

PAULO ROSA DA MOTA

INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE  
FERRAMENTAS DE AÇO-RÁPIDO NO PROCESSO  
DE ROSQUEAMENTO INTERNO EM ALTA  
VELOCIDADE DE CORTE



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2006



PAULO ROSA DA MOTA

**INVESTIGAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE FERRAMENTAS DE  
AÇO-RÁPIDO NO PROCESSO DE ROSQUEAMENTO INTERNO EM  
ALTA VELOCIDADE DE CORTE**

**Dissertação** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Co-Orientador: Prof. Dr. Alexandre Martins Reis

**UBERLÂNDIA – MG**

**2006**

## FICHA CATALOGRÁFICA

Elaborada pelo Sistema de Bibliotecas da UFU / Setor de Catalogação e Classificação

M917i Mota, Paulo Rosa da, 1965-  
Investigação do comportamento de ferramentas de aço-  
rápido no processo de rosqueamento interno em alta  
velocidade de corte / Paulo  
Rosa da Mota. - Uberlândia, 2006.  
142f. : il.  
Orientador: Márcio Bacci da Silva.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de  
Uberlândia, Pro-  
grama de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.  
Inclui bibliografia.  
1. Metais - Corte - Teses. 2. Ferramentas para cortar metais  
- Teses.  
I. Silva, Márcio Bacci da. II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pro-grama de Pós-Graduação em Engenharia  
Mecânica. III. Título.

CDU: 621.9

Aos meus pais, Jair (em memória) e Clara,  
Aos meus Irmãos e Irmãs,  
À minha Esposa Denise e meus  
Filhos Rafael, Rodrigo e Raquel,  
pelo Amor, Incentivo e Dedicação.  
Aos demais amigos e familiares



## AGRADECIMENTOS

- A Deus pela vida que tenho e por todas as oportunidades que tem me concedido, dentre tantas, a de realizar este trabalho.
- À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.
- De modo especial ao Professor Márcio Bacci da Silva, pelos ensinamentos, orientação e profissionalismo demonstrado em todas as situações.
- Ao Professor Alexandre Martins Reis, pela co-orientação, pelo apoio, incentivo, amizade e pelas importantes discussões e sugestões sobre este trabalho.
- Ao Professor Álisson Rocha Machado pelo apoio e incentivo durante a realização desse trabalho.
- Aos demais Professores do Curso de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, pelos conhecimentos transmitidos.
- À equipe do Laboratório de Tribologia e Materiais (LTM), em especial ao Professor MSc. Rafael Ariza Gonçalves, pela ajuda técnica, apoio, incentivo e amizade.
- À equipe do Laboratório de Soldagem (LAPROSOLDA), em especial ao Professor Louriel Oliveira Vilarinho pelo auxílio nas análises estatísticas.
- Aos amigos do Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), Éder Costa, Flávia Cristina, Déborah Oliveira, Leandro Reis, Marcelo Nascimento, Nélis Evangelista, Rhander Viana, Rosemar Batista, Ulisses Borges e Vinícius Torres pelas importantes discussões e sugestões sobre os resultados desta pesquisa.
- Aos amigos da FEMEC, André Alves, André Beloni, Evaldo Malaquias, Gilmar Carossi, Paulo Silva, Renato Montandon, Ruham Reis e Solidônio Rodrigues.

