

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO - USP
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS - EESC
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO
NÚCLEO DE MANUFATURA AVANÇADA - NUMA

MATERIAIS PARA FERRAMENTA DE CORTE EM
USINAGEM

Prof. Dr. REGINALDO T. COELHO
Prof. Dr. ERALDO JANONNE DA SILVA

Março 2018

ÍNDICE

Sumário

1 - INTRODUÇÃO.....	3
2. AÇOS AO CARBONO E AÇOS LIGADOS	4
3. AÇOS RÁPIDOS (HSS – HIGH SPEED STEEL)	5
3.1 –AÇO RÁPIDO REVESTIDO	8
3.2 – AÇO RÁPIDO PRODUZIDO PELA METALURGIA DO PÓ	9
4. LIGAS FUNDIDAS.....	10
5. METAL DURO	12
5.1 – FABRICAÇÃO DO METAL DURO.....	17
5.2 - METAL DURO REVESTIDO.....	20
6. CERMETS.....	26
7. CERÂMICAS.....	28
7.1 - CERÂMICA A BASE DE Al_2O_3	31
7.2 -CERÂMICA A BASE DE Si_3N_4	34
8. MATERIAIS ULTRADUROS PARA FERRAMENTAS	36
9 – SELEÇÃO DE MATERIAIS PARA FERRAMENTAS DE USINAGEM	42
10 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	47

1 - Introdução

O processo de usinagem baseia-se na remoção de material utilizando como ferramenta um material mais duro e mecanicamente mais resistente que a peça. Baseado no princípio da dureza relativa, o surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribui para o aparecimento de novos materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem. Por outro lado, a usinagem de materiais frágeis ou em operações de cortes interrompidos (como no caso de fresamento, por exemplo) requer materiais de ferramentas com suficiente tenacidade para suportar os choques e os impactos inerentes. Como, em geral, dureza e tenacidade são duas propriedades distintas (normalmente alta dureza se associa a baixa tenacidade e vice-versa), o balanço destas propriedades nos materiais de ferramenta de corte se tornou um desafio para os seus fabricantes. A conciliação dessas propriedades foi conseguida com a produção de ferramentas com diferentes composições químicas, refinamento de grãos, controle dos processos de fabricação e do tratamento térmico, o que lhes confere um grau de pureza e qualidade compatíveis.

As principais propriedades desejáveis em um material para ferramenta de corte podem ser assim listadas:

- Alta dureza;
- Tenacidade suficiente para evitar falha por fratura;
- Alta resistência ao desgaste abrasivo;
- Alta resistência a compressão;
- Alta resistência ao cisalhamento;
- Boas propriedades mecânicas e térmicas em temperaturas elevadas;
- Alta resistência ao choque térmico;
- Alta resistência ao impacto;
- Ser inerte quimicamente.

Essas propriedades não necessariamente se reúnem em um só material, mas dependendo da aplicação, priorizam-se algumas delas, possíveis de ser reunidas. Desde as primeiras aplicações de processos de usinagem surgiram diversos materiais aplicados em ferramentas de corte. A seguir apresentam-se os mais importantes com algumas de suas características, propriedades, limitações e aplicações.

2. Aços ao Carbono e Aços Ligados

No final do século XVIII e início do XIX os aços ao carbono eram os principais materiais empregados como ferramentas de corte nos primórdios dos processos de usinagem. Mais tarde, já ao final do século XIX, os aços de baixa, e média liga, introduzidos por Müshet em 1868, já representavam as primeiras inovações em ferramentas de corte. Com o aparecimento de materiais mais resistentes para as peças, estes aços foram logo substituídos, embora ainda hoje sejam utilizados como ferramentas para usinagem em baixas velocidades de corte, e em ferramentas de conformação. A maior limitação dos aços com estrutura martensítica é que eles perdem a dureza quando aquecidos em temperaturas na faixa de revenido (300° a 600° C). A Tabela 2.1 mostra a classificação da AISI (*American Iron and Steel Institute*) para os aços mais comuns para ferramentas de corte aplicadas em usinagem.

Tabela 2.1. Classificação dos aços mais comuns para ferramentas de corte

Tipo	Designação AISI	C	Mn	Si	Cr	V
<i>Classe 110 (Ao carbono)</i>						
110	W1	0,60/1,40	0,25	0,25	-	-
<i>Classe 120 (Ao carbono-vanádio)</i>						
120	W2	0,60/1,40	0,25	0,25	-	0,25
121	-	1,00	0,25	0,25	-	0,50
122	W2	,90	0,25	0,25	-	0,10
<i>Classe 130 (Ao carbono-cromo)</i>						
130	W4	1,00	0,25	0,25	0,10	-
131	W4	1,00	0,25	0,25	0,25	-
132	W4	1,00	0,25	0,25	0,50	-
133	W4	1,00	0,70	0,25	0,25	-
<i>Classe 140 (Ao carbono-cromo-vanádio)</i>						
140	-	1,00	0,25	0,25	0,35	0,20

Dentre os tipos acima, os mais utilizados são o AISI W1 tipo 110 e AISI W2 tipo 120. Os aços da Tabela 2.1 são os que apresentam menores custos e são, normalmente, tratados termicamente em água, tendo o carbono como o principal elemento de liga e o responsável por regular o balanço entre dureza e tenacidade. Quanto a composição química, os principais elementos presentes nos aços empregados como

ferramentas de corte são o *Carbono*, para formar carbonetos (0,6 a 1,3%), o *Silício* (0.10 a 0.30%), o *Manganês* (até 0.5%), o *Cromo* (até 14%), o *Vanádio* (0.25 a 0.35%), o *Tungstênio* (até 4.0%) e o *Molibdênio*, (Chiaverini, 1979). O principal tratamento térmico empregado nos aços ferramenta se constitui de têmpera seguido de revenido.

3. Aços Rápidos (HSS – High Speed Steel)

O primeiro impacto significativo causado nos materiais para ferramentas aconteceu na virada do século XIX, quando Taylor e White desenvolveram o primeiro aço-rápido, contendo 0,67% C, 18,91% W, 5,47% Cr, 0,11% Mn, 0,29% V e o tratamento térmico apropriado. Esta descoberta revolucionou a prática de usinagem na época, resultando em um grande aumento de produtividade. As velocidades de corte puderam ser aumentadas em cerca de 20 vezes, passando de 3 a 5 m/min com as ferramentas de aço carbono para 30 a 35 m/min com as de aço-rápido. Exatamente por isso, estes aços receberam o nome de “rápidos” (HSS – *High Speed Steel*). Hoje, comparando com os materiais das ferramentas atuais, estes valores são relativamente baixos. Atualmente este grupo de materiais ainda resiste, pois mais de um século depois de descobertos, ainda são largamente empregados. As principais aplicações dos aços rápidos são em brocas, fresas inteiriças, cossinetes, brochas, e até ferramentas de barras para aplicações em torneamentos de peças de diâmetros reduzidos, cuja velocidade de corte conseguida é inferior à velocidade econômica de corte dos materiais mais resistentes. Pode-se encontrar no mercado um variado grupo de aços-rápidos, com cada um tendo sua aplicação específica. A AISI (*American Iron and Steel Institute*) classifica os aços rápidos como apresentado na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Classificação dos aços rápidos segundo a AISI.

Classe	AISI	C	Mn	Si	Cr	V	W	Mo	Co	Outros
Classe 610 (tipos ao W)										
610	T1	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,10	1,00/1,20	18,00/18,25	0,70 (opc.)	-	-
611	T2 (tipo 1)	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,00/2,15	18,00/18,50	0,50/0,75 (opc.)	-	-
612	T2 (tipo 2)	0,95/0,98	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,00/2,15	18,00/18,50	0,50/0,75 (opc.)	-	-
613	-	0,97/1,03	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	2,80/3,20	13,50/14,50	0,65/0,85	-	-
614	-	1,08/1,13	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,90/3,35	18,00/18,50	0,70/0,90	-	-
615	T9	1,22/1,28	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	3,75/4,25	18,00/18,50	0,71 (opc.)	-	-
616	T7	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,50/5,00	1,50/1,80	13,50/14,50	-	-	-
Classe 620 (tipos ao W - Co)										
620	T4	0,70/0,75	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,00/1,25	18,00/19,00	0,60/0,70 (opc.)	4,75/5,25	-
621	T5	0,77/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,85/2,00	18,50/19,00	0,65/1,00 (opc.)	7,60/9,00	-
622	T6	0,75/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,60/2,00	18,75/20,50	0,60/0,80 (opc.)	11,50/12,25	-
623	T15	1,50/1,60	0,10/0,40	0,10/0,40	4,50/4,75	4,75/5,00	12,50/13,50	0,50 (opc.)	4,75/5,25	-
624	T8	0,75/0,80	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	2,00/2,25	13,75/14,00	0,75	5,00/5,25	-
Classe 630 (tipos ao Mo)										
630	M1	0,78/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,00	1,00/1,25	1,50/1,65	8,00/9,00	-	-
631	M10	0,85/0,90	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	1,90/2,10	-	8,00/8,50	-	-
632	M7	0,97/1,03	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,00	1,90/2,10	1,50/1,75	8,50/8,75	-	-
Classe 640 (tipos ao Mo - Co)										
640	M30	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,10/1,40	1,50/1,80	8,25/8,50	4,75/5,25	-
641	M34	0,87/0,93	0,10/0,40	0,10/0,40	3,50/4,00	1,85/2,25	1,30/1,60	8,45/8,95	8,00/8,50	-
642	-	0,56/0,62	0,10/0,40	0,10/0,40	4,75/5,25	1,10/1,40	-	7,75/8,25	2,30/2,70	0,25 B
643	-	0,55/0,60	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,60/1,90	1,65/1,75	8,15/8,50	8,00/8,50	0,50 B
644	M33	0,85/0,95	0,10/0,40	0,10/0,40	3,50/4,00	1,00/1,30	1,30/1,70	9,25/9,75	7,75/8,25	-
645	M33	1,05/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	3,50/4,00	1,05/1,25	1,30/1,70	9,25/9,75	7,75/8,25	-
Classe 650 (tipos ao W - Mo)										
650	M2	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	1,70/2,10	6,00/6,50	4,75/5,25	-	-
651	M3 (tipo 1)	1,00/1,10	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	2,40/2,55	6,00/6,25	5,70/6,25	-	-
652	M3 (tipo 2)	1,10/1,20	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,25	3,00/3,30	5,60/6,25	5,00/6,25	-	-
653	M4	1,25/1,30	0,10/0,40	0,10/0,40	4,25/4,50	3,75/4,25	5,50/6,00	4,50/4,75	-	-
654	-	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	1,35/1,65	5,25/5,75	4,30/4,70	-	1,10/1,40 Nb
Classe 660 (tipos W - Mo - Co)										
660	M35	0,80/0,85	0,10/0,40	0,10/0,40	3,90/4,40	1,75/2,15	6,15/6,65	4,75/5,25	4,75/5,25	-
661	M36	0,80/0,90	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,65/2,00	5,50/6,00	4,25/5,25	7,75/9,00	-
662	M6	0,75/0,80	0,10/0,40	0,10/0,40	3,75/4,25	1,25/1,55	3,75/4,25	4,75/5,25	11,50/12,50	-
663	M15	1,50/1,60	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,75	4,75/5,25	6,25/6,75	3,00/5,00	4,75/5,25	-
664	-	1,20/1,30	0,10/0,40	0,10/0,40	4,00/4,50	4,00/4,50	9,50/10,50	2,30/2,70	5,25/5,75	-

As ferramentas de aço rápido são divididas em dois grandes grupos:

- Aços ao Tungstênio (W), identificados pela letra “**T**”;
- Aços ao Molibdênio (Mo), identificados pela letra “**M**”.

Assim, os principais elementos de ligas dos aços-rápidos são o *Carbono* (0.7 e 1.6 %), o *Tungstênio* (até 20%), o *Molibdênio*, o *Vanádio* (1 a 5 %), o *Cromo*, (até 4%), o *Cobalto*, além de outro como enxofre (0.05% a 0.2%) e o Titânio pode substituir parte ou completamente o vanádio. Outros elementos como o boro e o nióbio podem também, eventualmente ser encontrados nos aços-rápidos (Chiaverini, 1979).

Diferentemente do que acontece com os aços convencionais, os quais são temperados e revenidos e a dureza exibe uma queda contínua com o aumento da temperatura de revenido, os aços-rápidos apresentam uma elevação de dureza quando revenidos em temperaturas na faixa de 480°C a 565°C, dependendo da composição química. Para processos onde é necessária alta dureza a elevadas temperaturas, o principal elemento de liga do aço rápido deve ser o tungstênio. Na sequência, o segundo

mais importante é o molibdênio, o terceiro o Co, e assim por diante. Os aços-rápidos com teores de Co, que variam até um valor máximo de aproximadamente 12%, são normalmente os mais requisitados, justamente por permitirem velocidades de corte da ordem de 25% a 30% maiores que seus similares sem este elemento.

Por outro lado, quando a resistência ao desgaste abrasivo for a principal exigência do processo, o principal elemento de liga do aço rápido deve ser o vanádio, depois o tungstênio, o molibdênio etc. Neste caso, a principal propriedade a ser considerada é a dureza do carboneto presente. Pode-se, portanto, concluir que a dureza dos carbonetos de vanádio é superior à dureza dos carbonetos de tungstênio que por sua vez é superior à dureza do carboneto de molibdênio, e assim sucessivamente. Algumas das principais propriedades mecânicas e térmicas importantes para materiais usados em ferramentas de corte e de vários componentes normalmente encontrados nessas ligas são mostradas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2. Algumas das principais propriedades mecânicas e térmicas importantes para materiais usados em ferramentas de corte e de vários componentes (Gurland, 1988)

Propriedades mecânicas e térmicas de alguns elementos duros e compostos					
Material	Módulo de Young, GN m ⁻²	Coefficiente de expansão térmica, 10 ⁻⁶ K ⁻¹	Densidade, g cm ⁻³	Temperatura de fusão, °C	Dureza, GN m ⁻²
TiC	450	7,4	4,94	3100	30 HV (50g)
TaC	285	5,5	14,50	3800	18 HV (50g)
Cr ₃ C ₂	373	9,9	6,66	1800*	14 HV (50g)
Mo ₂ C (hex.)	533	6,7	9,18	2500	15 HV (50g)
WC (hex.)	696	5,2	15,70	2800*	13-22 HV (50g)
ZrC	348	6,7	6,56	3400	27 HV (50g)
HfC	352	6,6	12,76	3900	26 HV (50g)
VC	422	7,2	5,71	2700	29 HV (50g)
NbC	388	6,7	7,80	3600	20 HV (50g)
Diamante	1.141	1,5 - 4,8	3,52	transforma	~80 HV
BN (cúbico)	680	4,8	3,48	3200*	~50 HV
TiN	250	9,4	5,40	2950	25 HV
Bl ₂ N ₂	210	3,0	3,11	1900	22 HV
Al ₂ O ₃	400	8,4	3,88	204	25 HV
TiH ₂	480	8,0	4,50	2900	34 HV

* Temperatura de dissociação

Nota: Observa-se que a dureza em [GNm⁻²] do VC131® é 29 HV contra 13 HV a 22 HV para o WC e 15 HV para o Mo₂C.

Dois grandes avanços com relação à utilização de aços rápidos em usinagem foram conseguidos nos anos 70 e merecem destaque: ferramentas revestidas e produzidas pela metalurgia do pó.

3.1 – Aço Rápido Revestido

Os aços rápidos começaram a receber coberturas na década de 70 (Komanduri, 1982), com o desenvolvimento de técnicas de revestimento a temperaturas suportáveis pela estrutura martensítica desses materiais. O método de deposição utilizado para aços rápidos, denominado PVD (*physical vapour deposition*, ou deposição física de vapor), usa temperaturas de tratamento inferiores a 500°C e pode ser subdividido em três configurações básicas: evaporação a vácuo e a arco (*vacuum or arc evaporation*), ejeção (*sputtering*) e implantação iônica (*ion implantation*). A Figura 3.1 apresenta um diagrama esquemático deste processo, no qual o revestimento é vaporizado e conduzido fisicamente para a superfície a ser revestida.

