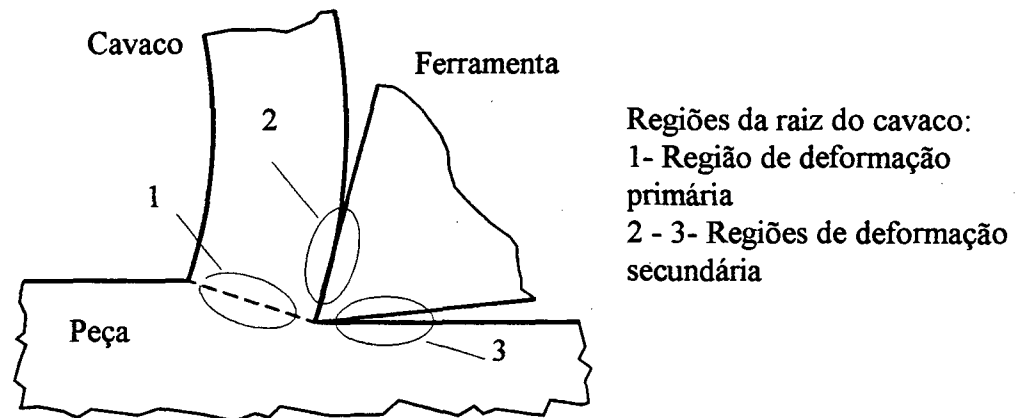


FIGURA 2.5 - Regiões importantes da raiz do cavaco na usinagem [6]

Os cavacos produzidos na usinagem podem apresentar muitos aspectos distintos,

dependendo do avanço, profundidade e velocidade de corte, geometria da ferramenta, material da peça e fluido de corte, entre outros fatores. Os cavacos de metais dúcteis podem se apresentar de diversas formas, como em fitas retas, em fitas retorcidas, em fitas helicoidais, em fitas espiraladas, em vírgula e outras formas. Os cavacos de metais frágeis, como ferro fundido e latão, apresentam-se sob a forma de lascas cisalhadas ou ainda de partículas arrancadas sem deformação plástica [5].

Do ponto de vista da tecnologia da usinagem, pode-se classificar as diversas formas de cavacos em três tipos básicos: o cavaco contínuo, o cavaco cisalhado e o cavaco arrancado. Além disto, os dois primeiros tipos podem vir associados com a formação de gume postiço [5]. A figura 2.6 mostra a representação esquemática do mecanismo de formação de cavaco. A representação mostra que a deformação plástica contínua, na raiz do cavaco, pode ser dividida em três regiões. A configuração estrutural na peça (a) por cisalhamento, passa para configuração estrutural do cavaco em (b). A deformação plástica na região de cisalhamento na usinagem de materiais frágeis, bem como de materiais dúcteis que apresentam encruamento, pode levar à separação do material na região de cisalhamento. Se o material tem, no entanto, uma capacidade de deformação maior, então a separação só ocorre imediatamente diante do gume na região (e). A solicitação de cisalhamento, simultânea à aplicação de uma pressão vertical sobre a ferramenta em combinação com as temperaturas elevadas, leva a deformações na camada inferior do cavaco (c) e na superfície de corte (d). Durante o deslizamento sobre a face da ferramenta, se formam superfícies limites que também sofrem deformações plásticas complementares. Essas regiões de escoamento, que têm uma textura de deformação paralela à face da ferramenta, podem ser comparadas a um escoamento viscoso com gradiente de deformação elevado [1].

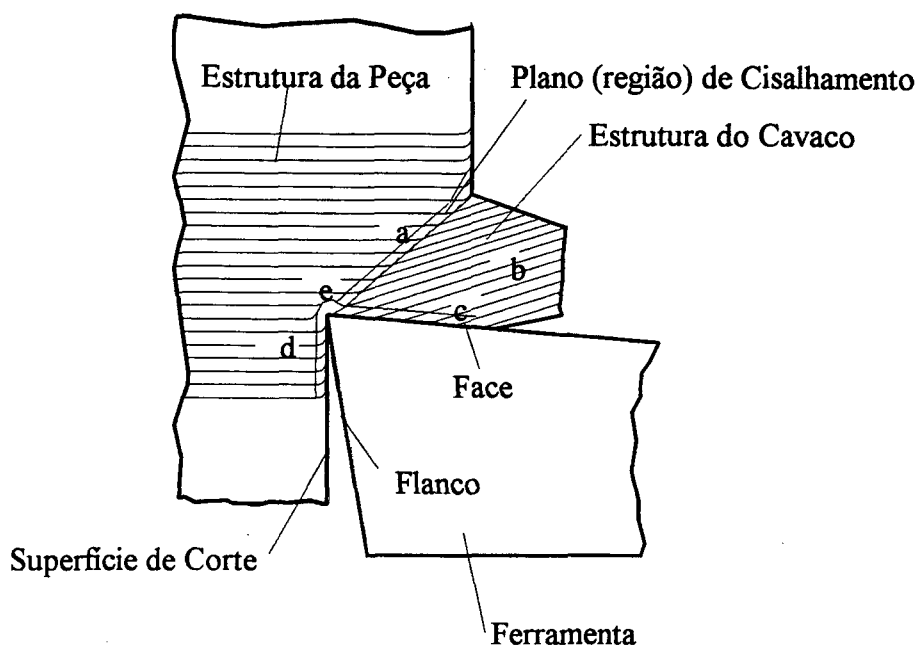


FIGURA 2.6 - Mecanismo de formação de cavaco [1]

Cavacos contínuos são formados quando o material tem uma capacidade de deformação suficientemente elevada ($\epsilon_B > \epsilon_0$), a estrutura na região do cavaco é regular e as deformações não levam a encruamentos acentuados na formação de cavacos, e o processo não é restringido por vibrações [1].

Cavacos cisalhados constam de segmentos de cavacos, que são seccionados na região de cisalhamento e em parte caldeiam entre si. Eles se formam se $\epsilon_Z < \epsilon_0$, de forma que isto não ocorra somente para materiais frágeis como o ferro fundido, mas também quando a deformação produz um encruamento acentuado na estrutura do material. Cavacos cisalhados também podem ocorrer para velocidades de corte extremamente baixas (1 a 3 m/min) [1].

Cavacos arrancados normalmente ocorrem na usinagem de materiais frágeis com estrutura irregular, como em alguns ferros fundidos e na usinagem de rochas. Os cavacos não são

cisalhados e sim arrancados da superfície, com o que a superfície da peça muitas vezes é danificada por microlascamentos [1].

2.1.3 Solicitações na cunha de corte

A força de usinagem F que atua entre a ferramenta, a peça e o cavaco durante o processo de usinagem é uma força espacial e é representada por suas componentes. A decomposição da força de usinagem pode ser polar ou cartesiana segundo eixos quaisquer arbitrários, ou devido a ações físicas específicas em certas direções, como a direção de avanço, direção de corte, atrito, cisalhamento, entre outros fatores.

O sistema de decomposição da força de usinagem mais comum é o sistema cartesiano, na qual as direções dos eixos coincidem com a velocidade de corte, velocidade de avanço e a normal entre estas duas.

A componente da força de usinagem no sentido da velocidade de corte é denominada de força de corte, no sentido da velocidade de avanço de força de avanço e a componente normal à estas duas, de força passiva. Como sobre a componente passiva não incide nenhum movimento durante a usinagem, ela não é responsável por uma parcela de trabalho na usinagem.

A força total de usinagem é decorrente da ação de várias forças que agem nas diversas áreas de contato entre a peça e a ferramenta. Decompondo esta força, como visto na figura 2.7, teremos as principais componentes de força durante o corte.

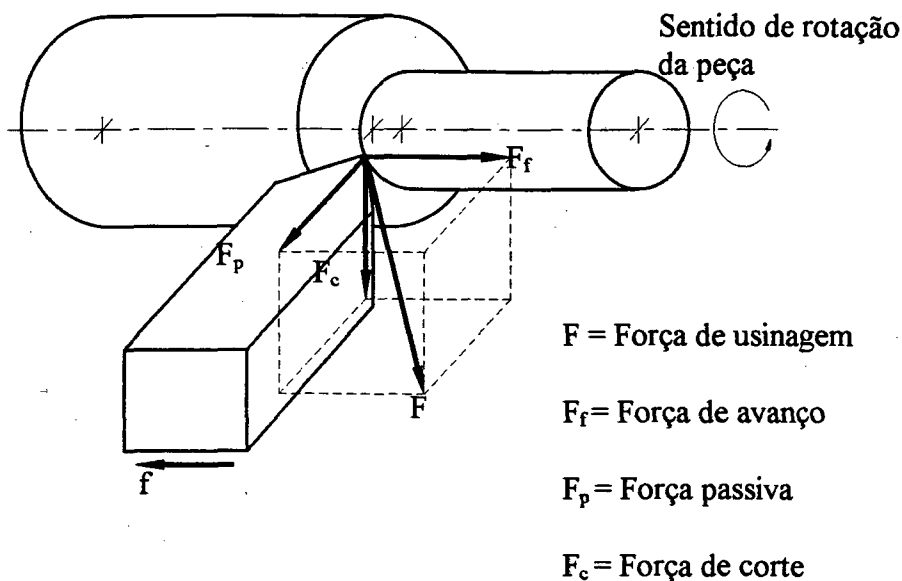


FIGURA 2.7 - Decomposição de forças no torneamento longitudinal cilíndrico

As tensões médias normais e tangenciais sobre a face da ferramenta na usinagem do aço de construção mecânica estão situadas na faixa de 350 a 400 N/mm^2 e 250 a 350 N/mm^2 , respectivamente. Para aços ligados estes valores podem atingir a 1100 N/mm^2 .

O trabalho de usinagem é resultante do produto entre o percurso percorrido e as forças que indicam a direção do percurso de usinagem [7]. Correspondentemente podemos determinar a potência de usinagem como sendo o produto das componentes da velocidade e da componente da força de usinagem respectiva. O trabalho efetivo W_e e a potência efetiva P_e , como a soma das correspondentes parcelas de corte e avanço.

O trabalho mecânico efetivo empregado na usinagem é quase que completamente

transformado em energia térmica. Os centros de geração de calor são idênticas aos centros de deformação. Em decorrência disso, temos fonte de calor na região de cisalhamento e nas regiões de atrito na ferramenta [1].

2.2 Avarias e Desgastes das Ferramentas de Corte

As avarias e o desgaste da parte cortante da ferramenta de corte ocorrem de forma isolada e/ou superpostas. Elas são decorrentes das solicitações térmicas e mecânicas e podem ser divididas em: lascamento (micro, macro e quebra total); fadiga (térmica, mecânica ou termo-mecânica); deformação plástica (consequência de solicitações térmicas excessivas); abrasão; aderência (abrasão provocada por ruptura de aderência); difusão (abrasão acentuada decorrente de fenômenos consequentes da difusão entre material da peça e ferramenta) e oxidação (abrasão facilitada na ferramenta enfraquecida pela oxidação).

2.2.1 Quebra

A quebra é uma ruptura acidental e prematura de partes da cunha próximas ao gume da ferramenta e é causada por sobre-solicitações mecânicas e térmicas na região de corte. Na quebra distingue-se micro e macro-lascamentos e ruptura total. A quebra pode ser evitada por alterações da própria ferramenta, do processo e do material da peça, como mostrado esquematicamente:

a) Na ferramenta:

- aumento do ângulo de cunha ou ângulo de quina;
- adequação do acabamento do gume;

- alteração do inserto (relação resistência / tenacidade).

b) No processo:

- reduzir os cortes interrompidos ou impacto, principalmente em materiais mais tenazes;
- evitar vibrações de qualquer origem;
- evitar resfriamento brusco na afiação ou na usinagem.

c) No material:

- reduzir inclusões duras no material a usar.

A fadiga é provocada por solicitações térmicas e mecânicas alternantes e tem como consequência micro e macro-lascamentos. A fadiga pode ser minimizada pela escolha de ferramentas mais tenazes.

2.2.2 Desgastes da ferramenta

Os desgastes normalmente mensurados na ferramenta de corte estão mostrados na figura 2.8, e são encontrados na face e no flanco. Na face mede-se a profundidade de cratera (KT), a largura do lábio da cratera (KL), a distância do centro da cratera ao gume (KM) e o deslocamento do gume no sentido da face (SV_f). No flanco é medido o desgaste de flanco (VB) e o deslocamento do gume no sentido do flanco (SV_α) [5].

Para ferramentas de metal-duro a análise dos mecanismos de desgaste deve ser iniciado na faixa de temperatura onde o aço-rápido não pode ser mais empregado. Ou seja, para velocidade de corte acima de 45 m/min. Com isto descartam-se os mecanismos de desgaste induzidos por fatores vinculados à adesão. Passam a dominar mecanismos que anteriormente não eram motivo de preocupação. Além do desgaste abrasivo, temos os mecanismos de desgaste decorrentes da difusão e da oxidação.

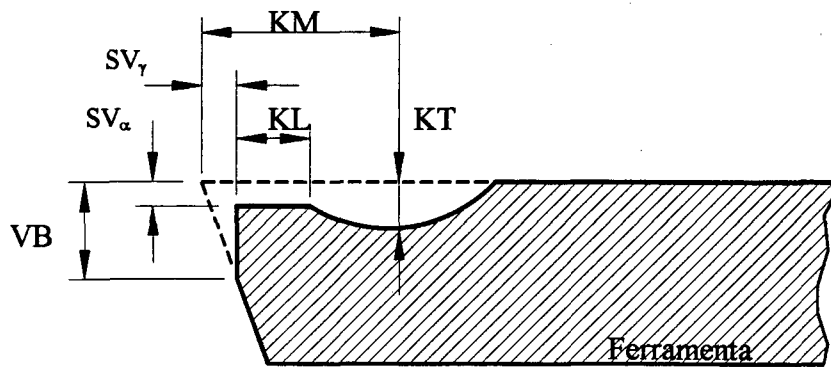


FIGURA 2.8 - Desgastes da ferramenta [7]

2.2.3 Mecanismos de desgaste das ferramentas de metal-duro

Para ajudar a entender os mecanismos de desgaste, a literatura se refere a um gráfico que exprime os mecanismos de desgaste como função da temperatura, figura 2.9.

Os mecanismos de desgaste por abrasão são os mesmos para toda a faixa de temperatura e também para o metal duro são consequência de micro-fenômenos de corte (de usinagem com gumes não definidos) provocadas por partículas duras inclusas no material da peça. Com o aumento da temperatura diminui a resistência ao desgaste abrasivo da ferramenta, mas como a matriz do material da peça também enfraquece, para o mesmo volume usinado, o aumento do desgaste abrasivo é pequeno.

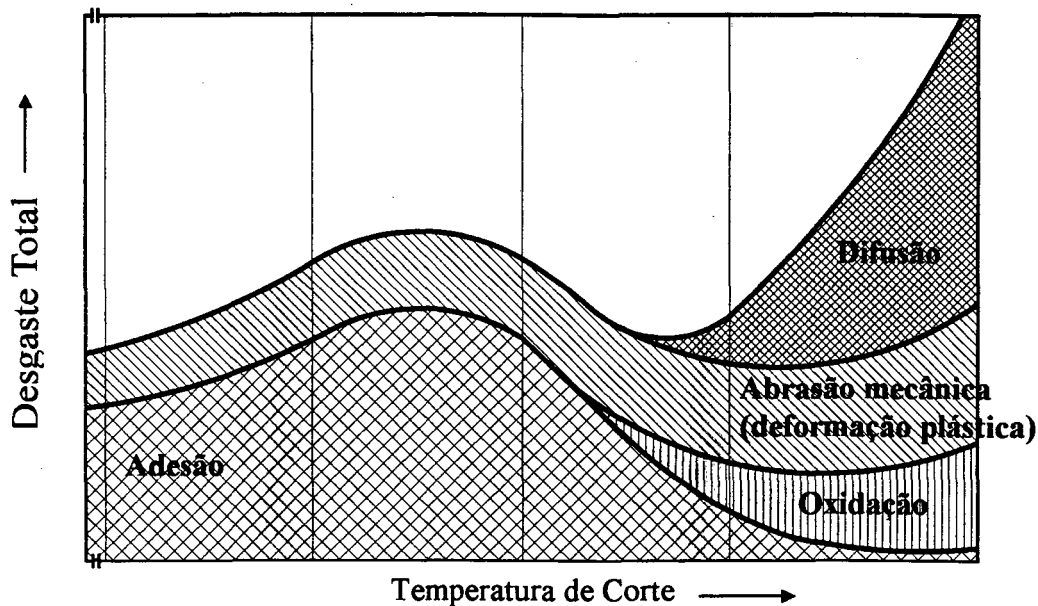


FIGURA 2.9 - Mecanismos de desgaste como função da temperatura [1]

Para entender os mecanismos de desgaste provocados pela difusão e pela oxidação, deve ser entendida a metalurgia do metal duro. Originalmente este era composto de carboneto de tungstênio e uma matriz de cobalto saturada com 0,7 % de carbono. O carboneto de tungstênio forma uma solução sólida com o cobalto, de forma que parte dos carbonetos se encontram dissolvidos na matriz de cobalto. O carboneto de tungstênio é um carboneto primário e altamente resistente ao desgaste abrasivo. A boa tenacidade destes metais duros (grupo K) é consequência da forte ligação entre o carboneto e a matriz de cobalto. Quando a temperatura de contato entre o metal duro e a peça atinge valores nos quais os átomos se tornam móveis (acima de dois terços da temperatura de fusão dos elementos envolvidos - no caso do aço e do cobalto em torno de 1000 °C), os átomos procurarão estabelecer uma nova posição de equilíbrio. Como o ferro é infinitamente solúvel no cobalto, e vice-versa, não existe tal posição de equilíbrio e a velocidade de deslocamento dos átomos pode ser considerada grande: alguns micrometros por hora. Como a difusão é substitutiva, ela não pode, de início, explicar a formação da cratera, comumente

designada como de origem difusiva. Teremos que ter um entendimento mais profundo dos acontecimentos na interface cavaco / ferramenta.

O cobalto da ferramenta que difunde para o cavaco é substituído por ferro oriundo do cavaco. Com isto a matriz da ferramenta passa a se apresentar como uma liga de cobalto e ferro que tem uma solubilidade de carbono aumentada de 0,7 para 2 a 2,5 %. Torna-se necessário estabelecer a nova posição de equilíbrio, fornecendo-se carbono à nova matriz de ferro-cobalto. Este carbono na usinagem de um aço, mesmo eutetóide, para a temperatura de trabalho em torno dos 1000 °C, não está disponível na peça, de forma que também não pode ser transferido da peça para a ferramenta. A ferramenta dispõe de carbono, no entanto não livre, apenas na forma de carboneto de tungstênio WC, que mantém uma ligação muito forte com o carbono. Como o ferro forma carbonetos complexos com o tungstênio, na forma de $(WFe)_{23}C_6$, e o carboneto de tungstênio está dissolvido na matriz de cobalto, o caminho médio que o ferro tem que percorrer até encontrar um carboneto de tungstênio para formar um carboneto complexo, é extremamente curto. Como resultado da reação de formação de carbonetos complexos, sobram os átomos de carbono necessários para novamente saturar a matriz de cobalto com o carbono exigido pela presença do ferro. Os carbonetos complexos de ferro e tungstênio no entanto não apresentam a resistência ao desgaste apresentados pelos carbonetos primários de tungstênio, de forma que imediatamente após se formarem, são removidos com relativa facilidade da face da ferramenta, nas regiões de temperatura maiores, por abrasão mecânica, dando-se início à uma nova reação na superfície recém exposta da ferramenta pelo desgaste.

Podemos interferir sobre os mecanismos de desgaste induzido pela difusão de duas maneiras: substituindo os carbonetos de tungstênio por outros que não tenham a afinidade com o ferro, ou substituindo a matriz de cobalto por outro elemento. A substituição dos carbonetos é realizada tecnicamente há muitos anos e é encontrada nos metais-duros dos grupos P e M.

Infelizmente os carbonetos de titânio, tântalo e nióbio não são solúveis na matriz de cobalto e, embora com isto se tenha um aumento da resistência ao desgaste abrasivo em altas temperaturas, pela minimização do mecanismo de desgaste induzido pela difusão do ferro para o cobalto e a formação de carbonetos complexos, estes grupos de metal-duro apresentam uma menor resistência à flexão, e apenas permitem solicitações mecânicas menores que a de seus antecessores do grupo K.