- Aos amigos José Edmundo e Sebastião Gonçalves pelo apoio moral e ajuda técnica e à família: Vicente, Rose e filhos pelo apoio familiar em Uberlândia.
- Aos Amigos do Núcleo de Pesquisa em Fabricação do CEFET-GO, Adolfo Sérgio, Aldemi Coelho, Alexandre Martins, Ildeu Lúcio, Luiz Carlos e a todos os demais Professores da Coordenação de Mecânica e Eletromecânica do CEFET-GO, pela confiança, incentivo e apoio.
- Aos alunos de iniciação científica Danilo Alves, Fábio Cunha, Paulo Manara, Gilson Carlos, pela ajuda durante a realização dos ensaios e análises de resultados.
- Aos técnicos Reginaldo Ferreira (LEPU) e Ângela Andrade (LTM), pelo apoio durante a execução dos ensaios.
- Ao NUMA (Núcleo de Manufatura Avançada) da EESC/USP (Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo), por permitir a utilização de suas dependências e equipamentos nos ensaios de medição de torque.
- Ao IFM (Instituto Fábrica do Milênio) que possibilitou o intercâmbio com o NUMA/EESC/USP, que permitiu a realização dos ensaios de medição do sinal de torque.
- À OSG Ferramentas de Precisão Ltda pelo fornecimento das ferramentas utilizadas no trabalho, em nome do Sr. Coiti.
- À FIAT-GM POWERTRAIN pelo fornecimento de material para corpos de prova.
- À Usinagem Brasil (Goiânia) pelo apoio técnico na fabricação do dispositivo para medir desgaste nas ferramentas de corte.
- Ao CEFET-GO, ao CNPq e à FAPEMIG pelo apoio financeiro.
- A todos que de alguma forma contribuíram para realização deste trabalho.

DA MOTA, P. R. **Investigação do Comportamento de Ferramentas de Aço-Rápido no Processo de Rosqueamento Interno em Alta Velocidade de Corte**. 2006. 142 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

## Resumo

O comportamento de machos de corte de aço-rápido (M 6 X 1) foi investigado neste trabalho utilizando altas velocidades de corte, na usinagem de ferro fundido cinzento, nas condições a seco e com MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante). Foram utilizados quatro tipos de aço rápido, com e sem revestimento: convencional (HSS); aço super-rápido com adição de vanádio (HSS-E); aço rápido fabricado pelo processo da metalurgia do pó (HSS-PM); e aço-rápido submetido a tratamento superficial de nitretação. Nos ensaios com revestimentos foram utilizados dois tipos de cobertura, TiN (nitreto de titânio) e Multicamadas de TiN/TiAlN (nitreto de titânio e alumínio). A fixação dos machos foi através de dois cabeçotes, sendo um fixo e o outro auto-reversível. As análises foram feitas por meio do monitoramento direto do nível de desgaste atingido pelas ferramentas. As formas e os mecanismos de desgaste desenvolvidos nas ferramentas foram analisados no MEV. O nível de desgaste foi monitorado através da medição do torque em todas as ferramentas no final de vida. O sinal de torque serviu para facilitar a caracterização dos três estágios desenvolvidos no rosqueamento (corte, repouso e retorno), permitindo fazer comparações entre os dois cabeçotes empregados. Os resultados mostraram que os mecanismos de desgaste predominantes para as ferramentas foram adesão e abrasão. Foi feita análise estatística das principais variáveis estudadas neste trabalho, sendo o efeito da variação das velocidades o principal responsável pela deterioração da aresta de corte dos machos. Os revestimentos e os substratos também foram avaliados através das análises estatísticas, sendo esses últimos menos importante. Dentre as ferramentas investigadas, as revestidas com multicamadas TiN/TiAlN, com velocidade de corte moderada, foram as que apresentaram os melhores resultados em termos de quantidade de furos rosqueados. Outro fator que influenciou a vida das ferramentas foi a aplicação de fluido de corte (MQL).

---

*Palavras Chave: Rosqueamento interno. Machos de Corte. Revestimento. Desgaste de ferramentas. Alta velocidade de corte. MQL.*

DA MOTA, P. R., **Investigation of the Behaviour of High Speed Steel Tools in Tapping Operation at High Speed Cutting**, 2006, 140 p, Master Dissertation, Federal University of Uberlandia, Uberlandia.