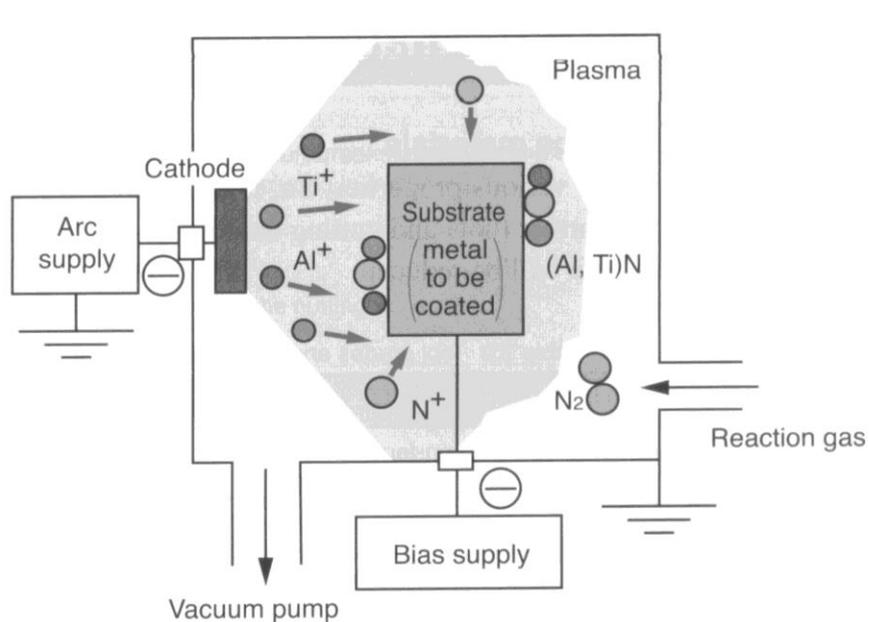


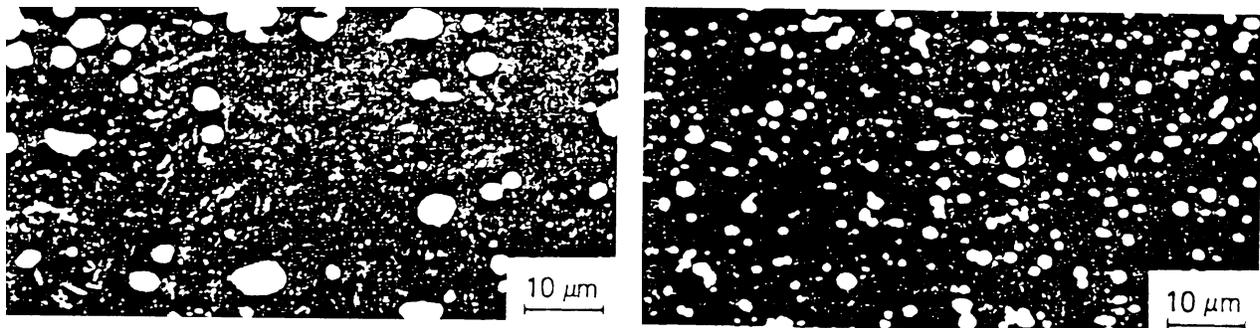
Figura 3.1: Ilustração do processo de deposição física de vapor (PVD) por implantação iônica (Mitsubishi, 2005).

Elevadas temperaturas de deposição são empecilhos críticos para os revestimentos em estruturas martensíticas. Hoje a aplicação de ferramentas de aço-rápido revestida com estas camadas garante tempo de vida mais longo nas ferramentas e velocidades de corte superiores àquelas possíveis em ferramentas sem o revestimento. As ferramentas de aço rápido são normalmente reafiadas após o desgaste atingir determinados níveis, o que implica na necessidade de novo recobrimento, uma vez que a reafiação é feita pela retificação da zona desgastada. No caso das brocas e fresas, as ferramentas são normalmente reafiadas pela retificação da superfície de folga, ficando a superfície de saída sempre com a camada

revestida. No caso de fresas caracol, a ferramenta é reafiada pela retificação da superfície de saída, neste caso quem fica sempre com o revestimento são as superfícies de folgas.

3.2 – Aço Rápido Produzido pela Metalurgia do Pó

São aços rápidos fabricados pela metalurgia do pó, ou HSS-PM (PM de *Powder Metallurgy*), muitas vezes chamados de aços rápidos sinterizados (embora sinterização seja o nome do tratamento térmico, que os produtos fabricados pela metalurgia do pó sofrem). Hoje são encontradas no mercado fresas, brocas e outras ferramentas de aço rápido fabricadas por este processo. A fabricação de ferramentas em HSS-PM depende muito da complexidade da forma desejada. O processo necessita uma matriz para a compactação do pó, a qual deve possuir a forma negativa da ferramenta. O HSS-PM possui partículas de carbonetos mais finas e uma dispersão mais uniforme na matriz. Adicionalmente, os pós podem ser obtidos de aços previamente ligados, pelo processo de atomização, o que garante partículas contendo carbonetos bem finos e uniformemente distribuídos. Os pós são compactados e sinterizados para formar o produto que vai ser conformado e usinado para a obtenção da ferramenta. O tamanho dos carbonetos do HSS-PM é da ordem de 1 a 3 μm , enquanto que no HSS convencional, mesmo após a conformação a quente, estes valores são da ordem de 3 a 16 μm . A Figura 3.2 mostra uma comparação da microestrutura entre esses dois tipos de HSS.



a) HSS AISI M42 convencional

b) HSS-PM

Figura 3.2.- Micrografias comparativas entre dois tipos de aços rápidos (Komanduri and Desai, 1982). Os pontos brancos são os carbonetos dispersos em uma matriz mantensítica predominantemente de cor preta.

A granulometria fina confere ao HSS-PM uma maior tenacidade, embora este possa apresentar porosidade, o que diminui a resistência à tração, ou melhor resistência a compressão. Hoje os processos de prensagem isostática a quente (HIP – *Hot Isostatic Press*) garantem praticamente ausência de porosidade. Quanto á usinabilidade o HSS-PM é melhor para a retificação do que o HSS convencional, devido à granulação mais fina. O tratamento térmico do HSS-PM é equivalente ao do HSS convencional, consistindo de tempera e revenimento, no qual ocorre o endurecimento secundário. Entretanto, devido à obtenção de microestrutura mais fina, no HSS-PM há menor risco de distorções e empenamentos.

4. Ligas Fundidas

As ligas fundidas formam outro grupo de materiais de ferramentas de corte que surgiram na mesma época que os aços rápidos, mas tiveram grandes aplicações somente mais tarde, durante a Segunda Guerra Mundial. São ferramentas a base de Co, contendo W e Cr em solução sólida, e às vezes alguns carbonetos. Estas ligas são mais duras do que os aços rápidos e mantêm esta dureza a temperaturas mais elevadas. Em decorrência disso as velocidades de corte empregadas podem ser em torno de 25% maiores. A Figura 4.1 apresenta as curvas características de dureza contra a temperatura de uma liga fundida e de dois tipos de aços rápidos e a Tabela 4.1 apresenta quatro tipos de ligas fundidas com suas respectivas composições e propriedades.

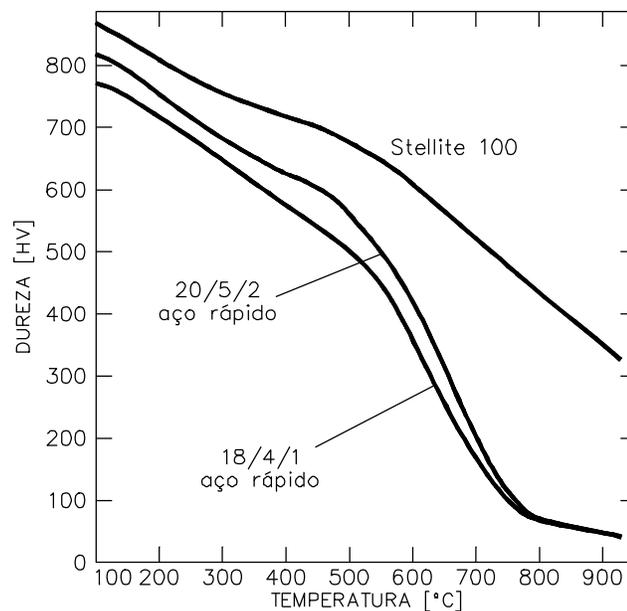


Figura 4.1 - Comportamento da dureza com o aumento de temperatura de uma liga fundida (Stellite 100®) e de dois aços-rápidos (Ridhough, 1970)

Tabela 4.1. Composição e propriedades das ligas fundidas (Ferraresi, 1977)

	Composição química [%]																			
	Co 53	Cr 31	W 10	C 1,5	Ou- tros 4	Co 52	Cr 30	W 11	C 2,5	Ou- tros 4	Co 41	Cr 32	W 17	C 2,5	Ou- tros 4	Co 38	Cr 20	W 18	C 2,0	Ou- tros 12
Densidade [g/cm ³]	8,36					8,38					8,76					8,63				
Faixa de fusão [°C]	1256-1298					1235-1320					1166-1332					1139-1314				
Limite de resistência à tração [kgf/mm ²]	77					59,5					52,5					52,5				
Limite de escoamento	próximo do limite de resistência à tração																			
Alongamento [%]	0-1					0					0					0				
Dureza Rockwell A	80,0					81,5					82,0					82,5				
Dureza Rockwell C	58,0					60,5					61,5					62,5				
Resistência à compressão [kgf/mm ²]	210					224					238					259				
Resistência ao choque Izod [kgm]	1,6					0,9					0,6					0,4				
Módulo de elasticidade [kgf/mm ²]	27,720					23,730					25,900					27,865				

Observa-se que o maior teor de cobalto garante uma maior tenacidade ou resistência ao choque, dado pela absorção de energia no teste Izod. Por outro lado, uma maior percentagem de tungstênio e carbono garantem maior dureza e, conseqüentemente, maior resistência ao desgaste. A não ser em aplicações muito especiais, as ligas fundidas estão caindo em desuso, tanto pela escassez de matéria prima (e aumento do preço) como também por haver no mercado materiais que as superam a custos menores. Quando a principal propriedade requerida for tenacidade, os aços rápidos as superam. Quando for resistência ao desgaste, os metais duros são muito superiores.

Para fins de comparação de desempenho em usinagem a Figura 2.4 apresenta curvas de vida de ferramentas de aço rápido, liga fundida e metal duro no torneamento de um aço liga, enquanto a Figura 4.2 apresenta as faixas de velocidades de máximo rendimento para o torneamento de uma liga de alumínio com essas ferramentas.

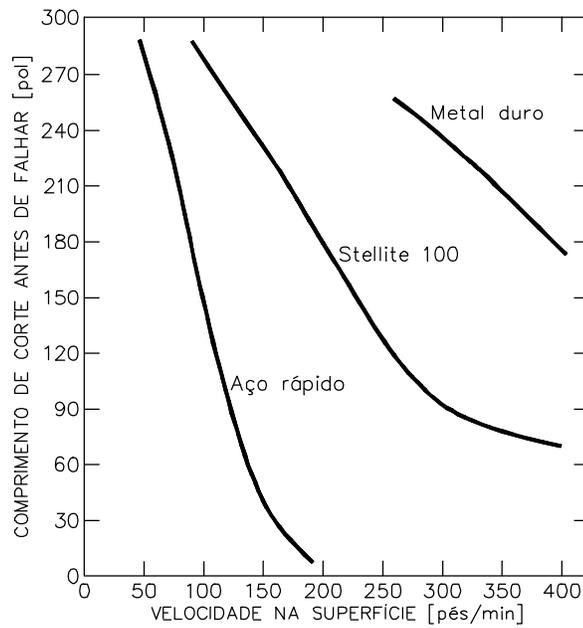


Figura 4.2 - Vidas das ferramentas no torneamento de um aço liga (Ridhough, 1970)

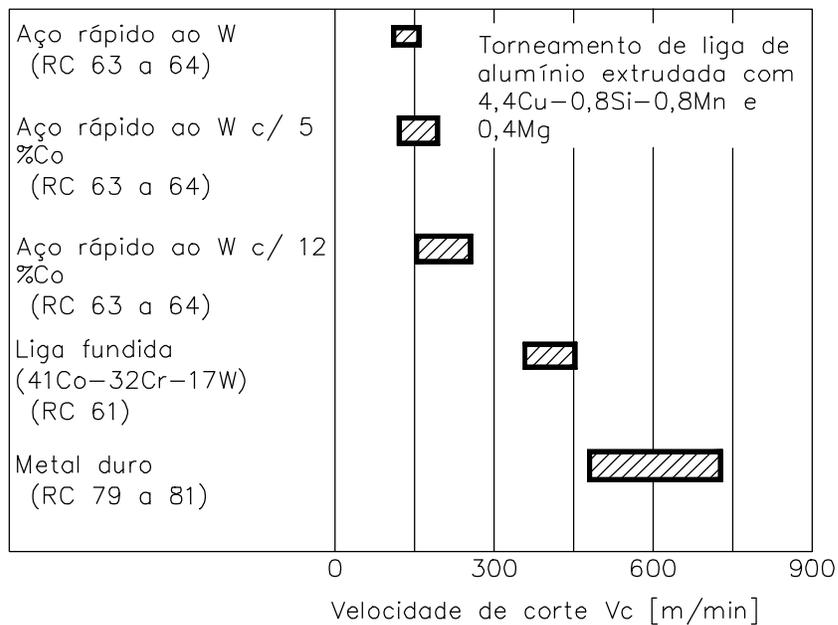


Figura 4.2 - Faixas de velocidades de máximo rendimento no torneamento de uma liga de alumínio (Ferraresi, 1970).

5. Metal Duro

O primeiro grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte aconteceu com a descoberta do aço-rápido, o segundo com o metal duro. Com o metal duro, novamente, as velocidades de corte puderam ser aumentadas em praticamente dez vezes (de 35 m/min com os aços-rápidos para 250 - 300 m/min). A descoberta desta classe aconteceu por volta de 1920, na Alemanha, quando Schröter conseguiu produzir em laboratório o carboneto de tungstênio, WC, em pó pela primeira vez. A mistura deste pó principalmente com o cobalto, também em pó (admite-se ainda o níquel ou o ferro, mas com resultados inferiores), trouxe ao mercado, em 1928, este que é um dos mais revolucionários grupos de materiais para ferramentas de corte. Quando foram verificadas as excelentes propriedades de dureza e resistência ao desgaste desse material, foi chamado de “**widia**” (da língua alemã, de *wie diamant* = como o diamante), fazendo referência à semelhança das propriedades desse material com as do diamante. Denominado de “metal duro” o carboneto de tungstênio, fabricado pelo processo de metalurgia do pó possui uma excelente combinação de resistência ao desgaste, resistência mecânica e tenacidade.

O material originalmente desenvolvido na Alemanha, continha WC+Co e se mostrou muito eficiente na usinagem de ferros fundidos cinzentos, mas com baixa resistência ao desgaste na superfície de saída usinando aços (craterização). Para superar esta deficiência, pesquisas logo se iniciaram, pois, os aços sempre foram os mais importantes materiais de uso geral em engenharia. Adicionou-se, então TiC, TaC e/ou NbC aos WC+Co verificando-se significativa redução no problema de craterização durante a usinagem dos aços.

A norma ISO padronizou a classificação dos metais duros e designou de classe K aqueles contendo WC+Co. Esta classe também é conhecida por classe dos ferros fundidos ou classe aplicada a materiais que produzem cavacos curtos. Num sistema de cores de especificação internacional, coube a este grupo a coloração vermelha. Quando se adiciona TiC, TaC e/ou NbC, a ISO os designa de classe P. Essa classe ficou também conhecida por classe dos aços, ou dos materiais que produzem cavacos longos e tem o azul como a cor de referência nos catálogos. A classe M é uma classe intermediária, quando o WC+Co possui adições de TiC, TaC e/ou NbC, mas em menores quantidades que aqueles apresentados pela Classe P. Essa classe é também conhecida como a classe dos aços inoxidáveis, tendo em vista a sua maior aplicação na usinagem dos aços inoxidáveis austeníticos. A coloração padrão dessa classe é o amarelo.

