

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO MARANHÃO  
CENTRO DE CIÊNCIAS TECNOLÓGICAS - CCT  
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA E PRODUÇÃO

**ALEXSANDRO SANTOS DA CRUZ**

**CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE FERRAMENTAS  
DE CORTE EMPREGADAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM**

SÃO LUÍS – MA  
2018

**ALEXSANDRO SANTOS DA CRUZ**

**CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE FERRAMENTAS  
DE CORTE EMPREGADAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), Campus Paulo VI.

Orientador: Dr.º Jean R. Pereira Rodrigues

Cruz, Alessandro Santos da.

Características e propriedades dos materiais de ferramenta de corte empregadas nos processos de usinagem / Alessandro Santos da Cruz. – São Luís, 2018.

61 f.

Monografia (Graduação) – Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, 2018.

Orientador: Prof. Dr. Jean Robert Pereira Rodrigues.

1. Ferramenta de corte. 2. Usinagem. 3. Propriedades das ferramentas de corte. I. Título.

CDU 621.98

# **CARACTERÍSTICAS E PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE FERRAMENTAS DE CORTE EMPREGADAS NOS PROCESSOS DE USINAGEM**

Monografia apresentada ao curso de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual do Maranhão – UEMA, para obtenção de título de Bacharel em Engenharia Mecânica, pela Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Centro de Ciências Tecnológicas (CCT), Campus Paulo VI.

Aprovado em:        /        /

## **BANCA EXAMINADORA**

---

**Professor Dr.º Jean Robert Pereira Rodrigues (Orientador)**  
Universidade Estadual do Maranhão

---

**Professor Dr.º José Roberto Pereira Rodrigues**  
Coordenação de Engenharia química COEQ/CCET/UFMA  
Universidade Federal do Maranhão

---

**Mestrando Sebastião Raimundo de Jesus Belém Leitão Filho**  
Instituto Federal do Maranhão

Dedico este trabalho a Deus. A minha adorável  
mãe: Raimunda Rodrigues, a você devo todas  
as minhas conquistas.

## **AGRADECIMENTOS**

Primeiramente a Deus por me fazer acreditar sempre e nunca desistir dos meus sonhos, e por todas as benções concedidas e oportunidades para o desenvolvimento desse trabalho.

Ao Prof.º Dr. Jean Robert pela orientação, por ter contribuído para minha formação, sempre disposto a esclarecer todas minhas dúvidas e desempenhado um excelente trabalho como orientador.

A minha mãe Raimunda Rodrigues dos Santos, por ter me ensinado o caminho correto e estar presente em todos os momentos de minha vida, por ter acreditado em mim dando-me força na minha jornada.

A todos aos meus amigos do curso de Engenharia Mecânica por todo apoio, incentivo e momentos que tivemos de estudos em grupo.

Aos amigos e profissionais que tanto contribuíram para concretização desse trabalho.

Aos Professores do Departamento de Engenharia Mecânica da UEMA, por intermédio dos quais recebi conhecimentos teórico para chegar até aqui.

A todas as outras pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

*“O que precisamos é de mais pessoas especializadas no impossível.”*

*(Theodore Roethke)*

## RESUMO

Ao longo dos anos, as industriais do processo de usinagem buscaram alternativas no sentido de desenvolver mais resistência para a fabricação de ferramentas de corte. De maneira geral os materiais utilizados em ferramentas de corte devem satisfazer um conjunto de requisitos mais rigoroso para a maior parte dos materiais de engenharia, no qual devem ser consideradas não apenas as propriedades mecânicas à temperatura ambiente, mas também o comportamento dos materiais a temperaturas elevadas. O objetivo desse trabalho visa estudar evolução das ferramentas de corte, bem como as características dos materiais das ferramentas de corte, visando esclarecer possíveis dúvidas existentes quanto a suas propriedades, características e aplicabilidade e desta maneira proporcionar um melhor aprendizado para seleção adequada de acordo com o tipo específico de material a ser processado. Portanto o trabalho apresenta as propriedades do material das ferramenta de corte, de forma a explicar o material adequado para cada uso determinado no processo de usinagem.

**Palavras-chave:** Ferramenta de Corte, Usinagem, Propriedades das Ferramentas

## **ABSTRACT**

Over the years, the machinists have sought alternatives to develop more resistance to the production of cutting tools. In general, the materials used in cutting tools must satisfy a more stringent set of requirements for most engineering materials in which not only the mechanical properties at room temperature but also the behavior of materials at elevated temperatures . The objective of this work is to study the evolution of cutting tools, as well as the characteristics of cutting tool materials and their applicability, in order to clarify possible doubts regarding their properties, characteristics and applicability and thus to provide a better learning for proper selection of according to the specific type of material to be processed. Therefore the work presents the properties of each material of the cutting tool, in order to clarify the material suitable for each determined use in the machining process. In this way it was realized that the cutting tool is related in the balance between hardness and toughness, where these properties are of great importance for the performance of cutting tools in the machining.

**Keywords:** Cutting Tool, Machining, Tool Properties

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2.1 - Processo de fabricação por remoção.....</b>  | <b>18</b> |
| <b>2.2 - Diagrama de dureza x tenacidade dos materiais das ferramentas.....</b>                     | <b>25</b> |
| <b>2.3 - Materiais para ferramenta de corte.....</b>  | <b>28</b> |
| <b>2.4 - Futuro desenvolvimento de substratos para aplicação em ferramentas.....</b>                | <b>29</b> |
| <b>2.5 - Principais ângulos de ferramenta conforme a DIN 6581.....</b>                              | <b>30</b> |
| <b>2.6 - Diversos tipos de ferramenta multicortante em aço rápido.....</b>                          | <b>34</b> |
| <b>2.7 - Divisão de materiais cerâmicos para ferramenta de corte.....</b>                           | <b>38</b> |
| <b>2.8 - Materiais empregados para ferramentas de corte.....</b>                                    | <b>45</b> |
| <b>2.9 - Dureza dos materiais para ferramentas de corte.....</b>                                    | <b>46</b> |
| <b>2.10 - Valores da dureza com relação à temperatura para determinado materiais...</b>             | <b>49</b> |
| <b>2.11 - Variação da resistência à compressão com a temperatura para insertos de cerâmica.....</b> | <b>50</b> |

## LISTA DE TABELAS

|   |           |
|---|-----------|
| <b>2.1 – Classificação dos aços carbono para ferramentas de corte.....</b>              | <b>20</b> |
| <b>2.2 – Categorias de aços ferramenta existente.....</b>                               | <b>32</b> |
| <b>2.3 – Composição química dos principais aços rápidos.....</b>                        | <b>34</b> |
| <b>2.4 – Características do metal duro.....</b>   | <b>35</b> |
| <b>2.5 – Comparação de propriedades físicas da cermet (TiC) com o metal duro (WC)</b>   | <b>40</b> |
| <b>2.6 – Composição de propriedades físicas de materiais de ferramenta de usinagem.</b> | <b>43</b> |
| <b>2.7 – Principais propriedades do diamante.....</b>                                   | <b>50</b> |

## LISTA DE SIGLAS

$Al_2O_3$  – Óxido de Alumínio ou Alumina

AlCrN – Nitreto de Cromo de Alumínio

C – Carbono

CBN – Nitreto Cúbico de Boro

CBN – Nitreto Cúbico de Boro

Co – Cobalto

Co – Cobalto

Cr – Cromo

CrN – Nitreto de Cromo

CVD – Chemical Vapour Deposition

HSM – High Speed Machining

HV – Dureza

Mn – Manganês

$Mo_2C$  – Carboneto de Molibdênio

$MoS_2$  – Bissulfeto de Molibdênio

NbC – Carboneto de NIÓBIO

NbC – Nióbio

Ni – Níquel

PCD – Polycrystalline Compact Diamond

PVD – Physical Vapour Deposition

$Si_3N_4$  – Nitreto de Silício

SiC – Carboneto de Silício

TaC – Carboneto de Tântalo

TaC – Tântalo

TiC – Carbeto de Titânio

TiN – Nitreto de Titânio

TiN – Nitreto de Titânio

W – Tungstênio

Wc – Carboneto de Tungstênio

WC + Co – Metal Duro

## SUMÁRIO

|   |             |
|---|-------------|
| <b>FOLHA DE APROVAÇÃO.....</b>  | <b>i</b>    |
| <b>AGRADECIMENTOS.....</b>  | <b>iii</b>  |
| <b>RESUMO.....</b>  | <b>v</b>    |
| <b>ABSTRACT.....</b>  | <b>vii</b>  |
| <b>SUMÁRIO.....</b>   | <b>ix</b>   |
| <b>ÍNDICES DE ILUSTRAÇÕES.....</b>  | <b>xi</b>   |
| <b>ÍNDICES DE TABELAS.....</b>  | <b>xiii</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO.....</b>  | <b>14</b>   |
| <b>1.1 OBJETIVOS.....</b>   | <b>16</b>   |
| <b>1.1.1 Objetivo Geral.....</b>  | <b>16</b>   |
| <b>1.1.2 Objetivos Específicos.....</b>   | <b>16</b>   |
| <b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>   | <b>17</b>   |
| <b>2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS.....</b>  | <b>17</b>   |
| <b>2.2 PROCESSO POR REMOÇÃO (USINAGEM).....</b>   | <b>18</b>   |
| <b>2.3 EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE.....</b> | <b>20</b>   |
| <b>2.3.1 Aços Carbono e Aços Liga.....</b>  | <b>20</b>   |
| <b>2.3.2 Ferramentas de Aço-Rápido.....</b>   | <b>21</b>   |
| <b>2.3.3 Ferramentas de Aço-Rápido com Revestimentos Tribológicos.....</b>                | <b>23</b>   |
| <b>2.3.4 Ligas Fundidas.....</b>  | <b>24</b>   |
| <b>2.3.5 Ferramentas de Metal Duro.....</b>   | <b>24</b>   |
| <b>2.3.6 Cermets.....</b>   | <b>26</b>   |
| <b>2.3.7 Cerâmicas.....</b>   | <b>26</b>   |
| <b>2.3.8 Materiais de Ferramentas Ultraduros.....</b>                                     | <b>26</b>   |
| <b>2.3.9 Ferramenta de Corte.....</b>   | <b>28</b>   |
| <b>2.3.10 Geometria da Ferramenta de Corte.....</b>                                       | <b>30</b>   |
| <b>2.3.11 Vida da Ferramenta de Corte.....</b>  | <b>31</b>   |
| <b>2.3.12 Materiais de Ferramenta de Corte.....</b>                                       | <b>32</b>   |
| <b>2.3.12.1 Aço Ferramenta.....</b>   | <b>32</b>   |
| <b>2.3.12.2 Aço Rápido.....</b>   | <b>33</b>   |
| <b>2.3.12.3 Metal Duro.....</b>   | <b>35</b>   |
| <b>2.3.12.4 Cerâmicas.....</b>  | <b>37</b>   |

|  |           |
|--|-----------|
| 2.3.12.4.1 Cerâmica Pura, Branca ou Óxida .....                                  | 38        |
| 2.3.12.4.2 Alumina Reforçada com Whiskers de SiC .....                           | 39        |
| 2.3.12.4.3 Sialon.....   | 39        |
| 2.3.12.5 Cermets.....  | 39        |
| 2.3.12.6 Diamante.....   | 42        |
| 2.3.12.7 Nitreto Cúbico de Boro.....   | 43        |
| <b>2.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE FERRAMENTA DE CORTE.....</b>                | <b>45</b> |
| <b>2.4.1 Aço Rápido .....</b>  | <b>47</b> |
| <b>2.4.2 Metal Duro .....</b>  | <b>47</b> |
| <b>2.4.3 Cerâmicos .....</b>   | <b>48</b> |
| 2.4.3.1 Resistência às Reações Químicas .....                                    | 48        |
| 2.4.3.2 Resistência ao Choque Térmico .....                                      | 48        |
| 2.4.3.3 Dureza.....  | 49        |
| 2.4.3.4 Resistência Mecânica .....   | 49        |
| <b>2.4.4 Diamante .....</b>  | <b>50</b> |
| <b>2.4.5 Nitreto de Boro .....</b>   | <b>51</b> |
| <b>3 APLICABILIDADE DAS FERRAMENTAS DE CORTE NOS PROCESSOS DE USINAGEM. ....</b> | <b>54</b> |
| <b>3.1 AÇO RÁPIDO .....</b>  | <b>54</b> |
| <b>3.2 APLICAÇÕES PARA OS INSERTOS CERÂMICOS .....</b>                           | <b>54</b> |
| <b>3.3 APLICAÇÕES DOS INSERTOS PCBN.....</b>                                     | <b>55</b> |
| <b>3.4 APLICAÇÕES DE FERRAMENTA COM METAL DURO .....</b>                         | <b>56</b> |
| <b>4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS.....</b>                           | <b>57</b> |
| <b>4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>   | <b>57</b> |
| <b>4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>                                | <b>58</b> |
| <b>REFERÊNCIAS .....</b>   | <b>59</b> |

## 1 INTRODUÇÃO

Os processos de fabricação tem evoluído nos últimos 30 anos, de forma que os materiais são bem mais trabalhados eficientemente e com menores perdas, em menor dimensão, a conversão de materiais de uma forma para outra implica em somar valores ao produto final. Os materiais precisam ser corretamente combinados para alcançar baixo custo (STEMMER, 2001).

A ferramenta foi um dos primeiros instrumentos a ser utilizado pelo homem. Com o passar dos anos, foi-se aperfeiçoando a qualidade dos materiais utilizados na fabricação desse instrumentos. A utilização de máquinas-ferramentas modernas e com uma rigidez considerável, potência disponível e velocidade de operação, permitem a utilização de condições de usinagem mais fortes, de forma a aumentar a produtividade dos processos de usinagem nas indústrias. Nos últimos anos, houve uma evolução na qualidade das ferramentas de corte, em função da aplicação da usinagem de materiais endurecidos e de novas ligas de materiais, permitindo assim, melhoria no processo de corte e extensão da vida das ferramentas (AMORIM, 2002).

Os processos de usinagem convencional em geral baseiam-se no corte de uma peça utilizando-se uma ferramenta de corte. Este corte só é possível porque a ferramenta possui uma dureza mais elevada do que a peça. Dessa forma, com o constante surgimento de novas ligas, com propriedades mecânicas e durezas cada vez maiores, criou-se uma demanda contínua por novos materiais de ferramenta, com propriedades à altura dessas ligas. Por outro lado, a usinagem de materiais frágeis e/ou operações de cortes interrompidos (como o caso do fresamento, por exemplo) requerem materiais de ferramentas com suficiente tenacidade para suportarem os choques e os impactos inerentes a tais processos (AMORIM, 2002).

De maneira geral os materiais utilizados em ferramentas de corte devem satisfazer um conjunto de requisitos mais rigoroso do que a maior parte dos materiais de engenharia, no qual devem ser consideradas não apenas as propriedades mecânicas à temperatura ambiente, mas também o comportamento dos materiais a temperaturas elevadas. Algumas propriedades podem ser listadas como de grande importância para que uma ferramenta de corte possa ser eficiente, tais como elevada dureza a quente, alta tenacidade à fratura, resistência à compressão, resistência ao desgaste, resistência à oxidação e estabilidade química a altas temperaturas. Apesar da necessidade destas características não há um único material que combine simultaneamente todas as propriedades, principalmente elevada dureza e alta tenacidade, pois em boa parte dos materiais estas propriedades são mutuamente exclusivas, desta forma a seleção da ferramenta de corte deve ser feita considerando o processo, o acabamento necessário na peça e o material usinado (TONELLO, 2013).

No desenvolvimento dos processos de usinagem, as ferramentas de cortes são as que têm o mais intenso progresso. Desde a utilização de ferramentas de aço carbono temperado, passando pelo aço rápido desenvolvido por Taylor e White, o metal duro desenvolvido por Voigtlander e Lohman, até o uso de ferramentas de diamante policristalino e as modernas coberturas para ferramentas, passamos a usinar uma peça que demoraria 100 minutos em menos de 1 minuto (FERRARESI, 1977).