### **Abstract**

The main goal of this work is the evaluation of the performance of high-speed steel (HSS) taps when machining grey cast iron at high cutting speeds in dry conditions and when using MQL (minimal quantity of lubrication). The performance of four types of high speed steel with and without coating was investigated. They are: conventional HSS; HSS with addition of vanadium (HSS-E); HSS obtained by powder metallurgy (HSS-PM) and conventional HSS with surface treatment of nitriding. These tool materials are used in two coated situation: with TiN and multi layer TiN/TiAl. It was used two tapping system, one using the collet tapping chuck of the machine tool without axial compensation, and the other using a self rotation system with axial compensation. The tool life criteria were based on dimensional tolerances of the threads, on tool wear and also on catastrophic failure of the tool. Analysis in the scanning electron microscope and optical microscope were done to measure the wear land and to determine the type and mechanisms of wear. The results showed that the effect of the cutting speed depends on the coating and the main wear mechanisms were adhesion and abrasion. The best performance was achieved with the multi layer coating TiN/TiAl. The torque during the tapping operation was also monitored and the results for both system of fixation are compared. It was also performed a statistical investigation of the effects of some parameters. The cutting speed was the most influent parameter on tool wear. The application of cutting fluid improved the performance for all conditions tested.

---

*Keywords: Tapping, Tap tools, Coatings, Tool wear, High cutting speed. MQL.*

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Letras Latinas

|                 |                                                                           |
|-----------------|---------------------------------------------------------------------------|
| $Al_2O_3$ ..... | Óxido de alumínio                                                         |
| $a_p$ .....     | Profundidade de corte                                                     |
| APC.....        | Aresta Postiça de Corte                                                   |
| Cab.....        | Tipo de cabeçote utilizado no rosqueamento (fixo ou auto-reversível)      |
| CNC.....        | Comando Numérico Computadorizado                                          |
| CrC.....        | Carboneto de cromo                                                        |
| CrN.....        | Nitreto de cromo                                                          |
| DLC.....        | "Diamond Like Carbon"                                                     |
| CVD.....        | "Chemical vapour deposition"                                              |
| D.....          | Diâmetro maior teórico da rosca interna                                   |
| $D_1$ .....     | Diâmetro menor da rosca interna                                           |
| $D_2$ .....     | Diâmetro de flancos da rosca interna                                      |
| d.....          | Diâmetro maior da rosca externa                                           |
| $d_1$ .....     | Diâmetro menor teórico rosca externa                                      |
| $d_2$ .....     | Diâmetro de flanco da rosca externa                                       |
| EDS.....        | Espectroscopia de Energia Dispersiva                                      |
| f.....          | Avanço de corte                                                           |
| $F_x$ .....     | Força radial                                                              |
| FUTURA.....     | Denominação comercial para revestimento de multicamadas de TiN/TiAlN      |
| $F_z$ .....     | Força axial                                                               |
| GH 190.....     | Tipo de ferro fundido cinzento (classificação segundo norma FIAT de 1991) |
| H.....          | Altura do filete da rosca                                                 |
| HB.....         | Dureza Brinell                                                            |
| HRC.....        | Dureza Rockwell C                                                         |
| HSC.....        | "High Speed Cutting"                                                      |
| HSM.....        | "High Speed Machining"                                                    |
| HSS.....        | Aço rápido M7 convencional                                                |
| HSS-E.....      | Aço rápido especial M3 com alto teor de vanádio                           |
| HSS-NI.....     | Aço rápido M7 convencional com tratamento superficial de nitretação       |
| HSS-PM.....     | Aço rápido fabricado pelo processo da metalurgia do pó                    |
| HST.....        | "High Speed Tapping"                                                      |
| HV.....         | Dureza Vickers                                                            |