A classe K ainda é também conhecida como a classe dos metais não ferrosos. Ela é sempre indicada para usinagem dos materiais não ferrosos, devido ao fato dos carbonetos adicionados nas classes P e M terem maiores afinidades química com os não-ferrosos que os carbonetos de tungstênio da classe

K. Neste caso, a designação de classe dos cavacos curtos não se refere aos não-ferrosos, pois a maioria deles forma cavacos longos (alumínio, cobre, titânio, níquel, etc.).

Mais recentemente, entretanto, a Norma ISO 513 (2004), apresenta uma nova classificação de grupos de ferramentas, que não é exclusividade dos metais duros, abrangendo, também, as cerâmicas e os ultraduros. A classe N, para os metais e ligas não ferrosas (principalmente, cobre e alumínio), cuja coloração padrão é o verde, a classe S, para as superligas ou ligas resistentes ao calor (ferro, titânio, níquel e cobalto), cuja coloração padrão é o marrom, e a classe H, para os aços endurecidos (aços fundidos e aços e ferros fundidos temperados), tendo o cinza como coloração padrão. Esta nova classificação retirou da classe K o antigo rótulo de classe dos não-ferrosos.

A letra de designação dos metais duros é sempre acompanhada de um número que representa a tenacidade e a resistência ao desgaste da ferramenta. Quanto maior o número, que normalmente varia entre 01 e 50, maior a tenacidade e menor a resistência ao desgaste. São comuns tabelas detalhadas, indicando o campo de aplicação de cada grupo e subgrupo, na literatura e nos catálogos dos fabricantes de ferramentas de metal duro. A Figura 5.1 mostra esta designação que é recomendada pela norma ISO 513 (2004).

Principais classes			Classes de aplicação			
Letra de identificação	Cor de identificação	Materiais a serem usinados	Metais duros			
P	Azul	Aços: Todos os tipos de aços e aços fundidos, exceto aços inoxidáveis com estrutura austenítica	P01 P10 P20 P30 P40 P50	P05 P15 P25 P35 P45	a ↑	b ↓
M	Amarelo	Aço Inoxidável: aço inoxidável austenítico e aço duplex (austenítico/ferrítico) e aço fundido	M01 M10 M20 M30 M40	M05 M15 M25 M35	a ↑	b ↓
K	Vermelho	Ferro Fundido: Ferro fundido cinzento, ferro fundido com grafita esferoidal, ferro fundido maleável	K01 K10 K20 K30 K40	K05 K15 K25 K35	a ↑	b ↓
N	Verde	Metais não-ferrosos: Alumínio e outros metais não ferrosos, materiais não metálicos	N01 N10 N20 N30	N05 N15 N25	a ↑	b ↓
S	Marron	Superligas e titânio: Ligas especiais resistentes ao calor a base de ferro, níquel e cobalto, titânio e ligas de titânio	S01 S10 S20 S30	S05 S15 S25	a ↑	b ↓
H	Cinza	Materiais duros: Aços endurecidos, ferros fundidos endurecidos, ferros fundidos resfriados	H01 H10 H20 H30	H05 H15 H25	a ↑	b ↓

a – Aumento da velocidade de corte, aumento da resistência ao desgaste do material da ferramenta
b – Aumento do avanço, aumento da tenacidade do material da ferramenta

Figura – 5.1 - Classificação dos metais duros segundo a norma ISO 513 (2004)

A subdivisão dentro de cada classe depende principalmente de:

- Composição química do material da ferramenta, incluindo qualidade e quantidade de carbonetos. A presença de carbonetos de titânio (TiC), por exemplo, garante maior resistência ao desgaste. A maior quantidade de cobalto por outro lado, garante maior tenacidade;
- Tamanho dos grãos de carboneto. Quanto mais finos os carbonetos, maior a tenacidade da ferramenta, aliada a uma maior dureza média.

As variações da porcentagem de cobalto e seus efeitos nas propriedades mecânicas são ilustrados na Figura 5.2. Nos quatro gráficos desta figura, nos eixos das abscissas tem-se a variação da porcentagem de Co na liga.

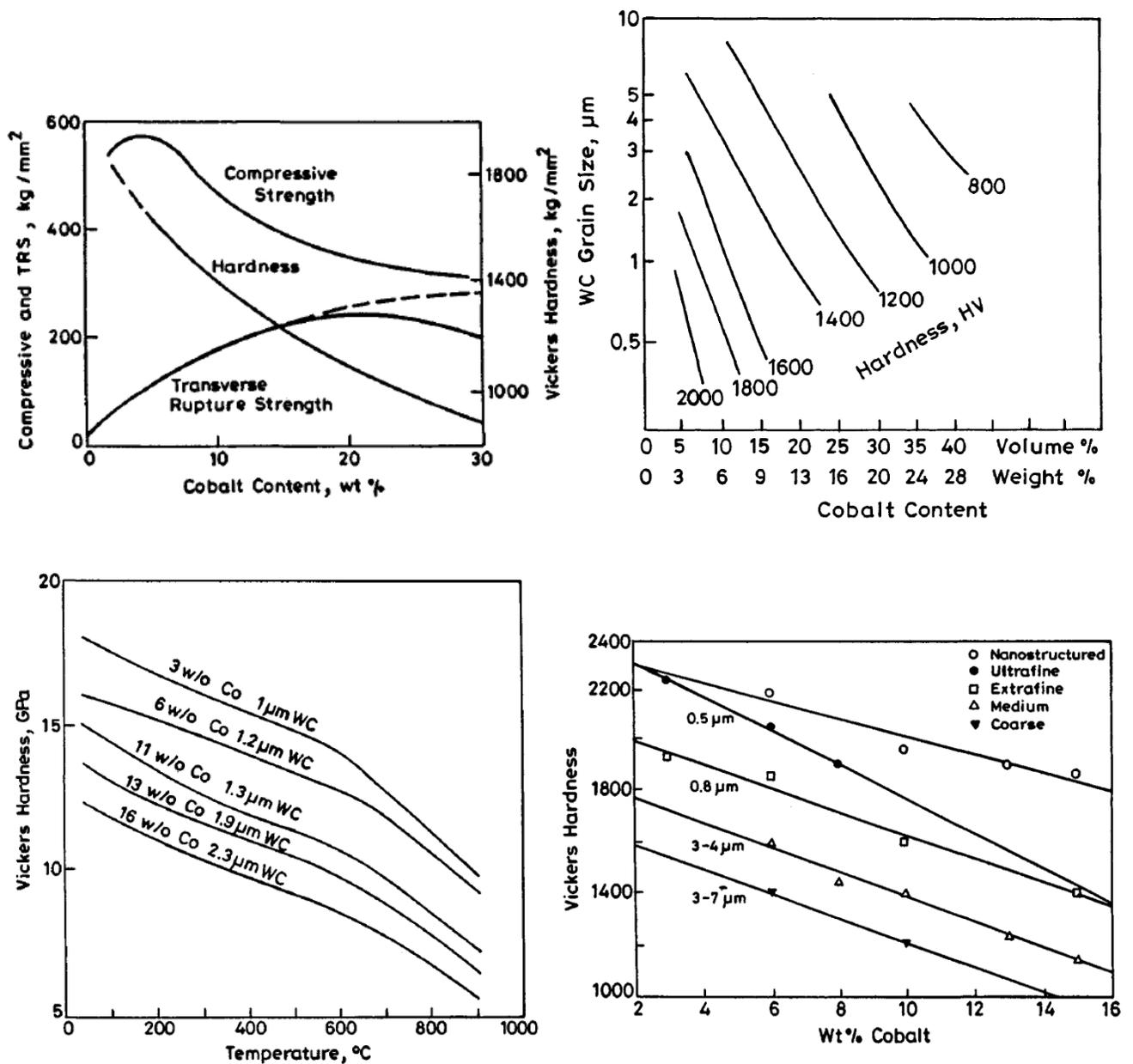


Figura 5.2. Variações da porcentagem de cobalto e seus efeitos nas propriedades mecânicas (Gopal S. Upadhyaya, 1988)

Nota-se que o aumento do Co implica em menor dureza, maior resistência à ruptura transversal (TRS) e, portanto, maior resistência ao impacto (ou tenacidade) e menor módulo de elasticidade e, portanto, menor rigidez. Nota-se que o refino de grão melhora a tenacidade em aproximadamente 50%, aumentando também a dureza média, embora piorando as propriedades térmicas. A influência do tamanho de grão é ilustrada pela Figura 5.2 e também pela Tabela 5.1.

Tabela 5.1. Comparação das propriedades de metal duro com tamanho de grão convencional (THM e THR) e com tamanho de grãos ultrafinos (THM-F e THR-F).

	THM	THM-F	THR	THR-F
Densidade [g/cm ³]	14,9	14,8	14,6	14,4
Dureza [HV30]	1600	1800	1450	1500
Resistência à ruptura transversal [N/mm ²]	2000	3000	2350	3200
Resistência à compressão [N/mm ²]	5400	6000	5000	5300
Tenacidade à fratura K _h [Mpa K ⁻¹]	9,6	10,8	12,0	13,8
Condutividade térmica [W m ⁻¹ K ⁻¹]	80	46	70	42
Coefficiente de expansão térmica [K ⁻¹]	5,5·10 ⁻⁶	6,2·10 ⁻⁶	5,6·10 ⁻⁶	6,7·10 ⁻⁶

A classificação ISO, que considera principalmente a composição química e as propriedades de dureza (ou resistência ao desgaste) e tenacidade é, muitas vezes, substituída por classificação específica de um fabricante de ferramentas de metal duro. Assim, um determinado produto, pode cobrir uma vasta faixa da classificação ISO com resultados muito próximos. Às vezes um mesmo produto pode ser indicado como pertencente simultaneamente a mais de uma classe ISO. Neste caso, os fabricantes estão enfatizando mais a aplicabilidade da ferramenta, do que propriamente o sentido da classificação original.

5.1 – Fabricação do Metal Duro

O tungstênio, na forma original, se encontra na natureza nos minérios denominados *scheelita* e *wolframita*, que podem ser encontrados no nordeste brasileiro. Após uma série de reações em meio ácido (ácido clorídrico) ele é transformado em trióxido de tungstênio, (WO₃). Por meio de reações de desoxidação em atmosfera rica em hidrogênio é obtido o tungstênio puro, que é misturado com o carbono, também puro, e levado a um forno para formar o WC a temperaturas elevadas (1375°C a 1650°C) (Marcondes, 1990). O tamanho de grão do carboneto de tungstênio assim obtido é da ordem de 0,4 a 7 µm (Jack, 1987). O controle e o refino maior dos grãos de carboneto são obtidos na etapa de moagem seguinte. Os carbonetos são moídos em meio líquido e depois secados com spray. Esta moagem pode ser

feita após a mistura com o cobalto, na proporção ideal para produzir cada uma das classes de metal duro. Opcionalmente, a mistura com o cobalto (na forma de um pó fino) pode ser feita após a moagem individual dos constituintes. A Figura 5.3 apresenta uma amostra dos pós prontos para serem misturados para composição final dos produtos.

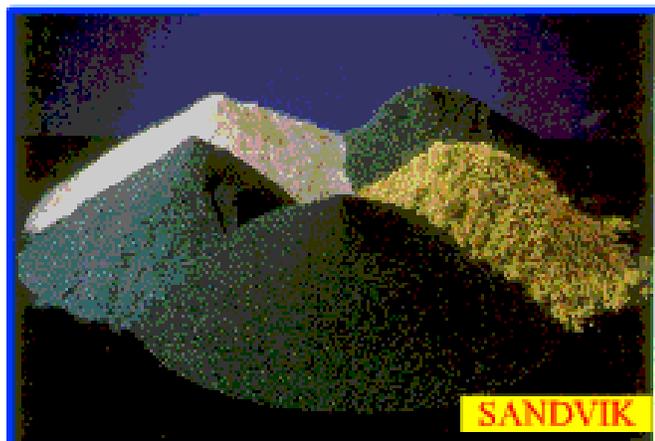


Figura 5.3. Pós constituintes de metal duro após a moagem, prontos para misturas de acordo com cada classe de ferramenta (Sandvik, 2007)

A mistura é comprimida a frio em matrizes, geralmente usando uma adição de cera lubrificante para facilitar esta etapa. Esta cera é extraída do produto durante o tratamento térmico de sinterização. Após a prensagem o produto já ganha o formato final desejado, apresentando uma porosidade que pode chegar à ordem de 50% em volume, e pode ser manipulado. A sinterização segue imediatamente esta etapa, e é realizada a vácuo, em temperaturas próximas ao ponto de fusão do ligante, com a porosidade sendo reduzida para menos de 0,01% (Jack, 1987). Após a sinterização o produto sofre uma redução de tamanho, que pode chegar da ordem de 18%. Antes de ser comercializado, normalmente o produto é submetido à operação de retificação para confecção do raio de ponta e melhoria da exatidão dimensional. A Figura 5.4 ilustra as etapas do processo.

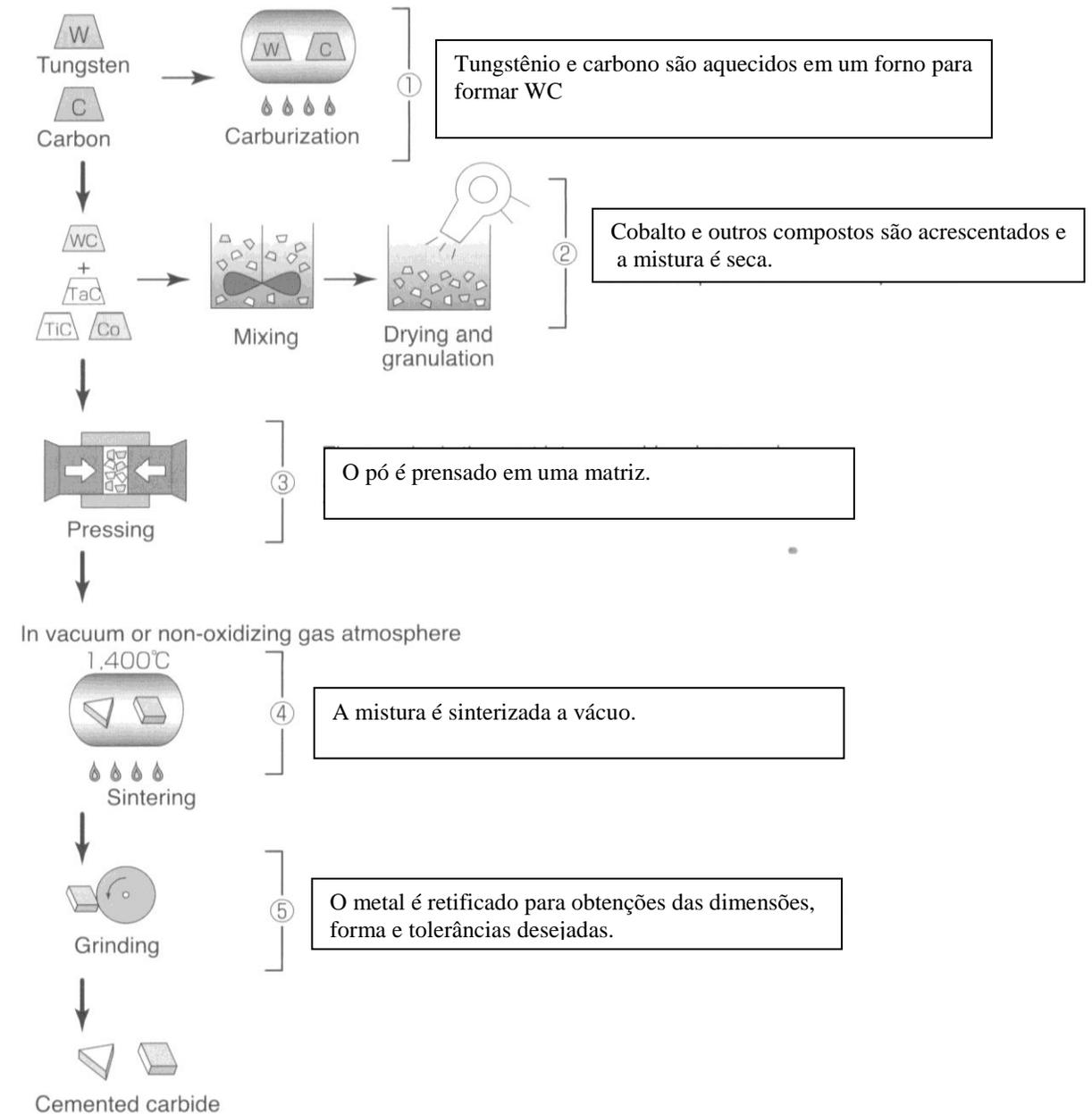


Figura 5.4. Esquema ilustrativo do processo de metalurgia do pó para obtenção dos metais duros (Mitsubishi, 2005).