O presente trabalho encontra sua justificativa, pois, mesmo com o alto nível de desempenho alcançado atualmente nas máquinas de usinagem, a produtividade continua limitada a performance da ferramenta de corte. E sendo a ferramenta a parte mais crítica do sistema de usinagem, muito se tem pesquisado e investido na busca de materiais visando otimização da produção e sucesso no corte de materiais. O que torna a compreensão do tema tratado, de grande valia a toda comunidade acadêmica.

O trabalho discutirá a evolução tecnológica das ferramentas de corte empregada nos processos de usinagem convencional, visando esclarecer possíveis dúvidas existentes quanto às suas propriedades, características e aplicabilidade e desta maneira proporcionar um melhor aprendizado para seleção adequada de acordo com o tipo específico de material a ser processado.

## **1.1 OBJETIVOS**

### **1.1.1 Objetivo Geral**

De maneira geral, esse trabalho visa oferecer uma contribuição para a comunidade acadêmica do curso de engenharia mecânica e áreas afins que tenham interesse em aprofundar os conhecimentos sobre as propriedades e principais características de vários materiais de ferramentas de corte que associada aos processos de usinagem convencional tem sofrido intenso desenvolvimento nos últimos anos.

### **1.1.2 Objetivos Específicos**

- Estudar a evolução dos materiais das ferramentas de corte no processo de usinagem;
- Identificar os principais materiais empregados na fabricação de ferramentas de corte;
- Descrever as características dos materiais utilizados nas ferramentas de corte e suas propriedades mecânicas;
- Relatar a aplicabilidade das ferramentas de corte nos processos de usinagem.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Conforme Jesus (2004), o processamento de materiais pode ser definido como a ciência e tecnologia pela qual um material é convertido em uma peça ou componente útil com estrutura e propriedades melhoradas de acordo com as necessidades de aplicação. O processamento de materiais tem o intuito de possibilitar a transformação destes em objetos úteis. Uma grande quantidade e variedade de processos estão envolvidos na obtenção de produtos e componentes, quer sejam eles acabados ou semi acabados.

O processo de fabricação por remoção de material na usinagem convencional, possui destaque para o torneamento, o qual é um dos processos de usinagem mais empregados em trabalhos experimentais sobre usinagem e também na indústria. O processo de torneamento é usado para se obter superfícies de revolução por meio da ação de uma ferramenta de corte, fixa, sobre uma peça que realiza rotação em uma máquina chamada torno (TRENT; WRIGHT, 2000).

De acordo com Cervelin (2009), é possível a execução de várias operações no torneamento, o que permite a fabricação de peças cilíndricas, cônicas, esféricas, com detalhes ou uma combinação de tudo isso, tornando-o um processo muito versátil. O faceamento é usado para produzir superfícies, na maioria das vezes planas e também rebaixos na extremidade da peça; a furação permite a execução de furos na extremidade da peça com o auxílio de brocas; com a utilização de ferramentas especiais, geometrias complexas podem ser obtidas mais fácil e rapidamente; particionamento ou sangramento que permite a separação de uma parte do material; o roscamento permite a confecção de roscas internas e externas em vários padrões; o recartilhado proporciona uma superfície cilíndrica com detalhes regulares.

Uma fator importante em torneamento é a taxa de remoção de material, isto é, a taxa de volume de material removida por unidade de tempo. As ferramentas de corte permitem a remoção de material de uma peça por meio de arestas cortantes. Em 1760 não existiam máquinas ferramentas, quando um inglês chamado Richard Reynolds relatou em seu diário a construção de uma máquina para produzir um cilindro (CERVELIN, 2009).

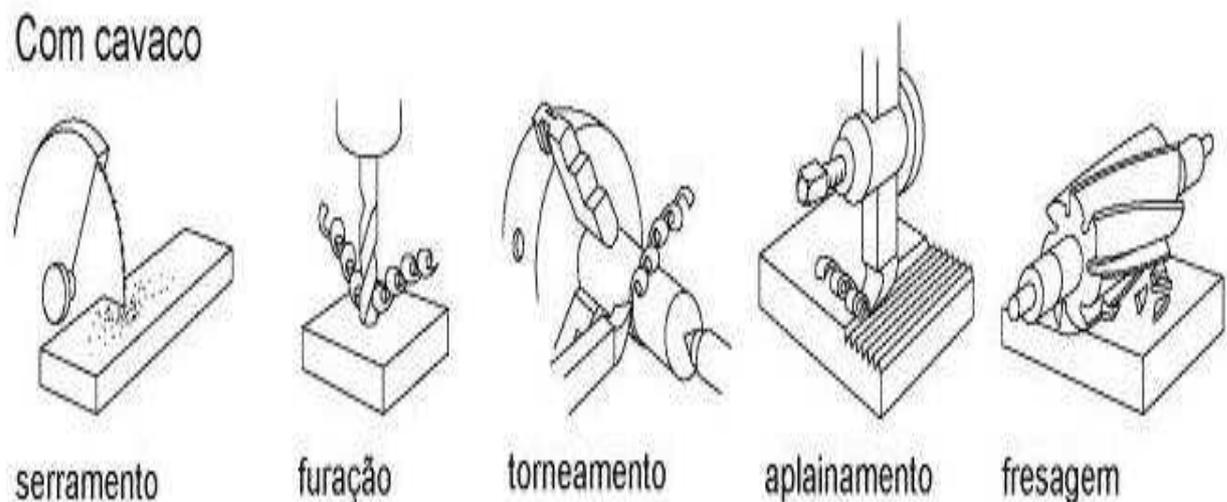
Jesus (2004), afirma que a fabricação de algum produto ou componente envolve não apenas o projeto e a seleção do material mais adequado, mas, também, a seleção do processo mais adequados para que se obtenha a forma, as características e as propriedades planejadas.

## 2.2 PROCESSO POR REMOÇÃO (USINAGEM)

Conforme Jesus (2004), no ano de 1776 James Watt construiu a primeira máquina a vapor, e uma de suas maiores dificuldades no desenvolvimento foi à furação do tarugo fundido, pois não se conseguia obter uma superfície suficientemente cilíndrica que permitisse a minimização da folga existente entre o pistão e o cilindro.

O problema foi solucionado quando John Wilkinson inventou a máquina de furação horizontal que consistia de uma ferramenta de corte montada em uma barra de mandrilagem suportada em anéis fora da região do cilindro (JESUS, 2004).

Conforme Jesus (2004), os processos de fabricação por remoção de material são comumente conhecidos como processos de usinagem como mostra a Figura 2.1 e são considerados secundários porque têm como material de partida (matéria prima) materiais previamente obtidos por processos primários como: fundição, conformação, laminação, soldagem, extrusão. Dificilmente ocorre a presença isolada de um outro destes processos na fabricação de peças ou componentes. Por ser considerado um processo secundário, a usinagem normalmente atua como processo complementar em relação aos demais processos.



**Figura 2.1 - Processo de fabricação por remoção (Adaptado de Jesus, 2004).**

Jesus (2004), afirma que o processo de usinagem é diferentemente do que ocorre nos processos por deformação plástica, onde não há perda de matéria-prima ao longo do processo. Na usinagem, a obtenção da peça ou produto implica em remoção de parte do material de

partida, que varia de acordo com a forma final requerida para o produto. Este material é removido em forma de cavacos ou partículas, dependendo do tipo de processo utilizado.

A principal vantagem dos processos de usinagem com relação aos demais processos é a possibilidade de obtenção dos mais diversificados e complexo perfis de peças, com dimensões e tolerâncias bastante estreitas (JESUS, 2004).

De acordo com Baptista (2002), a usinagem é um termo que abrange processos de fabricação mecânica por geração de superfícies através da retirada de material, conferindo dimensão e forma à peça. Uma definição bastante ampla do termo usinagem, são operações que ao conferir à peça a forma, ou as dimensões ou o acabamento, ou qualquer combinação destes três itens, produzem cavaco.

No processo de usinagem de um metal em operação, no seu início do corte, a ferramenta penetra no material da peça, e ela deforma elástica e plasticamente durante o processo. Logo em seguida tal material irá ultrapassar a tensão máxima de cisalhamento do material e 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. O desempenho do material frente a esse trabalho de usinagem é que vai caracterizar a usinabilidade do mesmo no processo de usinagem (BAPTISTA, 2002).

Conforme Baptista (2002), as ferramentas mais utilizadas na usinagem dos aços são os aços-rápidos e o metal duro. O limite de emprego das ferramentas de aço-rápido, está na dureza de 300 HV do aço. Para as ferramentas de metal duro, este limite é maior, isto é, 500, com relação aos outros materiais.

Quando se usa ferramentas de aço-rápido, uma cratera se desenvolve por difusão e cisalhamento plástico superficial. Às velocidades de corte mais altas, as ferramentas podem se deformarem plasticamente sobre tensão de compressão. Quando se usa metal duro WC + CO (classe K) com altas velocidades de corte, acontecerá o desenvolvimento rápido da cratera e do desgaste do flanco por difusão (BAPTISTA, 2002).

## 2.3 EVOLUÇÃO DOS MATERIAIS EMPREGADOS PARA FABRICAÇÃO DE FERRAMENTAS DE CORTE

É um grande desafio encontrar materiais para ferramentas de corte que possam adequar características como tenacidade e a dureza, onde tais propriedades são opostas, e isso é um desafio contínuo dos fabricantes. Contudo, os altos investimentos em estudo e pesquisa têm mostrado resultados, uma vez que já é possível encontrar um número elevado de ferramentas com composições químicas diferentes, tamanho de grãos menores, controles de processos de fabricação muito acurados e tratamentos térmicos muito bem controlados, que permitem conferir excelentes graus de pureza para a produção de ferramentas de excepcional qualidade (RIBEIRO, 2007).

Conforme Ávila (2003a), os principais materiais para ferramentas de corte e sua época de descobrimento são expostos abaixo:

### ➤ Evolução dos materiais de ferramenta

- AÇOS-CARBONO E AÇOS LIGA – SÉC. XIX;
- AÇOS-RÁPIDOS – 1899;
- LIGAS FUNDIDAS – 1915;
- METAL DURO – 1928;
- CERMET – 1950;
- CERÂMICAS
  - $Al_2O_3$  – 1950;
  - $Si_3N_4$  – 1980;
- ULTRADUROS (PCD/PCBN) – 1970.

### 2.3.1 Aços Carbono e Aços Liga

No século XIX, os aços comuns ao carbono e, logo depois os aços de baixa e média liga, onde foram introduzidas por Mushet em 1868, foram os únicos materiais de ferramentas disponível. Logo surgiram materiais com maior resistência e logo foram substituídos, mas ainda hoje são utilizados como ferramentas em determinadas aplicações, e utilizados também na

fabricação de matrizes. A maior barreira desse tipo de material é que eles perdem a dureza quando aquecidos a temperaturas superiores à de revenimento de 300°C a 600°C.

A tabela 2.1, expõem a classificação da AISI (American Iron and Steel Institute) dos tipos de aço carbono mais comuns para ferramentas de corte. Os mais usuais são os aços 110 e 120.

**Tabela 2.1 Classificação dos aços carbono para ferramentas de corte (Adaptado de Ávila, 2003a).**

| <b>Aços-carbono para ferramentas</b>          |                 |           |      |      |      |      |
|---|-----------------|-----------|------|------|------|------|
| Tipo  | Designação AISI | C         | Mn   | Si   | Cr   | V    |
| <i>Classe 110 (Aço carbono)</i>               |                 |           |      |      |      |      |
| 110   | W1              | 0,60/1,40 | 0,25 | 0,25 | -    | -    |
| <i>Classe 120 (Aço 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 (Aço 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 (Aço carbono-cromo-vanádio)</i> |                 |           |      |      |      |      |
| 140   | -               | 1,00      | 0,25 | 0,25 | 0,35 | 0,20 |

Os aços da Tabela 2.1 são os que apresentam custos mais baixos e são, normalmente, tratados em água, tendo o carbono como o principal elemento de liga. O teor desse elemento vai regular as propriedades de dureza e tenacidade requeridas.

### 2.3.2 Ferramentas de Aço-Rápido

As primeiras ferramentas de aço-carbono, apresentavam teores que variavam de 0,8 a 1,5 % de carbono (C), sem a presença de outros elementos em porcentagens significativas. Atualmente, a composição química destes aços é levemente modificada com a adição de quantidades pequenas de cromo (Cr), vanádio (V) e tungstênio (W) e seu emprego atualmente só é justificado se, numa análise de custo/benefício, for comprovado que os valores de sua utilização são baixos, se houver a necessidade de arestas muito vivas, se forem necessários tratamentos térmicos muito simples e se sua boa tenacidade for útil ao processo, fatores que restringem bastante o seu emprego. Estes aços-carbono eram os únicos aços que podiam ser utilizados para ferramentas de corte até o surgimento dos aços-rápidos, quando então passaram

a ser utilizados somente para ferramentas de pequenas oficinas de reparo, usos domésticos e de lazer, ferramentas de uso esporádico ou descartável e ferramentas de forma, para a usinagem de latão e ligas de alumínio (STEMMER, 1995a).

De acordo como Stemmer (1995), os aços-rápidos surgiram no final do século XIX, desenvolvidos inicialmente pelo norte-americano Taylor. A época, causou verdadeira revolução, pois as qualidades deste aço causaram grande surpresa na sua primeira exibição pública, ocorrida na Exposição Mundial de Paris, em 1900. Com seu uso, foi possível racionalizar o trabalho industrial, permitindo uma administração mais eficiente e de um planejamento de produção mais efetivo.

A primeira das ligas desenvolvidas por Taylor e White continham a seguinte composição química: C – 0,67 %; Cr – 5,47 %; W – 18,91%; V – 0,29 % e Mn – 0,11 %, sendo positivo que o teor de manganês (Mn) se situasse na menor concentração possível, para evitar a fragilização da liga. Era necessário ainda um tratamento térmico controlado. Hoje, em função dos materiais mais recentes, a denominação “aços-rápidos” não faz mais jus ao material (SANTOS; SALES, 2004).

Conforme Ribeiro (2007), vários procedimentos foram adotados para conferir aos aços-rápidos como melhorias nas suas características, desde os processos de seleção e pureza de seus componentes aos processos de fabricação cada vez mais bem controlados. Foram ainda surgindo várias configurações baseadas nos percentuais de seus componentes e na adição de cobalto (Co). Os carbonetos obtidos conferem ao aço bons níveis de resistência ao escoamento e à tração, devido ao fato de serem extremamente duros, além de permitir boa dureza a quente (RIBEIRO, 2007).

Segundo Ribeiro (2007), são fornecidos pelas indústrias alguns tipos de aços-rápidos como os denominados: ao tungstênio (W); ao tungstênio / molibdênio (W-Mo) classe 650; tungstênio / cobalto (W-Co); ao molibdênio (Mo); ao molibdênio / cobalto (Mo-Co) e ao tungstênio / molibdênio / cobalto (W-Mo-Co). Estes fornecedores comercializam aços com teor de cobalto (Co) entre 8 e 12%, denominando-os como aços de alta dureza a quente. Este efeito também pode ser obtido com a adição de tungstênio (W) ou vanádio (V).

Nos catálogos dos principais fabricantes de ferramentas para usinagem pode-se encontrar uma enorme gama de aplicações para os diversos tipos de aços-rápidos, com destaque para fresas de vários tipos, brocas, cossinetes, brochas, matrizes, ferramentas em barras para torneamentos de pequenas dimensões, barras para afiação em pequenas oficinas, etc (STEMMER, 1995b).

Dessa forma, é possível comprovar que, embora normalmente, possa dizer que estes aços não podem mais serem considerados “rápidos”, na prática estes estão presentes em várias aplicações, competindo com outros tipos de materiais para ferramentas, considerados mais avançados, e prestando-se para aplicações de usinagem há mais de um século.

De acordo com Ribeiro (2007), os principais fabricantes de ferramenta começaram a disponibilizar para o mercado consumidor o resultado dos primeiros avanços obtidos em pesquisas na área de ferramentas, com destaque para a fabricação de ferramentas utilizando os materiais obtidos por metalurgia do pó. Outro campo que tomou impulso foi a da utilização de tecnologias de recobrimentos, conhecidos como revestimentos tribológicos.