|                          |                                                                          |
|--------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| OSG.....                 | Osawa Screw Grinding                                                     |
| M6 X 1.....              | Rosca métrica com 6 milímetros de diâmetro e passo da rosca igual a 1 mm |
| MEV.....                 | Microscópio Eletrônico de Varredura                                      |
| MQL.....                 | Mínima Quantidade de Lubrificante                                        |
| MoS <sub>2</sub> .....   | Bissulfeto de Molibdênio                                                 |
| P.....                   | Passo da rosca                                                           |
| PVD.....                 | "Physical Vapour Deposition"                                             |
| Rev.....                 | Revestimento aplicado sobre o macho de corte                             |
| SR.....                  | Macho de corte sem revestimento                                          |
| Sub.....                 | Substrato da ferramenta de corte (macho)                                 |
| TiCN.....                | Carbonitreto de Titânio                                                  |
| TiN.....                 | Nitreto de titânio                                                       |
| TiN/TiAlN.....           | Nitreto de titânio/Nitreto de titânio e alumínio                         |
| VB <sub>B</sub> .....    | Desgaste de flanco médio                                                 |
| VB <sub>B</sub> max..... | Desgaste de flanco máximo                                                |
| Vc.....                  | Velocidade de corte                                                      |
| WCC.....                 | Carboneto de Tungstênio Carbono                                          |

## SUMÁRIO

|                                                                                                                                                        |           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>Resumo.....</b>                                                                                                                                     | <b>ix</b> |
| <b>Abstract.....</b>                                                                                                                                   | <b>x</b>  |
| <b>Lista de Símbolos.....</b>                                                                                                                          | <b>xi</b> |
| <b>I – Introdução.....</b>                                                                                                                             | <b>01</b> |
| <b>II – Revisão Bibliográfica.....</b>                                                                                                                 | <b>05</b> |
| 2.1. Usinagem.....                                                                                                                                     | 05        |
| 2.2. Rosqueamento.....                                                                                                                                 | 05        |
| 2.3. Macho de Corte.....                                                                                                                               | 08        |
| 2.4. Cabeçotes para Rosqueamento em Máquinas.....                                                                                                      | 11        |
| 2.5. Torque no Rosqueamento.....                                                                                                                       | 14        |
| 2.6. Materiais de Ferramentas de Corte.....                                                                                                            | 18        |
| 2.6.1. Ferramentas de Aços Rápidos.....                                                                                                                | 20        |
| 2.7. Tratamentos Superficiais e Revestimentos.....                                                                                                     | 22        |
| 2.7.1. Nitretação nas Ferramentas de Usinagem.....                                                                                                     | 23        |
| 2.7.2. Revestimentos das Ferramentas de Corte.....                                                                                                     | 24        |
| 2.8. Ferro Fundido Cinzento.....                                                                                                                       | 28        |
| 2.9. Fluídos de Corte.....                                                                                                                             | 31        |
| 2.9.1. Fluídos de Corte com MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante).....                                                                               | 31        |
| 2.10. Critério de Fim de Vida das Ferramentas de Corte.....                                                                                            | 34        |
| 2.11. Desgaste, Avarias e Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Corte.....                                                                         | 34        |
| 2.11.1. Desgaste, Avarias e Mecanismos de Desgaste em Machos de Corte..                                                                                | 39        |
| 2.11.2. Forma de Medir o Desgaste em Machos de Corte.....                                                                                              | 43        |
| 2.12. Usinagem em Altas Velocidades de Corte ( <i>HSM / HSC / HST</i> ) - ( <i>High Speed Machining, High Speed Cutting, High Speed Tapping</i> )..... | 44        |
| 2.12.1. Definição de <i>HSM / HSC / HST</i> .....                                                                                                      | 44        |
| 2.12.2. Histórico da Usinagem em Altas Velocidades de Corte.....                                                                                       | 46        |
| 2.12.3. Características do Processo <i>HSM</i> .....                                                                                                   | 48        |