Quando se trata de ferramentas das classes P ou M, há também a adição de TiC, TaC e/ou NbC além dos constituintes já mencionados. O processo de metalurgia do pó, muitas vezes é denominado de sinterização, porém, conforme observado na Figura 2.9, sinterização é apenas uma etapa do processo. É durante este tratamento que os grãos adjacentes do pó do constituinte são unidos. Essa união pode ser

realizada por meio de dois mecanismos distintos, a saber: transporte de material na fase sólida ou transporte de material na fase líquida. No primeiro, a união é garantida pela difusão na fase sólida dos constituintes, enquanto que no segundo a união é garantida pela fusão do elemento ligante. A Figura 5.5 ilustra esses dois métodos.

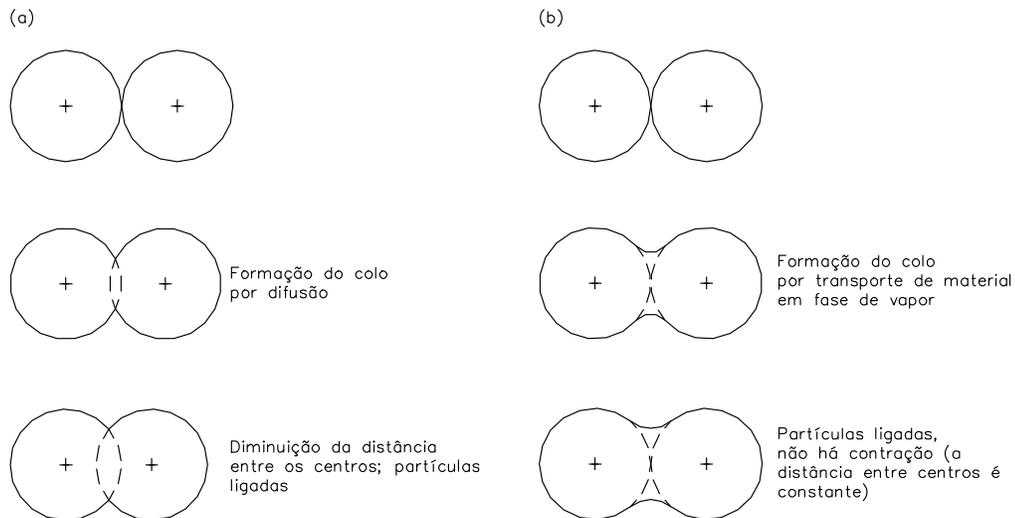


Figura 5.5. Esquema ilustrativo dos dois mecanismos de união dos pó durante o processo de sinterização; a)- transporte de material no estado sólido; b)- transporte de material no estado líquido (Kalpakajian, 1984)

5.2 - Metal Duro Revestido

O revestimento de ferramentas de metal duro ganhou uma importância muito grande por garantir um desempenho bem superior à ferramenta sem revestimento na usinagem de materiais ferrosos. Dentre todo o metal duro utilizado na indústria, os revestidos representam mais de 95% no presente, com tendência ao crescimento contínuo. Outro fator que contribui muito para o crescimento da aplicação de metal duro revestido é o maior domínio das técnicas de revestimento assim como um custo mais acessível. Os revestimentos são aplicados em substratos de quaisquer classes de metal duro.

Ao contrário das ferramentas de aço rápido revestido, que usam apenas o processo PVD, os metais duros podem receber tanto o processo PVD como o CVD (CVD - *chemical vapour deposition* – deposição química de vapor). Neste caso, a utilização de temperaturas elevadas (aproximadamente 1000°C) não implica em problemas de alterações metalúrgicas para o metal duro. A Figura 5.6 apresenta o diagrama esquemático do processo CVD, no qual gases são fornecidos em uma câmara onde ocorre a reação química que resulta na formação do revestimento sobre a superfície da ferramenta.

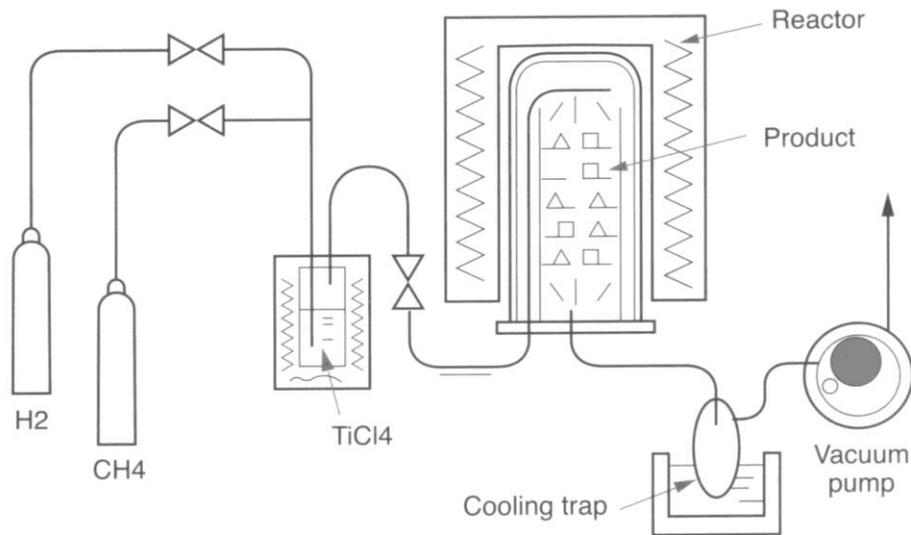


Figura 5.6 - Processo de deposição química de vapor (Mitsubishi, 2005).

Além dos revestimentos de TiC e TiN normalmente produzidos por esta técnica, vide Equações 5.1 e 5.2, também é possível a deposição de filmes de diamante e de Al₂O₃.



Diante das alternativas disponíveis, os fabricantes de ferramentas oferecem produtos revestidos por ambos os processos. A Tabela 5.2 apresenta uma comparação entre ferramentas de metal duro revestidas pelos dois processos.

Tabela 5.2. Comparação de ferramentas revestidas pelos processos CVD e PVD

	CVD - DEPOSIÇÃO QUÍMICA DE VAPOR	PVD - DEPOSIÇÃO FÍSICA DE VAPOR
TEMPERATURA DE REVESTIMENTO	APROX. 1000°C	APROX. 500°C
TENACIDADE	REDUZIDA	NÃO É AFETADA
ARESTA DE CORTE	ARREDONDAMENTO REQUERIDO	PODE SER QUINA VIVA
ESPESSURA DO REVESTIMENTO	ATÉ 12 µm	ATÉ 4 µm
CAMADAS	MULTICAMADAS TiC-TiN, TiN-TiCN-TiN, TiC-Al ₂ O ₃	TiN, TiCN, TiNAl
PRINCIPAIS APLICAÇÕES	TORNEAMENTO E MANDRILAMENTO	FRESAMENTO, ROSCAMENTO E FURAÇÃO
VANTAGENS	MAIOR RESISTÊNCIA AO DESGASTE MAIOR RESISTÊNCIA À CRATERIZAÇÃO GRANDE VIDA DA FERRAMENTA	SUBSTITUI FERRAMENTAS SEM REVESTIMENTO: COM MESMA TENACIDADE, MESMA CONFIGURAÇÃO DE ARESTA E MESMA PRECISÃO REDUZ APC MAIOR VIDA NA FERRAMENTA

Nota-se que o processo PVD garante a mesma tenacidade do substrato, enquanto que o processo CVD diminui esta propriedade. Isto implica em problemas para a aplicação de ferramentas revestidas pelo processo CVD em cortes interrompidos. A causa desta redução de tenacidade está na tensão residual de tração deixada pelo método CVD, enquanto que no método PVD a tensão residual é de compressão, igual àquela conseguida no substrato, após a retificação (Quinto et al, 1988). Portanto, é a tensão residual de tração que reduz a resistência ao lascamento da aresta de corte.

Outra variável na seleção de uma ferramenta de metal duro revestido é o número de camadas. O revestimento pode ser uma única camada de TiC, ou, mais comum, triplo revestimento de TiC, TiCN e TiN e TiC, Al₂O₃ e TiN, mas existe registro (Quinto et al, 1988) de ferramentas com até 12 camadas de diferentes revestimentos. Cada camada tem a sua função específica e a associação de camadas permite oferecer um material com todas as vantagens possíveis de se obter com a técnica. Normalmente, o TiC ou o TiCN são revestimentos muito utilizados como a primeira camada, pois garantem uma coesão muito boa com o substrato. Além disso, o TiC é um dos mais duros revestimentos utilizados (ver Tabela 5.2), o que garante alta resistência ao desgaste.

O Al_2O_3 é outro revestimento muito empregado nas ferramentas de metal duro, utilizando a técnica CVD, apresentando várias vantagens. As principais são inércia química e dureza e, portanto, resistência ao desgaste. Outra característica importante é a redução de sua condutividade térmica com o aumento da temperatura. Isto garante uma barreira térmica interessante para a superfície da ferramenta. Salienta-se que no revestimento, ao contrário do substrato, quanto menor a condutividade térmica melhor, pois menor a quantidade de calor que irá chegar ao substrato. Para o substrato quanto maior a condutividade térmica melhor, pois o calor que chega será mais rapidamente dissipado. A condutividade térmica do TiC e do TiN apresentam comportamentos inversos do Al_2O_3 , como mostra a Figura 5.7.

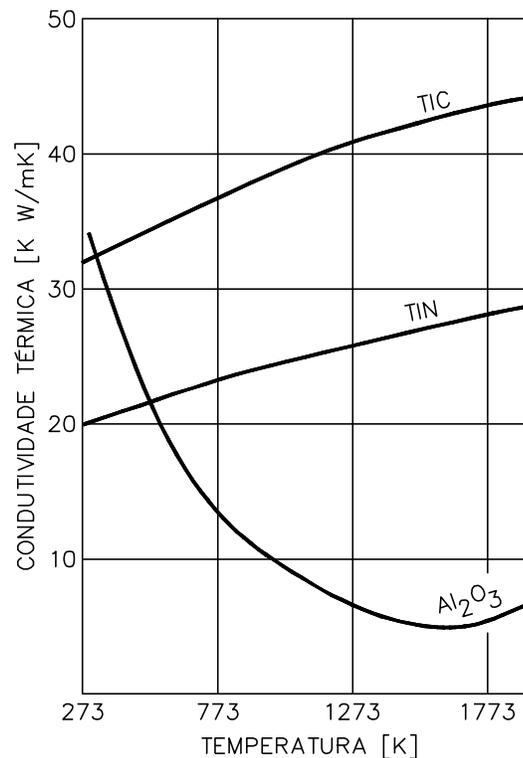


Figura 5.7. Influência da temperatura na condutividade térmica dos principais revestimentos utilizados nas ferramentas de corte (Wertheim et alli, 1982)

O TiN se apresenta, normalmente como a camada externa, por proporcionar baixos coeficientes de atrito entre a ferramenta e o cavaco. Este material garante menores comprimentos de contato cavaco-ferramenta devido à menor tendência de adesão dos ferrosos neste material. A Figura 5.8 apresenta diversas classes de metal duro revestidas comumente utilizadas na indústria.

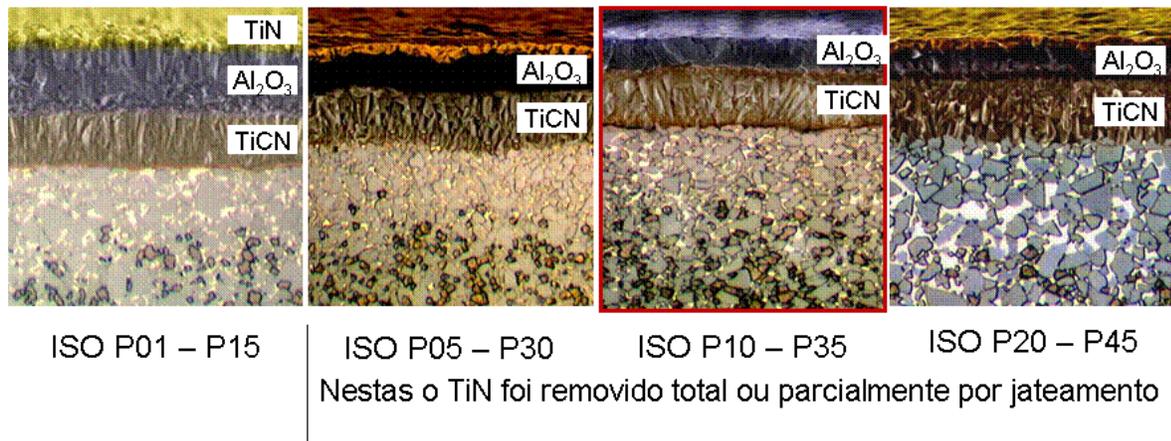


Figura 5.8. Exemplos de ferramentas de metal duro revestidas (Sandvik, 2007)

O TiCN é normalmente o mais requisitado como primeira camada, justamente por garantir maior aderência do revestimento no substrato e de novos revestimentos sobre ele. Para garantir uma tensão residual de compressão é comum aplicar uma operação de jateamento para remoção da última camada revestida na superfície de saída das ferramentas. Isto garante maior resistência à propagação de trincas.

Outro revestimento que confere bom desempenho em operações de usinagem é o TiAlN ou (TiAl)N que é um nitreto à base de Ti e Al. A estequiometria destes compostos pode variar em uma larga margem, permitindo diferentes produtos para diversas aplicações (Ávila, 2003). Este revestimento tem se mostrado excelente para a usinagem de ferros fundidos, tanto em inserts intercambiáveis como em brocas de metal duro. Tal revestimento pode também ser aplicado na usinagem das superligas de níquel. Ensaios de furação mostraram que as ferramentas de metal duro revestidas com TiAlN podem produzir até 3 vezes o número de furos conseguidos com as brocas sem revestimento.

Normalmente, a espessura total das camadas de revestimento pode variar entre 4 e 12 μm . Camadas muito espessas podem fragilizar a aresta, portanto, um número excessivo de camadas pode ter esse efeito nocivo. Quando se utilizam várias camadas finas, intercaladas entre si, a resistência da aresta é consideravelmente maior se comparada com uma camada única de mesma espessura (Wertheim et al, 1982). Neste caso, uma possível trinca que se forma na superfície, por fadiga, por exemplo, irá se propagar apenas até a interface da primeira camada, se propagando paralela a esta, posteriormente. Assim, quanto mais fina a camada, mais difícil é para a trinca atingir o substrato.

Para que se possa mostrar a eficiência das multicamadas em inibir a propagação de trincas utilizam-se os testes de indentação. As ferramentas revestidas com monocamadas apresentam ramificações de trincas muito maiores nas bordas do penetrador piramidal comparando-se com aquelas produzidas por ferramentas revestidas com multicamadas, onde a propagação das trincas se limita a circundar a endentação, como ilustra a Figura 5.9.