A substituição do cobalto por outro metal é concretizada no grupo de materiais de ferramenta designada por CERMETS, que são metais duros à base de carbonitretos de titânio com matriz de níquel-molibdênio.

Assim como nas ferramentas de aço-rápido, uma barreira para a difusão do ferro para o cobalto e vice-versa é propiciada pelos revestimentos aplicados sobre as ferramentas de metal-duro. Enquanto que nos aços-rápidos os revestimentos predominantemente são aplicados pela técnica PVD, nos metais-duros se empregam técnicas CVD, mais econômicas e versáteis. Os revestimentos mais usuais são os de carboneto de titânio, nitreto de titânio, carbonitreto de titânio e de óxido de alumínio. Normalmente os revestimentos são efetuados de forma multi-camada, com o que se garante melhor homogeneidade e melhores características dos revestimentos. A espessura total dos revestimentos se situa na faixa de 4 a 12 micrometros.

O desgaste por oxidação é um mecanismo de ação direta. Se o material da ferramenta tem afinidade com o oxigênio, e se o óxido formado não apresenta resistência ao desgaste abrasivo, a ação do oxigênio da atmosfera se incumbe de oxidar as regiões de temperatura mais elevada da ferramenta, onde ele tenha acesso. Assim, as regiões limitadas pelo cavaco e peça e a interface ferramenta / peça são afetadas por este mecanismo de desgaste. De forma mais acentuada o gume da ferramenta na região de transição de contato ferramenta / cavaco e peça apresentam marcas de desgaste por oxidação, onde os óxidos foram removidos pelo efeito abrasivo do cavaco sobre os

óxidos. Porém também no flanco das ferramentas de metal duro podem surgir marcas de oxidação. Como nesta região os óxidos formados não sofrem uma ação abrasiva intensa, a superfície de corte e usinadas são regulares e a formação de óxidos está associada a um aumento de volume, ocorre uma diminuição do ângulo de incidência, até que ocorra o contato do filme de óxidos com a superfície usinada. Esporadicamente os óxidos nesta região são removidos por esfrelamento. Uma análise não criteriosa do desgaste de flanco pode levar à conclusão de que o desgaste de flanco esteja flutuando entre valores mínimos e máximos. Na verdade, o aspecto da marca de desgaste sobre o filme de óxidos é semelhante a marca de desgaste no flanco da ferramenta, e sempre que o óxido se desprende, tem-se a impressão que a marca de desgaste tenha diminuído. No flanco a marca de desgaste por oxidação raras vezes é limitante, ou seja, é a responsável pelo fim da vida da ferramenta de corte.

Um material de ferramenta mais resistente à oxidação (no caso dos metais duros, os do grupo P) ou um revestimento também levam a resultados favoráveis com respeito ao desgaste por oxidação. Diminuir o acesso do oxigênio à região de formação de cavaco, empregando-se uma atmosfera controlada, também é uma solução, porém não prática [1].

2.3 Materiais para Ferramentas de Corte

Conseqüência do grande número de exigências que se faz a uma ferramenta de corte, bem como pela característica contraditória feita às partes geométricas da ferramenta, torna-se difícil satisfazer a todas as condições. Além das características geométricas devem ser satisfeitas características físicas e mecânicas, como elevada dureza a frio e a quente, elevada tenacidade, resistência à abrasão, estabilidade química, além de se exigir facilidade de obtenção a preços

econômicos.

As pesquisas e desenvolvimentos na área dos materiais para ferramentas de usinagem não podem ser considerados concluídos, pois continuamente procura-se melhorar as características dos materiais já existentes, assim como obter novos materiais.

Nenhum dos inúmeros materiais de corte disponíveis hoje em dia possui todas estas qualidades no mais alto grau. A escolha da ferramenta de corte deve ser feita pelo mérito, pois aquele que é extraordinário em algumas propriedades, se apresenta inferior em outras, conforme mostrado na figura 2.10. Desta forma, em cada trabalho específico deve-se verificar quais as exigências primordiais e quais as secundárias, de modo a se poder escolher o material mais adequado ao caso [5].

Não há uma classificação geral de materiais para ferramentas. Entretanto, em vista da ordem cronológica do seu desenvolvimento e com base nos seus característicos químicos, eles podem ser agrupados da seguinte maneira [1, 8, 9]:

- aços-ferramenta (aço-carbono);
- aços-rápidos (HSS);
- stellite;
- metal-duro;
- cermets;
- cerâmica óxidas;
- cerâmicas mistas;
- cerâmicas à base de nitretos;
- nitreto de boro cúbico (CBN);
- diamante.

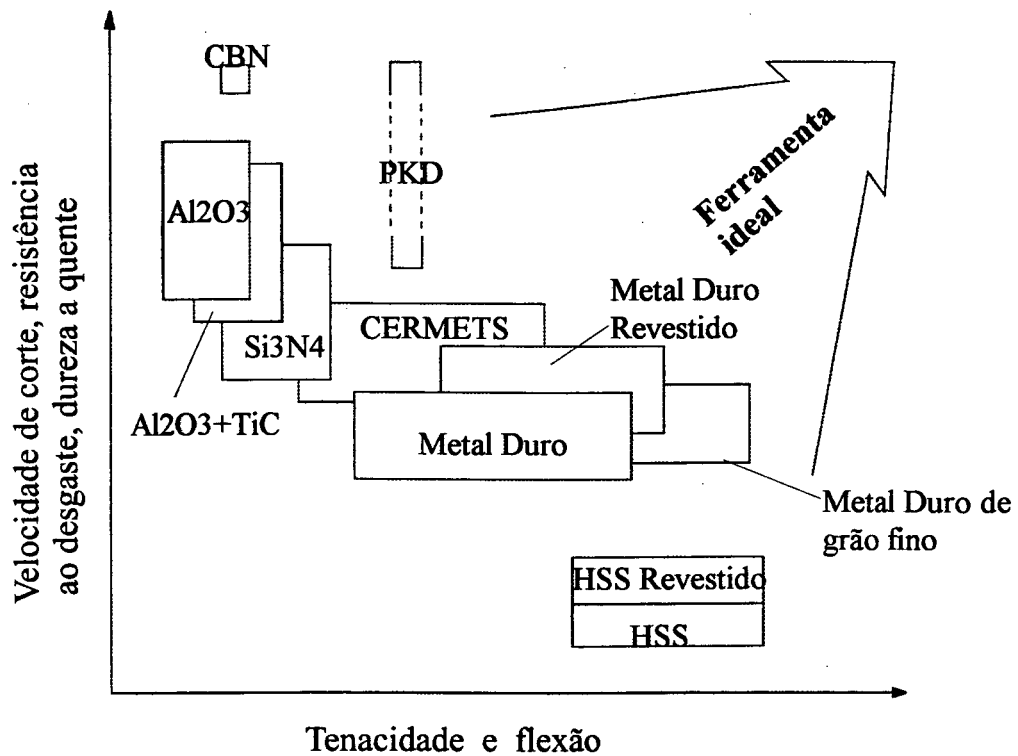


FIGURA 2.10 - Relação entre a dureza e a tenacidade para diversos materiais de ferramentas de corte [1]

2.3.1 Aços-ferramenta (aço-carbono)

Aços-ferramenta são os primeiros materiais de corte que foram empregados na indústria. Eles obtêm a sua dureza pelo tratamento térmico de têmpera [1]. São aço-carbono com teores de 0,8 a 1,5% de carbono, e até 1900 eram praticamente os únicos aços utilizados na confecção de ferramentas de corte. Para melhorar a qualidade do aço-ferramenta, sua composição é às vezes modificada pela adição de pequenas quantidades de cromo, vanádio e tungstênio [5].

Atualmente, o uso de aços-ferramenta para fabricação de ferramentas é bastante reduzido, tendo as seguintes aplicações principais:

- ferramentas de formas mais complexas: usadas principalmente para usinagem de latão e alumínio;
- ferramentas de pouca utilização (lotes pequenos);
- ferramentas de uso caseiro e trabalhos em madeira.

O principal inconveniente dos aços-ferramenta é o fato de perderem a sua dureza martensítica e, portanto, sua capacidade de operarem como ferramentas de corte já em temperaturas relativamente baixas, em torno de 250°C [5].

2.3.2 Aço-rápido (HSS)

O aço-rápido foi desenvolvido por volta de 1898 pelo norte-americano F. W. Taylor e apresentado publicamente pela primeira vez, com extraordinário sucesso, na Exposição Mundial de Paris de 1900.

O desenvolvimento original do aço rápido partiu do emprego do tungstênio, cromo e vanádio como elementos básicos de liga, com um teor de manganês tão baixo quanto possível, a fim de evitar a fragilidade.

A dureza do aço-rápido é obtida por um tratamento de têmpera e revenimento em temperaturas em torno de 500 °C, onde é propiciada a precipitação dos carbonetos na matriz. Embora a dureza martensítica seja reduzida pelo aumento de temperatura de revenimento, a dureza secundária decorrente da precipitação dos carbonetos, confere características boas ao HSS como ferramenta de corte.

No decorrer dos anos, foram introduzidas algumas modificações na composição do aço-rápido, oferecendo ligas de maior resistência à abrasão ou ao choque.

Em 1942, em virtude da escassez de tungstênio provocada pela guerra, passaram a ser

utilizadas ligas em que o mesmo era substituído total ou parcialmente por molibdênio. O menor preço do molibdênio, e pelo fato de participar na composição com metade da porcentagem do tungstênio (por ter aproximadamente a metade do peso específico do tungstênio) fazem com que os aços-rápidos ao molibdênio sejam mais baratos do que os aços ao tungstênio, para propriedades equivalentes.

A principal vantagem dos aços-rápidos sobre os aços-ferramenta é o de manterem a dureza até temperaturas em torno de 520 a 600°C. Este fato associado a uma maior resistência à abrasão, permite aos aços rápidos velocidades de corte bem mais elevadas e maior vida da ferramenta em relação aos aços-ferramenta.

Revestimentos de TiN (nitreto de titânio) aplicados por processo PVD (deposição física de vapor), em temperaturas inferiores a 550°C, isto é, abaixo da temperatura de revenimento do aço-rápido, conferem uma aparência dourada à ferramenta e produzem os seguintes efeitos:

- redução do desgaste na face e no flanco da ferramenta;
- caráter não metálico, estabilidade química e mínima tendência de adesão ao revestimento de TiN, assegurando baixo atrito e impedindo a aderência de material na ferramenta e, portanto, a formação do gume postiço. Isto reduz a força de corte e melhora o acabamento superficial;
- proteção do metal de base contra altas temperaturas pelo baixo coeficiente de transmissão de calor do TiN [5];
- redução da temperatura na cunha devido ao menor coeficiente de atrito.

2.3.3 Stellite

Stellites são ligas fundidas, sem ferro, constituídas de cobalto (40 a 45%), os formadores de carbonetos, tungstênio (15 a 20%) e cromo (25 a 30%). O teor de carbono varia entre 1,5 e

2,5 %. A estrutura é formada por carbonetos aciculares e uma matriz austenítica, formada de binários eutéticos de todos os elementos de liga, predominantemente pelo cobalto.

Para pequenas velocidades de corte os stellites são superiores em qualidade aos aços-rápidos. Em velocidades de corte maiores, a dureza a quente do stellite é insuficiente. No aspecto metalúrgico, os stellites formam a ponte entre o aço-rápido e o metal-duro, mas na prática eles não preencheram esta função [1].

2.3.4 Metal-duro

O metal-duro é um material de ferramenta desenvolvido inicialmente por volta de 1927, produto da metalurgia do pó, tendo como base o carboneto de tungstênio e o cobalto. Ainda hoje é de fundamental importância dentro do campo das ferramentas de corte.

A matéria-prima para a fabricação do metal-duro se apresenta em forma de pó. Os diversos pós metálicos são misturados, prensados e sinterizados, formando um material de alta densidade, composto de partículas duras incrustadas no metal ligante. As partículas duras, que são os carbonetos metálicos, são responsáveis pela resistência ao desgaste, enquanto o metal ligante é responsável pela tenacidade.

O processo de manufatura do metal-duro é bastante complexo e será descrito sucintamente. A matéria-prima principal para a manufatura do metal-duro é a scheelita, que possui um alto teor de tungstênio. Esse minério passa por uma série de tratamentos químicos e mecânicos até obter-se o tungstênio metálico “puro”.

O pó de tungstênio (W) é misturado com pó de carbono (C). A mistura é aquecida a temperaturas em torno de 1700°C e durante o aquecimento o tungstênio e o carbono se unem, formando carboneto de tungstênio (WC). Estes carbonetos são as partículas duras do metal-duro.

Uma das características importantes do cobalto é a de formar uma solução sólida com o carboneto de tungstênio, sendo em consequência o metal ligante mais usado em metais-duros.

Os vários pós são misturados em moinhos de bola onde também se chega a dimensões de grãos pré-determinadas. Os pós são misturados com cera em pó e prensados em forma de briquetes que podem ser pré-sinterizadas a 900°C em atmosfera de proteção.


O último estágio de fabricação, a sinterização final durante o qual o briquete se torna uma peça acabada de metal-duro em forma de pastilha, é feito a uma temperatura entre 1300 e 1600°C. Durante o processo de sinterização final o briquete se contrai aproximadamente 20% em direção linear e 50% no volume reduzindo a porosidade praticamente a zero.


Em adição às classes de metal-duro que se constituem somente de carbonetos de tungstênio e cobalto, foram desenvolvidas classes contendo carboneto de titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC). Por serem carbonetos muito mais estáveis, os carbonetos de titânio foram adicionados para aumentar a resistência à craterização, enquanto os carbonetos de tântalo e nióbio dão mais tenacidade ao metal-duro, devido ao refinamento da granulação que estes provocam, aumentando assim a resistência dos gumes dos metais-duros [10].

Os metais-duros convencionais são subdivididos em grupos P, M e K, conforme mostrado na tabela 2.1. Os critérios para tais grupos são a sua composição e as propriedades resultantes da composição.

TABELA 2.1 - Características do metal-duro [1]

Classe ISO	Aplicações na usinagem de:	
P10 P15 P20 P25 P30 P40	Aços comuns, aços ligados, aço fundido, aço inoxidável, ferro fundido maleável de cavacos longos	↑ ↓
M10 M15 M20 M40	Aços, aço fundido, aço manganês, aço inoxidável austenítico, ferro fundido maleável	↑ ↓
K10 K20 K30	Ferro fundido cinzento coquilhado maleável, aços temperados, metais não ferrosos, plástico e madeira	↑ ↓


 ↑ Maior dureza e resistência ao desgaste


 ↓ Maior velocidade, maior tenacidade e maior avanço

Os metais-duros do grupo P se caracterizam por uma alta resistência a quente e pequena resistência ao desgaste abrasivo. São empregados na usinagem de aço, aço fundido e de ferro fundido maleável, nodular ou ligado, de cavaco longo.

Os metais-duros do grupo M tem uma resistência a quente relativamente boa e boa resistência à abrasão. São adequados para usinagem de aço, aço fundido, aço ao manganês, ferros fundidos ligados, aços inoxidáveis austeníticos e ferro fundido maleável e nodular.

Os metais-duros do grupo K têm menor resistência a quente e uma alta resistência ao desgaste abrasivo. Em decorrência disso, eles tem sua principal aplicação para usinagem de materiais de cavaco curto, como ferro fundido e materiais não ferrosos e não metálicos, bem como para usinagem de materiais com boa resistência a quente, para usinagem de materiais de pedra e de madeira [1].

Esquemáticamente a microestrutura do metal-duro pode apresentar-se como na figura 2.11 [1].

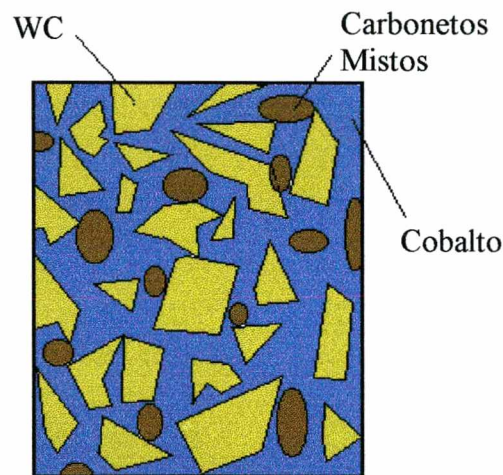


FIGURA 2.11 - Representação esquemática da estrutura do metal-duro [1]

Os metais-duros revestidos possuem o objetivo de melhor explorar as vantagens dos metais duros. Sobre a base do metal-duro se aplica uma ou mais camadas finas, duras, resistentes à abrasão e de granulometria fina, de um material composto de carbonetos (por exemplo TiC, HfC, ZrC), de nitretos (por exemplo TiN, HfN, ZrN), de carbonitretos (TiCN) ou de óxidos (por exemplo Al_2O_3). A figura 2.12 ilustra um esquema de ferramenta de metal-duro com três camadas de revestimento sobre o substrato. Estes revestimentos permitem um aumento substancial da vida das ferramentas [11].

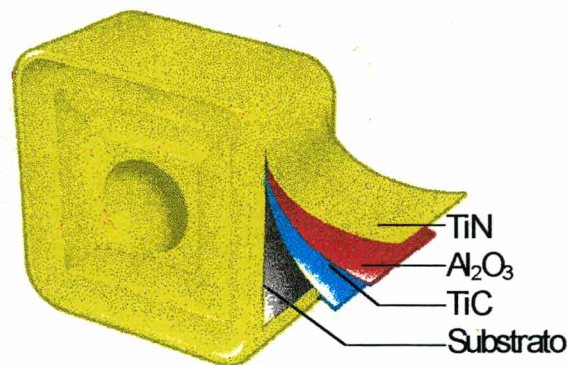


FIGURA 2.12 - Pastilha de metal-duro revestido [11]

Os componentes do revestimento apresentam as seguintes características:

- O carboneto de titânio (TiC) apresenta baixo coeficiente de atrito e baixo coeficiente de condutibilidade térmica, o que leva a temperaturas mais baixas no gume. Com isto diminui a difusão entre os materiais da ferramenta e da peça. Ocorre assim menor desgaste, tanto por abrasão como por difusão. Também a tendência de adesão entre o revestimento e o material da peça é menor, resultando em menor desgaste por aderência. A redução do atrito e da tendência à adesão produzem menor força passiva e de avanço na ferramenta, ainda que a força de corte seja substancialmente igual à da ferramenta de metal-duro convencional. O coeficiente de dilatação térmica é menor que nos outros revestimentos, o que é vantajoso em operações em que ocorrem variações de temperatura.
- O nitreto de titânio (TiN) é quimicamente mais estável do que o TiC, tendo menor tendência a fenômenos de difusão com aços. Há, portanto, menos desgaste por formação de crateras na face, embora o desgaste por abrasão do flanco seja maior do que no caso de revestimentos com TiC. Usualmente a espessura da camada de TiN é em torno de 5 a 7 μm , dando uma cor dourada à pastilha [5].
- O óxido de alumínio Al_2O_3 se caracteriza por uma alta dureza a quente, resistência à oxidação a

altas temperaturas e pela resistência a ações químicas. O óxido de alumínio tem uma excelente resistência ao desgaste de cratera. No entanto, uma desvantagem desse material é sua baixa resistência a oscilações de temperatura e alta fragilidade [1].

Visando a melhora das propriedades da ferramenta de corte aproveitando as vantagens dos vários revestimentos em um único substrato, foram desenvolvidos os metais duros com múltiplas camadas de revestimentos tais como:

- O revestimento múltiplo de carbonitreto de titânio (TiC-Ti(C,N)-TiN) combina as boas propriedades de resistência ao desgaste de flanco do carboneto de titânio, com a boa estabilidade química do nitreto de titânio, contra o desgaste de cratera e o desgaste por oxidação. Inicialmente é feito um revestimento de carboneto de titânio sobre o substrato, de forma que se obtém uma boa ligação entre o substrato e o revestimento. Procede-se então uma passagem gradual do carboneto de titânio para nitreto de titânio. Como o nitreto de titânio é menos frágil e tem um coeficiente de atrito menor que o carboneto de titânio, as forças de usinagem são diminuídas e também é criada a possibilidade de empregar a ferramenta em corte interrompido [1].

- Revestimentos múltiplos de TiC-Al₂O₃ são usuais pois a aderência do óxido de alumínio puro numa base de metal-duro não é perfeita, exigindo uma camada intermediária de TiC. O campo principal de aplicação do metal-duro com duplo revestimento TiC-Al₂O₃ é na usinagem de aço fundido e de ferro fundido [5].