|                                                                                                                |           |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>III – Procedimentos Experimentais.....</b>                                                                  | <b>51</b> |
| 3.1. Planejamento Experimental.....                                                                            | 53        |
| 3.2. Máquina-Ferramenta.....                                                                                   | 57        |
| 3.3. Machos de Corte.....                                                                                      | 58        |
| 3.4. Corpo-de-prova, ferramentas e seqüência de execução dos testes.....                                       | 58        |
| 3.5. Sistema de Indexação dos Machos de Corte.....                                                             | 62        |
| 3.6. Avaliação dos níveis de desgaste atingidos pelas ferramentas.....                                         | 64        |
| 3.6.1. Análises no MEV.(microscópio Eletrônico de Varredura).....                                              | 66        |
| 3.7. Estudo do Comportamento do Torque.....                                                                    | 66        |
| 3.7.1. Equipamentos utilizados para medir o torque.....                                                        | 67        |
| 3.8. Sistema de lubrificação utilizado nos teste.....                                                          | 70        |
| <b>IV – Resultados e Discussões.....</b>                                                                       | <b>73</b> |
| 4.1. Análise estatística da vida das ferramentas de corte.....                                                 | 73        |
| 4.1.1. Resultados da primeira etapa.....                                                                       | 73        |
| 4.1.2. Resultados da segunda etapa.....                                                                        | 78        |
| 4.1.3. Resultados dos testes complementares.....                                                               | 82        |
| 4.2. Influência do Tipo de Fixação.....                                                                        | 84        |
| 4.3. Desgaste de flanco apresentado nos machos de corte.....                                                   | 86        |
| 4.3.1. Ferramentas sem revestimento e revestidas com TiN.....                                                  | 86        |
| 4.3.2. Ferramentas de HSS-E e PM revestidos com TiN e TiN/TiAlN com altas velocidades de corte.....            | 89        |
| 4.3.3. Ferramentas de HSS-E e PM revestidos com TiN e TiN/TiAlN em velocidades de corte moderadas.....         | 92        |
| 4.4. Mecanismos de Desgaste.....                                                                               | 94        |
| 4.4.1. Mecanismos de desgaste apresentado nas ferramentas revestidas com TiN em HSM.....                       | 94        |
| 4.4.2. Microanálise por Energia Dispersiva (EDS) nas ferramentas revestidas com TiN.....                       | 97        |
| 4.4.3. Mecanismos de desgaste apresentado nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN em HSM..... | 99        |
| 4.4.4. Microanálise por Energia Dispersiva (EDS) nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN..... | 101       |
| 4.4.5. Mecanismos de desgaste apresentado nos machos estudados nos testes complementares.....                  | 105       |

|                                                                                                                                              |            |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 4.4.6. Mecanismos de desgaste apresentado nos machos utilizados com MQL.....                                                                 | 109        |
| 4.4.7. Mecanismos de desgaste apresentado nos machos em função do tipo de cabeçote.....                                                      | 112        |
| 4.5. Qualidade das roscas fabricadas.....                                                                                                    | 116        |
| 4.6. Torque no rosqueamento.....                                                                                                             | 118        |
| 4.6.1. Comparação do Torque medido com as ferramentas novas utilizando cabeçote fixo e auto-reversível (10 m/min).....                       | 120        |
| 4.6.2. Comparação do Torque medido com as ferramentas novas e em fim de vida utilizando cabeçote fixo com velocidades altas e moderadas..... | 121        |
| 4.6.3. Influência dos revestimentos no torque.....                                                                                           | 123        |
| 4.6.4. Influência da lubrificação no rosqueamento interno com macho de corte                                                                 | 124        |
| 4.6.5. Torque medido para as ferramentas revestidas com TiN/TiAlN.....                                                                       | 126        |
| 4.6.6. Torque medido para as ferramentas revestidas com TiN e TiN/TiAlN.....                                                                 | 127        |
| 4.6.7. Torque medido para os dois cabeçotes (fixo e auto-reversível).....                                                                    | 128        |
| <b>V – Conclusões.....</b>                                                                                                                   | <b>131</b> |
| <b>VI – Proposta para Trabalhos Futuros.....</b>                                                                                             | <b>133</b> |
| <b>VII – Referências Bibliográficas.....</b>                                                                                                 | <b>135</b> |