### **2.3.3 Ferramentas de Aço-Rápido com Revestimentos Tribológicos**

Conforme Ribeiro (2007), os primeiros estudos sobre os revestimentos tribológicos surgiram na década de 1930, quando fabricantes suíços aplicaram revestimentos em peças de pequeno tamanho, para aumentar a vida de componentes de relojoaria. O conceito é garantir uma peça ou ferramenta que possua características de tenacidade em seu núcleo e, na superfície apresente elevada dureza, estabilidade, inércia química e resistência ao desgaste. No caso das ferramentas de corte, as primeiras a serem revestidas na década de 1960 foram as de metal duro, que serão discutidas posteriormente. Tal se deve ao fato de que os processos de aplicação dos recobrimentos exigiam temperaturas em torno de 1000 °C, com a utilização do processo denominado deposição química de vapor (“Chemical Vapour Deposition” – CVD). Em torno desta temperatura os aços-rápidos têm sua estrutura metalúrgica significativamente alterada, impedindo sua aplicação sem danos estruturais. Na década de 1970 surgiu o processo denominado deposição física de vapor (“Physical Vapour Deposition” – PVD), que permitiu a deposição de nitreto de titânio (TiN) sobre aço-rápido em temperaturas em torno de 500 °C (RIBEIRO, 2007).

Os principais revestimentos tribológicos que podem ser aplicados com a técnica PVD nos aços-rápidos, são: nitreto de titânio (TiN), nitreto de titânio alumínio (TiAlN), carbonitreto de titânio (TiCN), carboneto de tungstênio/carbono (WC/C), nitreto de cromo (CrN), bissulfeto de molibdênio (MoS<sub>2</sub>), a alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) e o nitreto de cromo alumínio (AlCrN).

### 2.3.4 Ligas Fundidas

As ligas fundidas formam um outro grupo de materiais de ferramentas de corte. Elas surgiram mais ou menos na mesma época dos aços-rápidos, mas tiveram grandes aplicações muito depois de seu descobrimento, no período da Segunda Guerra Mundial. Essas ligas são 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 em decorrência disso as velocidades de corte empregadas são maiores, por volta de 25%.

### 2.3.5 Ferramentas de Metal Duro

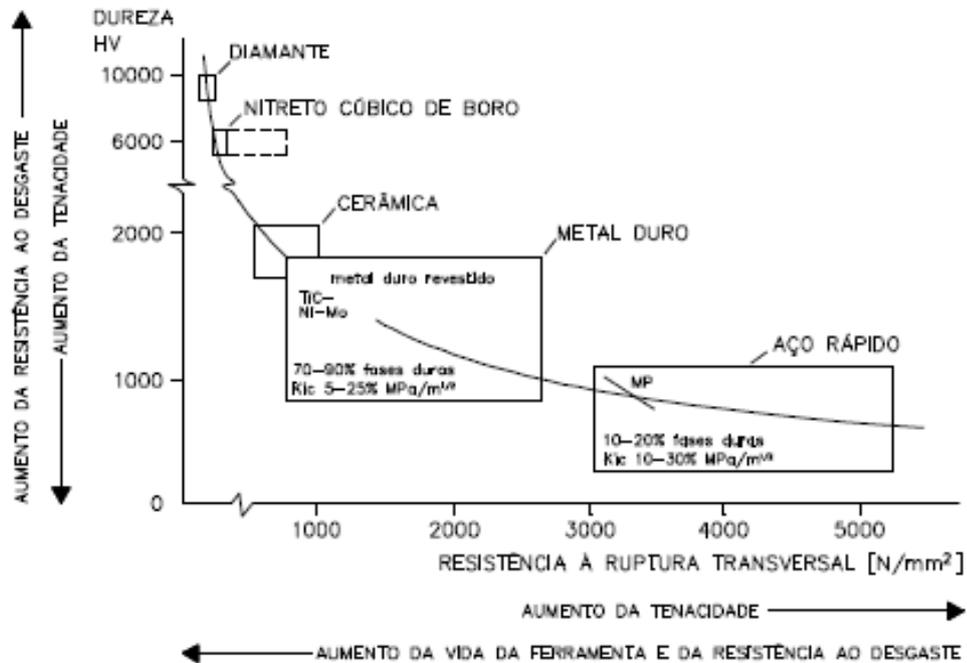
O metal duro foi desenvolvido a partir de 1923 na Alemanha, contendo apenas carboneto de tungstênio e cobalto – WC/Co. Desde então foi sendo aperfeiçoado, tornando-se, desde então, um dos mais notáveis materiais para a construção de ferramentas de usinagem mecânica. As velocidades de corte que até então se situavam em torno de 35 m/min com o uso dos aços-rápidos, atingiram um incremento em torno de quase oito vezes, passando para valores entre 250 e 300 m/min (RIBEIRO, 2007).

Ao final da década de 1920, Schröter conseguiu produzir em laboratório o carboneto de tungstênio (WC) em pó pela primeira vez e este, misturado com o cobalto (Co) também sob a forma de pó de granulometria bastante fina, permitiu que fosse lançado comercialmente pela empresa Krupp (que desenvolveu estudos iniciados pela fabricante de lâmpadas Osram para a fabricação de filamentos), a conhecida “Widia™”, contração das palavras alemãs “Wie Diamond” ou “Como o Diamante”, devido à sua extrema dureza. A composição original do metal duro continha somente 81% WC, 6% C e 13% Co, como ligante, o que foi sendo aperfeiçoado com o desenvolvimento de pesquisas (STEMMER, 1995a).

Segundo Santos e Sales (2004), as melhorias esperadas na aplicação de revestimentos estão: o baixo desgaste superficial; a extensão de vida da ferramenta; a redução de custos por peça manufaturada; a diminuição do atrito peça-ferramenta, com melhoria de produtividade por ser possível o incremento de velocidade de corte; a redução do calor transmitido à ferramenta; a redução dos custos por máquina parada para troca de ferramentas; a redução do consumo de energia por redução das forças de corte; o aumento de dureza na superfície de contato; melhor estabilidade química superficial; diminuição das forças de adesão; melhoria da qualidade superficial das peças devido à melhoria da lubrificidade e exatidão dimensional das ferramentas.

O maior desafio no desenvolvimento de ferramentas de corte está relacionado no balanço entre a dureza e a tenacidade, visto que são duas propriedades de suma importância para o desempenho da ferramenta de corte e que não são facilmente encontradas em um mesmo material como mostra a Figura 2.2.

Observa-se que o aumento da dureza leva a uma redução na tenacidade e vice-versa. Portanto, se a exigência for tenacidade, no caso de usinagem em cortes interrompidos, como no fresamento, por exemplo, o técnico responsável pela seleção deverá optar pela ferramenta posicionada mais à direita do diagrama, com sacrifício na dureza e resistência ao desgaste. Se a exigência for resistência ao desgaste e dureza, como no caso de usinagem de materiais resistentes e abrasivos, a escolha deverá recair naqueles materiais posicionados mais à esquerda do diagrama, com sacrifício da tenacidade. No processo de fabricação consegue-se combinações de dureza e tenacidade, tanto em materiais de ferramenta puros quanto nos revestidos. As ferramentas revestidas buscam o equilíbrio entre propriedades necessárias através do uso de um material base, que confere propriedades de tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com alta dureza, resistência a abrasão e inércia química (AMORIM, 2002).



**Figura 2.2 - Diagrama de dureza - tenacidade dos materiais das ferramentas (Adaptado de Amorim, 2002).**

### 2.3.6 Cermets

No aparecimento da ferramenta de cermet, dois fatores contribuiu para o seu aparecimento. O primeiro foi a constatação de que a adição de Tic, onde aumenta muito a resistência ao desgaste, principalmente de cratera, dos metais duros, quando usinando aços. O segundo fator 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 dos metais duros. Apesar de 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 com grande competitividade.

### 2.3.7 Cerâmicas

O emprego das cerâmicas como ferramenta de corte desde o princípio do século, mas foi somente no final dos anos 50 que as pastilhas à base de alumina  $Al_2O_3$  entraram no mercado, sendo um grupo hoje bastante competitivo, principalmente na usinagem de materiais endurecidos e superligas.

As cerâmicas são usadas onde se requer alta dureza e resistência ao desgaste. As cerâmicas a base de alumina, apresentam excelente inércia química contra materiais ferrosos. Mas em contrapartida não apresentam tenacidades suficientes, os quebra-cavacos integrais ficam proibitivos, o que prejudicam sua aplicação nos aços comum ao carbono e baixa liga. Mas por outro lado, quando se tratar de aços de alta dureza, acima de 40Rc, as cerâmicas são sempre consideradas, em particular no corte contínuo.

### 2.3.8 Materiais de Ferramentas Ultraduros

O diamante natural foi usado como ferramenta de corte por centenas de anos, por tratar de um material de maior dureza e resistência ao desgaste da natureza. Ele possui excelente condutividade térmica. As ferramentas de diamante natural são usadas principalmente quando se requer super-acabamentos nos componentes usinados. Acabamentos superficiais da ordem de 0,025micro metro podem ser obtidos com estas ferramentas se o maquinário tiver rigidez suficiente. Em contrapartida, ele possui uma fragilidade e risco de falha sob impacto e também

seu alto custo, e tem sua aplicação limitada como ferramentas de corte, principalmente após o surgimento dos diamantes e CBN sintéticos, que podem substituí-lo como bastante eficiência.

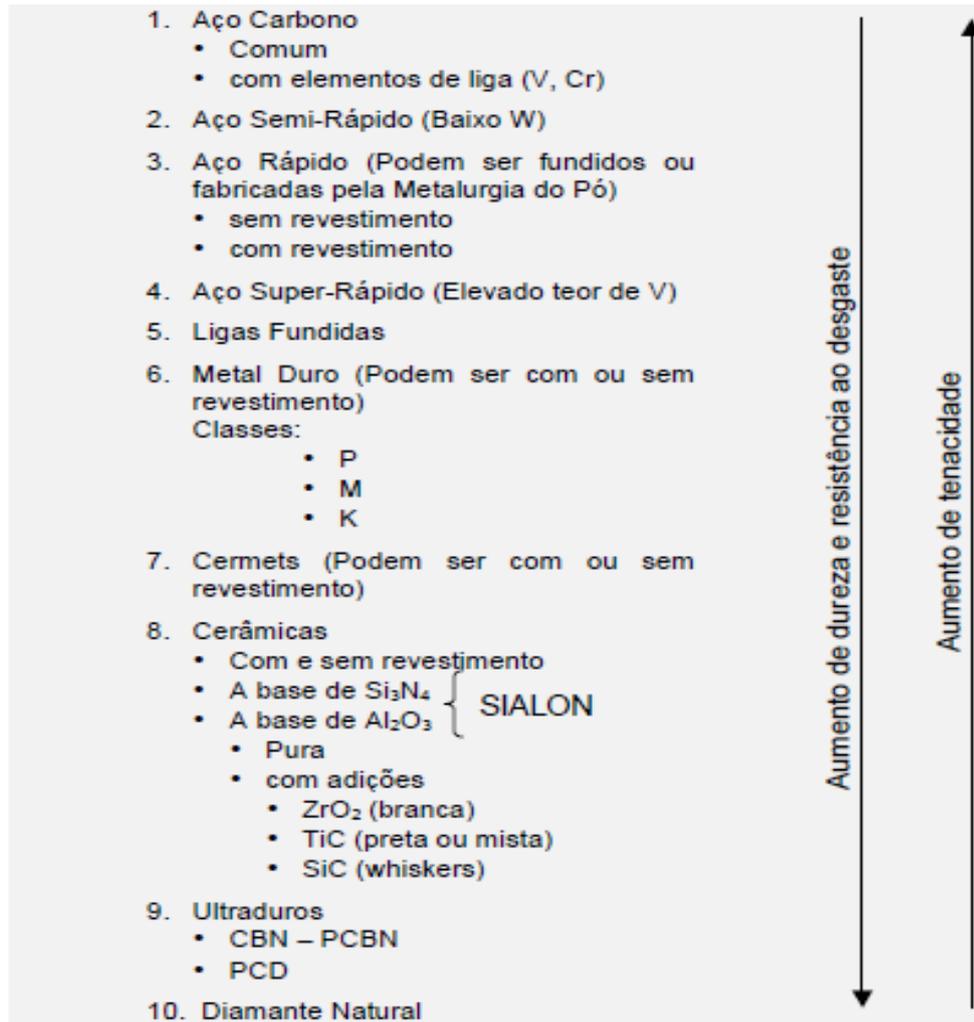
➤ Requisitos desejados em uma ferramentas de corte

- Dureza;
- Tenacidade
- Resistência a compressão
- Resistência ao cisalhamento
- Boas propriedade mecânicas e térmicas a altas temperaturas
- Resistência ao choque térmico
- Inércia química

Tais propriedades não estão listadas em nível de importância, até porque as qualidades necessárias à ferramenta podem variar bastante com a operação de usinagem com o material a ser usinado e com parâmetros de corte (AMORIM, 2002). A Figura 2.3 mostra os materiais para ferramentas existentes atualmente no mercado. Observa-se que esses materiais estão em ordem crescente de dureza e decrescente de tenacidade Esta ordem também representa o avanço tecnológico dos materiais, de acordo com a cronologia, com algumas exceções.

No contexto histórico, duas categorias de materiais se sobressaem, e podem ser considerados os mais importantes para usinagem, ainda que não os mais eficientes ou tecnologicamente desenvolvidos. Estes materiais são os aços rápidos e os metais duros (AMORIM, 2002).

Segundo Amorim (2002), a grande importância dos aços rápidos e dos metais duros se deve ao fato de, na época de seu desenvolvimento, terem permitido os maiores saltos tecnológicos da história dos processos de usinagem, tendo ocorrido na ocasião do desenvolvimento de cada um desses materiais um crescimento nas velocidades de corte de uma ordem de grandeza, comparado com os materiais de corte então existentes. Os aços rápidos, as velocidades de corte foram aumentadas de aproximadamente 3 m/min para até 35 m/mim, e com o desenvolvimento do metal duro chegou-se a 300 m/mim.



**Figura 2.3 - Materiais para ferramentas de corte (Adaptado de Amorim, 2002).**

### 2.3.9 Ferramenta de Corte

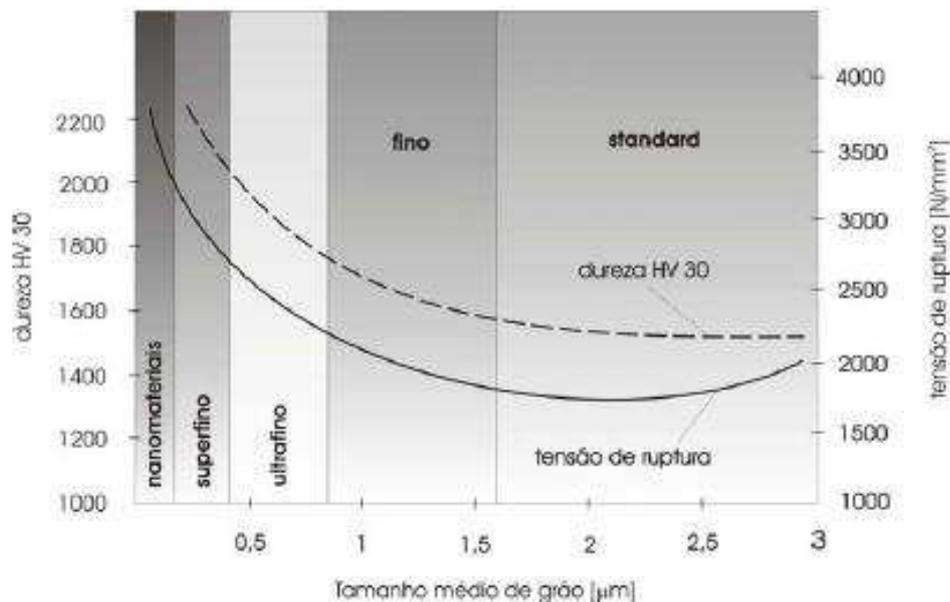
De acordo com Yen *et al.* (2004), a ferramenta de usinagem mecânica, segundo a norma da ABNT NBR 6175 é formada de arestas cortantes, como o intuito de remoção de cavaco. No caso da ferramenta possuir uma única superfície de saída, é chamada ferramenta monocortante. Quando possuir mais de uma superfície de saída, é chamada ferramenta multicortante. A geometria da ferramenta de corte exerce influência na usinagem dos metais, mais especificamente na forma da zona de deformação da peça, distribuição de tensão, temperatura e esforços de corte.