O desempenho das ferramentas revestidas e não revestidas podem ser comparado através de algumas das metodologias mostradas a seguir [12]:

- a) Ferramentas não revestidas com ferramentas revestidas obtidas através de vários processos de revestimento.
- b) Ferramentas revestidas de formas diferente através do mesmo processo de usinagem.
- c) Ferramentas revestidas de forma diferente através de vários processos de usinagem.

Rahman [13] estudou ferramentas com camadas de revestimento simples e múltiplas em torneamento e concluiu que todos tipos de revestimentos estudados no seu trabalho trouxeram um aumento de desempenho em relação ao desgaste de cratera quando comparados com ferramentas não revestidas. O desgaste de flanco, entretanto, é mais dependente do tipo de combinação do revestimento. Não é necessário que uma ferramenta com múltiplas camadas possua todas as propriedades requeridas em cada camada, pois cada revestimento trará um melhor desempenho específico.

Os principais tipos de revestimentos, conforme Vagle [14], são TiN/TiC/TiN, TiN/TiC/Al₂O₃ e TiN/TiC/Al₂O₃/TiN. Porém, encontram-se várias combinações de revestimentos no mercado.

König [15] ressalta que há um grande espectro de revestimentos e tecnologia de revestimento, e este ganhou mais importância nos últimos anos. Nesta mesma linha, Israelsson [9] faz um relato do progresso das ferramentas de corte e abre uma ampla gama de desenvolvimentos futuros de novas ferramentas e revestimentos e ainda reforça que maiores diferenciações nas propriedades dentro dos insertos aparecerão, com núcleos tenazes, gumes duros, manejando melhor antigas dificuldades de usinagem.

Para Jean-Paul Peyre [16], os revestimentos se especializam em função das utilizações. Ele questiona os depósitos mais duros do que o diamante, como por exemplo C_n, C₃N₄, que conforme estrutura prevista por M.L. Cohen e A. Y. Liu, da Universidade da Califórnia, teria propriedades mecânicas superiores às do diamante.

Foram levantadas faixas de dureza de alguns revestimentos para PVD e CVD por Olivier Vinterholler e Jean-Paul Peyre [17], e para o TiN obteve-se:

Para PVD → 2000 a 5000 (HV).

Para CVD → 2000 a 2500 (HV).

2.3.5 Cermets

Os CERMETS são materiais compostos com uma ou mais fases cerâmicas e uma fase metálica, servindo de ligante. São obtidos por prensagem a quente, o que produz uma estrutura mais fechada do que no caso de cerâmica pura, e são em geral de cor preta.

Na sinterização, a presença de carbonetos de titânio e outros óxidos inibe o crescimento de grãos. Isto confere aos CERMETS elevada dureza, maior tenacidade e resistência a impactos, ao desgaste do gume e à formação de crateras. Os CERMETS são condutores elétricos, têm razoável condutibilidade térmica e são menos frágeis que os materiais oxi-cerâmicos [5].

2.3.6 Cerâmicas óxidas

Devido à escassez de matéria-prima, como o tungstênio e o cobalto, usados na fabricação do metal-duro, houve na Europa, durante a Segunda Guerra Mundial, uma intensificação nas pesquisas com materiais cerâmicos para utilização na fabricação de ferramentas de usinagem [18].

O componente principal da cerâmica de corte é o corindon (Al_2O_3), o qual é uma forma estável α da alumina. O material de partida se apresenta sob a forma de um pó, cujas partículas estão compreendidas entre 1 e 10 μm . As peças se obtêm prensando fortemente a matéria-prima, que pode ser de Al_2O_3 com 99,98% de pureza. Hoje é freqüente a adição de ZrO_2 na cerâmica pura para obter maior tenacidade. O material prensado obtido apresenta-se ainda muito poroso, sendo sinterizado a uma temperatura elevada (geralmente 1700°C ou mais). Durante a sinterização as peças experimentam uma contração progressiva, fechando os canais capilares existentes e diminuindo a porosidade [5].

Uma propriedade dominante das cerâmicas de corte é a sua fragilidade. No caso de uma

solicitação mecânica rápida, por exemplo por impacto ou batidas, se atinge a destruição total por ruptura frágil. A causa disto é a falta de ductilidade. Ultrapassando-se a tensão admissível na superfície do corpo cerâmico, a formação de uma fissura não é interrompida e normalmente leva à quebra total.

Em temperaturas elevadas, o óxido de alumínio não apresenta uma deformação plástica considerável, e apenas uma fluência muito pequena. Disto resulta sua superioridade em aplicações a alta temperatura com altas velocidades de corte.

A alta resistência ao desgaste da cerâmica de corte é decorrente de sua boa estabilidade química, bem como dos baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta de corte e o cavaco.

Uma desvantagem considerável da cerâmica é a sua baixa resistência a oscilações de temperatura. Para uma oscilação de temperatura brusca superior a 200°C, o óxido cerâmico puro Al_2O_3 é destruído. Uma melhora só é possível pela adição de elementos que melhoram a resistência a oscilações de temperaturas.

Reações químicas e adesão do material da peça na ferramenta, na usinagem de metais leves, fazem com que cerâmicas a base de óxido de alumínio não sejam adequadas para usinagem de ligas de alumínio, magnésio e titânio [1].

2.3.7 Cerâmicas mistas

As cerâmicas mistas são ferramentas cerâmicas com menos de 90% de Al_2O_3 , com adições de outros óxidos e carbonetos metálicos, especialmente de carbonetos de titânio e também carboneto de tungstênio. As ferramentas de cerâmica mista são obtidas por prensagem a quente, o que produz uma estrutura de partida mais fechada do que no caso da cerâmica pura.

2.3.8 Cerâmicas à base de nitretos

Em 1981, foi introduzido um novo tipo de cerâmica de corte no mercado, denominado SIALON (Si + Al + O+ N), que contém nitreto de silício (Si_3N_4), além do Al_2O_3 e de uma fase de TiC. Sua dureza a quente é ainda melhor do que a das cerâmicas mistas. A resistência a choques térmicos aproxima-se da dos carbonetos. O SIALON, sob a forma de pastilhas pretas, está superando as outras cerâmicas na usinagem em alta velocidade de ferro fundido e ligas de níquel [5]. Além do Sialon foram desenvolvidas ferramentas de nitreto de silício Si_3N_4 que permite usinagem em corte interrompido de ferro fundido em velocidade de corte de até 5000 m/min.

2.3.9 Nitreto de boro cúbico (CBN)

O nitreto de boro cúbico é o segundo material mais duro conhecido na face da terra, apenas superado pelo diamante. O CBN é um material sintético que não é encontrado na natureza, obtido pela reação de halogenetos de boro e amoníaco.

Como no carbono, existe uma forma mole de nitreto de boro com uma estrutura hexagonal, idêntica à estrutura cristalina do grafite, e uma dura, que apresenta uma estrutura cristalina cúbica idêntica à estrutura do diamante [1].

O nitreto de boro, de estrutura cúbica, foi obtido pela primeira vez em 1957, pela transformação de nitreto de boro de estrutura hexagonal em estrutura cúbica, sob pressões de 5000 a 9000 MPa e em temperaturas de 1500 a 1900°C, na presença de um catalisador (geralmente lítio).

Em relação à sua estabilidade química, principalmente em relação à oxidação, o CBN apresenta uma vantagem considerável sobre o diamante. À pressão atmosférica e temperaturas até

2000°C, o nitreto de boro cúbico é estável, ao passo que a grafitização do diamante já se inicia a 900°C, à pressão ambiente [1].

As ferramentas de CBN são empregadas preferencialmente na usinagem de aços duros (45 a 65 HRC), aço-, ligas resistentes a altas temperaturas à base de níquel e cobalto [5].

A qualidade melhorada da peça, a economia em tempo de fabricação e os ganhos consideráveis na vida da ferramenta em relação à usinagem com ferramentas de materiais convencionais, permitem prever o emprego considerável da ferramenta de nitreto de boro cúbico, sobretudo na usinagem de materiais de difícil usinabilidade [1].

Conforme Weinert [19], a grande capacidade do CBN para usinar materiais duros é devida à sua extrema dureza até em elevadas temperaturas. Israelsson [9] reforça que o CBN já preencheu o nicho de aplicação na usinagem de aço endurecido e que para ele o CBN já alcançou a sua maturidade de desenvolvimento.

2.3.10 Diamante

Atualmente existem dois tipos de diamantes utilizados na manufatura de ferramentas para usinagem: o natural (monocristalino) e o sintético (policristalino) [1]. O diamante natural é o material que atinge a maior dureza entre os já conhecidos pelo homem. Classificam-se em Carbonados, Ballos e Borts [5].

Ferramentas de diamante monocristalino (Borts) são especialmente indicadas para usinagem de metais leves, bronze, latão, cobre, ligas de estanho, borracha dura e mole, vidro, plásticos e pedras. O principal campo de aplicação é a usinagem fina, onde são feitas grandes exigências de medidas e de acabamento superficial [5].

O diamante sintético PKD (Polykristalliner Diamant) ou PCD (Policristalin Diamond)

possui dureza inferior ao diamante natural. Apresenta uma estrutura policristalina e, pela distribuição irregular dos grãos de diamante, apresenta uma estrutura isotrópica [1].

De modo análogo ao processo de obtenção do CBN, ocorre também a obtenção do diamante sintético, pela transformação da estrutura do grafite hexagonal em uma estrutura cúbica bem mais dura sob alta temperatura e pressão.

A ferramenta de PKD é fabricada a partir de pós extremamente finos de diamante sintético. Estas partículas são então sinterizadas com cobalto, em altas temperaturas (1400 a 2000°C) e pressões (6000 a 7000 MPa), formando uma estrutura policristalina. Uma camada deste diamante (0,5 a 0,7 mm) é posteriormente aplicada sobre um substrato de metal duro pré-sinterizado [5].

O diamante sintético, assim como o diamante natural, em condições normais de pressão apresentam a grafitização em altas temperaturas e a afinidade química do carbono com o ferro e outros elementos formadores de carbonetos. Isto limita a sua aplicação a materiais que não apresentam afinidade ao carbono na temperatura de trabalho [18].

Com o diamante pode-se também usinar o ferro, desde que algumas condições específicas sejam mantidas. Várias publicações recentes mostram a viabilidade de usinar ferro subresfriado com N₂ líquido empregando ferramentas de diamante policristalino sob atmosfera protetora ou com auxílio de ultra-som.

2.4 Usinabilidade dos Materiais

2.4.1 O Termo usinabilidade

A usinabilidade de um material nos dá a noção do quão fácil - ou difícil - é trabalhar o material em processos de fabricação com remoção de cavaco. É uma grandeza complexa, fruto da interação de vários fatores:

- material da peça;
- material da ferramenta;
- máquina utilizada;
- tipo de operação;
- condições de corte (avanço, velocidade de corte, profundidade, geometria da ferramenta, tipo de trabalho executado, fluidos de corte e outros).

A usinabilidade tem uma influência direta na produtividade de uma empresa, razão pela qual existe a necessidade de conhecer os métodos de ensaio que permitam determinar a usinabilidade de um material, quer no controle de qualidade de uma metalúrgica, quer na inspeção de recebimento pelo comprador [8]. É, sem dúvida, um fator tecnológico útil na análise de otimização do processo de usinagem, visando melhores resultados técnico-econômicos [20].

Como grandeza derivada da usinabilidade temos o índice de usinabilidade, que nada mais é do que uma média ponderada dos vários métodos de ensaios disponíveis para avaliação da mesma. É atribuído um peso maior àqueles métodos que forem relevantes para o processo produtivo em questão. Para fins comparativos escolhe-se um material como padrão e todas as médias obtidas para outros materiais serão referenciadas a ele em termos percentuais. A literatura apresenta índices tabelados que se baseiam principalmente na curva de vida da ferramenta. Esses

índices devem ser encarados como valores puramente orientativos, devido às diferenças entre as condições de ensaio e as condições reais, bem como serem dependentes das ferramentas empregadas.

Os dados experimentais disponíveis na literatura técnica clássica nos fornecem valores medidos dos desgastes das ferramentas em função das condições de usinagem, temperaturas atingidas, forças de corte e outros. Entretanto esses dados apresentam considerável dispersão, e nenhuma relação empírica ou matemática universal foi encontrada para se prever com precisão o comportamento, quanto à usinagem, dos diversos materiais [7]. Este fato, pode ser explicado: num ensaio de usinabilidade é de capital importância o trinômio ferramenta/peça/máquina ferramenta e não exclusivamente características estruturais e dimensionais do material [20].

2.4.2 Classificação dos testes de usinabilidade

Num ensaio de usinabilidade os critérios básicos são classificados em: critérios baseados na vida da ferramenta (curvas de vida da ferramenta, método do comprimento usinado, método do faceamento de Brandsma, método do aumento progressivo da velocidade de corte, método do aumento discreto da velocidade de corte, ensaio de sangramento, método radioativo); critérios baseados na força de usinagem (pressão específica de corte, tensão de cisalhamento, força de avanço constante); critérios baseados no acabamento superficial e critérios baseados na produtividade. Os critérios específicos são análise dimensional, temperatura de corte e características do cavaco [8].

A figura 2.13 relaciona alguns dos mais relevantes métodos de ensaio segundo Cupini [20]. Os itens de 1 a 5 são os critérios; os de 6 a 17 são as características do ensaio; e os de 18 a 21, o material da ferramenta.

MÉTODOS DE ENSAIO	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
	Vida da Ferramenta	Esforços de Usinagem	Rugosidade Superficial da Peça	N. Peças/Hora/Qualidade	Características do Cavaco	Ensaio de Curta Duração	Ensaio de Longa Duração	Condições de Ensaio "Forçadas"	Condições de Ensaio "Normais"	Custo do Ensaio : Alto	Custo do Ensaio : Baixo	Custo do Ensaio : Médio	Fácil Determinação do Índice de Usinabilidade	Difícil Determinação do Índice de Usinabilidade	Moderada Determinação do Índice de Usinabilidade	Aplicação em Produção Seriada	Aplicação em produção não Seriada	Ferramenta de Aço Ferramenta	Ferramenta de Aço Rápido	Ferramenta de Metal Duro	Ferramenta de Mat. Cerâmico
Curva de Vida	X						X	X	X	X			X			X	X	X	X	X	X
Comprimento Usinado	X					X		X			X		X			X	X	X	X	X	X
Faceamento de Bradsmas	X					X		X			X		X			X	X	X	X	X	X
Aumento Progressivo Vc	X					X		X			X					X	X	X	X	X	X
Aumento Discreto Vc	X					X		X			X				X	X	X	X	X	X	X
Sangramento (Bedame)	X					X		X		X	X		X			X	X				X
Força de Avanço constante		X				X		X				X	X			X	X	X	X	X	X
Acabamento Superficial			X			X		X				X			X	X	X	X	X	X	X
Produtividade			X	X		X		X			X		X			X	X	X	X	X	X
Volume e Forma de Cavaco					X	X		X			X				X	X	X	X	X	X	X

FIGURA 2.13 - Comparação entre os mais importantes métodos de ensaio de usinabilidade [20]

Entre todos esses métodos o mais importante, para uma primeira análise para o comportamento de ferramentas, é o método da curva de vida da ferramenta. Trata-se de um ensaio de longa duração que consome uma quantidade significativa de material e é demorado.

No caso da análise de revestimentos de ferramentas nos interessam, particularmente, curvas de desgaste (curvas auxiliares) que são utilizadas na construção das curvas de vidas. Estas nos dão os desgastes da ferramenta para diferentes velocidades e tempos de trabalho, para condições de usinagem do par peça/ferramenta (condições de avanço, profundidade de corte, geometria da ferramenta e outras). Os desgastes avaliados para esse fim são aqueles mais significativos na vida da ferramenta [8].

O parâmetro mais importante da usinabilidade é a vida da ferramenta. Para a determinação

da vida da ferramenta, são utilizados testes de longa duração com velocidades de corte usuais na prática, que exigem elevado tempo de ensaio e gasto de material. Os testes rápidos permitem apenas comparações vagas com os resultados obtidos nos ensaios de longa duração [1].

Existem dois testes de longa duração para obtenção da curva de vida de uma ferramenta no torneamento, os quais são executados de acordo com o fator predominante no desgaste da ferramenta.

O teste chamado **“torneamento-temperatura”** é empregado sempre que o fator predominante na vida da ferramenta é a temperatura e não o desgaste da mesma. O material da ferramenta utilizado para este teste é o aço S 10-4-3-10 com qualificação superior. Neste ensaio, o colapso da ferramenta pode ser detectado por defeitos que começam a surgir na superfície usinada, modificação significativa na forma do cavaco ou ainda por um ruído mais acentuado. Em um ensaio monitorado o fim de vida, ou o colapso da ferramenta por temperatura, pode ser detectado pelo aumento súbito das forças de avanço e passiva.

O **“ensaio relacionado ao desgaste”** é usado quando o desgaste é a variável importante do processo de decremento da vida. Os materiais usados para este teste são o metal-duro e a cerâmica, porém o aço-rápido também pode ser usado.

Os critérios para o fim da vida nessas ferramentas são determinados a partir do desgaste de flanco e do desgaste de cratera. Este teste consiste na medição de marcas de desgaste de flanco VB da ferramenta e profundidade de cratera KT na face da ferramenta, fazendo-o com velocidades de corte constante em tempos pré-estabelecidos. Com estes dados plota-se os diagramas di-log $VB = f(t)$ e $KT = f(t)$ tendo em vista cada velocidade (ver figura 2.14) [1]. O ensaio geralmente é efetuado para três velocidades de corte e a medição deve ser realizada em intervalos de tempo determinados e devidamente cronometrados [21].

No exemplo mostrado nas figuras 2.14 e 2.15 estabeleceu-se um critério de fim de vida

$VB = 0,3 \text{ mm}$.

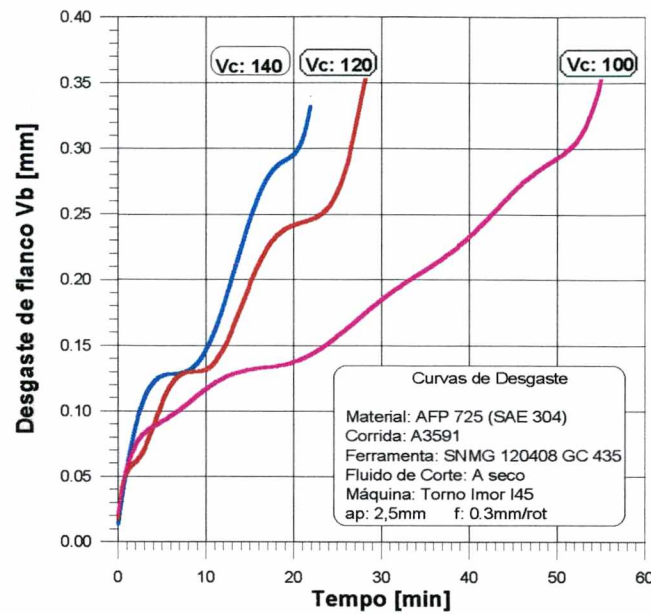


FIGURA 2.14 - Curvas de desgaste da ferramenta $VB \times t$ [22]

Estabelecendo-se um critério de fim de vida, estas curvas permitem traçar uma curva de vida.

Nos diagramas $T_{VB} = f(v_c)$ ou $T_{KT} = f(v_c)$, onde T_{VB} é o tempo de usinagem até o desgaste de flanco VB , que caracteriza o final de vida da ferramenta e T_{KT} é o tempo de usinagem até a formação da cratera com profundidade KT pré-determinada, que também caracteriza o final da vida da ferramenta.

A equação de Taylor para o par ferramenta-material usinado é expressa por:

$$v_c \cdot T^n = K \quad (2)$$

Onde v_c é a velocidade de corte, T é o tempo de usinagem, n é um expoente cujo valor depende até certo ponto das outras variáveis máquina, ferramenta e processo e K é a constante de Taylor [5]. Em uma representação bilogarítmica esta equação exprime uma reta.