# CAPÍTULO I

## INTRODUÇÃO

Desde o final do século XIX, os processos de fabricação têm passado por evoluções constantes que resultam no aumento da produtividade, proporcionando significativos impactos na economia dos países industrializados. A usinagem tem importância fundamental frente aos demais processos de fabricação, sendo o mais largamente empregado nas indústrias, transformando em cavacos algo em torno de 10% de toda produção de metais, empregando dezenas de milhões de pessoas em todo mundo (TRENT; WRIGHT, 2000) e representando desta forma mais de 15% do valor total dos produtos industrializados, sejam eles mecânicos ou não (BEZERRA; COELHO; DA SILVA., 2000).

Recentemente a usinagem nas áreas de torneamento e fresamento tiveram avanços extraordinários, frente aos demais processos de fabricação. A combinação de modernas ferramentas modulares e o desenvolvimento de novos projetos de insertos com geometrias complexas, novos materiais de substrato (mais resistentes ao desgaste) e de revestimento, tornaram possível a elevação das velocidades de corte a níveis muito superiores do que as praticadas no final do século passado. Além desses fatos, houve significativos avanços nas tecnologias aplicadas às máquinas-ferramentas, permitindo a usinagem com altíssimas velocidades de corte e avanços, assessoradas por softwares modernos, os quais permitem rápidas interações entre o homem e o meio produtivo. A usinagem com altas velocidades de corte (*HSM – High Speed Machining*), está consolidada nas principais indústrias que trabalham com moldes, matrizes e na fabricação de ligas aeroespaciais (COLDWELL et al., 2003). Além disso, há muitos trabalhos publicados que relatam as vantagens da usinagem em altíssimas velocidades de corte, devido à redução das forças de corte e das baixas temperaturas apresentadas na superfície usinada (NAVINSEK et al., 2002; KISHAWY et al., 2005; DA MOTA et al., 2006).

Entretanto, para as operações de usinagem mais complexas, como no caso dos rosqueamentos internos com machos de corte, ainda hoje há espaço para novas pesquisas, tanto em nível de desenvolvimento de novas ferramentas de corte e revestimentos, como nos processos de fabricação, envolvendo os lubrificantes utilizados na usinagem, bem como os sistemas de fixação das ferramentas de corte (BELLUCO; DE CHIFFRE, 2002; GUANI; CHOUDHURY; MASJUKI, 2004; KISHAWY et al., 2005). O rosqueamento interno com macho de corte é uma das mais exigentes operações de usinagem, devido aos problemas ocasionados pelas dificuldades de remoção do cavaco e de lubrificação adequadas das arestas de corte do macho, adicionados à necessidade de uma relação fixa e inalterável entre a velocidade de corte e o avanço, definida pelo passo da rosca (SKF, 1987). A quebra da ferramenta de corte no processo de rosqueamento pode causar severos danos à cadeia produtiva, pois essa operação de usinagem normalmente é uma das últimas a ser realizada na peça, que neste caso já apresenta um alto valor agregado (SHA; NI; WU, 1990, apud REIS, 2004; MÜLLER, 2000; CAO; SUTHERLAND, 2002). Ao mesmo tempo, trata-se de um processo onde o ciclo completo dura normalmente poucos segundos e pode ser dividido em dois estágios: corte e retorno. Durante o estágio de corte, os dentes do macho entram em ação de corte continuamente um após o outro, e sem experimentar um estágio de corte estável (em que todos os dentes estão em ação) os dentes de corte deixam a peça no fim do furo (no caso de furos passantes), ou sofrem uma desaceleração até parar em um determinado ponto do furo (furo cego). Isto dificulta o monitoramento do processo, pois não existe um sinal de estado estável, que possa ser usado (SHA; NI; WU, 1990, apud REIS, 2004).