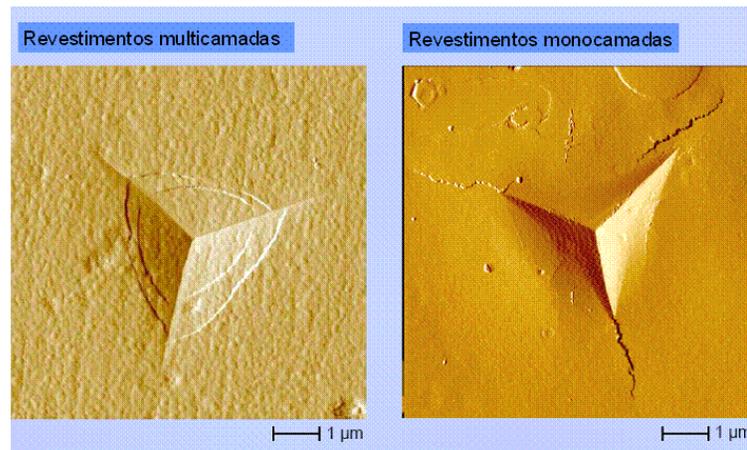


Figura 5.9 - Propagação de trincas após endentação em ferramentas revestidas com mono e multicamadas (Oerlikon Balzers, 2007)

Existem hoje no mercado ferramentas de metal duro revestidas com diamante policristalino (PCD) obtidas pelo processo CVD (Clark e Sem, 1998). Neste caso, a camada de revestimento é única, a espessura é maior que as normais, mas inferior a 30µm. Este revestimento é aplicado em aresta com ângulo de saída positivo para desbaste de materiais não ferrosos, como o alumínio, plásticos e compósitos. Com o aparecimento das ferramentas revestidas de PCD pelo processo CVD, aumentam-se as expectativas para os revestimentos de CBN para aplicações nos ferrosos. Mas isto ainda não é uma realidade comercial, pois o revestimento de CBN ainda não apresenta desempenho satisfatório para ferramenta. O CBN possui dois elementos (o nitrogênio e o boro), diferentemente do PCD que possui apenas um elemento (o carbono), fazendo com que o processo de crescimento da camada se torne mais complicado, por vários motivos, incluindo problemas estequiométricos.

A Figura 5.10 apresenta algumas técnicas de revestimento disponíveis atualmente e suas respectivas temperaturas de deposição. P3e™ é um desenvolvimento que a empresa denomina *Pulse Enhanced Electron Emission*. Camadas de óxidos, inclusive Al₂O₃, são depositadas em substratos com temperaturas inferiores a 600°C.

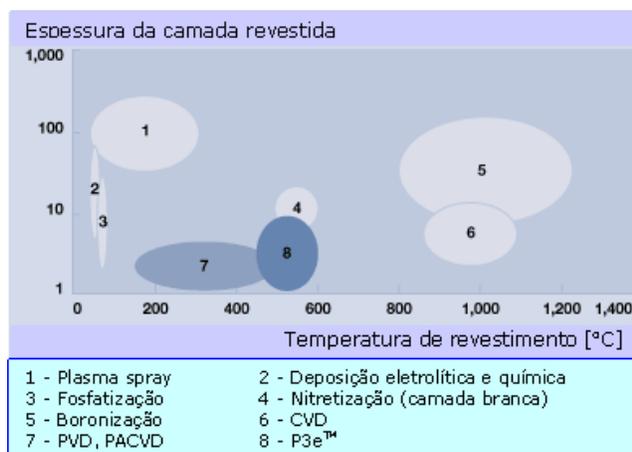


Figura 5.10 - Técnicas de revestimentos e faixa de temperaturas utilizadas no processo (Oerlikon-Balzers, 2007).

Observa-se que hoje há deposições até para aços aplicados em moldes e matrizes, em temperaturas em torno de 200°C, com possibilidade de camadas de TiN, CrN e TiAlN. O conceito do revestimento é para garantir uma ferramenta com características tenazes no núcleo e duras, resistentes ao desgaste e quimicamente inertes na superfície. Nos aços rápidos, os revestimentos comumente utilizados são de TiN, TiCN, TiAlN. Novos revestimentos vêm sendo lançados, como o AlCrN (2005) e AlCr (2006) (NN(a), 2007).

6. Cermets

Dois fatores contribuíram para o aparecimento das ferramentas de cermet. O primeiro foi a constatação de que a adição de TiC aumentava muito a resistência ao desgaste, principalmente na superfície de saída, dos metais duros, quando usinando aços. O segundo foi a escassez de tungstênio durante a segunda guerra mundial, que levou várias equipes de pesquisas a concentrarem esforços no desenvolvimento de um material similar com as características do metal duro. Assim, apesar de se ter registro de patente de cermet datada em 1931 (Kolaska e Dreyer, 1990), foi a partir da década de 70 que o cermet entrou realmente no mercado, para hoje ser uma ferramenta competitiva. Este grupo é constituído por TiC, TiN e geralmente tem o Ni como elemento de ligação. Pode contar também com a presença de outros elementos, tais como Al, Co, Mo ou compostos de Mo₂C, TaC, NbC, WC, AlN, TaN e outros. Trata-se de um grupo considerado intermediário entre os metais duros e as cerâmicas. As ferramentas são aplicadas principalmente no acabamento dos aços, com altas velocidades e baixos

avanços. Suas principais características são a alta dureza a elevadas temperaturas e a grande estabilidade química, com pouca tendência à difusão. Hoje são ferramentas com grandes aplicações nas indústrias. A Tabela 6.1 mostra as principais propriedades físicas do cermet a base de TiC, comparando com metal duro, a base de WC.

Tabela 6.1 Comparação das Propriedades Físicas do Cermet (TiC) com o Metal Duro (WC).

PROPRIEDADES FÍSICAS	CERMET	METAL DURO
DUREZA (HV)	3200	2100
ENERGIA LIVRE DE FORMAÇÃO (kcal/g - atm 1000°C)	-35	-10
SOLUBILIDADE NO FERRO (wt% a 1250°C)	0,5	7
TEMPERATURA DE OXIDAÇÃO (°C)	1100	700
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (cal/cm·s·°C)	0,052	0,42
COEFICIENTE DE DILATAÇÃO TÉRMICA (10 ⁻⁶ /°C)	7,2	5,2
COEFICIENTE DE CHOQUE TÉRMICO*	1,9	27,1

$$\text{Coeficiente de choque térmico} = \frac{\text{condutividade térmica} \times \text{resistência à tração}}{\text{coeficiente de dilatação} \times \text{módulo de elasticidade}}$$

Nota-se a maior dureza apresentada pelo cermet, garantida pela maior dureza do TiC em relação aos WC, o que garante uma maior resistência ao desgaste ou maiores velocidades de corte para os cermets. Outro fator importante dos TiC é a baixíssima solubilidade no ferro à elevada temperatura (0,5% para o TiC contra 7% para o WC), isto inibe a dissolução do TiC, e portanto, reduz a difusão. O cermet apresenta ainda maior temperatura de oxidação que o metal duro. A oxidação pode ser um forte acelerador de desgaste, principalmente se o desgaste de entalhe for predominante. Os pontos fracos dos cermets são as propriedades térmicas. Devido à baixa condutividade térmica e ao alto coeficiente de

dilatação, o cermet tem um baixo coeficiente de resistência ao choque térmico, bem inferior ao metal duro. Daí a explicação do cermet só ser eficiente em baixos avanços, pequenas profundidades de corte e altas velocidades (operações de acabamento) na usinagem dos ferrosos. Devido à grande afinidade química do titânio com a maioria dos não-ferrosos, a aplicação dos cermets, basicamente se restringe a usinagem dos ferrosos. O problema de baixa tenacidade vem sendo investigado e soluções práticas estão aparecendo no cenário industrial. A adição de 12% em peso de nanogrãos de Al_2O_3 na matriz de microgrãos de cermets, por exemplo, garante aumento da tenacidade e manutenção de durezas elevadas na ferramenta (Huang et al., 2006). Bons resultados foram encontrados utilizando o refino de grão dos constituintes duros dos cermets, ampliando o campo de aplicação deste grupo de ferramentas Zelinski (2007). A Figura 6.1 ilustra estes resultados.

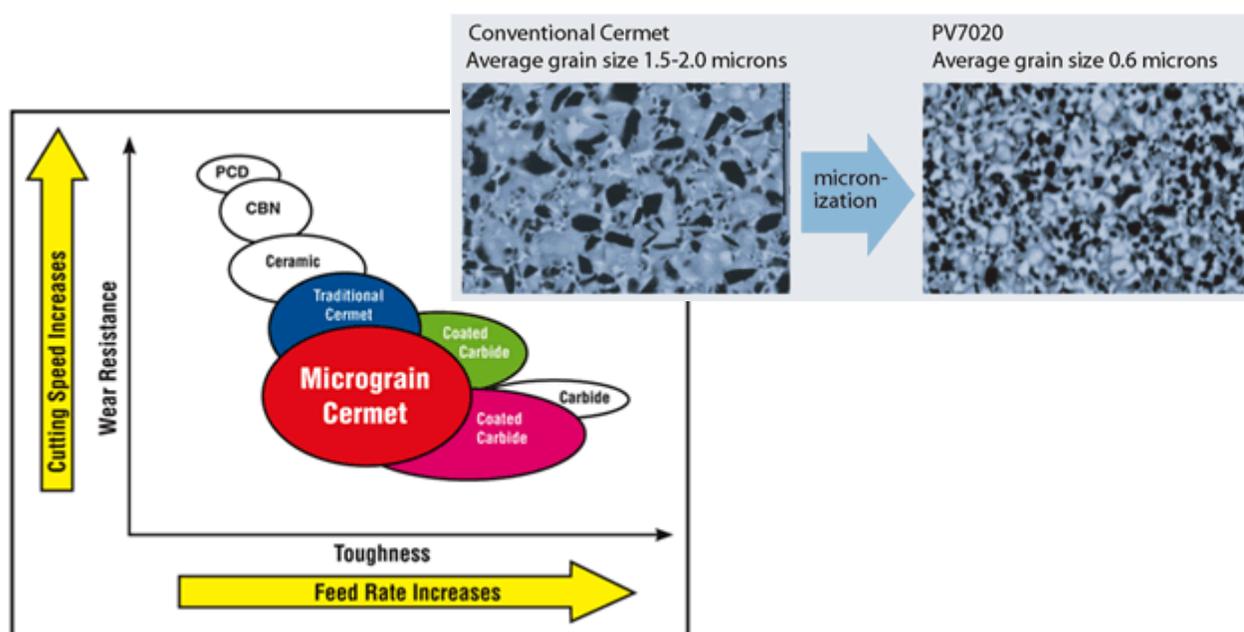


Figura 6.1. Ilustração demonstrando o aumento do campo de aplicação dos cermets pelo refino de grão de seus constituintes (Zelinski, 2007).

7. Cerâmicas

Não existe na literatura uma definição clássica para os materiais cerâmicos, que possa identificar prontamente este grupo de materiais. As cerâmicas, às vezes, são muito mais conhecidas pelas suas propriedades, do que propriamente por uma definição clássica. A definição que segue abaixo trata da união de pontos que identificam as cerâmicas oferecidos por diversos autores, ou livros (Kalpakjian, 1984; De Garmo et al, 1988; ASM Handbook, 1990):

“As cerâmicas são compostas de elementos metálicos e não-metálicos, geralmente na forma de óxidos, carbonetos ou nitretos. A maioria tem estrutura cristalina, mas em contraste com os metais as ligações entre os elementos são iônicas, ou covalentes”.

Em geral, as cerâmicas possuem as seguintes propriedades que ajudam a identificá-las.

- São materiais refratários, capazes de suportar altas temperaturas sem perder resistência mecânica;
- Possuem alta resistência ao desgaste em operações de usinagem;
- Possuem altos valores de dureza;
- São materiais frágeis;
- Têm baixa condutividade térmica;
- Apresentam boa estabilidade química e térmica;
- Possuem boa resistência à fluência;
- Apresentam alta resistência à compressão e baixa resistência à tração.

Apesar da literatura citar o emprego das cerâmicas como ferramentas de corte desde o princípio do século, somente nos fins dos anos 50 insertos a base de alumina (Al_2O_3) entraram no mercado, sendo atualmente um grupo bastante competitivo, principalmente na usinagem de materiais endurecidos e superligas. Normalmente, as cerâmicas são usadas onde se requer alta dureza e resistência ao desgaste. As cerâmicas a base de alumina, apresentam excelente inércia química usinando materiais ferrosos. Entretanto, por não apresentarem tenacidades suficientes, os quebra-cavacos integrais ficam proibitivos, o que prejudicam sua aplicação nos aços comum ao carbono e de baixa liga. Por outro lado, quando se tratar de aços de alta dureza, acima de 45 HRC, as cerâmicas são sempre empregadas, principalmente no corte contínuo. No corte interrompido ainda existem grandes limitações, exceto no fresamento de ferro fundido cinzento, onde as cerâmicas a base de nitreto de silício têm sido eficientes.

No passado o que limitava a aplicação das cerâmicas era a fragilidade que elas apresentavam. Com a introdução no mercado das cerâmicas mistas, cerâmicas reforçadas com SiC (*whiskers*) e cerâmicas a base de nitreto de silício, elas podem ter aplicações até nos cortes interrompidos, como por exemplo, no fresamento dos ferros fundidos cinzentos à altíssimas velocidades de corte e com altos valores de avanço. Isto é possível porque o grau de tenacidade conseguido nestas pastilhas é significativo, em relação aos materiais puros. É com o aparecimento de tais materiais, juntamente com os metais duros revestidos e os materiais de ferramentas ultraduros (PCD e PcBN), que os anos 80 podem ser

considerados a época do terceiro grande impulso das ferramentas de corte (após os aços rápidos com o primeiro, e os metais duros com o segundo).

As cerâmicas, de um modo geral, possuem algumas propriedades melhores e outras piores que os cermets e os metais duros. A Figura 7.1 apresenta esquematicamente a comparação das principais propriedades dessas ferramentas de corte.

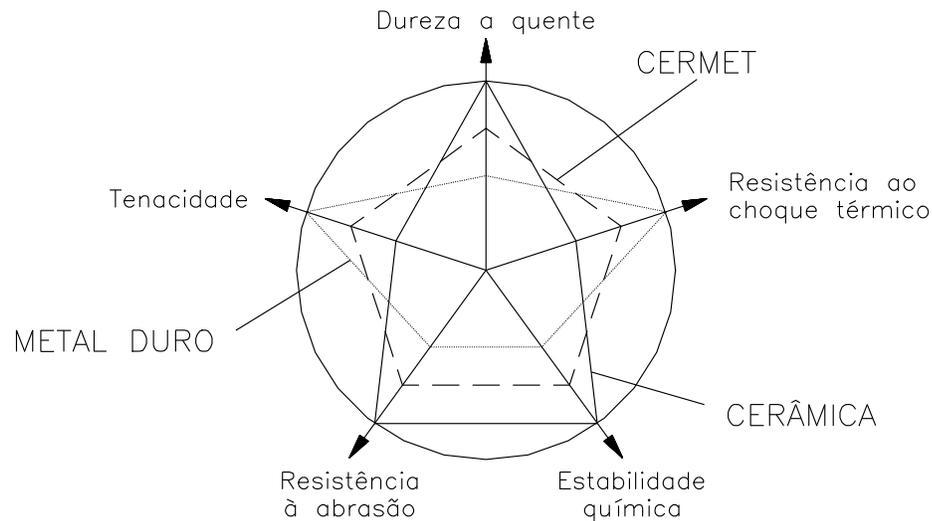


Figura 7.1. Esquema comparativo das propriedades da cerâmica, cermet e metal duro (Smith, 1989)

Observa-se que as cerâmicas possuem a maior dureza a quente, a maior resistência à oxidação e menor afinidade química com o material da peça, enquanto o metal duro possui maior tenacidade e maior resistência ao choque térmico entre eles. O cermet sempre ocupa uma posição intermediária, entre o metal duro e a cerâmica, considerando qualquer uma dessas propriedades.

A Tabela 7.1 apresenta as propriedades mais importantes das principais ferramentas cerâmicas. Estas propriedades são comumente encontradas na literatura (North and Baker, 1984; Ezugwu and Wallbank, 1987; Momper, 1987; Tönshoff and Bartsch, 1988; Drozda, 1985).

Tabela 7.1. Propriedades das principais ferramentas cerâmicas

Material	Módulo de elasticidade (GPa)	Dureza (GPa)	Tenacidade K_{IC} (MPa·m ^{1/2})	Coefficiente de dilatação térmica (10 ⁻⁶ ·K ⁻¹)	Condutividade térmica (Wm ⁻¹ ·K ⁻¹)
Al ₂ O ₃	400	17,2	4,3	8,0	10,5
Al ₂ O ₃ +TiC	420	20,6	4,5	8,5	13,0
Al ₂ O ₃ +ZrO ₂	390	16,5	6,5	8,5	8,0
Si ₃ N ₄ / SIALON	300	15,6	6,5	3,1	9,7
SiC / WHISKER	390	18,5	8,0	6,4	32,0

As cerâmicas podem ser divididas em dois grandes grupos: cerâmica a base de Al₂O₃ e cerâmica a base de Si₃N₄.