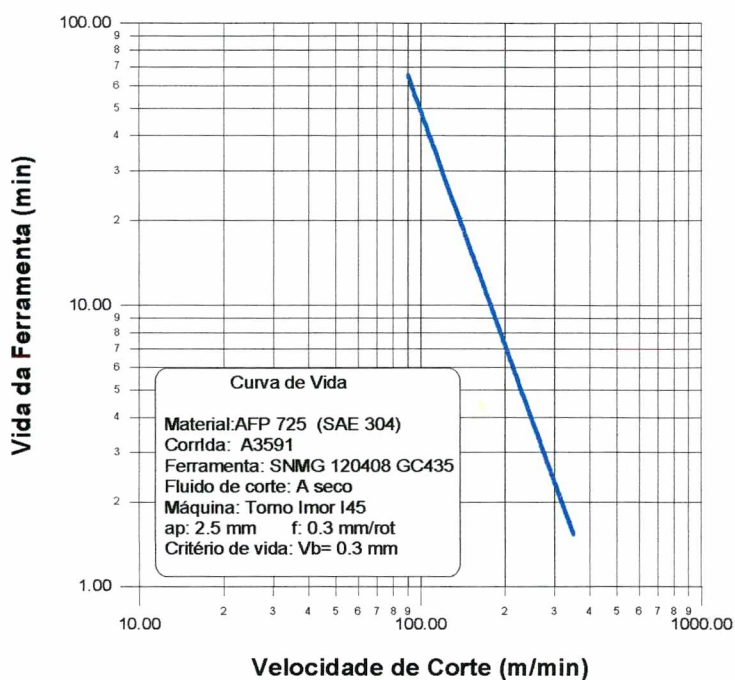


FIGURA 2.15 - Diagrama di-log da vida T (min) x velocidade de corte v_c (m/min) [22]

A máquina-ferramenta utilizada para a realização dos ensaios de desgaste e vida de ferramenta, deve ser rígida de maneira que não apresente tendências a vibrações, que podem alterar os resultados medidos [23].

Hoje, vários trabalhos são desenvolvidos com testes de ferramentas de corte, analisando a vida de ferramenta, o comportamento dos desgastes e outros critérios. Fabry [24] analisou a tenacidade e o desgaste de várias ferramentas revestidas e não, em corte interrompido, e chegou à conclusão que o desenvolvimento dos sistemas de revestimentos hoje conhecidos, de camadas mais resistentes ao desgaste, ainda não estão concluídos.

2.5 Processos de Revestimento de Ferramentas de Corte

2.5.1 Introdução

Segundo Freller [26] a funcionabilidade e o desempenho de um produto técnico é consideravelmente influenciado pela sua superfície.

Os processos para deposições de revestimentos sobre substratos de ferramentas cortantes permitem obter ferramentas com propriedades mecânicas superiores às de ferramentas não revestidas. Estes processos são o resultado de pesquisas avançadas e desenvolvimento de complexos equipamentos industriais. Os reatores que basicamente são compostos de dispositivos eletro-mecânicos com sistemas de comando e controle elétricos e eletrônicos, são alimentados com elementos químicos que, segundo leis físicas e químicas, permitem precipitar os filmes de revestimentos sobre os substratos. Além de ferramentas de corte, pulseiras de relógios, lentes de óculos e outros elementos decorativos podem ser revestidos com estas técnicas.

A deposição de filmes sobre ferramentas de corte é um avanço expressivo no campo das ferramentas de corte. Como as ferramentas revestidas se mostram superiores às ferramentas convencionais, o mercado é disputado por quem mais domina esta técnica, fazendo com que as pesquisas de novos revestimentos e processos sejam o ponto chave das empresas fabricantes de ferramentas de corte.

A figura 2.16 mostra um esquema básico da estrutura e funções desejadas pelo filme, depositado sobre substratos de ferramentas de corte.

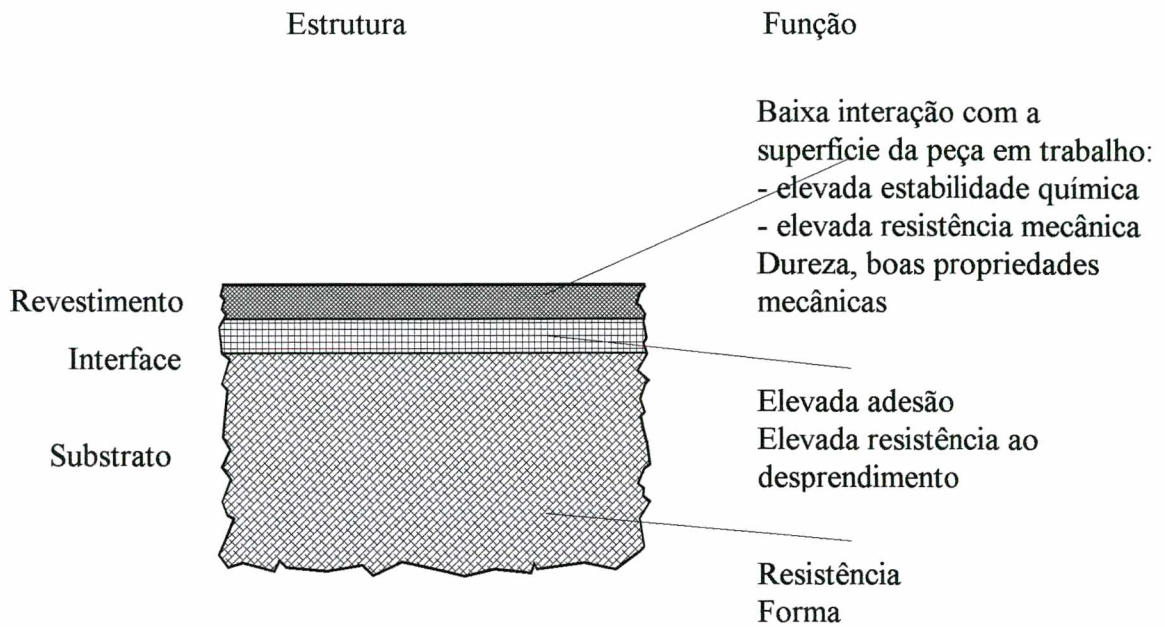


FIGURA 2.16 - Estrutura e funções de compostos revestidos [15, 26]

As técnicas de deposição e o equipamento associado tem chegado agora a um alto nível de desenvolvimento tecnológico e são capazes de um alto grau de automação [15].

Os processos de deposição por fase vapor se dividem em dois grupos, conforme figura 2.17.

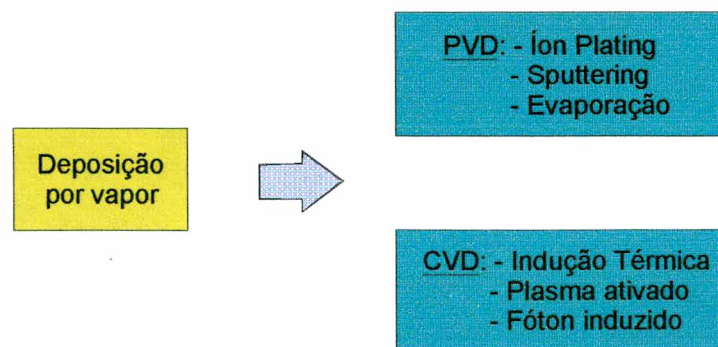


FIGURA 2.17 - Processos de revestimento [15]

Os processos de deposição por fase vapor CVD (Chemical Vapor Deposition) e PVD (Physical Vapor Deposition) estão crescendo em importância para a produção de classes de revestimentos com elevado desempenho. Revestimentos com camadas singulares e múltiplas com excepcional aderência ao substrato, dureza, resistência ao desgaste e propriedades anti-corrosivas podem ser produzidas [15].

A seguir é apresentada uma revisão resumida sobre os processos genéricos de revestimento e mais detalhado sobre a deposição por “Sputtering” e, mais especificamente, no processo “Magnetron Sputtering” (PVD), utilizado para obter o revestimento das ferramentas revestidas na UFSC, que são comparadas com as ferramentas revestidas comerciais.

2.5.2 Deposição química de vapor CVD

A técnica de revestimento CVD teve sua origem na Idade Média, já que a vitrificação de cerâmica ou porcelana pode ser considerada uma forma primitiva deste processo [27]. As primeiras experiências no uso da tecnologia CVD para deposição de materiais duros sobre substratos de aços foram realizadas em 1953/1954 por Muster e Ruppel [28], na Alemanha.

As principais propriedades dos revestimentos obtidos por CVD são [15, 27, 28, 30]:

- uma camada de revestimento bem aderente ao substrato;
- boa uniformidade da camada de revestimento;
- boa homogeneidade estrutural do revestimento;
- boa cobertura;
- limpeza da superfície, devida às altas temperaturas empregadas neste processo.

O processo CVD apresenta limitações aplicativas devido às altas temperaturas a que chegam os substratos. Estas impedem o revestimento de aços-rápidos, pois a temperatura

alcançada no substrato é maior que a temperatura de revenido do aço [28].

O processo CVD é um método de síntese, no qual os constituintes da fase vapor reagem para precipitar uma camada sólida sobre uma superfície [27]. Este processo é baseado na reação de componentes químicos dos gases na vizinhança da superfície do substrato e a subsequente deposição do produto-reação. Como fonte de material a condição básica é um componente precursor estável mas volátil, o tão chamado gás doador de metal, e.g. TiCl_4 , que se decompõe quimicamente como resultado da adição de energia. Usualmente, este gás toma lugar no substrato aquecido, que desta maneira trabalha como catalisador. Em adição, um gás reativo doador metalóide, e.g. N_2 , NH_3 , CH_4 , é requerido e toma parte na reação, contribuindo para a formação da substância do revestimento [15].

Finalmente, com alta percentagem, o gás H_2 é necessário para controle efetivo do processo e é responsável pelo transporte da mistura-gás para a peça de trabalho e influencia significativamente a taxa de deposição do filme. Este pode tomar parte na reação mas também serve à proposta de prevenção de reações secundárias indesejáveis no volume de gás e retira os resíduos da reação. Três componentes são desenvolvidos via mistura de gás para o conteúdo da reação na qual a peça de trabalho está localizado.

A adição de energia requerida para reação é normalmente carregada para fora termicamente, e.g. pelo aquecimento reativo do substrato de 700 a 1500°C. Desenvolvimentos recentes usam descarga elétrica de gás (plasma ativo CVD) ou radiação óptica, especialmente radiação LASER (LASER CVD). Usando LASER é possível limitar o processo de decomposição e reação para áreas selecionadas, e então obter revestimentos localizados [15].

2.5.3 Deposição física de vapor PVD

O processo de deposição física de vapor PVD foi desenvolvido há aproximadamente 20 anos [32]. Neste processo os problemas de temperatura são menores que no processo CVD, podendo o revestimento ser executado abaixo da temperatura crítica de revenido de aço-rápido e certos aços-ferramentas [28].

As principais propriedades do PVD são [15, 27, 28, 30, 33]:

- alta densidade e aderência do revestimento;
- composição definida das múltiplas camadas;
- baixas temperaturas do substrato;
- camada cristalina extremamente fina, com boa ductilidade do TiN sem a presença de fase quebradiça (fase η);
- possibilidade de depositar espessuras delgadas;
- possibilidade de revestir ferramentas de precisão, quer sejam de aço-rápido ou metal duro, já que virtualmente não há arredondamento dos cantos vivos de corte;
- amplo campo de possíveis revestimentos e materiais de substratos;
- uniformidade do revestimento em peças com reentrâncias.

No processo físico de deposição o metal de origem arrancado de um alvo, pelo bombardeamento iônico, emitindo partículas atômicas com uma certa energia térmica (0,1 e 0,5 eV) e cinética depositando no substrato. Em contraste com o processo CVD, o processo PVD é conduzido em alto ou médio alto vácuo, i.e., a pressões abaixo de 1 Pa. Estas condições permitem melhor controle do desenvolvimento do filme que o processo CVD [15, 34].

Um dos processos de deposição física empregados é o “Magnetron Sputtering”. A figura 2.18 mostra de forma esquemática o sistema de deposição “Tríodo Magnetron Sputtering”

utilizado para o revestimento das ferramentas revestidas na Divisão de Plasma do Laboratório de Materiais da UFSC.

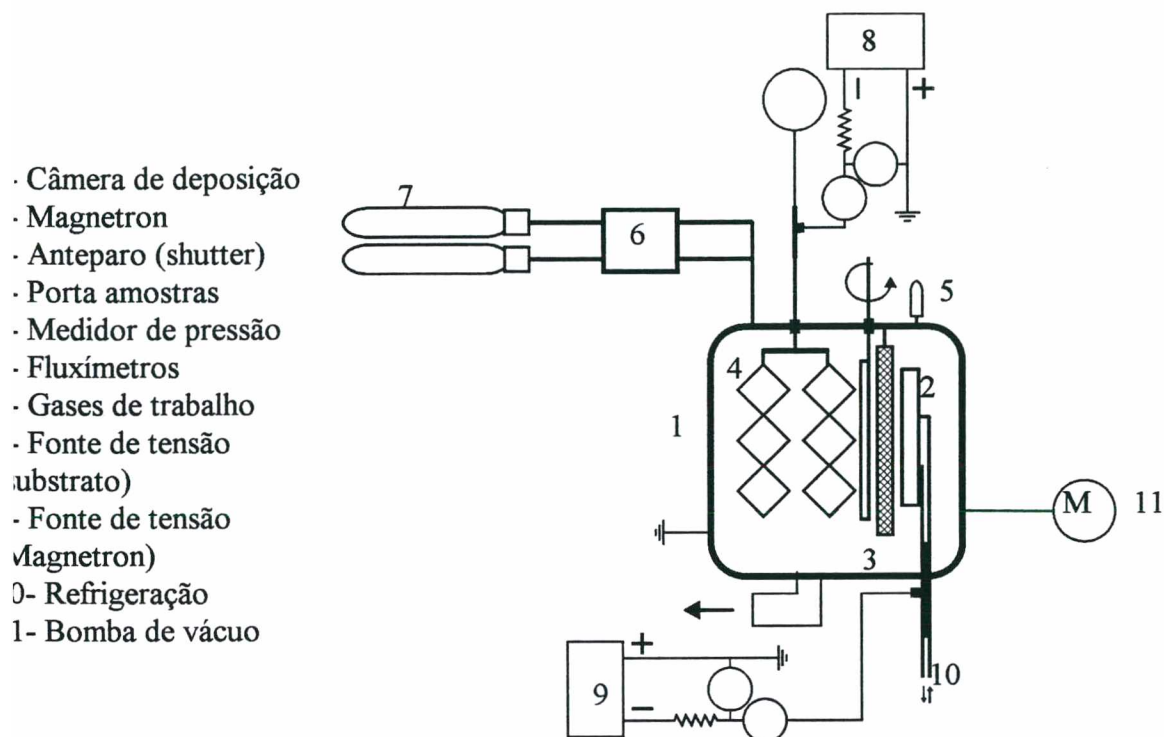


FIGURA 2.18 - Sistema de Deposição PVD (tipo “Triodo Magnetron Sputtering”) [35]

O Sistema “Magnetron Sputtering” foi desenvolvido no final da década de 70, por Thornton (1979) e já é usado em escala industrial, apresentando algumas vantagens para aplicações metalúrgicas. É um processo não poluente, que proporciona altas taxas de deposição, filmes de alta densidade, boa aderência e baixo custo de manutenção [35].

Na figura 2.19 são comparados o “Sputtering” com eletrodos do tipo “Magnetron”, e o

“Sputtering” Convencional.

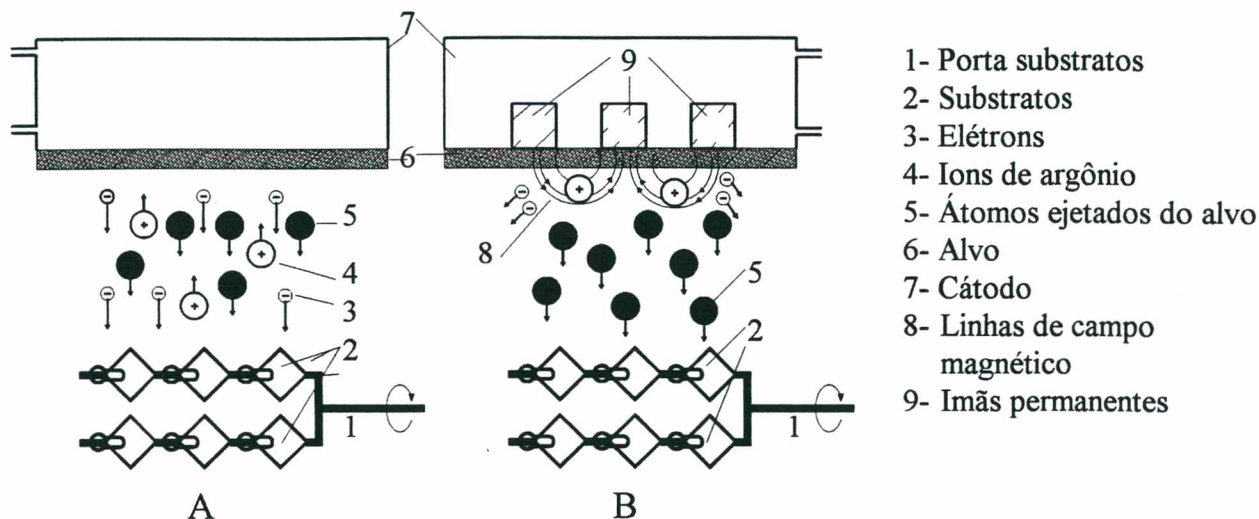


FIGURA 2.19 - Cinética de Partícula: (A) “Sputtering” Convencional; (B) “Magnetron Sputtering” [35]

O “Sputtering” Convencional trabalha com alta voltagem (2000 volts) e a descarga se espalha por toda a câmara, como mostrado na figura 2.19 A. Devido às pressões usadas (2,66 a 13,3 Pa), o livre caminho médio dos átomos ejetados do cátodo é pequeno, da ordem de 2 mm, e estes atingem o substrato com baixa energia, fazendo com que a aderência e a densidade do filme fiquem prejudicadas. Além disso, elétrons de alta energia bombardeiam continuamente o substrato, elevando a sua temperatura, de modo que este processo é restrito a substratos resistentes a altas temperaturas.

O “Magnetron Sputtering” utiliza campos magnéticos gerados por ímãs permanentes, para atuarem como armadilha de elétrons. Estes são colocados nas proximidades do alvo de tal forma que, produzindo linhas de campo magnético, formam um caminho fechado na frente do alvo

(cátodo), como mostra a figura 2.19 B. Devido à formação dessa armadilha de elétrons, a região de ionização é confinada próxima à superfície do cátodo, permitindo que a descarga se realize em pressões menores (0,133 Pa) e correntes maiores, aumentando a eficiência do processo [35].

Este método tem bastante sucesso em produtos de alta qualidade, filmes de baixas impurezas e de taxas de deposição razoável [36]. Boa aderência é a propriedade mais crítica de todas, quando se trata de ferramentas de corte, que são peças mecanicamente solicitadas. Sem aderência suficiente, um revestimento pode ocasionar um resultado inferior ao que a ferramenta sem revestimento teria [15].

O sistema “Tríodo Magnetron Sputtering” consiste em colocar na frente do alvo uma tela aterrada. Com esta modificação a descarga torna-se mais homogênea, com maior grau de ionização e conseqüentemente pode ser mantida a pressão menor que no sistema “Diodo Magnetron Sputtering”. Desta forma, como o livre percurso médio dos átomos de Ti aumenta, no caso em torno de 2,5 vezes mais, o filme obtido é significativamente mais denso e aderente.

Para se ter uma forte aderência do revestimento ao substrato, é condição indispensável que a superfície a revestir esteja limpa [28, 33].

Para se obter bons resultados a rugosidade do substrato para a deposição deve ser [33]:

$R_a < 2 \mu\text{m}$ - para ferramentas de corte.

$R_a < 0,4 \mu\text{m}$ - para ferramentas de conformação.

CAPÍTULO 3

3 PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

O trabalho experimental de que trata esta dissertação consta de testes de usinabilidade executados com ferramentas revestidas e não revestidas. As ferramentas revestidas foram revestidas em um reator experimental.

Os corpos de prova para os testes de usinabilidade para os ensaios das ferramentas de corte eram de aço inoxidável austenítico SAE 316, fornecidos pela Siderúrgica Riograndense S. A., e todas as ferramentas de corte foram cedidas pela Sandvik do Brasil. Os testes de usinabilidade foram executados no Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP) e parte das ferramentas foram revestidas na Divisão de Plasma do Laboratório de Materiais (LabMat), ambos do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC.

3.1 Equipamentos Utilizados nos Ensaios Experimentais

Os ensaios de usinabilidade foram realizados em um torno CN Romi Mazak 10U. As pastilhas SPUN 120304, e GC 415 (SPUN 120308) foram fixadas sobre um suporte CSRPR 124B.