Conforme Rodrigues (2005), uma ferramenta de corte deve aliar algumas características relevantes, como alta dureza em elevadas temperaturas, alta resistência mecânica e ao desgaste, alta tenacidade, alta resistência ao choque térmico, à compressão e elevada estabilidade química. A grande maioria dos materiais atualmente utilizados pela indústria combina alguns,

mas nem sempre todos, os requisitos citados. Para cada tipo de aplicação, existe um tipo específico de ferramenta de corte adequado.

O desenvolvimento tecnológico da usinagem fez surgir novas ferramentas de corte e da necessidade de se usinar novos materiais. Existem no mercado ferramentas compostas de aço rápido, carboneto metálico (metal duro), com ou sem revestimentos, cermet (misto de cerâmica e metal), cerâmica convencional, que pode ser reforçada com fibras de silício, CBN (nitreto de boro cúbico) e diamante policristalino (PCD) (RODRIGUES, 2005).

Conforme Christoffel (2001), há muito que se evoluir na tecnologia de ferramentas de corte. Alterando os substratos das ferramentas e diminuindo o tamanho médio de grão para ordens nanométricas, é possível elevar significativamente a dureza e a resistência mecânica da ferramenta de corte. Esta pode ser uma nova tendência a ser seguida pelos fabricantes de ferramentas. A Figura 2.4 apresenta esse exposto.



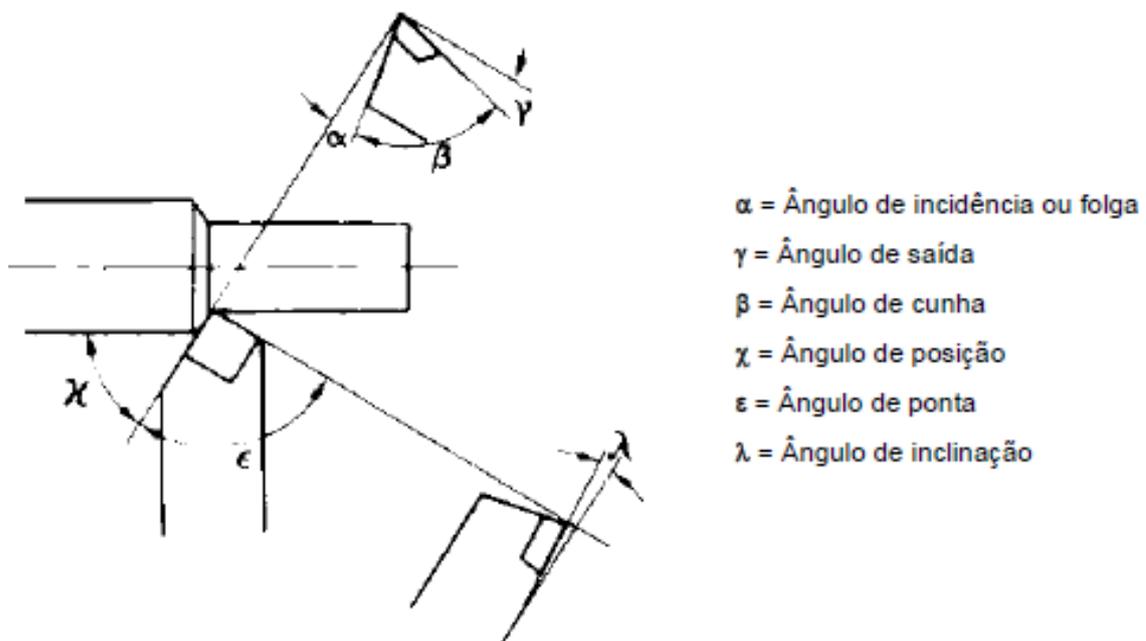
**Figura 2.4 - Futuro desenvolvimento de substratos para aplicação em ferramentas (Adaptado de Rodrigues, 2005).**

Diversos materiais são recomendados especificamente para aplicações em HSM (*High Speed Machining*), onde destacam-se o diamante policristalino (PCD), para materiais não ferrosos, e o nitreto de boro cúbico (CBN), para materiais ferrosos, principalmente em operações de acabamento. As ferramentas cermets também são empregadas em usinagem com alta velocidade de corte. As ferramentas cermets também são empregadas em usinagem com alta velocidade de corte. Possuem alta resistência ao desgaste, alta estabilidade química, alta

dureza a quente e baixa suscetibilidade à formação da aresta postiça de corte (RODRIGUES, 2005).

### 2.3.10 Geometria da Ferramenta de Corte

Conforme Jesus (2004), as ferramentas de corte são construídas em forma reta, inclinada, excêntrica, circular e outras maneiras que permitam colocar o gume ou gumes cortantes em posições convenientes de trabalho e em equipamentos variados. A DIN 6581, estabelece designações para os ângulos de corte das ferramentas, onde tem a vantagem de aplicar a todas as operações de usinagem. Os principais ângulos da ferramenta de acordo com a designação proposta pela DIN 6581, é mostrado na Figura 2.5.



**Figura 2.5 - Principais ângulos de ferramenta conforme a DIN 6581 (Adaptado de Jesus, 2004).**

As diferentes formas de ferramenta, não estão apenas relacionadas com a espécie de operação ou material a usar. O perfil da aresta cortante pode também ser variado em função de diferentes classes de serviços e materiais, de forma a ter efeito decisivo no desempenho da ferramenta em estado de operação (JESUS, 2004).

### 2.3.11 Vida da Ferramenta de Corte

A vida de uma ferramenta de corte é medida pelo tempo no qual ela efetivamente trabalha entre duas afiações sucessivas ou a troca da aresta de corte do inserto. Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas e por menor que seja a resistência mecânica da peça, a ferramenta sempre sofrerá desgaste e em algum momento precisará ser substituída. Isto se dá porque durante a usinagem, a ferramenta é exposta a uma combinação de fatores de origem abrasiva, mecânica, química e térmica. Já que os materiais da peça e da ferramenta não são homogêneos, os desgastes e as avarias podem ser observados na ferramenta durante o seu uso (MACHADO *et al.*, 2009).

Conforme Diniz *et al.* (2010) citam que para operações de acabamento, o fim de vida de uma ferramenta de corte pode ser definido quando não é mais possível conseguir tolerâncias apertadas ou o acabamento requerido na superfície usinada da peça, devido principalmente ao desgaste de flanco VB na superfície de folga da ferramenta. A ferramenta deve ser substituída antes de atingir valores que possam originar quebra da aresta de corte, pois esta, não terá condições de satisfazer as exigências impostas de tolerâncias e acabamento.

Conforme Machado *et al.* (2009), o desgaste é definido pela norma ISO 3685 (1993) como a mudança da forma original da ferramenta durante o corte, resultante da perda gradual de material. A progressão do desgaste apresenta-se como uma falha contínua e progressiva e em proporções pequenas, podendo ocorrer por vários mecanismos entre os quais a deformação plástica. Por ser um processo contínuo, o comportamento do desgaste pode ser modelado matematicamente ao longo do seu progresso, até o dano completo da ferramenta.

Nas ferramentas de metal duro com cobertura, VB cresce lentamente em virtude da alta resistência ao desgaste das camadas de cobertura da ferramenta até atingir valores na ordem de 0,3 a 0,4 mm, enquanto que o desgaste de cratera é muito pequeno ou inexistente. Após o desgaste das camadas de cobertura, o corte passa a ser realizado pelo substrato da ferramenta, que possui menor resistência ao desgaste fazendo VB crescer mais rapidamente, atingindo valores da ordem de 0,8 a 1,0 mm em um tempo muito curto (SOUZA *et al.*, 2013).

Os parâmetros de maior influência na progressão do desgaste VB são a velocidade de corte ( $vc$ ), o avanço ( $f$ ) e a profundidade de corte ( $ap$ ), respectivamente nessa ordem. Assim, o impacto no tempo de vida causado por um acréscimo de 10% em  $vc$  é muito maior do que ocorreria se  $f$  fosse alterado na mesma proporção. Isso ocorre, pois quanto maior  $vc$ , maior o calor conferido ao processo, sem crescer área da seção de corte. Já quando aumentado  $f$ ,

aumenta-se a quantidade de calor, porém aumentando a área da ferramenta que o recebe (Diniz *et al.*, 2010).

### **2.3.12 Materiais de Ferramenta de Corte**

Existe muitos materiais de ferramenta de corte, que pode fazer o uso com variadas propriedades, capacidade de desempenho e custo, dependendo da aplicação. Podemos destacar alguns materiais existentes para confecção de ferramentas de usinagem como:

- Aço ferramenta (aço rápido);
- Metal duro;
- Cermets;
- Cerâmicas;
- Diamante;
- Nitreto de boro

Esse materiais são avaliados pela máxima velocidade de corte necessária para usinar uma unidade em volume de material, de forma a assumir tempo de vida iguais; pois altas velocidades de corte ou taxa de remoção de material normalmente culminam com o aumento da produtividade. Em quase todas as operações de usinagem, a velocidade de corte e o avanço são limitados pela resistência do material da ferramenta. Velocidades e avanços precisam ser mantidos baixos o suficiente para possibilitar uma vida da ferramenta aceitável, ou então, o tempo perdido com a troca de ferramentas pode exceder o ganho em produtividade proporcionado pelo aumento da velocidade de corte (JESUS, 2004).

#### **2.3.12.1 Aço Ferramenta**

Conforme Alves (2005), vários sistemas de classificação têm sido utilizados para designar os aços ferramenta. A classificação proposta pela AISI-SAE (“American Iron and Steel Institute – Society of Automotive Engineers”), onde considera a grande variedade dos aços ferramentas existente, de forma a subdividir em diversas categorias, totalizando 7 ao todo como mostra a Tabela 2.2.

**Tabela 2.2 - Categorias de aços ferramenta existentes (Adaptado de Alves, 2005).**

| <b>Tipo</b>                     | <b>Classe</b> | <b>Característica marcante</b> |
|---------------------------------|---------------|--------------------------------|
| 1 - Temperável em água          | W             | -                              |
| 2 - Para trabalho a frio        | O             | Temperável em óleo             |
|                                 | A             | Temperável ao ar – média liga  |
| 3 - Resistente ao choque        | D             | Alto carbono – alto cromo      |
|                                 | S             | -                              |
| <b>4 - Aço rápido</b>           | <b>T</b>      | <b>A base de tungstênio</b>    |
|                                 | <b>M</b>      | <b>A base de molibdênio</b>    |
| 5 - Para trabalho a quente      | H             | H1~H19: a base de cromo        |
|                                 |               | H20~H39: a base de tungstênio  |
|                                 |               | H40~H59: a base de molibdênio  |
| 6 - Para a construção de moldes | P             | -                              |
| 7 - Para aplicações especiais   | L             | Baixa liga                     |
|                                 | F             | Carbono – tungstênio           |

### 2.3.12.2 Aço Rápido

O aço rápido que provém do inglês “high-speed steel” (HSS), é um dos diversos materiais de que se pode fazer uso para obtenção de ferramentas de usinagem. Sua origem foi nos primeiros trabalhos de Fred W. Taylor no início do século de 1903, com o desenvolvimento do que seria um protótipo dos modernos aços existentes (FERRARESI, 1970).

Tal fato gera forte confirmação em obter aços rápidos como matéria-prima para a confecção de ferramentas de corte como por exemplo, fresas, brocas, ferramentas de torneamento, serras, machos e cossinetes para rocar, alargadores e escareadores e forjamento que necessitem de elevada resistência ao desgaste (JESUS, 2004).

Conforme Jesus (2004), a microestrutura destes materiais é composta basicamente por carbonetos primários, cuja principal função é fornecer proteção contra o desgaste abrasivo, e uma matriz de martensita revenida reforçada por carbonetos finamente dispersos precipitados durante o revenido, em um processo onde ocorre endurecimento secundário, e cuja função é reter os carbonetos primários, mesmo sob as altas temperaturas e tensões cisalhantes criadas na interface entre a aresta de corte das ferramentas e o material que está sendo trabalhado na usinagem.

O aço rápido tem sido usado desde a sua descoberta, como material padrão mais utilizado para a fabricação de ferramentas de usinagem. Isto é devido à sua elevada dureza associada à alta tenacidade, possibilitando assim, sua utilização em operações difíceis, incluindo usinagem com cortes interrompidos. Mesmo com o desenvolvimento de novos materiais para aplicação em ferramentas de corte, as pesquisas no campo de aço rápido têm sido constantes voltadas para aplicações em usinagem (JESUS, 2004).

No início da década de 1990, a estimativa era que o aço rápido participava com cerca de 46% do total dentre os materiais de ferramenta utilizados em processos de corte e a produção mundial de aço rápido era algo em torno de 140.000ton/ ano. O aço rápido têm hoje uma série de aplicações, principalmente na confecção de ferramentas multicortantes como brocas, alargadores, fresas de topo, serras, brocas como mostra a Figura 2.6.



**Figura 2.6 - Diversos tipos de ferramenta multicortante em aço rápido (Adaptado de Jesus, 2004).**

O sistema AISI / SAE, subdivide os diversos tipos de aços ferramenta e os agrupa por similaridade de composição, identificando os grupos com letras maiúsculas, e atribuindo a cada variação de material dentro de um número sequencial, caracterizando então um sistema de codificação alfa numérico.

A Tabela 2.3, é resultado do desdobramento da Tabela anterior, para o caso específico dos aços rápidos, e apresenta a composição química nominal para os tipos principais (AMERICAN SOCIETY, 1999).

**Tabela 2.3- Composição química dos principais aços rápidos (Adaptado de Jesus, 2004).**

| AISI          | Composição (% peso)    |           |           |           |          |           |             |           |             |
|---------------|------------------------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-------------|-----------|-------------|
|               | C                      | Mn        | Si        | Cr        | Ni       | Mo        | W           | V         | Co          |
| T1            | 0,65-0,80              | 0,10-0,40 | 0,20-0,40 | 3,75-4,50 | 0,30 máx | -         | 17,25-18,75 | 0,90-1,30 | -           |
| T2            | 0,80-0,90              | 0,20-0,40 | 0,20-0,40 | 3,75-4,50 | 0,30 máx | 1,00 máx  | 17,50-19,00 | 1,80-2,40 | -           |
| T4            | 0,70-0,80              | 0,10-0,40 | 0,20-0,40 | 3,75-4,50 | 0,30 máx | 0,40-1,00 | 17,50-19,00 | 0,80-1,20 | 4,25-5,75   |
| T5            | 0,75-0,85              | 0,20-0,40 | 0,20-0,40 | 3,75-4,00 | 0,30 máx | 0,50-1,25 | 17,50-19,00 | 1,80-2,40 | 7,00-9,50   |
| T6            | 0,75-0,85              | 0,20-0,40 | 0,20-0,40 | 4,00-4,75 | 0,30 máx | 0,40-1,00 | 18,50-21,00 | 1,50-2,10 | 11,00-13,00 |
| T15           | 1,50-1,60              | 0,15-0,40 | 0,15-0,40 | 3,75-5,00 | 0,30 máx | 1,00 máx  | 11,75-13,00 | 4,50-5,25 | 4,75-5,25   |
| M1            | 0,78-0,88              | 0,15-0,40 | 0,20-0,50 | 3,50-4,00 | 0,30 máx | 8,20-9,20 | 1,40-2,10   | 1,00-1,35 | -           |
| M2            | 0,78-0,88<br>0,95-1,05 | 0,15-0,40 | 0,20-0,45 | 3,75-4,50 | 0,30 máx | 4,50-5,50 | 5,50-6,75   | 1,75-2,20 | -           |
| M3 (classe 1) | 1,00-1,10              | 0,15-0,40 | 0,20-0,45 | 3,75-4,50 | 0,30 máx | 4,75-6,50 | 5,00-6,75   | 2,25-2,75 | -           |
| M3 (classe 2) | 1,15-1,25              | 0,15-0,40 | 0,20-0,45 | 3,75-4,50 | 0,30 máx | 4,75-6,50 | 5,00-6,75   | 2,75-3,75 | -           |
| M4            | 1,25-1,40              | 0,15-0,40 | 0,20-0,45 | 3,75-4,75 | 0,30 máx | 4,25-5,50 | 5,25-6,50   | 3,75-4,50 | -           |
| M10           | 0,84-0,94<br>0,95-1,05 | 0,10-0,40 | 0,20-0,45 | 3,75-4,50 | 0,30 máx | 7,75-8,50 | -           | 1,80-2,20 | -           |

### 2.3.12.3 Metal Duro

O metal duro, ou carbeto de tungstênio (WC), é um dos materiais para ferramentas de usinagem mais utilizados e importantes na indústria, devido elevadas propriedades tais como: elevado valor de dureza à temperatura ambiente e à quente, alta tenacidade, grande resistência ao desgaste, entre outras características. Tais propriedades se devem principalmente à possibilidade de variação de sua composição, o efeito de fase ligante (FERNANDES, 2009).