7.1 - Cerâmica a Base de Al₂O₃

As cerâmicas puras são ferramentas constituídas basicamente de finos grãos de Al₂O₃ obtidos por metalurgia do pó com adição de MgO para inibir o crescimento de grão. Outros constituintes, tais como óxido de cromo, titânio e níquel são às vezes adicionados para aumentar a resistência mecânica. Estas ferramentas possuem um alto grau de dureza, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química, embora com baixa tenacidade. Quando usada na usinagem, é geralmente no acabamento de materiais fundidos, aços tratados superficialmente ou totalmente temperados. Exigem geralmente máquinas com alta rigidez, isentas de vibrações.

As primeiras ferramentas com adições apareceram nos anos 70, com altos percentuais (podendo chegar a 30%) de ZrO₂ e/ou TiC principalmente, podendo ainda conter TiN, TiO₂ e WC. Estas adições conferem à matriz de Al₂O₃ uma maior tenacidade e, às vezes, melhores propriedades térmicas, para suportar maiores impactos mecânicos e choques térmicos, inerentes a certos processos de corte. Uma ferramenta de Al₂O₃ pura tem o coeficiente de tenacidade à fratura K_{ic} de 180 N/mm^{3/2}, a adição de zircônia (ZrO₂) pode elevar este valor a 300 N/mm^{3/2} com 15% de ZrO₂, como mostra a Figura 7.2.

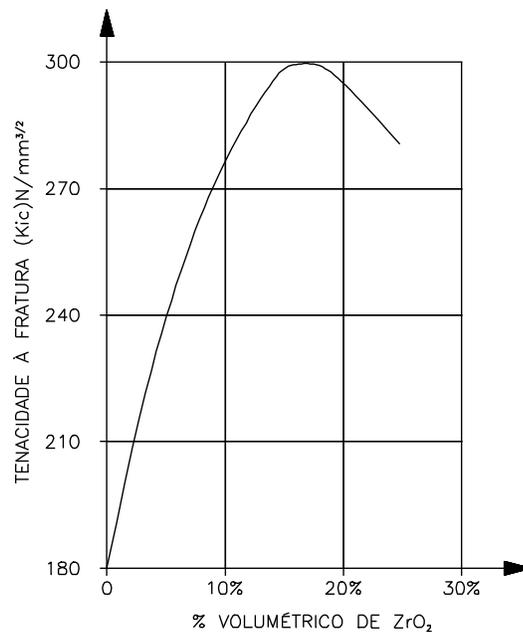


Figura 7.2. Tenacidade da cerâmica a base de Al_2O_3 em função do teor de ZrO_2 (Abel, citado por Gruss, 1987)

A adição de TiC (cerâmica mista ou preta), além de melhorar ligeiramente a tenacidade e a condutividade térmica, aumenta consideravelmente a dureza e a resistência ao desgaste da ferramenta. Com estes insertos, tem-se conseguido excelentes resultados no desbaste e acabamento de aços laminados (velocidade de 3 a 6 vezes maiores que o metal duro), ótimos resultados em acabamento e superacabamento na operação de fresamento de materiais fundidos e no torneamento de aços duros.

Outra introdução no mercado nos anos 80, que teve grande receptividade, é a ferramenta cerâmica, também a base de Al_2O_3 , reforçada com SiC (*whiskers*). Estes carbonetos são adicionados em até 20% na alumina, na forma de cilindros, de 0,5 a 6 μm de diâmetro e 10 a 80 μm de comprimento (Komanduri, 1989). A mecânica do processo de aumento da tenacidade com a adição dos *whiskers* pode ser entendida como segue: durante a propagação de uma trinca, apesar dos SiC permanecerem íntegros, sem se quebrarem, há a separação deles da matriz de Al_2O_3 , e este processo absorve grande quantidade de energia de fratura e inibe a propagação da trinca. Devido à grande resistência dos *whiskers*, a trinca não atravessa sua estrutura tendo, portanto, que desviar-se, o que também consome energia. Tudo isto aumenta a tenacidade do material. Estas ferramentas possuem, também, maior resistência ao choque térmico, devido à maior condutividade térmica do SiC em relação à alumina. As propriedades desse grupo de material são consideradas excepcionais, com aplicação na usinagem dos aços duros, aços

inoxidáveis e principalmente nas superligas de níquel (Smith, 1986). A Figura 7.3 apresenta o melhor comportamento de tenacidade de uma ferramenta de Al_2O_3 contendo ZrO_2 com a adição de SiC contra a mesma ferramenta sem SiC. Esta adição também aumenta a dureza e a resistência ao desgaste, como mostra a Figura 7.4.

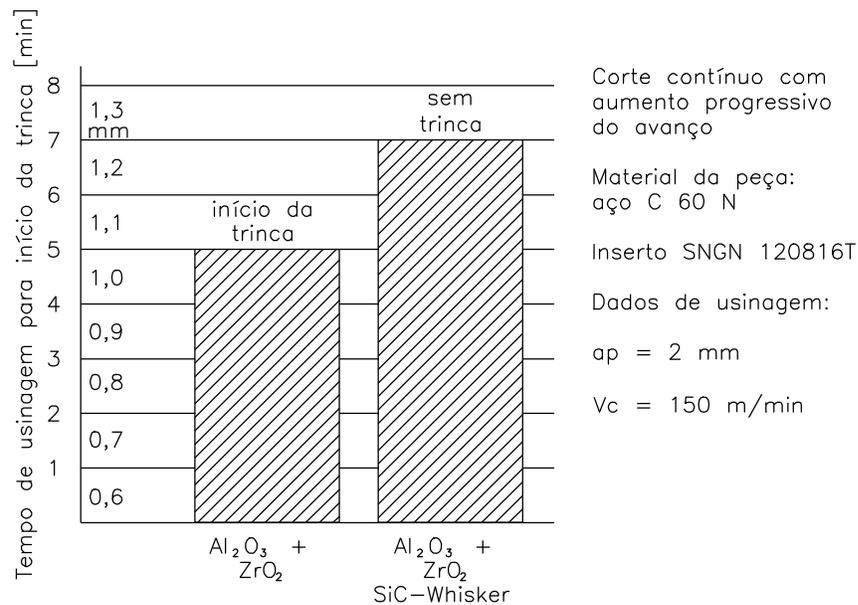


Figura 7.3. Tempo de usinagem e aumento do avanço para iniciar uma trinca em duas ferramentas cerâmicas, uma com outra sem adição de *whisker*, no corte contínuo de aço C 60 N, $v_c = 150 \text{ m/min}$ e $a_p = 2 \text{ mm}$. (Krupp Widia - Tech. Inf. HVT 78.521)

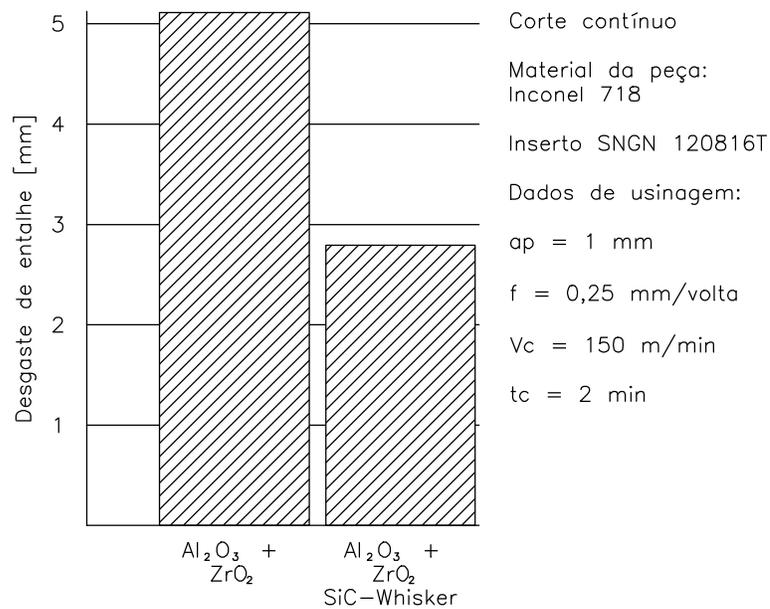


Figura 7.4. Desgaste nas ferramentas a base de alumina com e sem adição de "Whisker", no corte contínuo de Inconel 718, $v_c = 150 \text{ m/min}$, $f = 0,25 \text{ mm/volta}$, $a_p = 1 \text{ mm}$ e tempo de corte = 2 min. (Krupp Widia - Tech. Inf. HVT 78.521)

7.2 -Cerâmica a Base de Si_3N_4

Este grupo apareceu no mercado nos anos 80 tratando-se de cristais de Si_3N_4 com uma fase intergranular de SiO_2 (cristais de vidro) que são sinterizados na presença de Al_2O_3 , Y_2O_3 , MgO e outros. Com esses materiais tem-se conseguido excelentes resultados na usinagem das ligas de níquel e ferros fundidos. Entretanto, devido à grande interação química com o ferro a elevadas temperaturas, este grupo de material não tem tido sucesso na usinagem de aços (Buljan e Sarin, 1985). Um dos produtos deste grupo, que é comercializado com a marca registrada de SIALON® (nome que tem origem no símbolo dos elementos que ele contém, que são Si, Al, O e N), tem mostrado bons resultados na usinagem de aços e excelentes aplicações nas superligas de níquel. A adição de Al e O nas ferramentas desse grupo diminui as interações com o ferro e permite aplicações em aços (Buljan e Sarin, 1985). O baixo coeficiente de dilatação diminui a possibilidade de trinca térmica durante a usinagem. As cerâmicas a base de nitrato de silício possuem boa resistência ao desgaste, com tenacidade superior às das cerâmicas a base de Al_2O_3 . Isto faz com que a aplicação destes materiais chegue ao fresamento, o que pouco tempo atrás era inadmissível para as cerâmicas.

Para compensar a deficiência de menor durezas, estas cerâmicas podem ser revestidas tanto com Al_2O_3 quanto com TiC , o que garante maior resistência ao desgaste a estas ferramentas. A Figura 7.5 mostra a redução de desgaste conseguida com o revestimento de Al_2O_3 de uma cerâmica a base de Si_3N_4 .

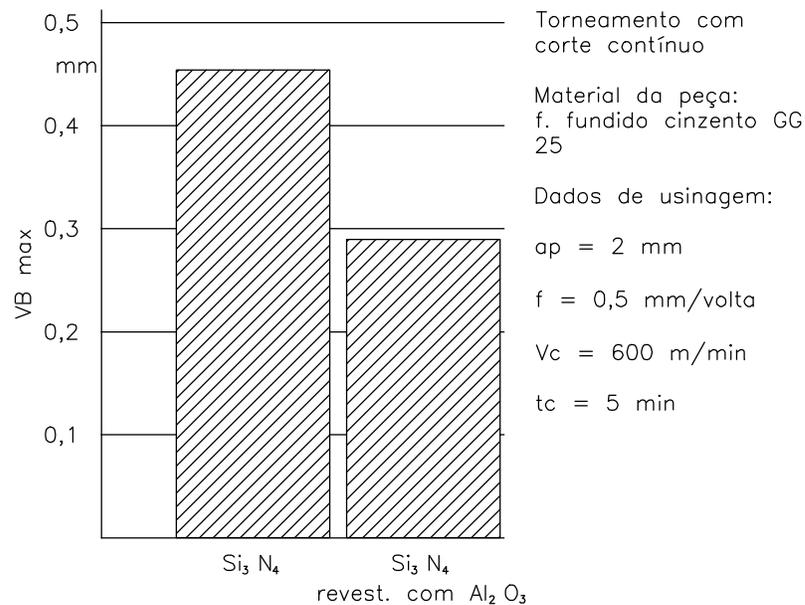


Figura 7.5. Influência do revestimento de Al_2O_3 numa ferramenta a base de Si_3N_4 no torneamento do ferro fundido cinzento, $v_c = 600 \text{ m/min}$, $f = 0,5 \text{ mm/volta}$, $a_p = 2 \text{ mm}$, $t_c = 5 \text{ min}$. (Krupp Widia - Tech. Inf. HVT 78.521)

No fresamento de ferro fundido cinzento já há aplicação corrente de cerâmicas, usando-se, cerâmicas mistas e SIALON, inclusive com uso de fluidos de corte. Na usinagem dos aços, a grande parte das aplicações fica por conta das cerâmicas mistas e óxidas (normalmente com adição de ZrO_2), com pouca aplicação de SIALON. A usinagem de superligas e de aços endurecidos é dividida entre a cerâmica mista, o SIALON e o PcBN, mas apenas no torneamento.

A aplicação de ferramentas cerâmicas exige alguns cuidados especiais, como:

- Uso dechanfros e evitar corte interrompido antes de iniciar a operação.
- O uso do fluido de corte deve ser evitado, se requerido, entretanto, usar o fluido em abundância na aresta de corte.
- Não usar aresta cortante afiada, sem chanfro ou arredondamento (*honing*);
- Usar arestas com raio de ponta;
- Preferir os maiores valores de v_c e de f possíveis;
- Usar um rígido sistema de fixação do inserto e bom assentamento da pastilha no suporte;
- Usar em máquinas-ferramentas rígidas, livre de vibrações;

A resistência mecânica de um inserto para operações de usinagem depende fortemente do ângulo de ponta e o seu aumento segue a ordem da Figura 7.6.

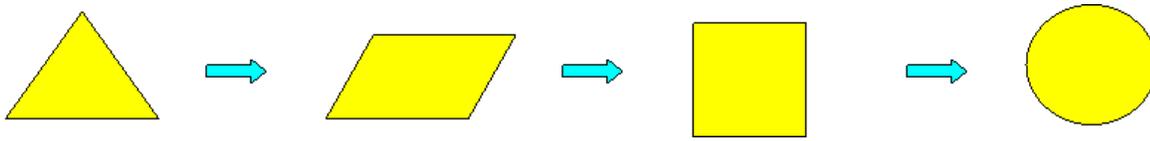


Figura 7.6. Sequência de formas de insertos que apresentam o ângulo de ponta, ϕ , crescente, com consequente aumento da resistência mecânica.

Este conceito deve ser aplicado quando da seleção da forma para os insertos em geral, mas principalmente se o material da ferramenta for cerâmica.

8. Materiais Ultraduros Para Ferramentas

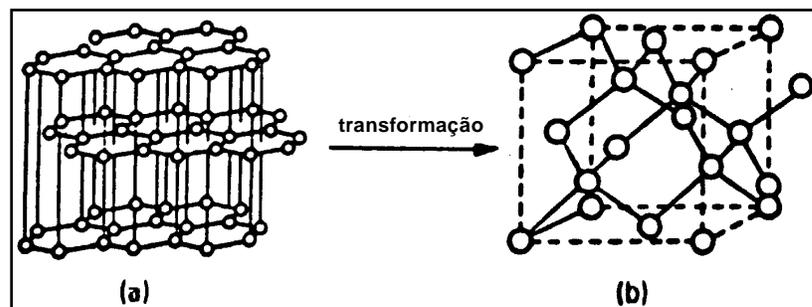
Normalmente materiais com dureza superior a 3000 HV são denominados ultraduros. Como ferramentas de corte os materiais ultraduros são:

- Diamantes naturais mono- e policristalino;
- Diamante sintético monocristalino;
- Diamante sintético policristalino (PCD- *polycrystalline diamond*);
- Nitreto cúbico de boro (cBN) monocristalino;
- Nitreto cúbico de boro policristalino (PcBN).