O desgaste de flanco VB das ferramentas foi medido em um microscópio de ferramentaria Mesuriscopo, Nikon, com uma ampliação de 50 vezes.

Para a caracterização do revestimento das ferramentas de corte foi empregado um Microscópio Eletrônico de Varredura Philips XL 30.

As características detalhadas dos equipamentos empregados encontram-se no capítulo 9

(anexos).

3.2 Material Utilizado nos Ensaio Experimentais

O material utilizado no ensaio experimental foi o aço inoxidável austenítico SAE 316 (corrida A35621) fornecida pela Siderúrgica Riograndense S.A., no escopo de um convênio com o Laboratório de Mecânica de Precisão (LMP).

3.2.1 Características do material usinado

A composição química do material foi fornecida pelo fabricante e é mostrada na tabela 3.1.

TABELA 3.1 - Composição química do aço SAE 316 [37]

Elemento	(%)
C	0,0600
Ca	0,0010
Co	0,1700
Cr	16,800
Cu	0,5600
B	0,0020
Al	0,0080
Mg	0,0080

Mn	1,7200
Mo	2,1800
N	0,0021
Nb	0,0010
Ni	11,1600
P	0,0370
Pb	0,0030
S	0,0230
Si	0,5800
Sn	0,0130
Ti	0,0100
V	0,0600
W	0,0800

A microestrutura do aço inoxidável austenítico SAE 316, correspondente à corrida A35621, é mostrada na figura 3.1, tendo os contornos de grãos bem definidos na estrutura austenítica [37].



FIGURA 3.1 - Microestrutura do aço inoxidável austenítico SAE 316, correspondente à corrida A35621 [37]

Na determinação da micro-dureza foram consideradas as normas ABNT- NBR 6394/80, NBR 6671/81 e NBR 6672/81 referentes à realização de ensaios de dureza.

O corpo de prova foi obtido aleatoriamente de uma seção transversal, central, de um dos corpos de prova usados para os ensaios de usinagem. A tabela 3.2 mostra o valor médio da micro-dureza (X).

TABELA 3.2 - Micro-dureza do aço SAE 316 [37]

Material	X	S	HV_{min.}	HV_{máx.}
SAE 316 (A35621)	177	8,616	168	191

Na determinação da resistência à tração foi considerada a norma ABNT- NBR 6152/80. O ensaio de tração foi efetuado no mesmo material que o utilizado nos ensaios de usinagem. A

tabela 3.3 apresenta o resultados do ensaio de resistência à tração e alongamento.

TABELA 3.3 - Resistência à tração e alongamento do aço SAE 316 [37]

Material	Tensão de ruptura σ_r (N/mm²)	S	Alongamento (%)	S
SAE 316 (A35621)	579,6	5,10	63,3	1,85

CAPÍTULO 4

4 DEPOSIÇÃO DO FILME DE REVESTIMENTO E ENSAIO DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

Com o objetivo de avaliar as características do processo de “Magnetron Sputtering” em desenvolvimento na Divisão de Plasma do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC foram revestidas ferramentas de metal duro com filmes de TiN.

4.1 Deposição do Filme de Revestimento nas Ferramentas H1P K10

A deposição dos filmes de revestimento foi realizada em um reator experimental de “Magnetron Sputtering”, mostrado na figura 4.1.

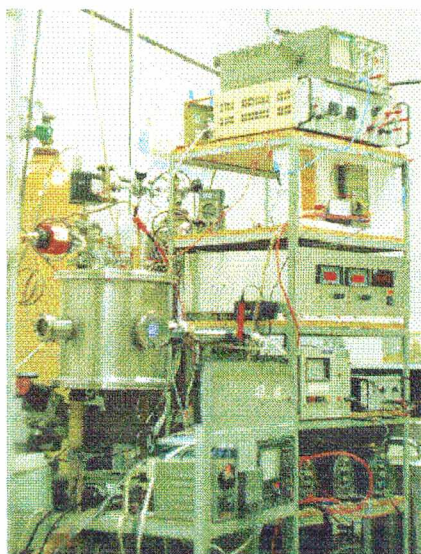


FIGURA 4.1 - Reator de deposição por “Magnetron Sputtering”

Foram necessários vários passos de desenvolvimento para chegar-se a um lote de ferramentas que apresentasse um bom estado do revestimento, como a aderência na face, no flanco e no gume. Todas as ferramentas revestidas foram analisadas no microscópio óptico para ter-se a certeza de que os gumes das ferramentas de corte estivessem sem problemas de lascamentos ou falta de revestimento. Para se ter um melhor entendimento das características de recobrimento do revestimento sobre o substrato, algumas ferramentas foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura e, com isso, foi possível identificar e analisar regiões das ferramentas de corte sem revestimento, como a mostrada na figura 4.2.

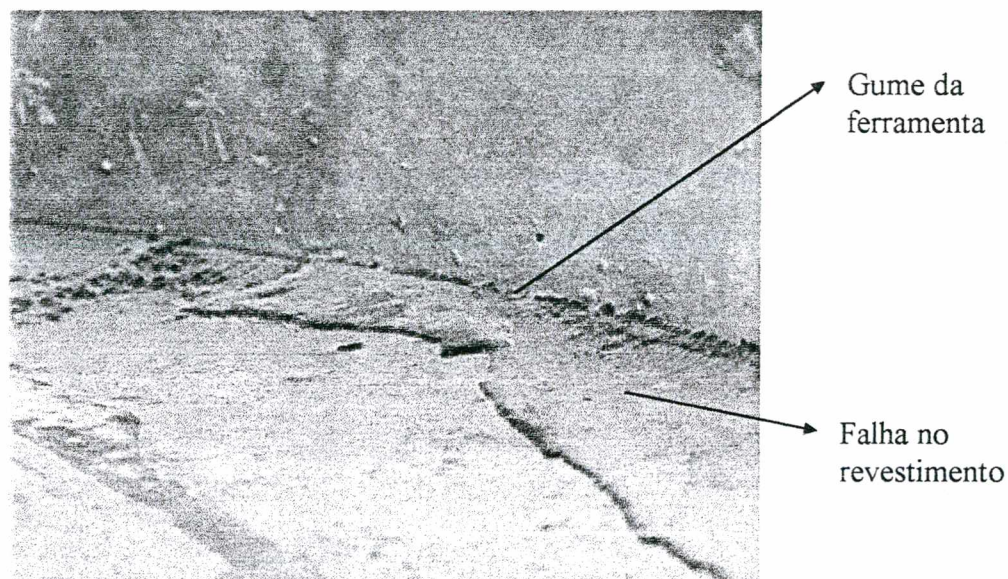
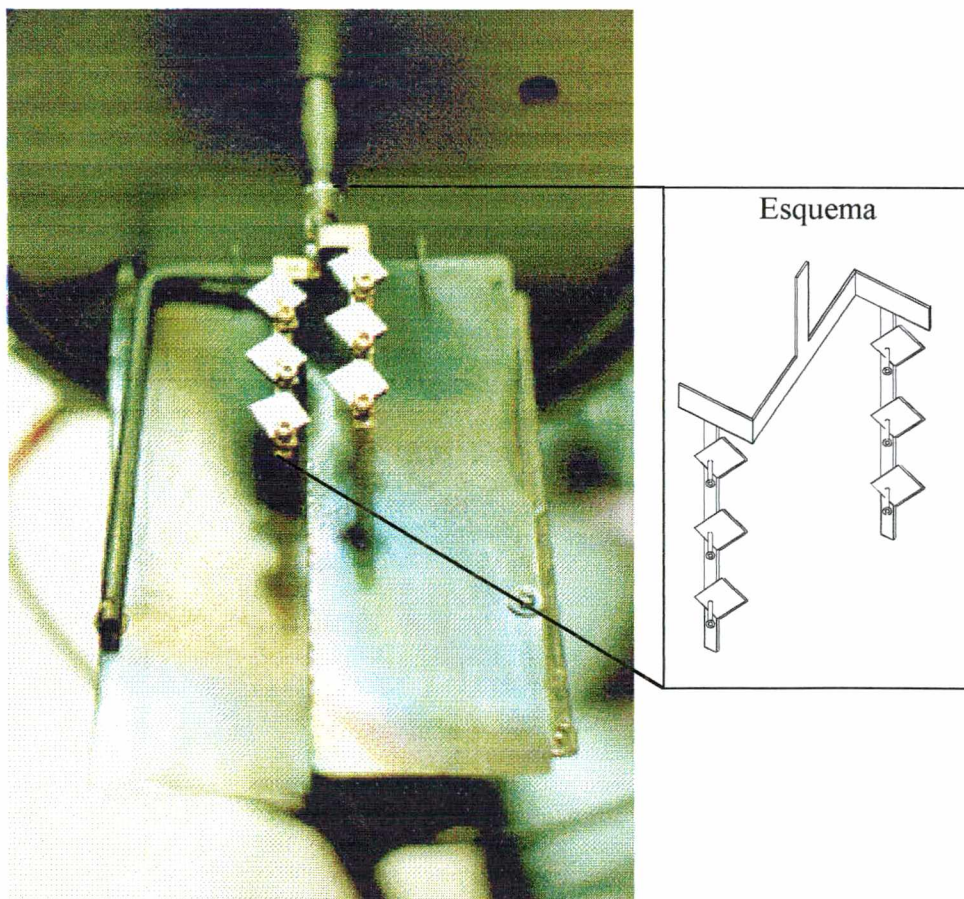


FIGURA 4.2 - Falha no revestimento sobre o gume de uma ferramenta de corte revestida

Com o objetivo de melhorar as características dos revestimentos foram depositados filmes de nitreto de titânio sobre lotes de ferramentas, com alterações no processo de deposição. O desenvolvimento destas fases de revestimento são descritas a seguir.

4.1.1 Deposição reativa de TiN

Para efetuar o revestimento no reator experimental foi necessário desenvolver um dispositivo de fixação para os insertos. A figura 4.3 mostra o dispositivo ao qual os insertos foram fixados para serem revestidos. Os insertos eram fixados no dispositivo por grampos, que impediam que um gume de cada inserto recebesse a camada de revestimento, obtendo-se três gumes por inserto. Como no dispositivo eram fixados seis insertos, obtinham-se dezoito gumes por lote.



um substrato (insertos), em um meio de um gás reativo, o N_2 , formando na superfície do substrato de metal duro revestimento de TiN, como mostrado esquematicamente na figura 4.4. Este depósito gera muitas tensões internas, pois nem todos os átomos de Ti na superfície do alvo conseguem reagir com o nitrogênio, formando um filme de TiN “puro”, sendo formada uma mistura de TiN mais Ti. Além disto o TiN não possui uma boa aderência com o substrato.

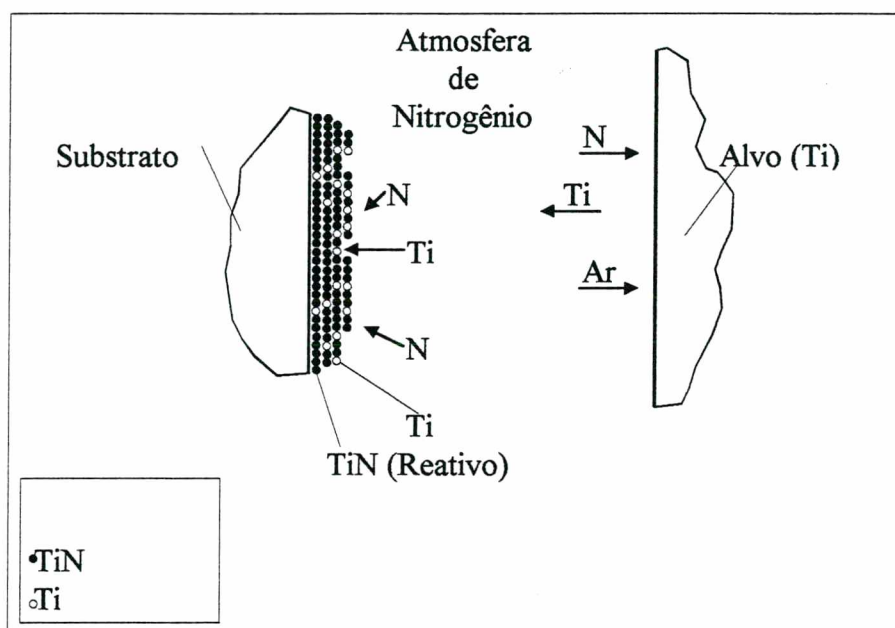


FIGURA 4.4 - Esquema do processo de deposição reativa de TiN por “Magnetron Sputtering”

Apenas um lote de ferramentas revestidas neste processo apresentou características adequadas como ferramentas de corte, tendo sido alterada a geometria e ajustados os parâmetros da descarga.

A espessura do revestimento obtido pela deposição reativa (UFSC) foi em torno de 2,4 μm , tendo este uma variação de até 1 μm . As figuras 4.5 e 4.6 mostram o revestimento analisado em um Microscópio Eletrônico de Varredura (UFSC) e em um Microscópio Óptico nos Laboratórios da Sandvik. Para fins de comparação a figura 4.7 mostra um revestimento comercial

μm , tendo este uma variação de até $1 \mu\text{m}$. As figuras 4.5 e 4.6 mostram o revestimento analisado em um Microscópio Eletrônico de Varredura (UFSC) e em um Microscópio Óptico nos Laboratórios da Sandvik. Para fins de comparação a figura 4.7 mostra um revestimento comercial de uma pastilha GC 415 da Sandvik.

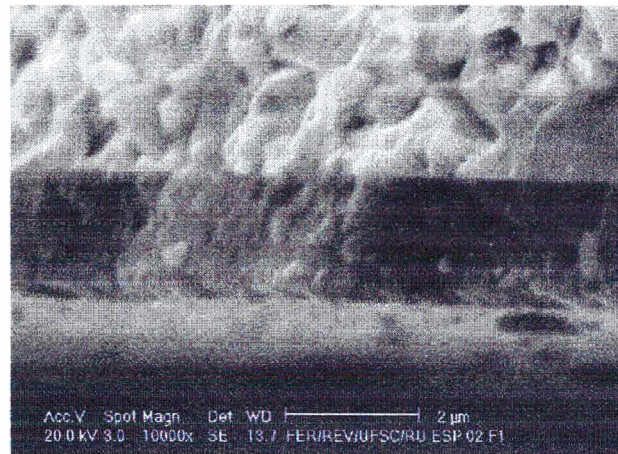


FIGURA 4.5 - Ferramenta H1P K10 (10000X - MEV)

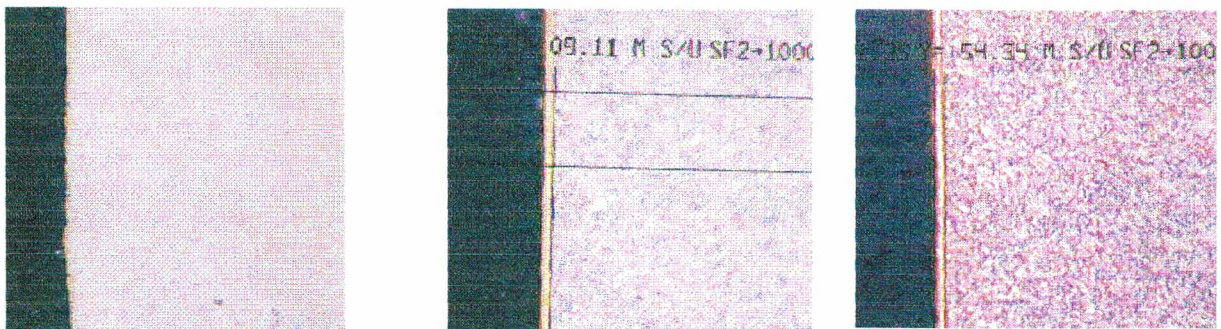


FIGURA 4.6 - Revestimento da Ferramenta H1P K10 (Sandvik)

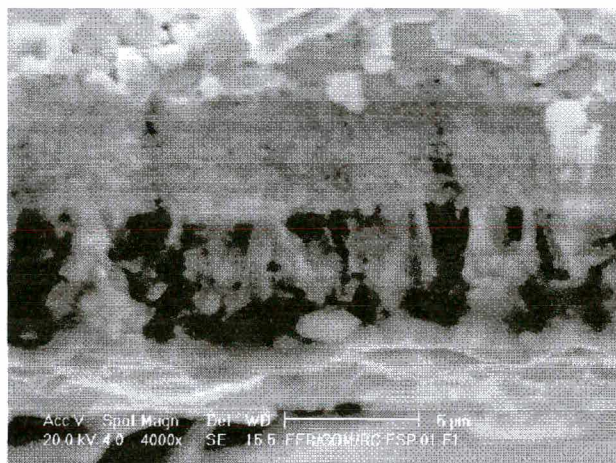


FIGURA 4.7 - Revestimento da ferramenta GC 415 (4000X - MEV)

4.1.2 Deposição não reativa de Ti com posterior nitretação

A deposição não reativa de Ti foi obtida através de um bombardeio de átomos de Ti sobre substrato de metal duro (insertos), sem a presença de um gás reativo no reator, como mostrado esquematicamente na figura 4.8.

O objetivo deste depósito foi o de se obter um revestimento com menores tensões residuais entre a camada de revestimento e o substrato. Como o Ti possui uma melhor força de aderência com o substrato e não há um gás reativo, tem-se um revestimento homogêneo de Ti. O revestimento de Ti não possui características apropriadas para a ferramenta de corte e, por isso, efetuou-se uma nitretação posterior do revestimento, como mostrado esquematicamente na figura 4.9. Para esta nitretação foi usado um reator específico para nitretação, figura 4.10.