A fabricação do metal duro é realizada a partir da metalurgia do pó. O processo baseia-se na mistura de pós cerâmicos e metálicos de forma que estes são prensados em pastilhas. A partir desta etapa é realizada a pré-sinterização onde o material obtém consistência para que possa ser usinado na forma desejada. Logo após a usinagem do produto é feito o processo final de sinterização da peça, sendo ela, retificada quando necessário (FILHO, 2004).

De acordo com Camerini (2008), o metal duro é constituído de carбето de tungstênio e, de modo geral é conjugado com outros carbetes, de titânio (TiC), Tântalo (TaC) e nióbio (NbC), porém este último em proporções menores em relação aos demais. Outro elemento de extrema importância na produção do metal duro é o agente ligante, pois ele é o responsável por aglomerar as partículas dos carbetes. O cobalto (Co) é geralmente utilizado como agente ligante na confecção do metal duro. As porcentagens dos conjugados e do ligante irão conferir as propriedades finais do produto, sendo cada composição classificada conforme a norma ISO, apresentado na Tabela 2.4.

**Tabela 2.4 - Características do metal duro (Adaptado de Fernandes, 2009).**

| Designação | Composição [%] |                 |    | Propriedades                      |  |  |  |   |
|------------|----------------|-----------------|----|-----------------------------------|--|--|--|---|
|            | WC             | TiC<br>+<br>TaC | Co | Densidade<br>[g/cm <sup>3</sup> ] | Dureza<br>Vickers<br>[kg/mm <sup>2</sup> ] | Resistência<br>à Ruptura<br>Transversal<br>[kg/mm <sup>2</sup> ] | Módulo de<br>Elasticidade<br>[kg/mm <sup>2</sup> ] | Coefficiente<br>de<br>Dilatação<br>Térmica<br>·10 <sup>-6</sup> [°C <sup>-1</sup> ] |
| P01        | 30.0           | 64              | 6  | 7.2                               | 1.800                                      | 75   | -  | -   |
| P10        | 55.0           | 36              | 9  | 10.4                              | 1.600                                      | 140  | 52000  | 6.5   |
| P20        | 76.0           | 14              | 10 | 11.9                              | 1.500                                      | 150  | 54000  | 6.0   |
| P25        | 73.0           | 19              | 8  | 12.5                              | 1.500                                      | 170  | 55000  | 6.0   |
| P30        | 82.0           | 8               | 10 | 13.0                              | 1.450                                      | 170  | 56000  | 5.5   |
| P40        | 77.0           | 12              | 11 | 13.1                              | 1.400                                      | 180  | 56000  | 5.5   |
| P50        | 70.0           | 14              | 16 | 12.9                              | 1.300                                      | 200  | 52000  | 5.5   |
| M10        | 84.0           | 10              | 6  | 13.1                              | 1.650                                      | 140  | 58000  | 5.5   |
| M20        | 82.0           | 10              | 8  | 13.4                              | 1.550                                      | 160  | 56000  | 5.5   |
| M30        | 81.0           | 10              | 9  | 14.4                              | 1.450                                      | 180  | 58000  | 5.5   |
| M40        | 78.0           | 7               | 15 | 13.5                              | 1.300                                      | 200  | 55000  | 5.5   |
| K01        | 93.0           | 2               | 5  | 15.0                              | 1.750                                      | 120  | 63000  | 5.0   |
| K05        | 92.0           | 2               | 6  | 14.6                              | 1.700                                      | 135  | 63000  | 5.0   |
| K10        | 92.0           | 2               | 6  | 14.8                              | 1.650                                      | 150  | 63000  | 5.0   |
| K20        | 91.5           | 2.5             | 6  | 14.8                              | 1.550                                      | 170  | 62000  | 5.0   |
| K30        | 89.0           | 2               | 9  | 14.5                              | 1.450                                      | 190  | -  | 5.5   |
| K40        | 88.0           | -               | 12 | 14.3                              | 1.300                                      | 210  | 58000  | 5.5   |

De acordo com Camerini (2008), como pode ser observado na Tabela 2.4 a presença do ligante, bem como do TiC e TaC influenciam diretamente nas propriedades físicas e mecânicas do metal duro. Pode-se notar que à medida que o teor de Co aumenta, a densidade do composto aumenta e a dureza diminui, entretanto, a resistência à ruptura transversal que está ligada à

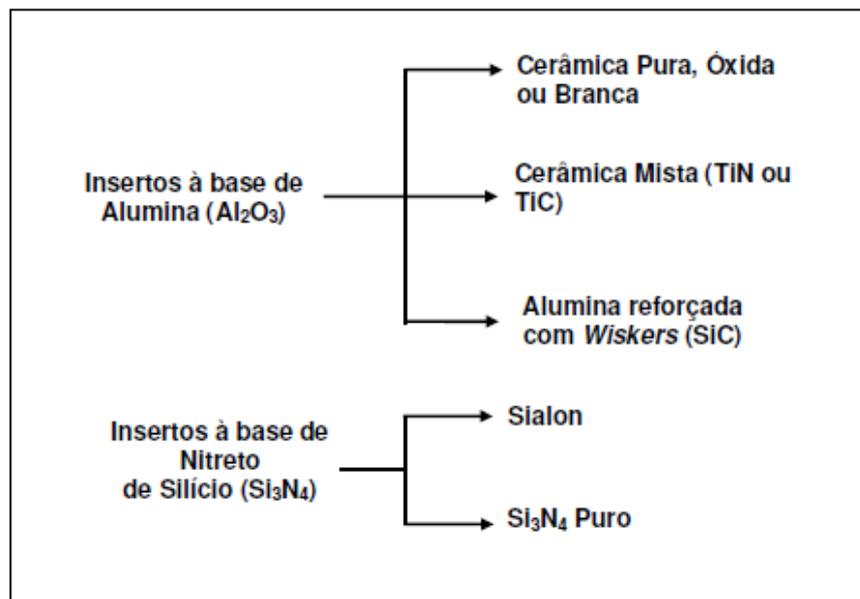
tenacidade do material aumenta significativamente. A introdução da TaC também é responsável pela melhora na tenacidade do metal duro, isto estando ligado à capacidade do TaC em formar soluções sólida puras que exercem um efeito de inibir o crescimento de grão no fase do carbeto. O TiC é responsável pelo aumento da dureza à quente e conseqüentemente pelo aumento da resistência ao desgaste. Para alcanças melhores propriedades é necessário a inserção do TiC e TaC na ferramenta, a inserção somente de um carbeto não apresentará melhoras significativas no desempenho final da ferramenta.

Outros fatores que precisam ser analisados, pois afetam diretamente a capacidade de corte da ferramenta de metal duro, são o tamanho de grão e a porosidade. Pode-se afirmar, de maneira geral que quanto maior o tamanho de grão, menor é a resistência ao desgaste e a tenacidade do metal duro, em contrapartida, maior será a resistência mecânica do material. A porosidade está ligada diretamente à densidade do metal duro, ou seja, quanto menos poros o material apresentar, mais denso ele será, o que vem trazer benefícios nas propriedades mecânicas (CAMERINI, 2008).

Fernandes (2009), o metal duro é utilizado industrialmente em usinagem de madeira, ligas de Al-Si, ferro fundido, entre outras aplicações. A velocidade de corte de uma ferramenta de metal duro em madeira ficam em uma faixa de 35m/s a 75m/s. Ele é normalmente utilizado como substrato para revestimentos cerâmicos quando as velocidades de corte produzidas ultrapassam estes valores. Uma das limitações de sua utilização como substrato, por exemplo, do diamante é a fraca adesão entre o substrato e filme pela necessidade de remoção do agente ligante nas primeiras camadas do substrato.

#### 2.3.12.4 Cerâmicas

Não devem ser utilizados com baixas velocidades de corte (proíbe a utilização nas ligas de Al, Ti e Mg). O grupo de ferramentas composto por insertos confeccionados à base de materiais cerâmicos é formado por várias classes de insertos, os quais estão divididos em dois grandes grupos em função do material empregado como matriz – óxido de alumínio ou alumina  $Al_2O_3$  ou nitreto de silício ( $Si_3N_4$ ), conforme a Figura 2.7. Dentro destes grupos, estes materiais diferem entre si de acordo com as suas características e propriedades, conforme será visto a seguir (PEREIRA, 2006).



**Figura 2.7 - Divisão de materiais cerâmicos para ferramentas de corte (Adaptado de Pereira, 2006).**

Conforme Pereira (2006), a cerâmica mista faz parte do grupo de ferramentas cerâmicas à base de alumina, contendo 25 a 40% de carboneto de titânio em volume, com uma segunda fase dispersa na matriz de alumina ( $Al_2O_3 + TiC$ ), conhecida também como cerâmica preta. Outra composição, mais recente, contém aproximadamente 23% em peso de nitreto de titânio (TiN) mais TiC disperso na matriz de alumina, esse material é de cor marrom escuro e possui maior resistência à ruptura transversal, maior dureza e maior condutividade térmica que as demais cerâmicas, possuindo desta forma uma maior área de atuação.

A presença de TiC e TiN na matriz de alumina, permite que estas ferramentas sejam empregadas com velocidades de corte mais elevadas e menor risco de fratura súbita. Além disso, a cerâmica mista apresenta uma dureza à quente superior à de outras ferramentas à base de alumina, podendo ser utilizada na usinagem de aços temperados e ferros fundidos de elevada dureza. São as mais indicadas pelos fabricantes de ferramentas para o torneamento de aços endurecidos (PEREIRA, 2006).

#### 2.3.12.4.1 Cerâmica Pura, Branca ou Óxida

Trata-se de insertos de alumina reforçados com zircônia ( $ZrO_2$ ), possui cor branca quando na sua fabricação é prensado a frio, ou cor cinza quando prensado à quente. Possui em sua composição, partículas de zircônia tetragonal dispersas em matriz de alumina, numa quantidade que pode variar de 10 a 40%. Estas cerâmicas surgiram no mercado na década de 80, com o

objetivo de expandir a faixa de aplicação das cerâmicas para a usinagem dos aços. Por tratar-se de material frágil, estes insertos devem ser utilizados com ângulo de saída negativo e aresta de corte chanfrada, objetivando-se melhorar a resistência à fratura. Devido à sua elevada resistência ao desgaste, é indicada para a usinagem de ferro fundido (cinzento, nodular e maleável). Em operações de acabamento, indica-se insertos com menores quantidades de zircônia, ao passo que para o desbaste são recomendadas pastilhas com maior teor de zircônia (PEREIRA, 2006).

#### 2.3.12.4.2 Alumina Reforçada com Whiskers de SiC

Pereira (2006), este tipo de inserto, possui em sua composição cerca de 20 a 40% em volume de carboneto de silício (SiC), na forma de cilindros monocristalinos, que têm diâmetro variando de 0,05 a 10  $\mu\text{m}$ . A finalidade destes cilindros monocristalinos de carboneto de silício, dispersos na matriz de alumina, é aumentar a tenacidade à fratura e a resistência ao choque térmico. Estas ferramentas possuem cor verde e são indicadas para a usinagem a altas velocidades (500m/min), de superligas à base de níquel e cobalto, ferro fundido endurecido e aços temperados, com durezas superiores a 45 HRC. Este material não é indicado para a usinagem de aços de média e baixa dureza, devido às altas taxas de desgaste de cratera, provocado pela afinidade entre as fibras de SiC e os aços.

#### 2.3.12.4.3 Sialon

O sialon é um inserto cerâmico à base de nitreto de silício ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ), possuindo excelentes propriedades em termos de dureza à quente e resistência ao choque térmico, porém é péssimo com relação à estabilidade química. Devido a essa característica, é principalmente utilizado na usinagem do ferro fundido em desbaste, onde a dureza à quente, a resistência ao choque térmico e a tenacidade são fundamentais e também, onde o cavaco curto não tende a causar difusão na superfície de saída da ferramenta (PEREIRA, 2006).

#### 2.3.12.5 Cermets

Conforme Callister (2002), os cermets são materiais compósitos pela qual um carboneto específico, de grande dureza, é colocado em uma matriz de um metal que junta todas as partículas. Os cermets são definidos também como compostos de duas fases, a fase cerâmica e

a fase metálica em uma microestrutura heterogênea. A fase cerâmica é escolhida por meio de materiais com dureza elevada a quente e resistência à oxidação, é sinterizada em metal ou liga metálica a alta temperatura, de maneira a dar-lhe ductilidade e tenacidade. Os elementos de metal do compósito oferecem tenacidade ao material e operam de maneira a isolar as partículas de carbonetos umas das outras, de forma a prevenir o desenvolvimento de trincas de partícula para partícula. A palavra cermet deriva exatamente das expressões cerâmica mais metal.

Os cermets são adquiridos por meio da metalurgia do pó e são formados principalmente de carbonetos e nitretos de titânio ( $TiC$ ;  $TiN$ ) de forma a utilizar na maioria das vezes, o níquel ( $Ni$ ) como elemento ligante. Uma junção equilibrada de dureza e tenacidade é adquirida com compostos à base de carbonitreto de titânio ( $TiCN$ ), carboneto de tungstênio ( $WC$ ) e carboneto de molibdênio ( $Mo_2C$ ), sinterizados com o níquel ( $Ni$ ) e o cobalto ( $Co$ ). Durante o processo de sinterização a presença de carbonetos de titânio e demais óxidos presentes na mistura inibem o crescimento dos grãos, conferindo elevada dureza (RIBEIRO, 2007).

De acordo com Ribeiro (2007), o cermet tem apropriados níveis de tenacidade e resistência a choques; grande resistência ao desgaste nas arestas de corte e grande resistência a craterização, por possuir elevada dureza a elevadas temperaturas e grande estabilidade química, com pouca tendência à difusão. É possível encontrar também outros elementos, presentes na sua composição, como: o alumínio ( $Al$ ) e o molibdênio ( $Mo$ ) e ainda alguns compostos como: carboneto de tântalo ( $TaC$ ), carboneto de nióbio ( $NbC$ ), carboneto de vanádio ( $VC$ ), nitreto de alumínio ( $AlN$ ), nitreto de tântalo ( $TaN$ ), entre outros.

Como os cermets têm uma condutividade térmica pequena e grande coeficiente de expansão volumétrica, elevadas temperaturas são provocadas no contato entre a ferramenta e o cavaco, com grande extensão de material nesta região, de forma a atrapalhar o desempenho do processo de usinagem. Estes fatores fazem que os cermets tenham um baixo coeficiente de resistência aos choques térmicos, ao se comparar com o mesmo coeficiente do metal duro, como apresentado na Tabela 2.5. Este coeficiente pode ser expresso como sendo a condutividade térmica multiplicada pela resistência à tração e dividida pelo coeficiente de dilatação e pelo módulo de elasticidade do material estudado (RIBEIRO, 2007).