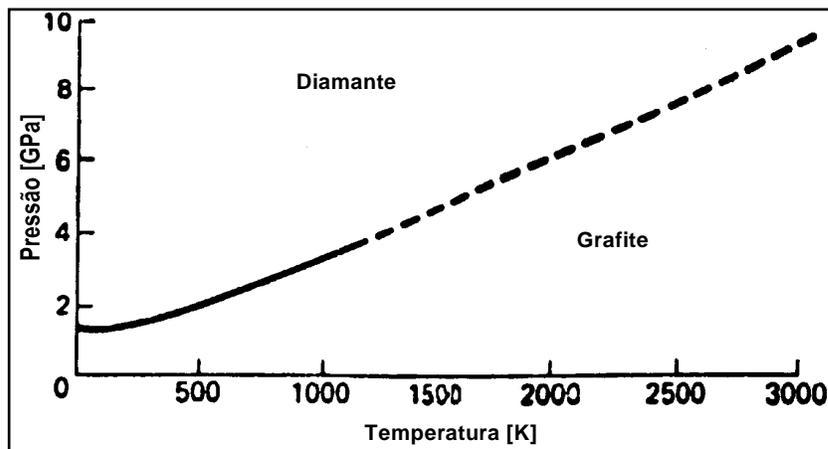
O diamante natural foi usado como ferramenta de corte por centenas de anos, pois se trata do material de maior dureza e resistência ao desgaste da natureza. Além disto, possui excelente condutividade térmica. As ferramentas de diamante natural são usadas principalmente quando se requer super-acabamento nos componentes usinados. Acabamentos superficiais da ordem de $R_a=25\text{nm}$ podem ser obtidos com estas ferramentas se a máquina-ferramenta possuir rigidez (Clark e Sen, 1998). Entretanto, devido à sua fragilidade e risco de falha sob impacto e também seu alto custo, tem sua aplicação limitada como ferramentas de corte, principalmente após o surgimento dos diamantes e CBN sintéticos, que podem substituí-lo com bastante eficiência.

Os sintéticos foram produzidos pela primeira vez nos anos 50, mas apenas no final da década de 70 entraram no mercado como ferramentas de corte. Tanto o PCD como o PcBN podem ser encontrados como uma camada de 0,5 a 1,0 mm de espessura sinterizada em uma placa de metal duro, as quais são cortadas e brasadas, geralmente em insetos de metal duro, ou então, mais raramente, usadas como insertos inteiros.

O diamante sintético é obtido sujeitando o carbono, na forma de grafite a temperaturas e pressões extremamente altas (da ordem de 2.000°C e 7 GPa). Como grafite, os átomos de carbono estão arranjados na forma hexagonal, mas após a sintetização ele se transforma em diamante, possuindo uma estrutura cúbica de face centrada (CFC). A Figura 8.1 ilustra a estrutura cristalina da grafite e do diamante e apresenta o diagrama de equilíbrio das duas formas.



a) Estrutura cristalina do grafite e do diamante

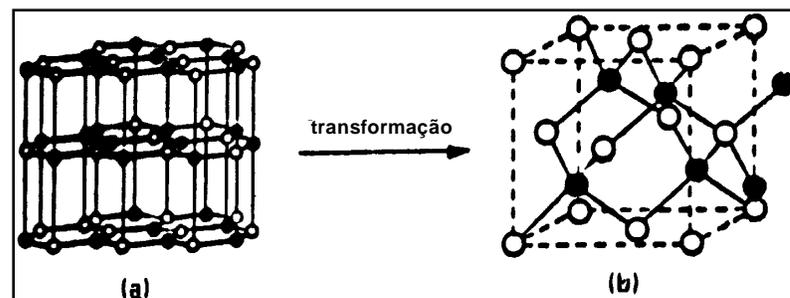


b) diagrama de equilíbrio da reação grafite-diamante

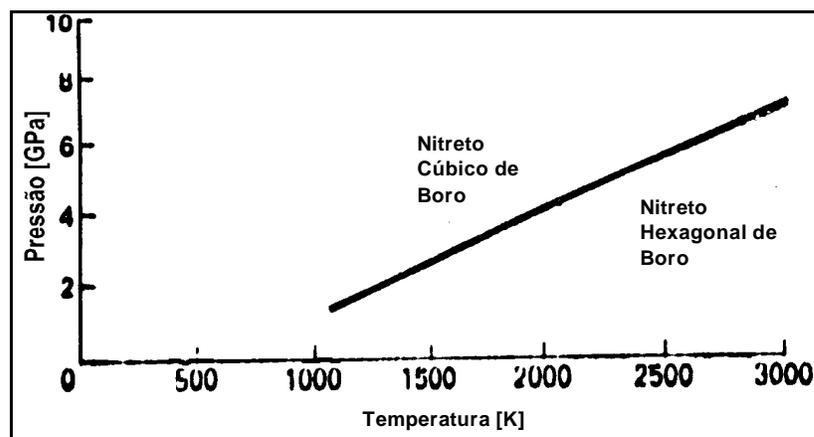
Figura 8.1 – Estruturas do grafite, do diamante e diagrama de equilíbrio grafite-diamante (Heath 1986)

Para ser mais econômico, o processo é realizado na presença de um catalizador da reação de transformação, normalmente o cobalto.

De maneira similar e pouco tempo depois de se obter o diamante sintético o hBN (nitreto hexagonal de boro) também foi transformado em cBN (nitreto cúbico de boro). Assim como a grafite, o hBN é frágil e escorregadio, enquanto o cBN é duro e resistente ao desgaste em menor escala que o diamante, mas superior às cerâmicas. A Figura 8.2 apresenta a estrutura cristalina do hBN e do cBN e o diagrama de equilíbrio, muito parecido com aquele da Figura 8.1. Para acelerar as reações, o solvente neste caso é um nitreto metálico, que reduz tanto a temperatura como a pressão de síntese para aproximadamente 1500°C e 6 GPa respectivamente (Heath, 1986). Com o andamento da transformação os cristais, sejam de diamante ou de cBN, crescem.



a) Estrutura cristalina do hBN e do CBN



b) diagrama de equilíbrio

Figura 8.2 - Estruturas do hBN, do CBN e diagrama de equilíbrio grafite-diamante (Heath 1986)

O desenvolvimento do processo de obtenção do diamante e do cBN a alta temperatura e pressão permite a produção de monocristais sintéticos da ordem de 8 mm. Assim, é possível encontrar no mercado ferramentas de monocristais de diamantes com arestas de 8 mm de comprimento e 2 mm de espessura. Este produto sintético tem a vantagem de possuir consistência no tamanho, forma e performance não encontrada nos diamantes naturais.

As ferramentas policristalinas de diamante e de cBN (PCD e PcBN, respectivamente) são obtidos pelo processo de metalurgia do pó, usando monocristais de diamante e CBN, respectivamente. Novamente, devem-se adicionar catalisadores para acelerar a sinterização. Naturalmente, durante o tratamento térmico, toda a massa do produto deve estar contida dentro da fase cúbica do respectivo diagrama de equilíbrio para evitar a reversão da fase cúbica em hexagonal. Neste processo, pode-se obter uma variedade imensa de produtos, dependendo de: tamanho de grão dos monocristais (estes dependem do tempo de permanência na câmara de transformação), solvente/catalisador empregado (devido a problemas de instabilidade térmica no produto final de PCD, a variação dos solventes utilizados são restritos, mas nos PcBN's são muitos), grau de sinterização, etc., com isto obtendo-se uma variedade muito grande nas propriedades finais dos produtos, sendo, portanto possível desenvolver produtos para aplicações específicas (Heath, 1986).

A tenacidade destes policristalinos é bem superior à dos monocristais e, portanto, o campo de aplicação é maior, apesar da maior dureza e resistência ao desgaste dos monocristais. Esta propriedade pode ser aumentada, aumentando-se o tamanho de grão dos policristais, pois inversamente ao que acontece com o metal duro, aqui a resistência ao desgaste cresce com o aumento do tamanho de grão (Clark e Sen, 1998). Entretanto, apenas quando se exige maior integridade e precisão da aresta, como no caso de usinagem de super-acabamento, o monocristal pode superar o policristal.

O revestimento de diamante conseguido pelo processo CVD, similarmente ao revestimento de metal duro, é obtido à baixa pressão. Uma mistura de gases a base de carbono e de hidrogênio são dissociados e depositados a altas temperaturas (~2000°C) e pressões abaixo da atmosférica. Nestas condições uma camada de diamante policristalina cresce, a qual pode apresentar uma variação grande no tamanho dos grãos e na textura. Uma vantagem em relação ao diamante sintético obtido a alta pressão, pelo processo convencional, é a ausência de catalisador e conseqüentemente, a estabilidade térmica é maior neste produto desenvolvido pelo processo CVD (Clark e Sen, 1998). A Figura 8.3 apresenta uma micrografia de uma camada de aproximadamente 30µm.

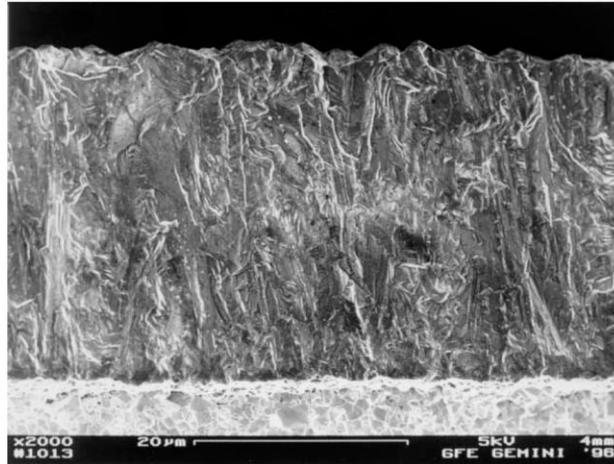


Figura 8.3. Camada de diamante desenvolvida em substrato de metal duro pelo processo CVD.

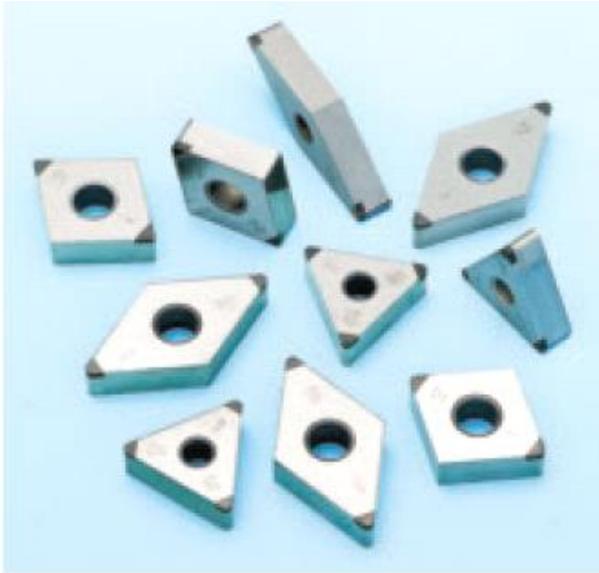
O diamante sintético tem a limitação de não poder ser utilizado na usinagem de aços ou qualquer outro material ferroso, pois ele está sujeito à reversão a grafite quando as temperaturas ultrapassam cerca de 700°C na presença de oxigênio. Mas, as ligas de alumínio, cobre puro, metais duros e materiais compostos, principalmente os compósitos de matrizes metálicas, têm-se beneficiado pelo uso do diamante.

Ao contrário, o PcBN tem-se mostrado excelente na usinagem dos aços, ligas de níquel e ferros fundidos. O PcBN é termicamente mais estável até temperaturas da ordem de 1200°C, apresentando uma resistência ao ataque químico bem maior que o diamante. Desta forma, ferramentas a base de cBN são aplicadas à usinagem de ferrosos de elevada dureza sem maiores problemas. A Tabela 8.1 apresenta as propriedades dos ultraduros em comparação com outros materiais de ferramentas de corte.

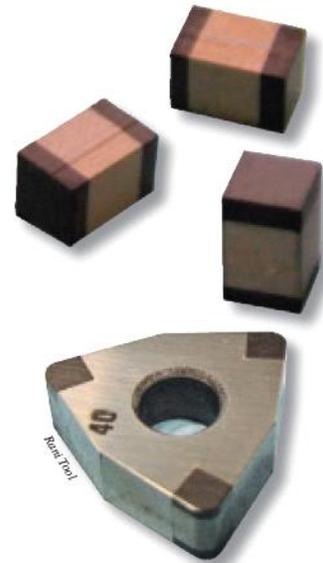
Tabela 8.1. Propriedades dos ultraduros (Brookes, 1986)

<i>Propriedades dos ultraduros</i>						
<i>Propriedade</i>	<i>Material do inserto</i>					
	<i>94WC 5Co metal duro</i>	<i>Alumina cerâmica</i>	<i>Alumina TiC cerâmica</i>	<i>Nitreto de silício cerâmica</i>	<i>Diamante policristalino</i>	<i>PCBN sólido</i>
Densidade, g/cm ³	14,7	3,9	4,3	3,2	3,4	3,1
Resist. à compressão, kN/mm ²	4,5	4,0	4,5	3,5	4,7	3,8
Dureza Knoop HK, kN/mm ²	13	16	17	13	50	28
Módulo de Young, kN/mm ²	620	380	370	300	925	680
Módulo de rigidez, kN/mm ²	250	150	160	120	430	280
Raio de Poisson	0,22	0,24	0,22	0,28	0,09	0,22
Coef. de exp. térmica, 10 ⁻⁴ /K	5,0	8,5	7,8	3,2	3,8	4,9
Condutividade térmica, W·m/K	100	23	17	22	120	100
Tenacidade à fratura K _{1C} , MN·m ^{3/2}	11	2,3	3,3	5,0	6,9	10

Observa-se que a limitação de tenacidade apresentada por algumas cerâmicas não se verifica no PcBN, cuja tenacidade chega bem próxima à do metal duro. Por esta razão e pela neutralidade química e propriedades de dureza e resistência ao desgaste desse material, ele pode ser aplicado na usinagem de praticamente todos os materiais de uso comum em engenharia, embora possa não ser economicamente viável para usinagem de certos materiais. O que mais limita a aplicação dos ultraduros ainda é o seu alto custo. Com o maior domínio da técnica de obtenção este custo deverá baixar, tornando este grupo de materiais ainda mais competitivo. Mas enquanto a técnica de obtenção continua sendo um empecilho para baixar custos, os fabricantes estão buscando alternativas para tentar reduzir estes. Devido o alto custo do produto, as ferramentas de metal duro contém arestas de PCD, ou de PcBN em uma, ou duas, arestas por inserto. A Figura 8.4 ilustra estes dois exemplos de redução de custos citados.



(a) Várias pontas de insertos



(b) Pontas nos dois lados

Figura 8.4. Alternativas para redução de custos de ultraduros. (NN(d), 2007)

9 – Seleção de Materiais para Ferramentas de Usinagem

Sendo a dureza a primeira propriedade importante para uma ferramenta de corte, a Figura 9.1 mostra a dureza dos principais grupos de materiais em função da temperatura. Nota-se que até mesmo o metal duro e as cerâmicas têm suas propriedades reduzidas com a temperatura, mas acima daquela apresentada pelos aços rápidos, por exemplo. Isto garante a aplicação destas ferramentas em condições de corte bem mais severas que aquelas a que podem se submeter os aços-rápidos.

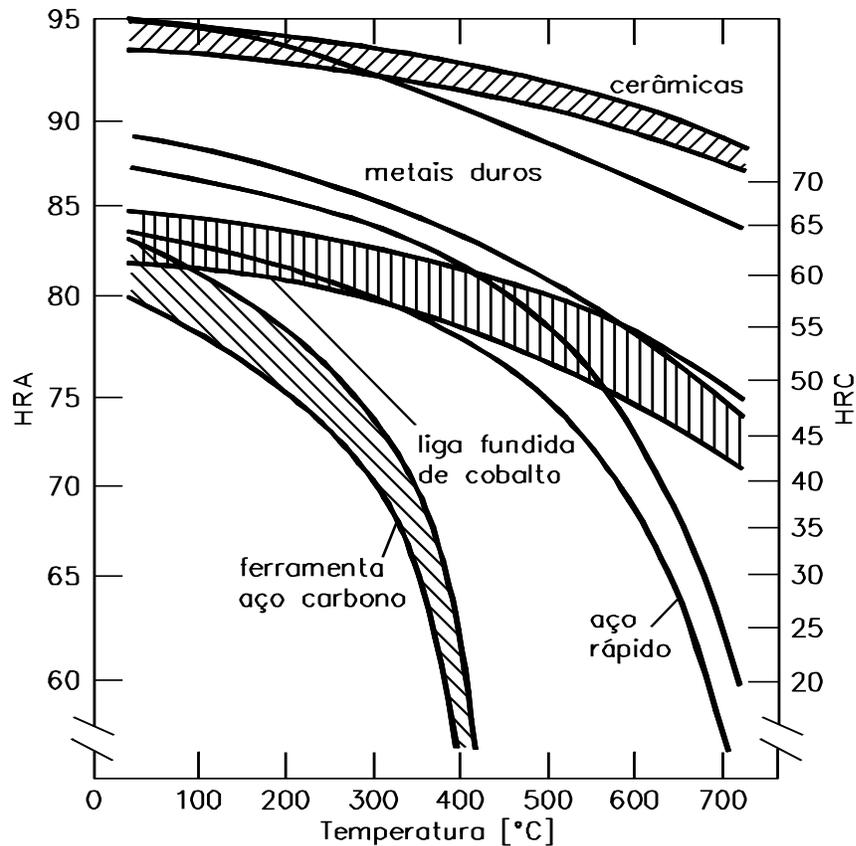


Figura 9.1. Variação da dureza de alguns materiais de ferramentas de corte com a temperatura (Komanduri, 1997).