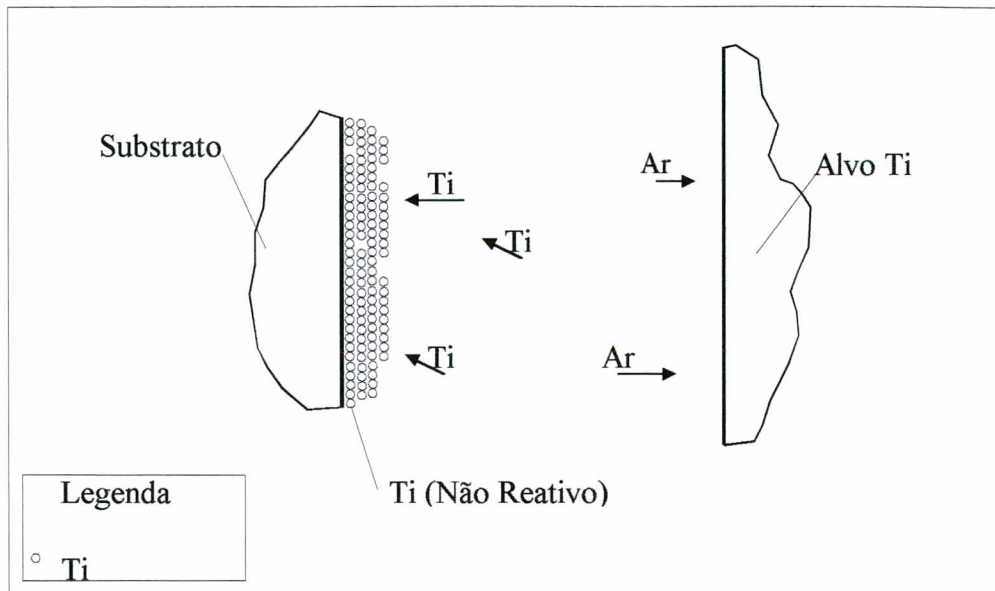


FIGURA 4.8 - Esquema do processo não reativo de Ti

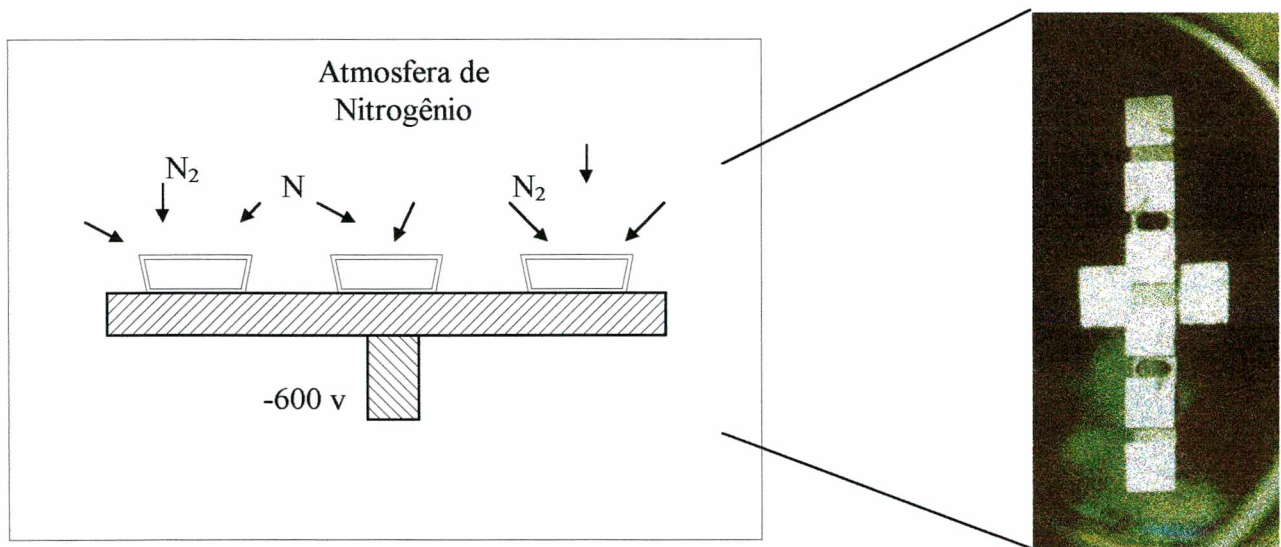


FIGURA 4.9 - Nitretação do revestimento de Ti

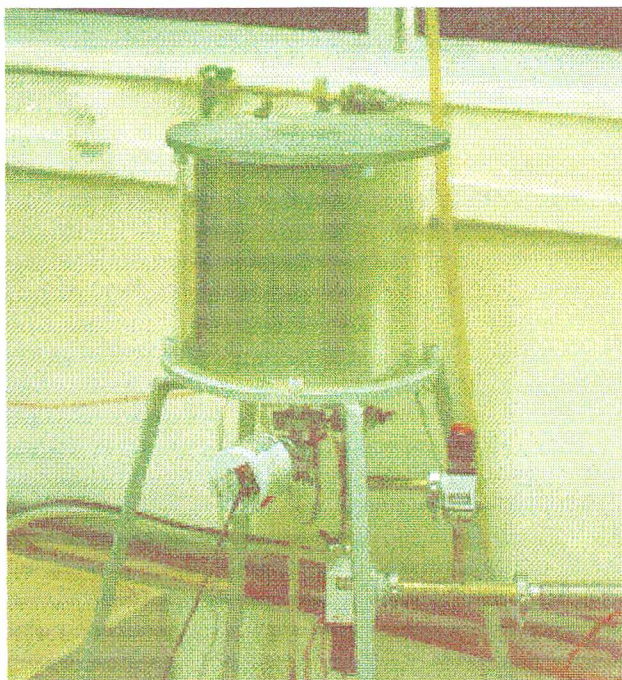


FIGURA 4.10 - Reator de nitretação

Este reator, que consiste de um recipiente compacto, permite gerar uma diferença de potencial entre a amostra a ser nitretada e um eletrodo do reator. O reator contém o gás reagente (N_2) e possui um controle mais seguro e fácil do que o reator de deposição por “Magnetron Sputtering”.

A nitretação é possível devido ao nitrogênio poder penetrar entre dos átomos de Ti, que são maiores e possuem espaços livres entre si, como mostrado esquematicamente na figura 4.11. Com isto, objetivou-se um revestimento com um gradiente de estrutura, tendo-se na superfície do revestimento o TiN e na interface com o substrato de metal-duro o Ti, conforme mostrado esquematicamente na figura 4.12. Esperava-se teoricamente um desempenho muito bom destas pastilhas de corte.

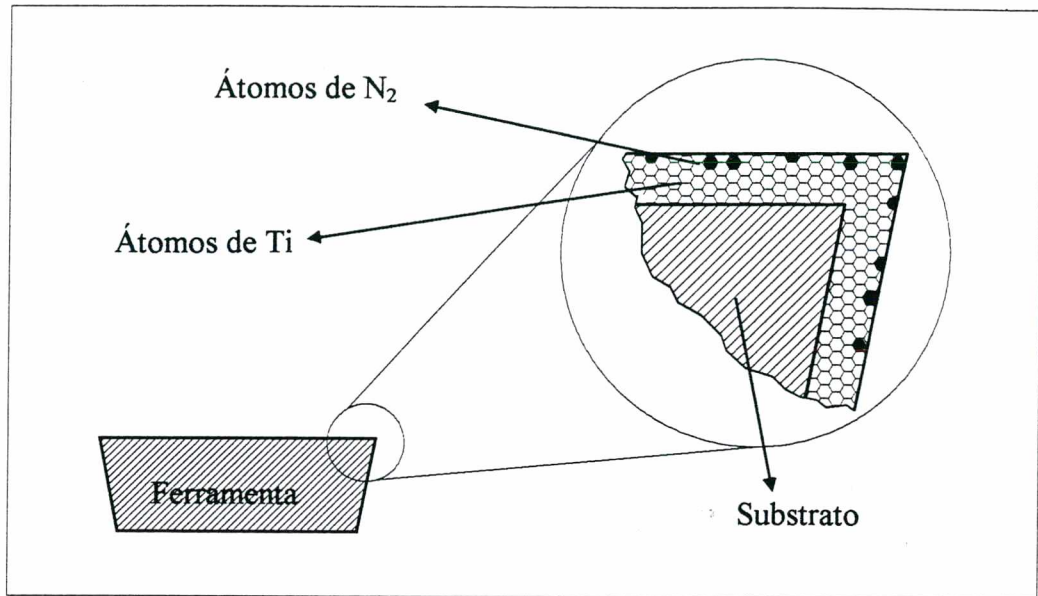


FIGURA 4.11 - Penetração do nitrogênio entre os átomos de Ti

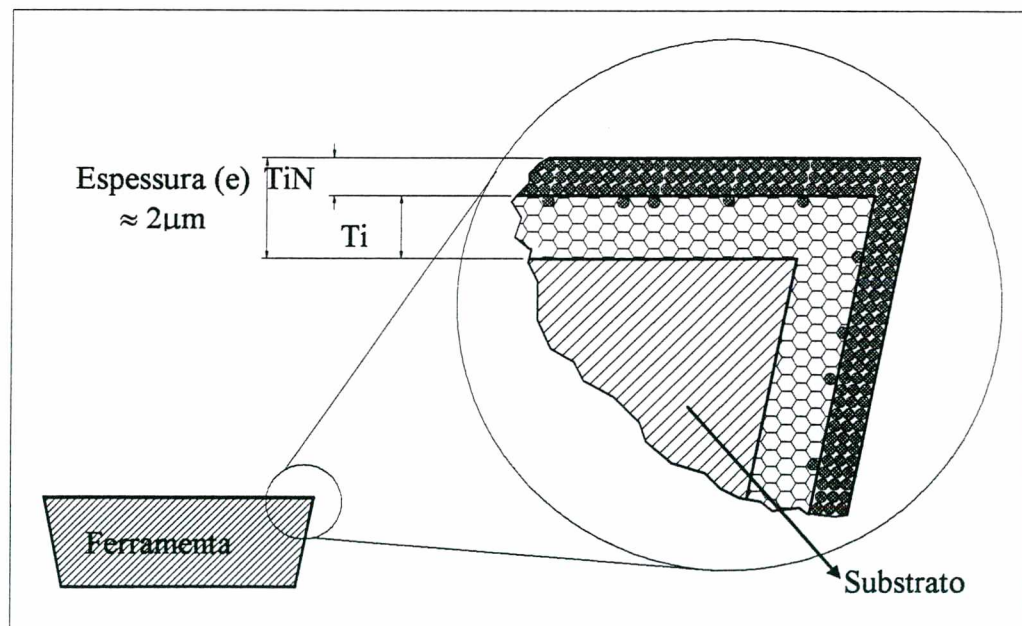


FIGURA 4.12 - Esquema do revestimento com gradiente de elementos de formação da estrutura

Neste processo de revestimento foram revestidos três lotes de ferramentas de corte. No entanto, se verificaram a formação de bolhas e lascamentos para temperaturas de nitretação superiores a 790° C. Nas regiões onde não houve a ruptura do revestimento, percebeu-se a coloração amarelada, típica do revestimento de TiN. Isto evidenciou a formação do gradiente de Ti - TiN esperado, porém nenhum dos insertos se encontravam em condições de serem empregados em testes de vida de ferramenta de corte.

A redução da temperatura de nitretação de titânio não é factível devido à dificuldade de nitretar a estrutura compacta CFC que ocorre abaixo de 890° C. Os ensaios de nitretação foram realizados para a estrutura CCC por uma hora em atmosfera de nitrogênio puro.

4.2 Ensaio de Vida das Ferramentas de Corte

4.2.1 Introdução

Os ensaios de usinabilidade para analisar o desempenho das ferramentas GC 415 , H1P e H1P com um filme de TiN depositado na Divisão de Plasma do Laboratório de Materiais do Departamento de Engenharia Mecânica da UFSC foram de longa duração e de torneamento externo longitudinal. Destes ensaios foram obtidas informações sobre o comportamento de desgaste das ferramentas de usinagem. Os resultados são expressos em forma de gráficos de evolução do desgaste de flanco médio VB ao longo do tempo de corte t.

4.2.2 Procedimento e caracterização do ensaio

a) Especificações das ferramentas

As ferramentas comerciais utilizadas para os ensaios de usinagem foram especificadas em capítulo anterior.

Como o objetivo do trabalho foi o de comparar o desempenho das ferramentas de corte, não foi necessária a utilização de ferramentas de uma classe específica para a usinagem de aços inoxidáveis.

As condições iniciais em que se encontravam as ferramentas de corte, bem como os valores dos ângulos que compunham a sua geometria eram verificadas em um microscópio óptico e de ferramentaria. Qualquer defeito ou irregularidade observado no gume, flanco, face ou no revestimento, desqualificava a pastilha para o ensaio.

b) Determinação dos parâmetros de usinagem

Para o ensaio de vida das ferramentas, adotaram-se parâmetros de usinagem iguais, para se ter um padrão comparativo de usinabilidade. Os valores dos parâmetros de corte foram baseados na literatura e em pré-testes executados anteriormente ao ensaio.

As condições de corte adotadas foram de desbaste leve, a fim de obter-se um desgaste acelerado da ferramenta sem o comprometimento dos resultados. As velocidades de corte usadas foram de 240 m/min, 270 m/min e 300 m/min, seguindo uma série geométrica (R20), conforme norma ISO 3685 [38]. A profundidade de corte de 1,5 mm e o avanço de 0,16 mm também são indicados pela norma ISO 3685, para determinado raio de quina da ferramenta de corte [38].

Foi optado pelo corte a seco para o ensaio, objetivando-se um maior desgaste de ferramenta de corte.

c) Dimensões dos corpos de prova

As dimensões iniciais dos corpos de prova foram estabelecidas pela capacidade da máquina-ferramenta e da matéria-prima fornecida. As dimensões finais dos corpos de prova foram limitadas pela rotação máxima da máquina-ferramenta para as velocidades de corte estabelecidas e pelo surgimento de vibrações regenerativas na superfície do corpo de prova. Os corpos de prova foram fixos entre placa e contra-ponta rotativa, conforme mostrado esquematicamente na figura 4.13.

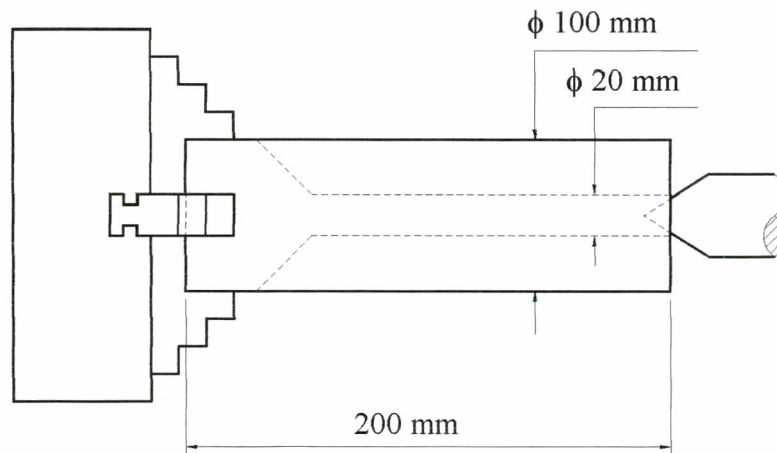


FIGURA 4.13 - Representação esquemática da fixação do corpo de prova na máquina-ferramenta e dimensões inicial e final do mesmo

Os corpos de prova foram pré-usinados para a remoção das superfícies brutas de laminação e outras irregularidades.

d) Metodologia do ensaio

Foi estabelecida uma estrutura organizacional para planejar, acompanhar e desenvolver o ensaio. Foram preparadas folhas de registro de dados e observações que fossem úteis para

posterior análise dos dados. Cada folha de registro de dados foi numerada e continha uma combinação de parâmetros para um determinado gume da ferramenta.

O porta-ferramentas foi mantido sempre na mesma posição, sendo somente a pastilha removida para que fosse efetuada a medição de desgaste. Ao retornar o inserto da medição de desgaste, era executada uma limpeza criteriosa do seu assento, garantindo um posicionamento adequado do inserto sobre o mesmo.

Foi desenvolvido um programa paramétrico para a execução dos ciclos de usinagem, em que o operador entrava com os dados de corte via teclado.

Para o fim de vida do gume da ferramenta de corte adotou-se um desgaste de flanco médio $VB_{MÉD}$ de 0,3 mm ou a quebra da quina da ferramenta.

As medições de desgaste foram realizadas de acordo com intervalos de tempos pré-estabelecidos para cada tipo de ferramenta, devido aos tempos de vida serem distintos, principalmente entre as ferramenta não revestida e as revestidas.

CAPÍTULO 5

5 RESULTADOS DOS ENSAIOS DE VIDA DAS FERRAMENTAS DE CORTE

A seguir são mostrados os respectivos gráficos do comportamento do desgaste de flanco médio $VB_{MÉD}$, ao longo do tempo de corte para as ferramentas H1P K10, H1P K10 revestida com um filme de TiN na UFSC e a ferramenta GC 415.

As ferramentas H1P e GC 415 foram testadas para se ter um referencial e permitir avaliar o comportamento de desgaste das ferramentas revestidas na Divisão de Plasma do Laboratório de Materiais da UFSC.

5.1 Ferramenta H1P K10

Os gráficos da figura 5.1 mostram o comportamento do desgaste da ferramenta H1P K10 para a velocidade de corte de 240 m/min, sendo que cada gráfico representa um ensaio. As curvas em que as ferramentas quebraram a quina de corte estão identificadas com um “x” no final da curva.

Para a velocidade de corte de 240 m/min as ferramentas H1P K10 não revestidas alcançaram um tempo de vida inferior a 5 min. Para esta condição as ferramentas sofreram a quebra da quina de corte antes de alcançarem o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm.

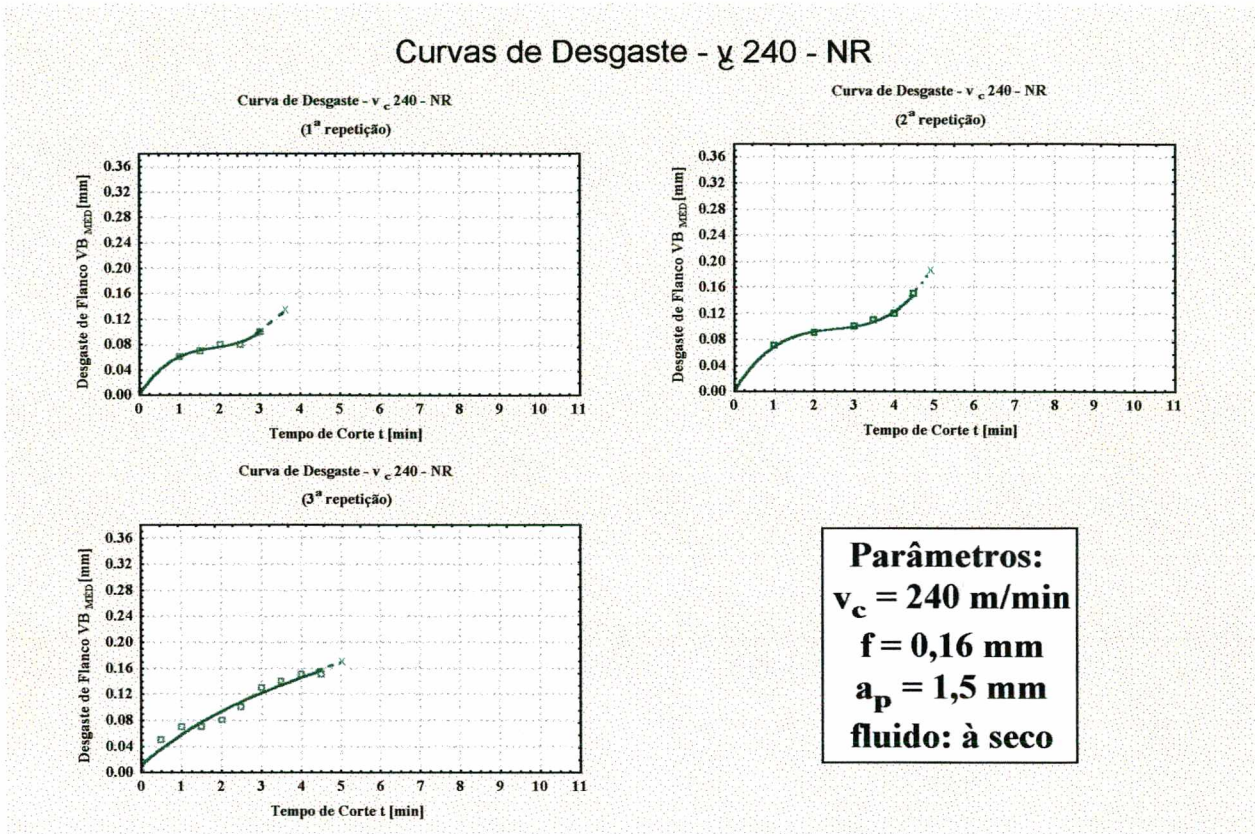


FIGURA 5.1 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10

Os gráficos da figura 5.2 mostram o comportamento do desgaste para a velocidade de corte de 270 m/min. Para a velocidade de corte de 270 m/min as ferramentas H1P K10 não revestidas alcançaram um tempo inferior a 3 min. Para esta condição as ferramentas sofreram a quebra da quina de corte antes de alcançarem o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm, para dois ensaios. Para um dos ensaios a ferramenta sofreu um desgaste hiperproporcional, aumentando o desgaste $VB_{MÉD}$ de 0,11 mm até 0,37 mm em menos de 1 min de corte.

Curvas de Desgaste - v_c 270 - NR

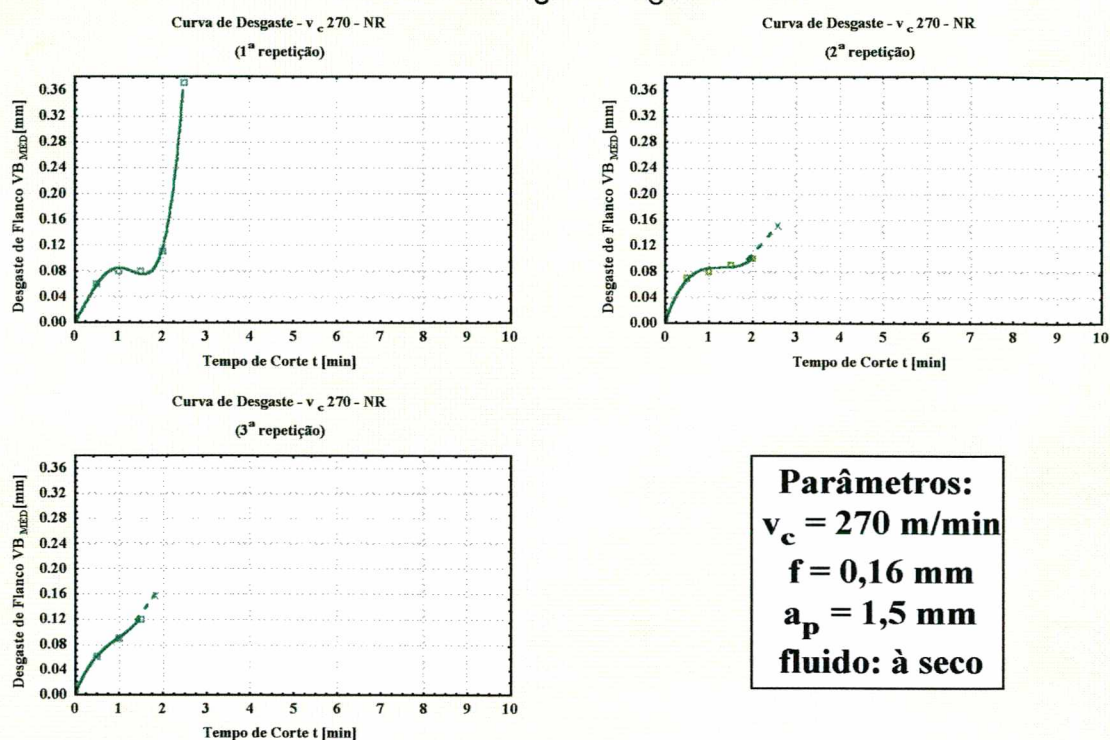


FIGURA 5.2 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10

Os gráficos da figura 5.3 mostram o comportamento do desgaste para a velocidade de corte de 300 m/min. Para a velocidade de corte de 300 m/min as ferramentas H1P K10 não revestidas atingiram um tempo de vida inferior a 2 min. Para esta condição as ferramentas sofreram a quebra da quina de corte antes de alcançarem o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm.