**Tabela 2.5 - Comparação de propriedades físicas do cermet (TiC) com o metal duro (WC) (Adaptado de Ribeiro, 2007).**

| Propriedades Físicas   | Cermet | Metal Duro |
|--|--------|------------|
| Dureza (HV)  | 3200   | 2100       |
| Energia Livre de Formação<br>(kcal/g – atm 1000 °C)          | - 35   | - 10       |
| Solubilidade no Ferro<br>(wt% a 1250 °C)                     | 0,5    | 7          |
| Temperatura de Oxidação (°C)                                 | 1100   | 700        |
| Condutividade Térmica<br>(cal/cm.s.°C)                       | 0,052  | 0,42       |
| Coefficiente de Dilatação Térmica<br>(10 <sup>-6</sup> / °C) | 7,2    | 5,2        |
| Coefficiente de Choque Térmico                               | 1,9    | 27,1       |

O cermet possui grandes concentrações de titânio, apresentando afinidade química com a grande parte dos metais não ferrosos, inviabilizando o seu uso como ferramenta de corte nestes materiais, mas permitindo ampla aplicação na usinagem de materiais ferrosos. As ferramentas de cermets também tem grande aplicação em processos de usinagem a alta velocidade ou usinagem rápida (“High Speed Machining” – HSM) de aços endurecidos, que não estejam submetidos a choques mecânicos durante o processo de usinagem. O cermet tem boa aplicação na usinagem do ferro fundido cinzento. Estes citam ainda que o TiCN é o principal elemento responsável pela resistência das pastilhas cermet ao desgaste de flanco. O aumento das concentrações de NbC e TaC também melhoram esta propriedade (RIBEIRO, 2007).

Ribeiro (2007), as alterações de temperaturas altas e baixas também são fatores para criar falhas por trincas nas ferramentas, devido à variação volumétrica cíclica. Dessa maneira, é preferível os cermets para usinagem de acabamento e superacabamento de ferrosos, em particular os ferros fundidos e os aços endurecidos, devido às pequenas áreas de contato entre o cavaco e a ferramenta, de forma a trabalhar com altas velocidades de corte mas, essencialmente, necessitam ser empregadas com pequenos avanços e pequenas profundidades de usinagem. Os cermets fazem parte de um grupo de materiais utilizados na fabricação de ferramentas com características intermediárias entre as características dos metais duros e das cerâmicas.

### 2.3.12.6 Diamante

A obtenção do diamante sintético se dá pela elemento carbono, sob a forma de grafite, a elevados valores de pressão (em torno de 7 GPa) e temperatura (em torno de 2000 °C). Os átomos de carbono que possuem um arranjo de forma hexagonal, passam a possuir uma estrutura cristalina cúbica de face centrada após a compressão.

A principal característica destes diamantes sintéticos é a sua anisotropia, ou seja, suas propriedades mecânicas como dureza, resistência e módulo de elasticidade variam com a direção de sollicitação. Assim sua preparação deve levar em conta que a lapidação deve se dar na direção de mínima dureza e a montagem no porta-ferramenta deve ser feita de forma que as forças de usinagem sejam direcionadas na direção de máxima dureza. São indicados na usinagem de metais como bronze, cobre, ligas de estanho e ainda borrachas duras e macias, vidro, plásticos e pedras. A usinagem de ferros e aços é inviável, em função da afinidade com o carbono (STEMMERT, 1995a).

As primeiras ferramentas de diamante sintético policristalino (“Polycrystalline Compact Diamond” – PCD) a serem comercializadas surgiram no início da década de 1970. São obtidas por sinterização de partículas sintéticas de diamante, obtidas com pós de granulação muito fina, para obtenção de resultado de máxima densidade e homogeneidade. A sinterização destas partículas se dá com pós de cobalto, que age como solvente para conferir adesão, em processos de alta pressão (em torno de 7000 MPa) e altas temperaturas (entre 1400 e 2000 °C). Normalmente são depositadas em substratos de metal duro em camadas em torno de 0,5 mm de espessura, denominadas plaquetas, ou afixadas, por meio de brasagem, a porta ferramentas (STEMMER, 1995a).

Dentre suas propriedades destacam-se: o elevado valor de condutividade térmica (um a cinco vezes o valor do metal duro classe K), dificultando a formação de pontos quentes nas ferramentas; a altíssima dureza (aproximadamente quatro vezes a do metal duro classe K e três vezes a da alumina); elevada resistência ao desgaste por abrasão e tenacidade elevada, se comparada aos materiais cerâmicos, mas menor que a tenacidade dos metais duros.

Podem ser utilizadas na usinagem de metais leves como cobre e suas ligas, latão, bronze, estanho, etc, ou diversos tipos de plásticos, asbesto, fibras de carbono, carvão, grafite e metal duro pré-sinterizado. Podem ser utilizadas tanto para desbaste quanto para acabamento. Entre suas aplicações se destaca a usinagem de alumínio e alumínio-silício (STEMMER, 1995a).

### 2.3.12.7 Nitreto Cúbico de Boro

Os cristais de nitreto cúbico de boro, foram sintetizados por volta de 1957, estão entre os mais duros materiais que existem, sendo excedidos somente pelos diamantes. Este material sintético é formado pela reação de halogenetos de boro com amoníaco. Assim como acontece no caso do carbono/diamante, tem uma maneira de menor dureza, com estrutura hexagonal cristalina igualmente a do grafite e uma forma mais dura, cúbica, de estrutura idêntica à do diamante (STEMMERT, 1995a).

O carbono, a estrutura do nitreto de boro pode mostrar-se na forma hexagonal; na configuração de grafite e na forma cúbica, também conhecida como wurtzite ou hexagonal duro.

O CBN é quimicamente mais estável que o diamante pois, enquanto o CBN é estável até temperaturas em torno de 1200 °C, o diamante inicia um processo de grafitação a 750 °C. O processo de fabricação do CBN é muito idêntico ao método de aquisição do diamante policristalino: as partículas de nitreto de boro cúbico são sinterizadas a elevadas pressões e altas temperaturas, na presença de um ligante, fixando-se numa base de metal duro em espessuras em torno de 0,5 mm. Também podem ser obtidas pastilhas que são fixadas por brasagem em portas-ferramenta (STEMMERT, 1995a).

Sua aplicação é voltada aos aços duros, entre 45 e 65 HRC; aços-rápidos; ligas resistentes a temperaturas elevadas à base de níquel e cobalto e usinagem de revestimentos duros, com elevadas porcentagens de carbonetos de tungstênio ou cromo/níquel. Podem ser usados em cortes interrompidos, cortes pesados e na remoção de superfícies de peças que foram obtidas por forjamento, peças fundidas em geral ou ferro fundido obtido por coquilhamento.

Segundo Ribeiro (2007), o processo de obtenção do nitreto cúbico de boro policristalino ("Polycrystalline Cubic Boron Nitride" – PCBN) tem certa igualdade ao do processo de obtenção do PCD, ou seja, o pó de CBN é colocado a extraordinárias pressões e elevadas temperaturas, com a adição de solventes para a sinterização e de catalisadores para a transformação da forma hexagonal para a forma cúbica. Isto é possível por meio de dispositivos, entre eles o denominado pressurizador cúbico, que emprega seis punções, de forma a aplicar a pressão nos seis lados do cubo, de forma simultânea, sendo que pelo menos um deles se encontra com elevadas temperaturas, fazendo com que o pó se sinterize e se transforme em PCBN.

Dessa maneira, a composição do nitreto de boro cúbico policristalino pode ser exposta como sendo formada por partículas de CBN e partículas de aglomerante que são aderidas a um substrato, geralmente metal duro.

Dentre as características que são destacáveis estão: a alta dureza, superada apenas pela dureza do diamante; a tenacidade elevada, que é análoga à dos materiais cerâmicos com base em nitretos e duas vezes a tenacidade da alumina; estabilidade termoquímica até temperaturas em torno de 1200 °C, bem maiores que as temperaturas admissíveis com o uso do diamante, podendo assim usinar as ligas ferrosas sem a intensidade do desgaste por difusão que ocorrem com o diamante (STEMMER, 1995a).

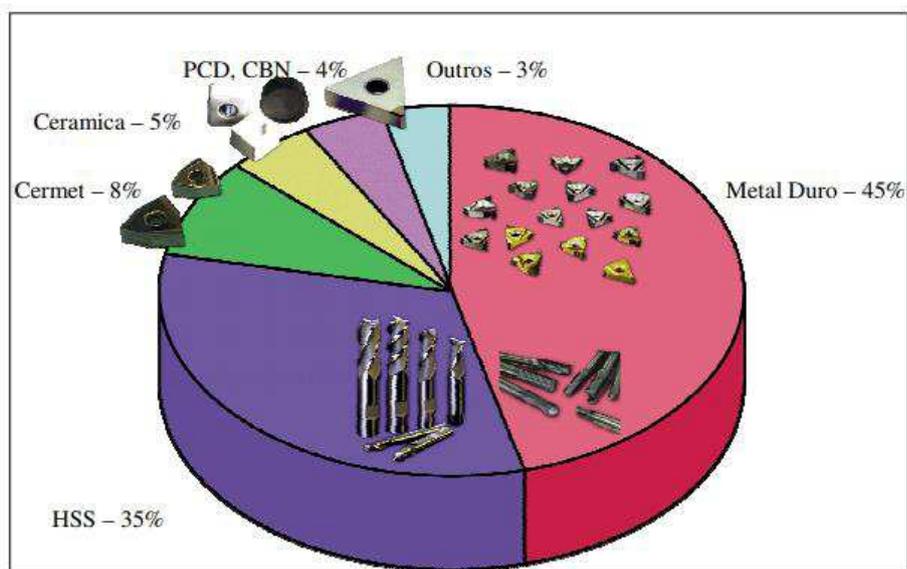
**Tabela 2.6 - Composição de propriedades físicas de materiais de ferramenta de usinagem (Adaptado de Ribeiro, 2007).**

| Propriedades   | Metal Duro                  | Cerâmica Branca   | Cerâmica Mista   | Whisker Reforçada                                  | Nitreto de Silício  | PCBN                                      | PCB                     |
|--|-----------------------------|---|--|--|---|---|-------------------------|
| <b>Composição Típica</b>   | <b>94wt% WC<br/>6wt% Co</b> | <b>90 a 95% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><br/>5-10% ZrO<sub>2</sub></b> | <b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 30%<br/>TiC 5-10%<br/>ZrO<sub>2</sub></b> | <b>75% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><br/>25% SiC</b> | <b>77% Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub><br/>13% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub><br/>10% Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b> | <b>98% CBN<br/>2% AlB<sub>2</sub>/AlN</b> | <b>PCD 0-18%<br/>Co</b> |
| <b>Densidade (g.cm<sup>3</sup>)</b>  | <b>14,8</b>                 | <b>3,8-4,0</b>  | <b>4,3</b>   | <b>3,7</b>   | <b>3,2</b>  | <b>3,1</b>                                | <b>3,4</b>              |
| <b>Dureza a RT(HV)</b>   | <b>1700</b>                 | <b>1700</b>   | <b>1900</b>  | <b>2000</b>  | <b>1600</b>   | <b>4000</b>                               | <b>8000-10000</b>       |
| <b>Dureza a 1000 °C (HV)</b>   | <b>400</b>                  | <b>650</b>  | <b>800</b>   | <b>-</b>   | <b>900</b>  | <b>1800</b>                               | <b>-</b>                |
| <b>Tenacidade (Mpa.m)</b>  | <b>10</b>                   | <b>1,9</b>  | <b>2</b>   | <b>8</b>   | <b>6</b>  | <b>10</b>                                 | <b>7,9</b>              |
| <b>Condutividade Térmica (W.m<sup>-1</sup>. °C<sup>-1</sup>)</b>             | <b>100</b>                  | <b>8-10</b>   | <b>12-18</b>   | <b>32</b>  | <b>23</b>   | <b>100</b>                                | <b>120</b>              |
| <b>Módulo de Young(kN.mm<sup>-2</sup>)</b>                                   | <b>630</b>                  | <b>380</b>  | <b>420</b>   | <b>390</b>   | <b>300</b>  | <b>680</b>                                | <b>925</b>              |
| <b>Coefficiente de Expansão Térmica (x. 10<sup>-6</sup>. K<sup>-2</sup>)</b> | <b>5-6</b>                  | <b>8,5</b>  | <b>8</b>   | <b>6,4</b>   | <b>3,2</b>  | <b>4,9</b>                                | <b>3,8</b>              |

Na Tabela 2.6 estão consolidadas as principais características mecânicas e propriedades físicas dos materiais mais comumente utilizados na confecção de ferramentas de usinagem mecânica.

## 2.4 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE FERRAMENTA DE CORTE

Conforme Teles (2007), o processo de usinagem utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça. É o processo mais comum entre os processos de fabricação existentes. O surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuiu para o aparecimento de materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem permitindo trabalhar com velocidades de corte sempre maiores. Como dureza e tenacidade são duas propriedades antagônicas, pode-se encontrar hoje no mercado alguns materiais para ferramentas como diamante, CBN, cerâmica, cermet, metal duro e aço rápido conforme mostrado na Figura 2.8 com invejáveis características de tenacidade e dureza. Isto foi conseguido graças à produção de ferramentas com diferentes composições químicas, tamanho de grãos finos e total controle do processo de fabricação e tratamento térmico, o que lhes confere um grau de dureza e qualidade excepcional. O constante surgimento de novas ligas, com propriedades mecânicas e dureza cada vez maior, cria uma demanda contínua por novos materiais de ferramenta, com propriedades à altura dessas ligas.

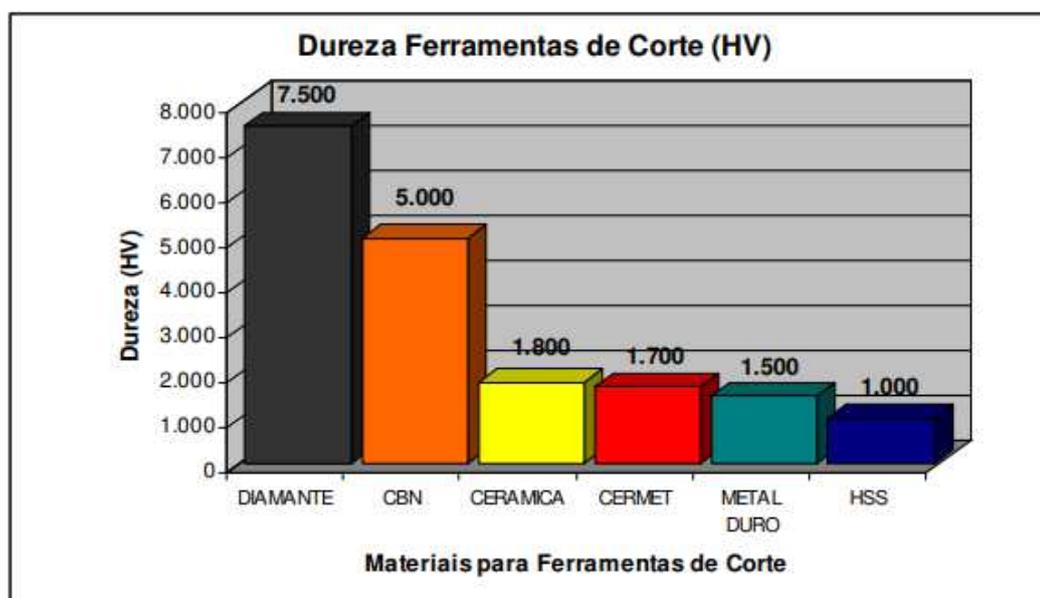


**Figura 2.8 – Materiais empregados para ferramentas de corte (Adaptado de Telles, 2007).**

A escolha correta do tipo de material para a ferramenta implica numa análise criteriosa de vários fatores que interagem entre si, resultando num mecanismo complexo e difícil de ser quantificado. Essa interação entre variáveis promove o surgimento de agentes indesejáveis que aceleram o mecanismo de desgaste, promovendo uma redução da vida útil, diminuindo a

qualidade superficial e provocando variações dimensionais na peça. Para resistir à ação dos agentes causadores de desgaste, é necessário obter certas qualidades para a ferramenta de corte, dentre as quais se destacam a resistência às tensões compressivas sob elevada temperatura, tenacidade, estabilidade química e térmica. Atualmente, a busca por ferramentas com maior dureza e maior resistência ao desgaste está ligada à necessidade de velocidades de corte cada vez maiores para atender o aumento de produtividade (TELLES, 2007).