As propriedades de dureza e resistência ao desgaste estão, também, diretamente relacionadas com a capacidade de imprimir altas velocidades aos processos, já que esse parâmetro é o principal responsável pelo aumento de temperatura. Esta relação é ilustrada na Figura 9.2, onde se observa a evolução das velocidades de corte ao longo dos anos, relacionada com o aparecimento dos diversos grupos de ferramentas de corte. Apesar de não estarem indicados, os materiais ultraduros, surgidos na década de 80, podem apresentar velocidades ainda superiores àquelas indicadas no diagrama, em algumas aplicações.

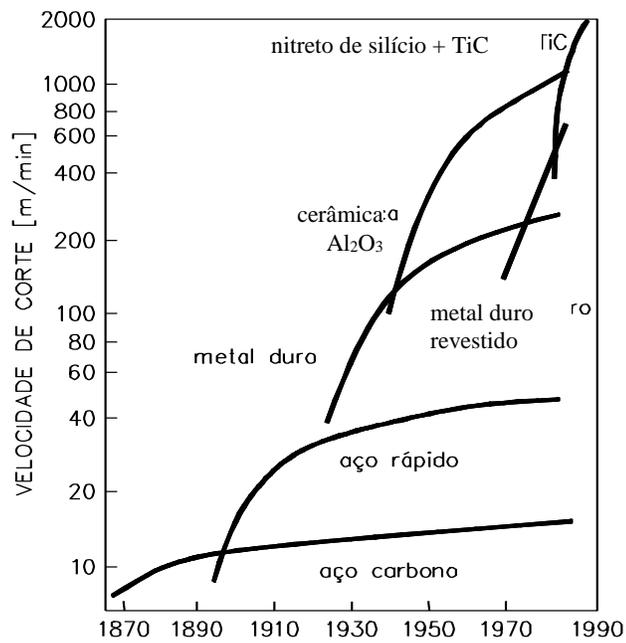


Figura 9.2. Aumento das velocidades de corte conseguido no último século (Pastor, 1987)

A Tabela 9.1 apresenta algumas das principais propriedades de ferramentas de corte selecionadas. Numa seleção, é de extrema importância conhecer estas propriedades, mas deve-se conhecer, também, quando e onde estas propriedades são requeridas. Na seleção do material de ferramenta de corte para uma aplicação específica, o grande número de ferramentas existentes no mercado dificulta a decisão e torna a tarefa relativamente complexa. Todas aquelas propriedades requeridas, listadas anteriormente, devem ser consideradas, mas o engenheiro deve ter conhecimento suficiente para destacar as mais importantes, em função da aplicação a que se destina o material.

Tabela 9.1. Dados quantitativos das principais propriedades das ferramentas de corte (Abrão, 1995)

Propriedades do material da ferramenta	Aço rápido (M2)	Carboneto de tungstênio (M20)	Alumina branca	Alumina mista	Alumina reforçada com whisker	Cerâmica à base de nitreto de silício	PCBN	Diamante natural	PCD
Composição básica*	0,85%pC 4%pCr 5%pMo 6,5%pW 2%pV	80,5%pWC 10%pCo 9,5%pOutros	90-95% Al ₂ O ₃ 5-10% ZrO ₂	Al ₂ O ₃ 30% TiC 5-10% ZrO ₂	75% Al ₂ O ₃ 25% SiC	77% Si ₃ N ₄ 13% Al ₂ O ₃ 10% Y ₂ O ₃	98%CBN 2%AIB ₂ / AlN		PCD 2-8% Co
Densidade (g/cm ³)	7,85	14,5	3,8-4,0	4,3	3,7	3,2	3,1	3,5	3,4
Dureza à TA (HV)	850	1600	1700	1900	2000	1600	4000	10000	8000-10000
Dureza à 1000°C (HV)	n.a.	≈400	650	800	900	900	≈1800	n.a.	n.a.
Resistência à fratura (MPa·m ^{1/2})	17	13	1,9	2	8	6	10	3,4	7,9
Condutividade térmica (W/m °C)	37	85	8-10	12-18	32	23	100	900	560
Módulo de Young (kN/mm ²)	250	580	380	420	390	300	680	964	841
Coefficiente de expansão térmica (x10 ⁻⁶ /K)	12	5,5	8,5	8	6,4	3,2	4,9	1,5-4,8	3,8
Custo aproximado por barra** (US\$)	72,54 (barra 25x25x200 mm)	0,61	0,83	1,08	4,5	2,25	72-108	225-252	54-90

*por volume a menos que indicado.

**custo referente à ISO SNGN 120416

O material de ferramenta ideal deveria ter a dureza do diamante natural, a tenacidade do aço rápido e a inércia química da alumina, porém ainda não existe. Deve-se considerar também, que nem sempre o melhor material é aquele que garante uma maior vida à ferramenta de corte. Às vezes, confiabilidade e previsibilidade de desempenho são mais importantes, e isto é tanto mais relevante quanto maior for o custo do material da peça. No processo de seleção é importante que o engenheiro entenda qual o tipo de dano que a ferramenta sofrerá (avaria, deformação plástica ou desgaste) e os mecanismos envolvidos, para ser capaz de recomendar a ferramenta de corte mais apropriada para cada situação.

A Figura 9.3 mostra uma metodologia que pode ser empregada para selecionar a ferramenta de corte, sua geometria e as condições de corte para uma dada aplicação. Observa-se que o número de fatores a considerar é grande e a decisão final deve recair na ferramenta e na condição de corte que apresentarem o melhor desempenho, confirmadas pelos testes experimentais realizados em laboratórios de pesquisas.



Figura 9.3. Metodologia para seleção da ferramenta de corte, sua geometria e condições de corte para uma dada aplicação (Adaptado de Komanduri, 1997).

É importante analisar estas propriedades e interpretar corretamente os requisitos dos materiais para ferramentas de corte para cada aplicação individual, para então poder selecionar a ferramenta corretamente. O módulo de elasticidade deve ser considerado na definição da rigidez elástica da ferramenta. Quanto maior menor a variação elástica durante o carregamento da ferramenta. A dureza está ligada à resistência ao desgaste abrasivo, enquanto a tenacidade significa a capacidade do material absorver energia antes de se romper, ou seja, resistência ao impacto. O coeficiente de dilatação térmica e a condutividade térmica indicam a resistência ao choque térmico. Quanto menor o coeficiente de dilatação e maior a condutividade térmica, maior a resistência ao choque térmico.

A variedade de ferramentas de corte disponível no mercado cresceu muito durante anos 80, principalmente devido à exigência de avanços tecnológicos ou para suprir as necessidades dos mais diversos grupos de materiais a usinar, visando sempre o aumento da produtividade e a economia no corte. Com a disponibilidade de uma maior variedade de materiais de ferramentas no mercado a escolha correta torna-se uma tarefa cada vez mais engenhosa. Conhecer o processo e entender os mecanismos de desgaste

das ferramentas é fundamental para que se chegue a uma ótima escolha, melhorado a economia e a produtividade da usinagem. Devido à complexidade do processo de usinagem é muito difícil uma teoria preditiva. Uma solução prática fundamentada em muitas experiências deve ser adotada.

A atual qualidade das ferramentas de corte permite a aplicação de altíssimas velocidades de corte e de avanço, em diferentes processos de usinagem. Na atualidade, HSM - *High Speed Machining* e UHSM - *Ultra High Speed Machining* (ou HSC – *High Speed Cutting*) são termos comuns no meio de fabricação. Além de vantagens diretas, a aplicação desses processos elimina a operação de acabamento, o que significa grandes ganhos. Toda esta evolução é um processo que depende do crescimento de todo o sistema. Não se pode falar em HSM ou UHSM sem falar em ferramentas resistentes e na evolução das máquinas-ferramentas. Aliás, este é outro ponto importante que deve ser colocado para todos os que querem evoluir nas técnicas de usinagem: cada vez mais se exigem máquinas-ferramentas mais potentes, precisas e rígidas.

10 - Referências Bibliográficas

- ABRÃO, A.M., (1995), "The Machining of Annealed and Hardened Steels Using Advanced Ceramic Cutting Tools", PhD Thesis, University of Birmingham, UK.
- ASM HANDBOOK, (1990), "Properties and Selection: Nonferrous Alloys and Special – Purpose Materials", Volume 2, tenth edition, ASM International, USA.
- ÁVILA, R.F., (2003), "Desempenho de Ferramentas de Metal Duro Revestidas com TiN, TiCN e TiAlN (PAPVD) no Torneamento do Aço BNT 4340 Temperado e Revenido". Tese de doutorado, UFMG, Programa de PG em Engenharia Metalúrgica e de Minas, Belo Horizonte – MG, 29.04.2003.
- BROOKES, K.J.^a, (1986), "Hard and Superhard Tools Are a Cut Above the Rest", Metal Working Production, October, pp. 92-104.
- BULJAN, S.T.; SARIN, V.K., (1985), "The Future of Silicon Nitride Cutting Tools", The Carbide and Tool Journal, May and June, pp. 4-7.
- CHIAVERINI, V.,(1979), "Aços e Ferros Fundidos", 4ª Edição, ABM, São Paulo.
- CLARK, I.E. and SEM, P.K., (1998), "Advances in the Development of Ultrahard Cutting Tool Material", Industrial Diamond Review, N° 2, pp. 40-44.
- De GARMO, E.P.; BLACK, J.T.; KOHSE, R., (1988), "Material and Processes in Manufacturing", seventh edition, Macmillan Publishing Company, New York, USA, 1172 p.
- DROZDA, T.J., (1985), "Ceramic Tools Find New Applications", Manufacturing Engineering, May, pp. 34-39.
- EZUGWU, E.O.; WALLBANK, J. (1987), "Manufacture and Properties of Ceramic Cutting Tools: A Review", Materials Science and Technology, November, vol. 3, pp. 881-887.
- FERRARESI, D., (1977), "Fundamentos da Usinagem dos Metais", Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo.
- HEATH, P.J., (1986), "Properties and Uses of Amorbite", Industrial Diamond Review, N° 3, pp. 120-127.
- HUANG, C.; WANG, J.; XU, L.; WANG, S.; LIU, H., (2006), "Microstructure and Mechanical Properties of Nano-Scale Al₂O₃ Toughened Ti(C,N) Matrix Cermet Tool Material", Materials Science Fórum, Vol 532-533, pp 37-40.
- ISCAR(a), 2007, Sistema de Identificação de Porta-ferramenta Iscar, obtido da web: http://www.iscardobrasil.com.br/ProductLines/PDF/SistemaDeIdentificacao4_468.pdf, acessado em 4 de novembro de 2007.
- ISCAR(b), 2007, Sistema de Identificação de Pastilha, Obtido do sítio web: http://www.iscardobrasil.com.br/ProductLines/PDF/SistemadePastilhas4_469.pdf, acessado em 4 de novembro de 2007.

- ISO, Standard nº 513, 2004 (E): “*Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges – designation of main groups and groups of application*”.
- ISO, Standard nº 1832, 2004: “*Indexable inserts for cutting tools – Designation*”.
- JACK, D.H., (1987), “Hard Materials for Metal Cutting”, Metals and Materials, September, pp 516 - 520.
- KALPAKAJIAN, S., (1984), “Manufacturing Processes for Engineering Materials”, Addison-Wesley Publishinn Company, USA, 839 pgs.
- KOLASKA, H. and DREYER, K., (1990), “Metal Duro, Cermets e Cerâmica”, Metal Mecânica, Set/Out., pp 62 – 70.
- KOMANDURI, R., (1989), “Advanced Ceramic Tool Materials for Machining”, Int. J of Refractory Materials & Hard Metals, June, pp. 125 -132.
- KOMANDURI, R., (1997), “Tool Materials”, Kirk-Othmer Encyclopedia of Chemical Technology, Fourth Edition, Vol. 24, ISBN 0-471-52693-2, John Wiley ans Sons Inc., pp 390 - 455.
- KOMANDURI, R.; DESAI, J.D., (1982), “Tool Materials for Machining”, General Electric - Technical Information Series, number 82 CRD, August, 32 pags.
- MARCONDES, F.C., (1990), “A História do Metal Duro”, Sandvik Coromant, CPA – Consultoria de Projetos e Arte, SP, 240 pgs.
- MITSUBISHI, (2005), “Mitsubishi Tooling Technology – Level 1”, 162 pgs.
- MOMPER, I.F., (1987), “Flexible Production With Ceramics”, Production Engineer, May, pp. 18-19.
- NN(a), acessado em 2 de novembro de 2007, no sítio da web: http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=BALZERS_EN_balinit_coatings
- NN(b), acesso em 2 de novembro de 2007, no sítio da web: http://www.oerlikon.com/ecomaXL/index.php?site=COATING_SERVICES_EN_INNOVA
- NN(c), 2007, Cutting Tool Engineering Magazine, January, vol. 59, nº 1.
- NN(d), (2007), Cutting Tool Engineering Magazine, August , vol. 59, nº 8.
- NORTH, B. and BAKER, R.D., (1984), “Silicon Nitride-Based (Sialon) Metalcutting Tools? Properties and Applications”, R & HM, March, pp. 46-51.
- PASTOR, H., (1987), “Present Status and development of Tool Materials: Part 1 Cutting Tools”, Interantional Journal of Refractory ard Metals, vol. 6, nº 4, December, pp 196 - 209.
- QUINTO, D.T.; SANTHANAM, A.T. and JINDAL, P.C., (1988), “Mechanical Properties, Structure and Performance of Chemically Vapor-Deposited and Phisically Vapor Deposited Coated Carbide Tools”, Materials Science and Engineering, A105/106, pp 443 - 452.
- RIDHOUGH, M., (1970), “Cast Cobalt Alloy Cutting Metal”, Materials for Metal Cutting , Proc. Conf. Of BIRSA, Scarborough, 14 - 16 April, pp 119 - 121.
- SANDVIK, CIMM – Centro de Informação Metal Mecânica, sítio na web: http://www.cimm.com.br/cimm/geral/jsps/frame_univers.jsp?pagina=http://construtor.cimm.com.br/cgi-win/construt.cgi?configuradorresultado&id=920&construt=true, acesso em 3 de novembro de 2007.
- Sandvik, (2007), material didático distribuído pela empresa.
- SMITH, G.T., (1989), ”Advanced Machining – The Handbook of Cutting Technology”, IFS Publications, England.
- SMITH, K.H., (1986), “Whisker Reinforced Ceramic Composite Cutting Tools”, Carbide and Tool Journal, September / October, pp. 8-11.
- TöNSHOFF, H.K. and BARTSCH, S., (1988), “Performance of Ceramic Cutting Tool Materials in Dependence on their Specific Properties”, Intersociety Symp on Machining of Advanced Ceramic Materials and Components, Winter Annual Meeting of ASME, Chicago, Illinois, 27th November to 2nd December, pp. 229-241.
- WERTHEIM, R.; SIVAN, R.; PORAT,R. and BER, A., (1982), “Characterization of CVD Coated Carbide Layers and their Thermal Properties”, Annals of CIRP, vol 31, Nº 1, pp 7- 11.
- ZELINSKI, P., (2007), “Cermets Get Assertive”, Modern Machine Shop on line, Available at the website: <http://www.mmsonline.com/articles/010603.html>, accessed in November the 4th, 2007.