Percebe-se para esta condição de corte porque as ferramentas não revestidas estão sendo pouco usadas pela indústria, já que com 1 min de corte as ferramentas já atingiram um estado físico na qual se poderia prever o fim de vida.

Curvas de Desgaste - v_c 300 - NR

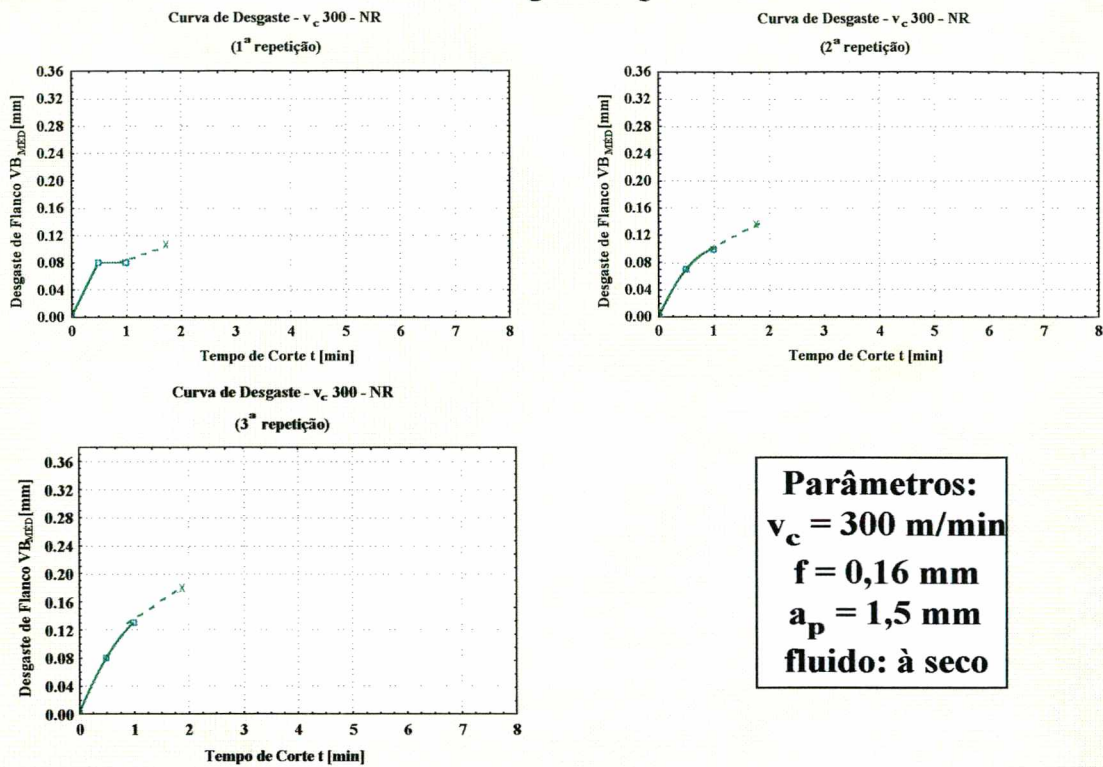


FIGURA 5.3 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10

As ferramentas não revestidas H1P K10, com exceção de uma (para a v_c de 270 m/min) sofreram a quebra da quina antes de ser atingido o critério de fim de vida por desgaste de flanco pré-estipulado. Após uma estabilização do desgaste na fase inicial, o desgaste apresenta uma progressão hiperproporcional. Como o processo de corte não é monitorado em tempo real, não é possível concluir sobre o desgaste da ferramenta no momento da quebra da mesma.

5.2 Ferramenta GC 415

Os gráficos da figura 5.4 mostram o comportamento do desgaste da ferramenta GC 415 para a velocidade de corte de 240 m/min.

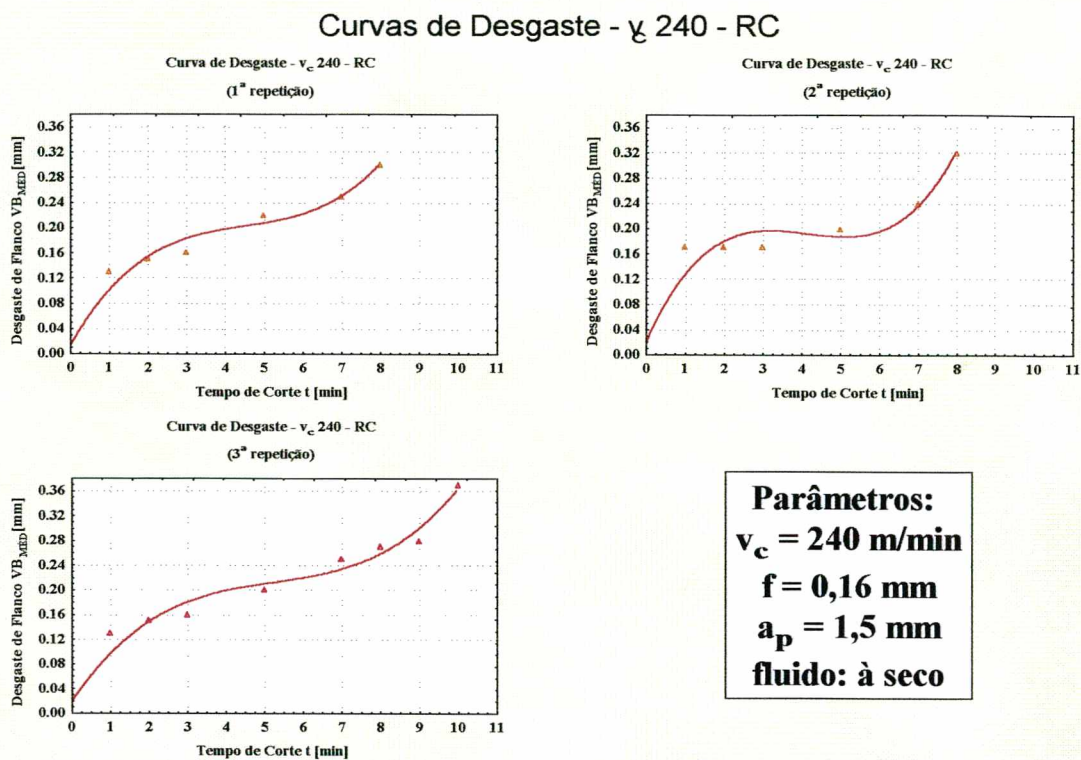


FIGURA 5.4 - Curvas de desgaste para a ferramenta GC 415

Para a velocidade de corte de 240 m/min as ferramentas GC 415 alcançaram um tempo de vida em torno de 9 min. Para esta condição as ferramentas alcançaram o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm.

Os gráficos da figura 5.5 mostram o comportamento do desgaste da ferramenta GC 415 para a velocidade de corte de 270 m/min.

Curvas de Desgaste - v_c 270 - RC

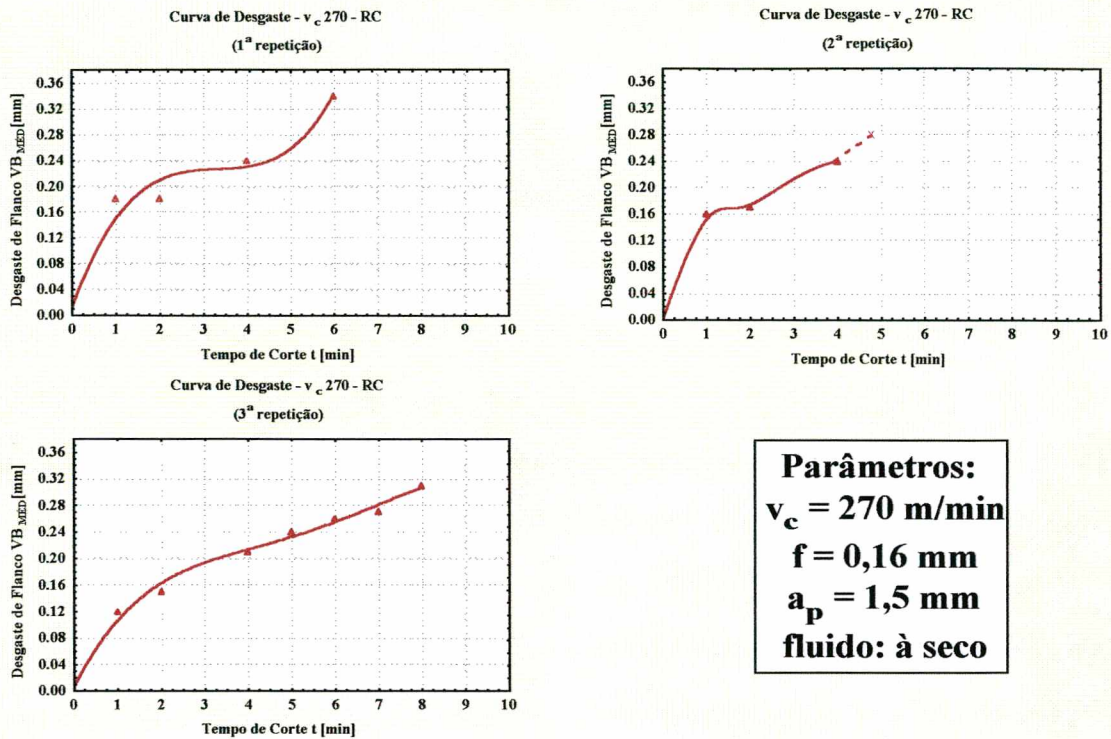


FIGURA 5.5 - Curvas de desgaste para a ferramenta GC 415

Para a velocidade de corte de 270 m/min as ferramentas GC 415 alcançaram um tempo de vida em torno de 6 min. Para esta condição as ferramentas alcançaram o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm, em dois ensaios. Para um ensaio, a ferramenta apresentou a quebra da quina antes de ser detectado o critério de fim de vida por desgaste de flanco.

Os gráficos da figura 5.6 mostram o comportamento do desgaste da ferramenta GC 415 para a velocidade de corte de 300 m/min.

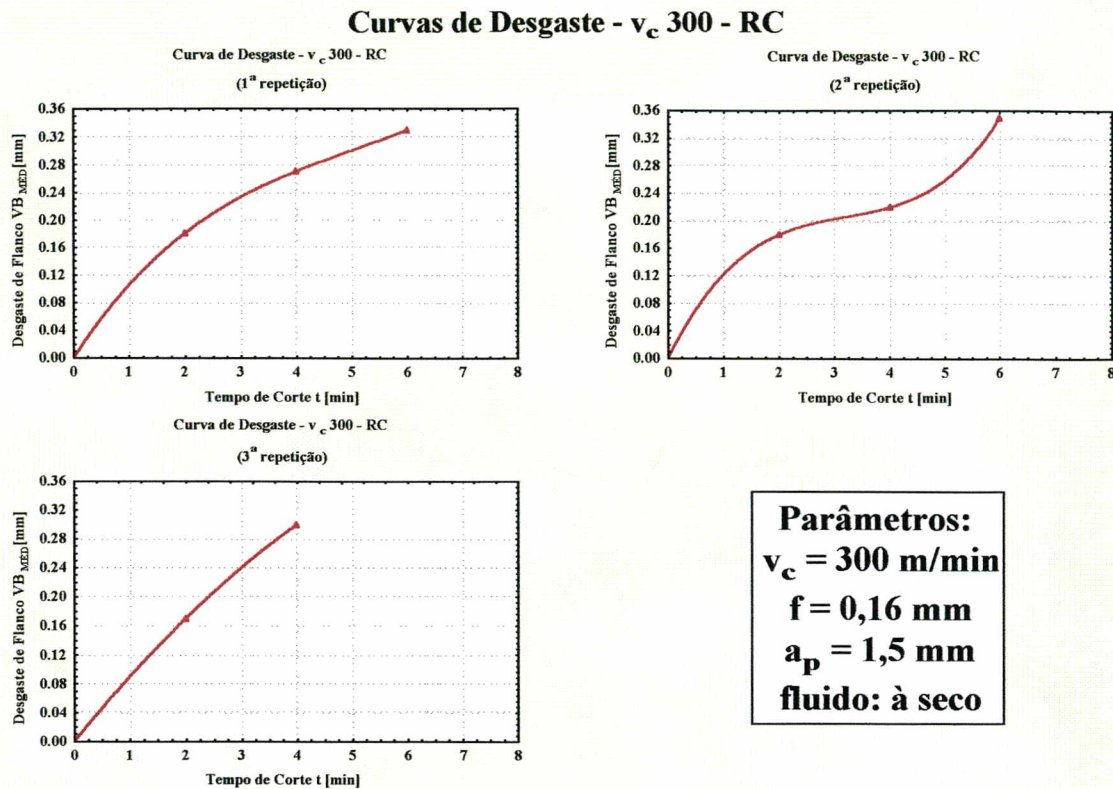


FIGURA 5.6 - Curvas de desgaste para a ferramenta GC 415

Para a velocidade de corte de 300 m/min as ferramentas GC 415 alcançaram um tempo de vida em torno de 5 min. Para esta condição foram detectados o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm.

As ferramentas GC 415 apresentam um comportamento de desgaste típico de 3 fases. Estabilização do gume em torno de $VB_{MÉD} \approx 0,15$ a $0,20$ mm, desgaste linear até $VB_{MÉD} \approx 0,25$ mm e hiperproporcional para $VB > 0,25$ mm. Com o aumento da velocidade de corte estas três fases não são mais tão nítidas. Mesmo assim todas as ferramentas, com exceção de uma, permitiram a continuação do ensaio até $VB_{MÉD} = 0,3$ mm.

5.3 Ferramenta H1P K10 - Revestida na UFSC

Os gráficos da figura 5.7 mostram o comportamento do desgaste da ferramenta H1P K10 - revestida na UFSC - para a velocidade de corte de 240m/min.

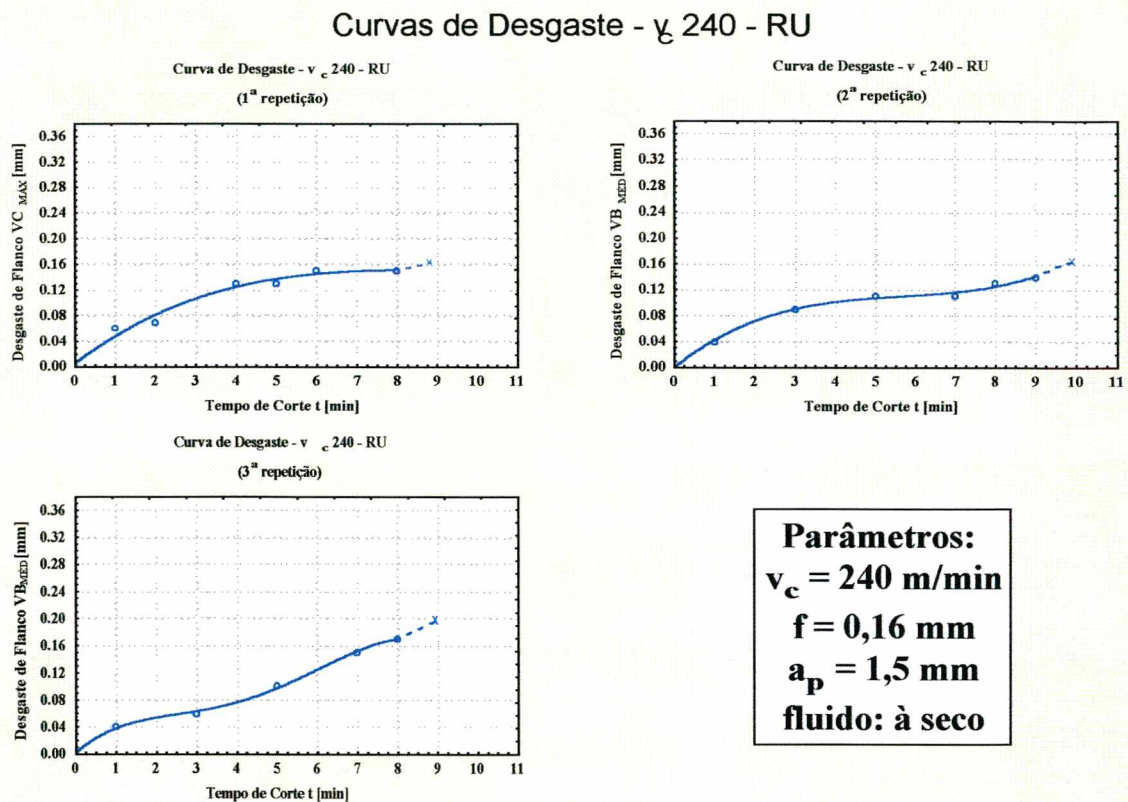


FIGURA 5.7 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10 revestida na UFSC

Para a velocidade de corte de 240 m/min as ferramentas H1P K10 revestidas na UFSC alcançaram um tempo de vida em torno de 8 min. Para esta condição as ferramentas apresentaram a quebra da quina antes de ser detectado o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm.

Os gráficos da figura 5.8 mostram o comportamento do desgaste da ferramenta H1P K10 - revestida na UFSC - para a velocidade de corte de 270m/min.

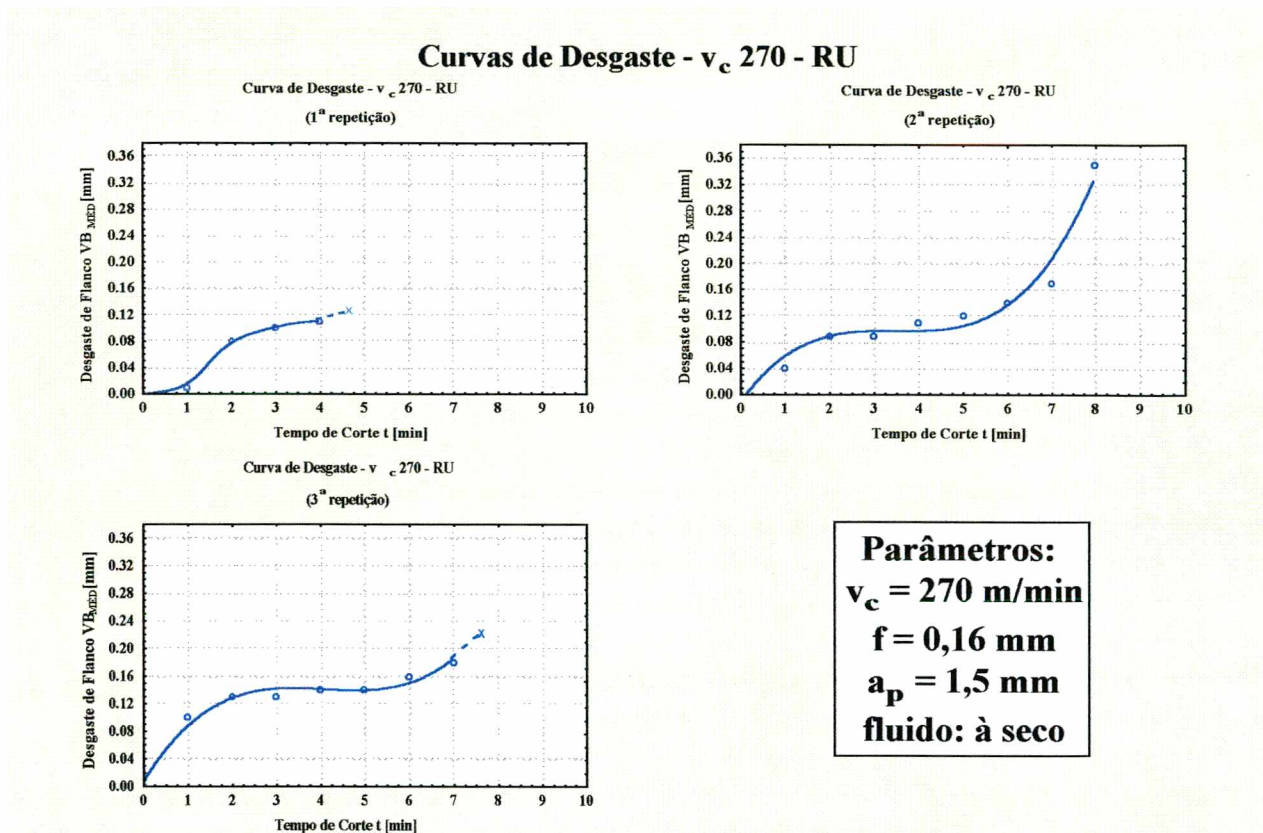


FIGURA 5.8 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10 revestida na UFSC

Para a velocidade de corte de 270 m/min as ferramentas H1P K10 revestidas na UFSC alcançaram um tempo de vida em torno de 6 min. Para esta condição as ferramentas apresentaram a quebra da quina antes de ser detectado o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm, em dois ensaios.