A Figura 2.9 mostra a dureza média dos principais materiais utilizados hoje para ferramentas de usinagem. O diamante é o material mais duro utilizado, mas não se aplica aos materiais ferrosos. Sua composição a base de carbono reage com o ferro. Atualmente o metal duro é o material mais utilizado pelas ferramentas de corte conforme apresentado na Figura 2.9 e sua participação está aumentando cada vez mais devido aos novos desenvolvimentos em nanotecnologia e os vários tipos de cobertura presentes no mercado. O aço rápido já foi o material mais utilizado para ferramentas, mas é muito limitado pela baixa velocidade de corte. Atualmente o aço rápido vem sendo substituído pelo metal duro com sucesso e seu uso tende a cair ainda mais (TELES, 2007).



**Figura 2.9 – Dureza dos materiais para ferramentas de corte (Adaptado de Telles, 2007).**

Para a escolha correta da ferramenta de corte deve-se analisar o material a ser usinado, o processo de usinagem, as condições da máquina operatriz, custo do material da ferramenta, as condições de usinagem (parâmetros de corte) e as condições da operação.

### 2.4.1 Aço Rápido

De acordo com Alves (2005), o nome aço rápido se deve ao fato na época do seu desenvolvimento, ter um ganho significativo nos valores de velocidade de corte utilizados até então em relação a outros materiais de ferramentas existentes, assim como, pela característica de manter elevadas durezas (65-70 HRC) quando usados no corte rápido dos metais. O aço rápido possui elevada dureza quando submetido a tratamento térmico, e capacidade de manter durezas elevadas se submetidos a temperaturas de até 600°C.

Aços Rápidos segundo Alves (2005), possuem algumas propriedades como:

- Elevada Tenacidade (até 500°C);
- Revestimentos de TiN, TiC, WC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, HfN por técnicas de PVD aumentam a vida do material base.
- Ligas Fundidas (estelites)
- Dureza mantém-se constante até 700-800°C;
- Velocidades de corte superiores às utilizadas com os aços rápidos;
- Maior tenacidade, menor dureza a quente e resistência ao desgaste do que os carbonetos sinterizados.

### 2.4.2 Metal Duro

Procurando melhorar as propriedades físicas e mecânicas desses grupos convencionais, foram desenvolvidos metais-duros com a adição de elemento de liga, cujo objetivo foi obter uma melhoria significativa da durabilidade da ferramenta. Os elementos constituintes adicionados são: Carboneto de Titânio (TiC), Carboneto de Tântalo (TaC), Carboneto de Nióbio (NbC) e Nitreto de Titânio (TiN), em que cada um destes elementos apresentam propriedades distintas de dureza, resistência a abrasão, tenacidade, condutividade térmica e estabilidade química (XAVIER, 2003).

Xavier (2003), afirma que o TiC possui um menor coeficiente de atrito, reduzindo o calor gerado. Já o TaC e o de NbC aumentam a tenacidade devido ao refinamento do grão da matriz do metal-duro, tendo como consequência o aumento da resistência do gume. Quanto ao TiN, este exibe uma maior estabilidade química que o TiC, propiciando uma menor tendência à difusão na ferramenta.

Outro fator que contribuiu para a melhoria do desempenho das ferramentas de metal-duro foi o desenvolvimento de processos de revestimentos duros aplicados sobre o substrato. Isto possibilitou uma expressiva redução dos desgastes das ferramentas, com conseqüente aumento da produtividade nas linhas de produção da indústria (XAVIER, 2003).

### 2.4.3 Cerâmicos

#### 2.4.3.1 Resistência às Reações Químicas

Pereira (2006), afirma que devido à incidência de altas temperaturas na interface cavaco–ferramenta e ferramenta–peça, o desgaste da ferramenta ocorre geralmente devido à difusão, mecanismo que normalmente não é observado em temperaturas inferiores. Para temperaturas mais baixas, o mecanismo de desgaste predominante, passa a ser a abrasão. Neste aspecto, a alumina é o componente ideal para os insertos cerâmicos devido à sua inatividade química. Os insertos à base de nitreto de silício e a alumina reforçada com *whiskers* são os mais reativos com o cobalto e com o ferro. A reatividade do carboneto de silício com materiais ferrosos parece ser a razão pela qual os insertos de  $Al_2O_3 + SiC$  possuem baixo desempenho nas aplicações em aços endurecidos, onde o desgaste predominante é o de cratera.

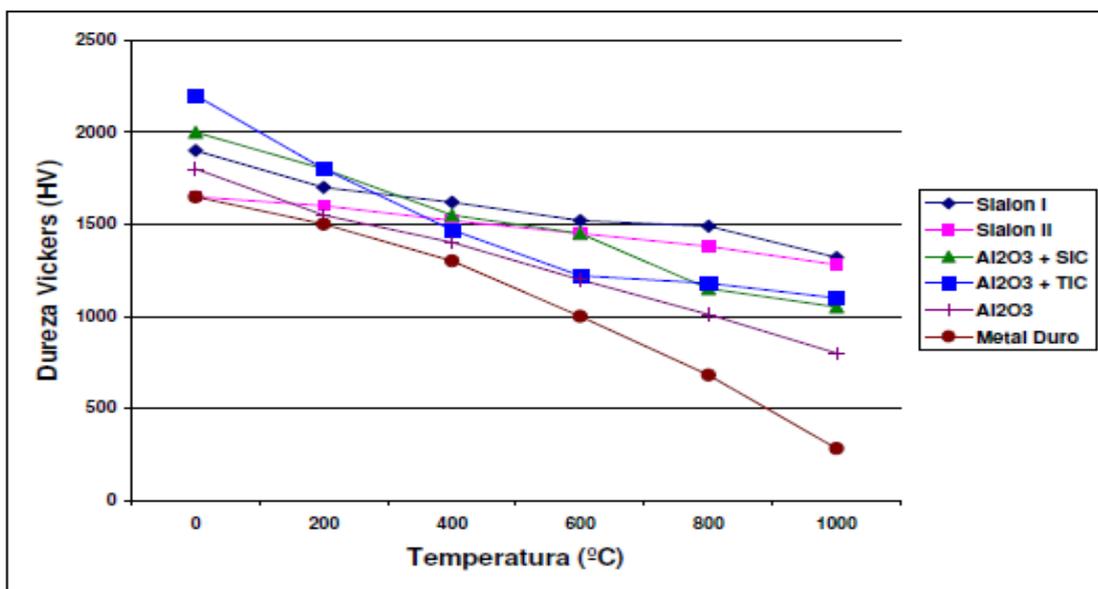
Pelo que foi exposto, pode-se dizer que os requisitos de um inserto cerâmico são exigências da aplicação em si. A aplicação do material da ferramenta depende do tipo de material a ser usinado, das condições de corte e das condições da máquina–ferramenta. A capacidade em atender a estes requisitos é função direta de suas propriedades físicas, mecânicas, químicas e térmicas, e estas por sua vez são dependentes da composição química, da microestrutura e do processo de fabricação (PEREIRA, 2006).

#### 2.4.3.2 Resistência ao Choque Térmico

Para os insertos cerâmicos, observa-se que a resistência ao choque térmico é inversamente proporcional ao coeficiente de expansão térmica e diretamente proporcional à condutividade térmica do material. Situações que envolvam alterações bruscas de temperatura como corte interrompido ou utilização interrupta de fluido refrigerante, pode causar fraturas nos insertos cerâmicos. Os insertos à base de nitreto de silício ( $Si_3N_4$ ) são os mais resistentes ao choque térmico, fato este, que se deve à sua boa condutividade térmica, e baixo coeficiente de expansão (PEREIRA, 2006).

### 2.4.3.3 Dureza

Conforme Pereira (2006), a dureza a frio da aresta de corte deve ser geralmente três vezes maior que a dureza da peça. Portanto, para tornear aços cuja dureza seja superior a 60 HRC (aproximadamente 760 HV), seria necessário uma ferramenta com dureza superior a 2200 HV. Dos insertos cerâmicos anteriormente relacionados, os que apresentam maior dureza à temperatura ambiente são os insertos cerâmicos à base de alumina reforçada com *whiskers* (2000 HV) e a cerâmica mista (2200 HV).



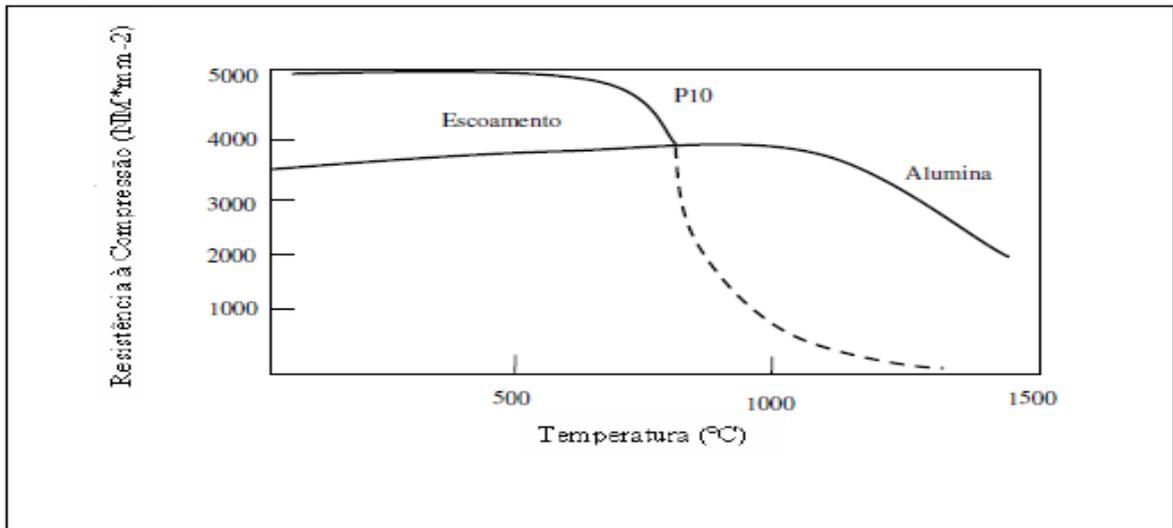
**Figura 2.10 – Valores da dureza com relação à temperatura para determinados materiais (Adaptado de Pereira, 2006).**

Porém, o fato de alguns insertos cerâmicos não apresentarem dureza ideal na temperatura ambiente, não deve ser considerado isoladamente, pois a dureza a quente do material da ferramenta e da peça, variam de acordo com o par, ferramenta – peça. Na Figura 2.10 é mostrada a variação da dureza com relação à temperatura para determinados materiais.

### 2.4.3.4 Resistência Mecânica

De acordo com Pereira (2006), as cerâmicas geralmente falham devido à fratura frágil, apresentando uma deformação plástica reduzida antes da ruptura. A ruptura ocorre devido à propagação catastrófica de um defeito (trinca) quando sujeito a tensões suficientemente altas. Os insertos cerâmicos apresentam alta resistência à compressão, que varia muito pouco com

relação à temperatura, conforme pode ser visto na Figura 2.11. Porém é pouco resistente ao choque. O metal duro, por exemplo, apresenta alta resistência à compressão, mas decai sensivelmente com o aumento da temperatura. Por outro lado, a resistência à tração dos materiais cerâmicos é muito baixa, razão pela qual recomenda-se a utilização de insertos com ângulo de saída negativo, visando tirar-se vantagem da alta resistência à compressão.



**Figura 2.11 – Variação da resistência à compressão com a temperatura para insertos de cerâmica (Adaptado de Pereira, 2006).**

#### 2.4.4 Diamante

O diamante é um material caracterizado pelas suas excelentes propriedades mecânicas, ópticas e térmicas que resultam numa estrutura cristalográfica constituída por átomos de carbono ligados dum modo covalente e dispostos segundo tetraedros com comprimentos de ligação uniformes. Esta estrutura dá origem a um material extremamente duro, muito resistente ao desgaste e com baixo coeficiente de atrito, com aptidão comprovada para ser utilizado no corte de vários tipos de materiais não ferrosos e não metálicos. Na Tabela 2.7 apresentam-se as propriedades mais relevantes do diamante monocristalino que são solicitadas nas aplicações do diamante como ferramenta de corte (CASTRO, 2005).

| Propriedades   |                      |
|--|----------------------|
| Densidade ( $\text{g/cm}^3$ )                        | 3,5                  |
| Dureza Knoop (GPa)                                   | 80-120               |
| Módulo de elasticidade (GPa)                         | 1050-1200            |
| Tenacidade à fractura ( $\text{MPa m}^{-1/2}$ )      | 3,4                  |
| Resistência à tracção (GPa)                          | 5                    |
| Tensão de compressão (GPa)                           | 16                   |
| Coefficiente de atrito                               | 0,03                 |
| Condutividade térmica (W/m.K)                        | 600-15000            |
| Coefficiente de expansão térmica ( $\text{K}^{-1}$ ) | $0,8 \times 10^{-6}$ |
| Razão de Poisson                                     | 0,07                 |

**Tabela 2.7 – Principais propriedades do diamante (Adaptado de Castro, 2005).**

Castro (2005), afirma que acrescentar tais propriedades, e considerando agora a sua reatividade química, o diamante é totalmente inerte em contato com metais como o alumínio, o cobre, o zinco, com os plásticos e com os materiais cerâmicos. No entanto, reage a altas temperaturas com os metais que têm a capacidade de solubilizar carbono, dos quais se destacam o ferro, o níquel e o cobalto, e forma carbonetos com o titânio, o zircónio, o tântalo e o tungsténio.

Tendo em atenção as propriedades anteriores, os materiais à base de diamante apresentam-se como ideais para maquinar ligas de alumínio e de cobre, materiais compósitos de matriz metálica, plásticos, madeira e seus aglomerados. Nestas aplicações, o diamante tem sido utilizado na sua forma natural e sintética, nomeadamente na forma de diamante PCD e diamante CVD, os quais serão abordados nos pontos seguintes (CASTRO, 2005).

#### **2.4.5 Nitreto de Boro**

O nitreto cúbico de boro (cBN) é segundo material superduro comercialmente aplicado na indústria. Seu principal uso está relacionado a usinagem sob altas velocidades de materiais ferrosos, de difícil mecanização, tais como aços de elevada dureza (acima de 50HRC) e ferros fundidos não maleáveis, atuando num campo onde as ferramentas adiamantadas não atuam,

provendo também alta qualidade superficial a um nível que possibilita eliminar operações posteriores de retífica (BOBROVNITCHII, 2007).

Segundo Bobrovnitchii *et al.* (2007), a obtenção de pastilhas sinterizadas de CBN se dá via compactação de pós de CBN sob alta pressão (>5,5GPa) e altas temperaturas (acima de 1873K) em períodos que variam desde alguns poucos minutos a até 30 minutos. O pó de CBN é misturado a um ligante, e submetido aos parâmetros de sinterização, no interior de uma matriz especial, chamada dispositivo de alta pressão.

Os materiais a base de CBN obtidos por este método são caracterizados pela dispersão da tenacidade da estrutura que é garantida pela ação dos seguintes fatores (BOBROVNITCHII, 2007):

- Tipo e composição do ligante na mistura reativa;
- Presença de gradientes de pressão e temperatura na câmara de compressão do DAP;
- Diferença de dilatação entre o CBN e o material ligante;
- Formação de novas fases com variação do volume, resultado da interação entre os diversos elementos que compõe a mistura reativa;
- Velocidade de redução da pressão e temperatura;

É difícil eliminar a influência dos fatores acima citados, restando para estudos e pesquisas, quase que exclusivamente, o estudo sobre a influência da composição de alguns ligantes e variação dos parâmetros (pressão e temperatura) durante o processo de sinterização, sobre a efetividade da pastilha de CBN nos processos de usinagem

A sinterização do CBN tem sido objeto de extensivos estudos, devido a excelentes propriedades químicas e físicas e propriedades mecânicas. Diversos autores têm avaliado a influência da fase ligante e seu resultado nas propriedades finais do compósito de CBN, e os ligantes a base de titânio têm sido objeto de alguns estudos devido as propriedades de resistência ao desgaste, dureza e tenacidade obtidas. A escolha do ligante para compósitos de CBN deve ser baseado na combinação de diversos fatores tais como (RONO *et al.*, 2002).

- Propriedades mecânicas elevadas que possibilitem manter as características de corte do compósito nos processos de usinagem;
- Significativo grau de adesão entre o material ligante e as partículas de CBN;

- Ausência de fases indesejáveis, que são aquelas que durante a aplicação da pressão e temperatura prejudiquem a sinterização;
- Coeficientes de dilatação e compressibilidade semelhante ao das partículas de CBN para prevenir o surgimento de trincas na interface do compósito;
- Consideração de fatores tecnológicos tais como disponibilidade de mercado e facilidade para o pré tratamento, tais como: trituração, moagem, aquecimento, oxidação, etc.

### **3 APLICABILIDADE DAS FERRAMENTAS DE CORTE NOS PROCESSOS DE USINAGEM.**

#### **3.1 AÇO RÁPIDO**

Teles (2007) afirma que os aços rápidos revestidos surgiram nos anos 80, com a introdução do processo de deposição física de vapor (PVD) citado mais adiante. O processo de cobertura originalmente desenvolvido para a aplicação de revestimento de ferramentas de corte, o CVD (Chemical vapour deposition), desenvolvido na década de 60, é realizado a temperaturas na ordem de 1000 °C, acima da temperatura de revenimento dos aços não podendo ser aplicado para as ferramentas de aço rápido. O processo PVD é realizado com temperaturas próximas a 500 °C viabilizando a aplicação de coberturas em ferramentas de aço rápido. Estes revestimentos proporcionaram à ferramenta boa tenacidade no núcleo e alta resistência ao desgaste na superfície. Segundo Diniz (2005), para revestimento utiliza-se o nitreto de titânio (TiN) e o carbonitreto de titânio (TiCN). A desvantagem do revestimento do aço rápido é que após a ocorrência do desgaste o operador, ao reafiar a aresta de corte, efetua a remoção da camada de revestimento, o que resulta numa nova aresta de corte com propriedades diferentes da ferramenta nova.

Conforme Teles (2007), os aços rápidos sinterizados são fabricados pelo processo de metalurgia do pó, que tem a vantagem de possibilitar partículas de carbonetos muito menores e mais dispersas na matriz, além de facultar a incorporação de um número maior de elementos de liga (carbonetos) que o processo de fabricação convencional.

#### **3.2 APLICAÇÕES PARA OS INSERTOS CERÂMICOS**

Atualmente a utilização de cerâmicos na usinagem de aços está restrita ao torneamento de aços de baixa liga ou endurecidos, sendo que, tanto as cerâmicas brancas como as mistas podem ser utilizadas. Em geral, à medida que a dureza da peça ou a velocidade de corte crescem, mais adequada é a utilização das cerâmicas mistas, que resistem melhor às tensões térmicas, e ao efeito combinado de alta temperatura e esforços de corte, quando comparadas às cerâmicas baseadas em óxidos. Razão pela qual são mais indicadas para o torneamento de aços endurecidos. Os cermets também são utilizados na usinagem de aços, porém, com menores velocidades de corte e principalmente para aços moles, devido a sua menor resistência ao desgaste.

De acordo com Pereira (2007), a usinagem de ligas de níquel resistentes ao calor é crítica devido ao elevado desgaste de entalhe gerado durante o corte. Para este tipo de desgaste, é recomendado um material que tenha baixa adesão ao cavaco e boa micro tenacidade, já que o principal mecanismo de desgaste não é a abrasão, como nos casos de desgaste de flanco e cratera. Se forem levadas em consideração as principais características dos materiais, as cerâmicas a base de nitreto de silício, principalmente o sialon, são as que atingem maior sucesso na usinagem destes materiais. O  $Al_2O_3$  reforçado com whiskers também é utilizado com sucesso na usinagem das ligas de níquel resistentes ao calor. As ferramentas cerâmicas também encontram larga aplicação na usinagem do ferro fundido em peças da indústria automobilística. As cerâmicas a base de  $Al_2O_3$  são recomendadas para a usinagem de fundidos de boa qualidade ou pré usinados, onde o risco de choques é menor ou a variação térmica causada pela variação da profundidade de usinagem é menor e, portanto, não se exige da ferramenta elevada tenacidade e resistência ao choque térmico.

Atualmente a otimização dos parâmetros de corte em usinagem está limitado à escolha correta da ferramenta com base em avanços, profundidades de usinagem e velocidades de corte indicados por fontes que publicam a experiência acumulada no assunto. A principal preocupação, no que tange à otimização, é conseguir usinar a peça dentro das especificações do desenho da mesma. São poucos freqüentes os relatos práticos que mostram uma preocupação de aliar ao cuidado acima mencionado, o de otimizar as condições de corte.

Coppini e Baptista (1998), comentam que as condições operacionais de usinagem são utilizadas através de extrapolações àquelas existentes, mesmo sendo notório o fato de que este processo de fabricação depende de um número fantásticamente alto de fatores de influência e que tal prática é, por este motivo, geradora de possíveis grandes erros que se perpetuam em plantas fabris, gerando e avolumando eventuais grandes prejuízos que permanecem como se não existissem.

### **3.3 APLICAÇÕES DOS INSERTOS PCBN**

As ferramentas de PCBN são geralmente empregadas na usinagem de aços endurecidos (45 a 65 HRc), mesmo em condições severas (corte interrompido), aços-ferramenta, aços rápidos, ligas ferrosas resistentes a altas temperaturas a base de cobalto, metais duros e revestimentos duros com altas percentagens de carboneto de tungstênio ou Cr-Ni, aplicadas por soldagem de deposição ou jato de material liquefeito por chama. De maneira geral as aplicações onde o CBN é utilizado são aquelas onde o diamante policristalino não pode ser utilizado e o

metal duro não possui propriedades adequadas para realizar a tarefa. O CBN compete então com o processo de retificação na substituição deste processo pelo torneamento, por exemplo, e com os materiais cerâmicos nos processos de fresamento, torneamento e mandrilhamento (COPPINI; BAPTISTA, 1998).

### **3.4 APLICAÇÕES DE FERRAMENTA COM METAL DURO**

Geralmente, os fabricantes de ferramentas e as pesquisas com ferros fundidos recomendam utilizar ferramentas de metal duro pertencentes à classe K para usinagem desses materiais. Ferramentas de cerâmicas, à base de óxido de alumínio ou de nitreto de silício, também vêm sendo utilizadas em escala significativamente crescente, principalmente quando a usinagem é realizada em máquinas que possibilitam trabalhar com velocidades de corte maiores do que as utilizadas com ferramentas de metal duro (Boehs et al., 2000). A classe K e as cerâmicas são recomendadas para materiais com cavaco descontínuo. Para o ferro fundido nodular devido ao cavaco contínuo pode-se também utilizar ferramentas da classe P (TELES, 2007).

A aplicação de coberturas nas ferramentas de usinagem implicam em ferramentas mais eficientes que se traduz em maior volume de cavaco por tempo, aumento da vida útil com aumento da velocidade de corte. A aplicação dessa tecnologia produz aumento significativo da produtividade, com a conseqüente redução dos custos de produção (TELES, 2007).

## 4 CONSIDERAÇÕES FINAIS E TRABALHOS FUTUROS

### 4.1 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O grande desafio no aumento e desenvolvimento de ferramentas de corte está ligado no equilíbrio entre a dureza e a tenacidade, onde são duas propriedades de grande relevância para o desempenho da ferramenta de corte, sendo que elas, não são facilmente encontradas em um mesmo material. No processo de fabricação de tais materiais, consegue-se combinações de dureza e tenacidade.

As ferramentas que possuem determinados revestimentos procuram o equilíbrio entre propriedades necessárias através do uso de um material base, que confere propriedades de tenacidade e alguma dureza, e um revestimento, com alta dureza, resistência a abrasão e inércia química.

Na atualidade de processos de usinagem, duas categorias de materiais se sobressaem, que são os aços e os metais, e de certa forma podem ser considerados os mais importantes para usinagem, ainda que não os mais eficientes ou tecnologicamente desenvolvidos.

A importância dos aços rápidos e dos metais duros se deve ao fato de, no seu desenvolvimento, terem permitido os maiores saltos tecnológicos da história dos processos de usinagem, onde ocorreu apenas um o crescimento nas velocidades de corte no desenvolvimento de cada um desses materiais, comparado com os materiais de corte então existentes.

Um outro fato importante que percebeu no presente trabalho foi a alternância de temperaturas altas e baixas. Dessa forma, a preferência aos cermets para usinagem de acabamento e super acabamento de ferrosos, em especial os ferros fundidos e os aços endurecidos, devido às pequenas áreas de contato entre o cavaco e a ferramenta, podendo trabalhar com altas velocidades de corte mas, necessariamente, devem ser utilizados com pequenos avanços e pequenas profundidades de usinagem.

Portanto, a otimização dos parâmetros de corte em usinagem se limita a escolha certa da ferramenta de corte para determinados tipos de operações em usinagem, levando em consideração os avanços, profundidades de usinagem e velocidades de corte. Dessa maneira, a principal preocupação, no que sentido da otimização dos processos de usinagem, é conseguir usinar a peça dentro das especificações do desenho da mesma.

## 4.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

**Para sugestões de trabalhos futuros, sugerem os itens abaixo:**

- Utilização de ferramentas de PCBN na verificação do comportamento da vida da ferramenta e rugosidade média;
- Discutir o desempenho das ferramentas cerâmicas mista para determinadas condições, de forma a serem ensaiadas em um torno de alta rigidez;
- Estudar a influência da variação dos parâmetros de corte, no torneamento de um aço de baixa dureza.

## REFERÊNCIAS

ALVES, F.; JORGE Lino. **Materiais para Ferramentas**. Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial. Faculdade de Engenharia, Universidade do Porto, 2005.

AMERICAN SOCIETY TESTING AND MATERIALS. **Standard specification for tool steel high speed**. Annual book of ASTM standards, section 1, Iron and steel products, vol. 01.05, p. 339-49, 1999. (ASTM A600-92a).

AMORIM, Heraldo José. **Estudo da relação entre velocidade de corte, desgaste de ferramenta, rugosidade e forças de usinagem em torneamento com ferramenta de metal duro**. Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia. Porto Alegre, 2002.

ÁVILA, R. F. **Técnicas e Procedimentos de Caracterização de Revestimentos Tribológicos**. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, Apostila. 2003A. 52 p.

BAPTISTA, André Luís de Brito. **Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços**. Rem: Revista Escola de Minas, v. 55, n. 2, p. 103-109, 2002.

BOBROVNITCHIL, G.S., SKURY, A.L.D., RAMALHO, A.M., MONTEIRO, S.N., **Desenvolvimento de materiais superduros policristalinos para ferramentas de corte, Máquinas e Metais**. n. 495, pp. 302-333, abril de 2007.

CALLISTER Jr., W. D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC – Livros Técnicos e Científicos Editora S.A., 2002. 589 p.

CAMERINI, R. V. **Efeitos do processamento em altas pressões e altas temperaturas na aderência de filmes de diamante CVD depositados sobre metal duro**. Dissertação de Mestrado, UFRGS, 2008.

CASTRO, Gil Costa. **Ferramentas de corte de diamante CVD para torneamento a seco de ligas Al-Si**. 2005. Dissertação de Mestrado. Universidade de Aveiro, 2005.

CERVELIN, José Eduardo. **Estudo teórico experimental das forças de corte no processo de torneamento**. Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo para a obtenção de título de Mestre em Engenharia de Produção. São Carlos, 2009.

CHRISTOFFEL, K. **High-speed machining – from a tool manufacturer’s perspective**. In: Seminário Internacional de Alta Tecnologia – Manufatura Avançada, 6., 2001, Piracicaba-SP. Anais. Piracicaba: UNIMEP, 2001. P. 121-151.

COPPINI, Nivaldo Lemos; BAPTISTA, Elesandro Antonio. **Alternativas de Otimização dos Parâmetros de Corte para Cenários de Fabricação em Usinagem**. Artigo publicado no Encontro Nacional de Engenharia de Produção, ENEGEP, Niterói, Rio de Janeiro, 1998.

DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI, N. L., 2010. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 7.ed., Ed. Artiber, São Paulo, 262 p.

FERNANDES, Jesum Alves. **Ferramentas Diamantadas para Usinagem de Madeira**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Sul para obtenção de título de Mestre. Porto Alegre, 2009.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. São Paulo: Editora Edgard Blücher Ltda, v. 1. 1977, 10ª reimpressão. 2000. 751 p.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**. Vol.1., ed. Edgard Blucher, 1970.

FILHO, F. C. L. **Análise da usinagem da madeira visando a melhoria de processos em indústrias de móveis**. Tese de Doutorado, UFSC, 2004.

JESUS, Edilson Rosa Barbosa. **Ferramentas de usinagem em aço rápido AISI M2 obtido por conformação por “spray”**. Tese apresentada como para obtenção em título de Doutor em Tecnologia Nuclear pelo Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares. São Paulo, 2004.

MACHADO, A. R., ABRÃO, A. M., Coelho, R. T., Silva, M. B., 2009. **Teoria da Usinagem dos Materiais**. Ed. Edgar Blücher, São Paulo, 384p.

PEREIRA, Jean Carlo Cescon. **Determinação de Modelos de Vida e Rugosidade no Torneamento do Aço ABNT 52100 Endurecido Utilizando a Metodologia de Superfície de Resposta (DOE)**. Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção de título de Mestre. Universidade Federal de Itajubá, 2006.

RIBEIRO, José Luiz Silva. **Fresamento do Aço Vhsuper nos Estados Recozido e Temperado Com Metal Duro e Cermet**. Tese apresentada ao Programa de Pós – Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção de título de Doutor. Universidade Federal de Minas Gerais, 2007.

RODRIGUES, Alessandro Roger. **Estudo da Geometria de Arestas de Corte Aplicadas em Usinagem com Altas Velocidades de Corte**. Tese apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos, da Universidade de São Paulo para obtenção em título de Doutor em Engenharia Mecânica. São Carlos, 2005.

RONO, X.Z., TSURIJMI, I., FUKUNAOA, O., et al., **High pressure sintering of cBN-TiN-Al composite for cutting tool application, Diamond and Related Materials**. v. 11, pp. 280-286, 2002.

SANTOS, S. C. e Sales, W. F. **Fundamentos da Usinagem dos Materiais**. Belo Horizonte: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais – CEFET-MG e Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais – PUC MINAS. Apostila. 2004. 274 p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte I**. 4. ed. rev. e ampl. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 1995a. 249 p.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II - Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos e Abrasivos**. 2. ed. rev. e ampl. Florianópolis: Editora da Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 1995b. 314 p.

STEMMER, G. E. **Ferramentas de corte I**. Florianópolis: UFSC, 2001 – Ed. 5. 249 p.

TELES, José Marcelo. **Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro**. Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica para obtenção de título de Mestre em Engenharia Mecânica. Minas Gerais, 2007.

TONELLO, Karolina Pereira dos Santos. **Compósitos de alumina com adições de NbC, TaC e TiC para aplicação em ferramentas de corte**. 2013. Tese (Doutorado em Tecnologia Nuclear - Materiais) - Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2013. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/85/85134/tde-29052013-092205/>>. Acesso em: 20 de maio de 2018.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4<sup>a</sup> ed. Woburn: Butterworth-Heinemann, 2000

VALPASSOS, J. M.; RAMALHO, A. M.; BOBROVNITCHII, G. S.; MONTEIRO, S. N. **Sinterização de pastilhas de nitreto cúbico de boro utilizando como ligantes compostos de titânio**. Revista Matéria, ISSN 1517-7076. v. 12, n.3, pp. 438 – 445, 2007.

XAVIER, Fábio Antônio. **Aspectos Tecnológicos do Torneamento do Ferro Fundido Vermicular com Ferramentas de Metal – Duro, Cerâmica e CBN**. Dissertação de Mestrado submetida à Universidade Federal de Santa Catarina, 2003.

YEN, Y. C.; JAIN, A.; ALTAN, T. **A finite element analysis of orthogonal machining using different tool edge geometries**. Journal of Materials Processing Technology. v. 146, p. 72-81, 2004.