Os gráficos da figura 5.9 mostram o comportamento do desgaste da ferramenta H1P K10 - revestida na UFSC - para a velocidade de corte de 300 m/min.

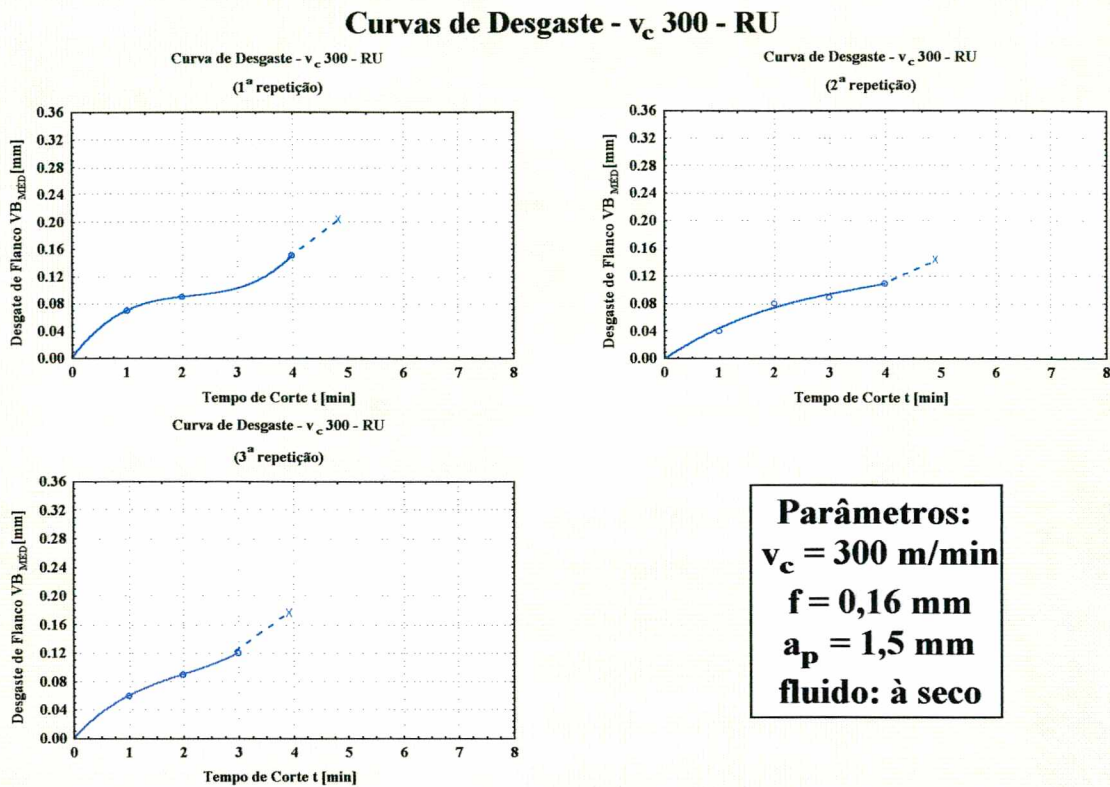


FIGURA 5.9 - Curvas de desgaste para a ferramenta H1P K10 revestida na UFSC

Para a velocidade de corte de 300 m/min as ferramentas H1P K10 revestidas na UFSC alcançaram um tempo de vida em torno de 4 min. Para esta condição as ferramentas sofreram a quebra da quina antes de ser detectado o critério de fim de vida, $VB_{MÉD} = 0,3$ mm.

As ferramentas revestidas na UFSC apresentaram a quebra de suas quinas, com exceção de um ensaio, para a v_c de 270 m/min. Nas curvas de desgaste percebe-se apenas um patamar que pode estar relacionado à única camada de revestimento.

Em termos de tempo de corte, desconsiderando-se o desgaste de flanco médio estabelecido como critério de fim de vida, a ferramenta teve um comportamento semelhante à GC 415.

Para a velocidade de corte de 240 m/min, a estabilização do gume da ferramenta GC 415 ocorre com um maior desgaste para o tempo de corte de 1 min, fazendo com que o patamar de desgaste desta ferramenta seja acima das outras. A ferramenta H1P K10 não revestida, alcançou um tempo inferior a 5 min, enquanto que as ferramentas revestidas atingiram aproximadamente o mesmo tempo de vida. A ferramenta GC 415 alcançou o critério de desgaste de $VB_{MÉD} = 0,3$ mm de desgaste de flanco e a revestida na UFSC teve a quebra da quina de corte da ferramenta.

Para a velocidade de corte de 270 m/min, percebe-se que a partir de um determinado tempo de corte algumas ferramentas sofrem um desgaste hiperproporcional, chegando no critério de fim de vida por desgaste antes de haver a quebra da quina da ferramenta. Para esta velocidade de corte percebe-se novamente que o patamar da curva de desgaste da ferramenta GC 415 é superior à da revestida na UFSC.

Para a velocidade de corte de 300 m/min, o patamar de comportamento de desgaste da ferramenta GC 415 mostrou-se superior à ferramenta revestida na UFSC, e em alguns pontos das curvas de desgaste chegou a ser duas vezes superior. Para um tempo de corte de 3 min, por exemplo, o desgaste de flanco médio VB da ferramenta GC 415 foi de aproximadamente 0,25 mm, enquanto que da ferramenta revestida na UFSC foi de aproximadamente 0,10 mm.

Com base nos gráficos de comportamento do desgaste de flanco médio, percebe-se que para as velocidades de corte usadas no ensaio, a ferramenta H1P K10 não revestida não suportou as altas velocidades de corte e sua vida foi bem inferior à das outras ferramentas revestidas, chegando a ter uma vida inferior à metade das outras ferramentas.

Houve uma diferenciação visível, na qual a ferramenta revestida na UFSC manteve os patamares das curvas de comportamento de desgaste de flanco médio abaixo das curvas da ferramenta GC 415. Isto significa que para um determinado tempo de corte a ferramenta revestida na UFSC manteve sempre um menor desgaste de flanco médio (VB). Isto pode ser em razão de

uma melhor micro estrutura do revestimento de TiN depositado na UFSC, mesmo este revestimento depositado na UFSC possuindo aproximadamente 2,4 μm de espessura e uma camada única de revestimento (figura 5.4), enquanto que a ferramenta GC 415 (figura 5.6) possui uma camada tripla de revestimento com uma espessura aproximadamente de 12 μm .

CAPÍTULO 6

6 CONCLUSÕES E SUGESTÕES

O emprego de ferramentas revestidas em grande escala industrial é justificado pelos ganhos significativos nas taxas de remoção de cavacos e velocidades de corte, chegando a níveis até 5 vezes maiores do que os alcançados pelas ferramentas não revestidas [11]. Quando apareceram as primeiras pastilhas revestidas, no final da década de 60, percebeu-se o nicho existente até então e a partir daí desenvolveu-se um grande campo de pesquisa, que envolve os tipos de revestimentos e os processos de obtenção dos mesmos.

A comparação do comportamento de desgaste entre ferramentas não revestidas, revestidas comerciais e revestidas pelo “Triodo Magnetron Sputtering” mostra que os resultados obtidos são muito promissores, principalmente pelo fato de que o desgaste das ferramentas revestidas pelo “Triodo Magnetron Sputtering” apresentam uma vida na mesma ordem de grandeza que o das ferramentas revestidas comerciais.

A obtenção de um filme de melhor qualidade, com menores tensões residuais, com uma melhor adesão ao substrato e mais resistente requer ainda um intenso trabalho de otimização para que o processo de revestimento pelo “Triodo Magnetron Sputtering” possa se tornar um processo comercial. Os resultados obtidos podem ser melhor explorados, com estudos mais profundos e a otimização destas ferramentas, estudando as variáveis que são influentes sobre a qualidade do revestimento e, conseqüentemente, no desempenho durante a usinagem [41]. A variação dos tipos de revestimentos, bem como um melhor estudo do par revestimento / substrato também poderá ser analisado em trabalhos futuros, permitindo assim uma melhor elucidação do comportamento dos mecanismos de aderência entre o revestimento e o substrato.

Uma investigação detalhada sobre os mecanismos de desgastes em ferramentas revestidas se faz necessário para os processos de torneamento, fresamento e furação, onde as características de corte e esforços se distinguem.

Um estudo mais detalhado do processo não reativo de revestimento de Ti com posterior nitretação também se faz necessário. Pois, apesar de os resultados não serem positivos, pode-se fazer um estudo de otimização do processo e verificar a variação dos resultados.

CAPÍTULO 7

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KÖNIG, W. **Fertigungsverfahren: Drehen, Fraesen, Bohren**. Duesseldorf, VDI-Verlag, Band 1, 1990.
- [2] RAMALINGAN, S. **Thin Solid Films**, 118 (1989), p. 335-349.
- [3] FRENSKE, G. et al. *J. Vac. Sci. Technol.*, A4(6), nov/dec 1986. p. 2879-2884.
- [4] WEINGAERTNER, W. L.; SCHROETER, R. B. **Tecnologia de Usinagem do Alumínio e suas Ligas**. 1º Edição. Alcan Alumínio do Brasil, São Paulo, 1990.
- [5] STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte**. 2ª Edição, Florianópolis, 1989.
- [6] SHAW, M. C. **Metal Cutting Principles**. The MIT Press Massachusetts Institute of Technology, 3º Edição, Cambridge, Massachusetts, 1965.
- [7] **DIN 6584**. (ENTWRF). **Kräfte und Leistungen**. Berlin, Beuthvertrieb GMBH, Oktober, 1963.
- [8] FERRARESI, D. **Fundamentos de Usinagem dos Metais**. 5ª Edição, Ed. Blücher, São Paulo, SP, 1977.
- [9] ISRAELSSON, J. **A Progress Report on Cutting Tool Materials**. *American Machinist* - dezembro 1992.
- [10] **Fabricação e Desenvolvimento do Metal Duro 1**. Apostila Sandvik Coromant.
- [11] MARCONDES, F. C. **A História do Metal Duro**. 1ª Edição. Sandvik do Brasil S/A., março, 1990.
- [12] KÖNIG, W.; FRITSCH, D.; KAMMERMEIER, D. **New Approaches to Characterizing the Performance of Coated Cutting Tools**. *Annals of the CIRP* Vol. 41 - janeiro 1992.

- [13] RAHMAN, M.; SEAH, K. H. W.; GOH, T. N. et al. **A Study on the Appropriate Usage of Different Tool Materials**. Journal of Materials Processing Technology, 29 - 1992.
- [14] VAGLE, M. & GATES, A. **Coating the Cutting Edge**. Machine and Tool BLUE BOOK, Outubro, 1988.
- [15] KÖNIG, W. et. al. **Advanced Coatings by Vapour Phase Processes**. Annals of the CIRP - Vol.38 - fevereiro 1989.
- [16] PEYRE, J. P.; DUCHATEAU, D. **Évolutions des Dépôts PVD - CVD**. CETIM - Informations, 138, Avril 1994.
- [17] VINTERHOLLER, O.; PEYRE, J. P. **Les Revêtements CVD et PVD**. CETIM - Informations, 134, Juin 1993.
- [18] WEISS, H. **Fräsen mit Scheidkeramik**. Tese de Doutorado. Institut Für Werkzeugmaschinen und Betriebstechnik. Karlsruhe. Juni 1983.
- [19] WEINERT, K. **Relation Between Process Energy and Tool Wear when Turning Hardfacing Alloys**. Annals of the CIRP Vol. 43 - janeiro 1994.
- [20] CUPINI, N. L. **Métodos Simples Facilitam a Seleção do Metal a Ser Usinado**. Dirigente Industrial, Vol. 17, N° 7, Agosto, 1977.
- [21] PFAU, D.; WERNER, G.; WINKLER, H. H. **Informationszentrum für Schnittwert**. Industrie-Anzeiger n° 105, Ausgabe Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik. Aachen, Dezember, 1971.
- [22] WEINGAERTNER, W. L. et. al. **Tecnologia de Usinagem do Aço Inoxidável Austenítico (Torneamento Longitudinal Externo)**. Relatório 1. Convênio UFSC - Aços Finos Piratini, Florianópolis, 1995, 80 p.
- [23] CONSALTER, L. A. **Arquivo de Dados Tecnológicos de Usinagem para Determinação Automática de Condições de Corte em Tornos com NC**. Florianópolis,

1985. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.

- [24] FABRY, F. J. **Anwendungsorientierte Klassifizierung und Prüfung von unbeschichteten und beschichteten Hartmetallen beim Drehen.** Aachen, (Tese de Doutorado) - RWTH, janeiro, 1984.
- [25] WEINGAERTNER, W. L. et. al. **Tecnologia da Usinagem de Alumínio.** Relatório ALCAN nº 4. Laboratório de Mecânica de Precisão, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [26] FRELLER, H.; GÜNTHER, K. G. **Progress in Physical Vapour Deposition Wear Resisting Coatings on Tools and Components.** Annals of the CIRP, VOL 37, 1988.
- [27] N.N. **Revestimento de Nitreto de Titânio em Ferramentas Através do Processo PVD.** DEPARTAMENTO TÉCNICO DA BRASIMET S. A.. Rev. Mundo Mecânico, novembro, 1985.
- [28] SANCHEZ, R. **Revestimento de Ferramentas de Nitreto de Titânio - Processo PVD.** Apostila Brasimet.
- [29] VOSSSEN, J.; KERN, W. **Thin Film Processes.** Academic Press, Inc. 5ª ed. Orlando, Flórida, 1978.
- [30] ISRAELSSON, J. **Carbide Technology Improves Insert Performance.** American Machinist - janeiro 1995.
- [31] Apontamentos de Aula. Disciplina: **Tecnologia de Fabricação I.** Professor: Walter L. Weingaertner. Universidade Federal de Santa Catarina, 1995.
- [32] **Tool and Manufacturing Engineers Handbook**, 4ª Edição, Vol.3 (**Materials, Finishing and Coating**), Society of Manufacturing Engineers (SME), Dearborn, Michigan, 1986.

- [33] RAUSCHER, A. **Ferramentas de Usinagem Revestidas com Nitreto de Titânio Depositado pelo Processo PVD**. 1^o Simpósio Brasileiro Sobre Tecnologia de Usinagem. Rio de Janeiro, 1989.
- [34] CHAPMAN, B. **Glow Discharge Processes**. John Willey & Sons Inc., N. Y. 1980.
- [35] FONTANA, L. C. et al. **Deposição Reativa de Filmes de TiN por Magnetron Sputtering**. Departamentos de Física e Engenharia Mecânica UFSC, outubro 1995, Florianópolis.
- [36] RICKERBY, D. S.; MATTHEWS, A. **Advanced Surface Coatings: a Handbook of Surface Engineering**. Chapman and Hall. New York. 1991.
- [37] GOMES, J. O. **Características da Usinabilidade de Aços Inoxidáveis Austeníticos SAE 304 e SAE 316 com a Variação dos Parâmetros Metalúrgicos**. Florianópolis, 1996. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina.
- [38] INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **Tool-Life Testing with SinglePoint Turning Tools**, ISO 3685. Switzerland, 1977.
- [39] DEARNLEY, P. A.; THOMPSON, V. **An Evaluation of the Mechanisms of Ceramics and Coated Carbides Used for Machining Stainless Steels**. HM 49, p.709-744.
- [40] N.N. **Contatos Pessoais com Especialistas (SANDVIK Coromant do Brasil)**. 1996.
- [41] SCHWARZ, H. **Schadensanalyse von PVD-TiN-beschichteten Bauteilen und Werkzeugen**. Mercedes-Benz AG, Stuttgart. Carl Hanser Verlag, München. *Prakt. Metallogr.* 30 (1993) 10, p. 496-506.

CAPÍTULO 8

8 ANEXOS

Características dos equipamentos utilizados nos ensaios.

8.1 Tornos Utilizados

8.1.1 Torno usado para a confecção dos corpos de prova e execução dos pré-testes

Máquina: Torno Universal, marca ROMI

- modelo: I-45;
- fabricante: Indústrias ROMI S.A.;
- distância entre pontas: 2000 mm;
- diâmetro admissível sobre o barramento: 620 mm;
- potência instalada: 30 kW (motor cc);
- torque admissível: 12750 N.m;
- gama de velocidades: 20 a 2500 rpm;
- avanços longitudinais: 0,05 a 18 mm/rot;
- avanços transversais: 0,017 a 6 mm/rot.

8.1.2 Torno usado para execução do experimento

Máquina: Torno de Comando Numérico, marca ROMI MAZAK

- modelo: 10U

- fabricante: Indústrias ROMI S.A.;
- comando CN: MACH 6;
- diâmetro máximo admissível: 300 mm;
- diâmetro máximo torneável: 160 mm;
- comprimento máximo de usinagem: 250 mm;
- curso longitudinal do carro (eixo Z): 290 mm;
- velocidades com variação contínua: 60 / 4000 rpm;
- avanço rápido longitudinal (Z): 30000 mm/min;
- avanço rápido transversal (X): 18000 mm/min;
- motor CA (30 min/reg. contínuo): 7,5 CV;
- peso líquido aproximado: 2600 kg;
- guias de deslizamento: lineares;
- número de posições na torre: 8;
- leitor de posição das ferramentas: via sensor.

8.2 Suporte Porta-Ferramentas e Ferramentas

O suporte porta-ferramenta e os três tipos de ferramentas estão descritos conforme especificações abaixo:

8.2 1 Suporte porta-ferramentas

- fabricante: Kennametal;
- classificação: CSRPR 124B.

8.2.2 Ferramentas

a) Ferramenta Revestida Comercial

- fabricante: SANDVIK Coromant;
- geometria: SPUN 12 03 08 ;
- classe: GC 415 (P15, K15).

b) Ferramenta não Revestida Comercial

- fabricante: SANDVIK Coromant;
- geometria: SPUN 12 03 04;
- classe: H1P (K10).

c) Ferramenta Revestida na UFSC

- fabricante: SANDVIK Coromant;
- geometria: SPUN 12 03 04 ;
- classe: H1P (K10);

Revestimento depositado:

- elemento: Nitreto de Titânio (TiN);
- espessura do revestimento (e): $\cong 2$ a $3 \mu\text{m}$;
- processo de deposição: Magnetron Sputtering (PVD);
- dureza do revestimento: $\cong 2000 \text{ VK}$;

8.3 Sistema Para a Medição dos Desgastes da Ferramenta

Neste trabalho foram estabelecidos como critérios de fim de vida o desgaste de flanco médio (VB) ou a quebra da ferramenta, sendo o que acontecer primeiro. Para as medições do desgaste de flanco médio foi utilizado um microscópio de ferramentaria, especificado abaixo:

Fabricante: Nikon - Japão

Modelo: Mesuriscopes

Campo de medição da mesa micrométrica: 50 x 100 mm

Resolução da mesa micrométrica: 0,001 mm.