Os desgastes e avarias dos machos de corte provocados durante a operação de rosqueamento surgem com maior veemência nas arestas da região cônica do macho, pois é esta a primeira porção do macho a realizar as ações de corte (BEZERRA et al., 2001). Quanto à forma de se medir os desgastes e avarias que ocorrem nos machos de corte, é comum localizar na literatura dados relativos a medições de desgaste de flanco, não existindo, contudo um parâmetro definido para isso, já que as definições de  $VB_B$  (desgaste de flanco médio) e  $VB_{Bmax}$  (desgaste de flanco máximo) não são diretas para estas ferramentas que possuem uma geometria complexa. Assim, ao contrário do que ocorre com outras ferramentas de corte, são poucos os critérios conhecidos e praticados que avaliam o estado de desgaste dos machos de corte. Não existe um critério para avaliação do estado de desgaste dos machos de corte, que seja comumente reconhecido e praticado (SHA; NI; WU, 1990, apud REIS, 2004). Desta forma, os critérios para avaliação do desgaste dos machos podem ser totalmente diferentes para dois ou mais usuários distintos. Reis, 2004,

desenvolveu uma técnica para medir o desgaste em machos de corte, a qual será adotada neste trabalho.

O desempenho de uma ferramenta de rosquear tipo macho em uma determinada aplicação depende de vários parâmetros de sua fabricação, tais como o ângulo de saída, tamanho do detalonamento, redução do diâmetro, comprimento total do macho, diâmetro da haste e sistema de lubrificação utilizado, entre outros. Porém, os fatores que causam maiores impactos na forma como esta ferramenta efetivamente trabalha são os materiais e os revestimentos com os quais é fabricada (ARTER, 1990).

Devido as limitações operacionais inerentes ao processo de rosqueamento interno, como a dificuldade de se trabalhar em altas velocidades de corte para os metais ferrosos e a falta de sincronismo entre o avanço e as rotações na mudança do sentido de rotação, além do alto grau de desgaste gerado nas ferramentas de corte, foi criado na década de 1990, unidades de rosqueamento auto-reversíveis de alta velocidade. Isso possibilitou o rosqueamento com máquinas que possuem poucos recursos técnicos (máquinas antigas), proporcionando elevadas velocidades de fuso e rápida reversão, permitindo a implementação da usinagem em altas velocidades de corte (*"HSC" - High Speed Cutting*) no rosqueamento. Atualmente as máquinas com CNC permitem a usinagem de roscas em altas velocidades de corte, utilizando cabeçotes fixos, permitindo o sincronismo de velocidades e avanços, gerando perfis de roscas variados.

O principal objetivo deste trabalho foi estudar o desempenho de machos para máquinas, fabricados com aço-rápido convencional (HSS), aço-super rápido com adições de vanádio (HSS-E), aço-rápido obtido pela metalurgia do pó (HSS-PM) e aço rápido submetido a tratamento superficial de nitretação, no rosqueamentos do ferro fundido cinzento GH-190 (equivalente ao FC 200/250 da norma AISI). É feito também um estudo do desempenho das ferramentas de HSS-E e HSS-PM, revestidas com nitreto de titânio (TiN), e com revestimento multicamadas constituído por camadas alternadas de nitreto de titânio (TiN) e nitreto de titânio-alumínio (TiAlN), que neste trabalho recebe a denominação comercial "FUTURA". As análises foram feitas utilizando:

- 1) Monitoramento direto do nível de desgaste atingido pelas ferramentas, desenvolvido por Reis (2004);
- 2) Estudo das formas e mecanismos de desgaste desenvolvidos nas ferramentas durante o processo de rosqueamento, por meio de análises em microscópio óptico e em microscópio eletrônico de varredura (MEV);
- 3) Monitoramento indireto do estágio de desgaste das ferramentas (em fim de vida) através da medição dos sinais de torque em todas as ferramentas empregadas;

- 4) Monitoramento indireto do desgaste das ferramentas, através de análises das tolerâncias dimensionais das roscas, por meio de um calibre passa-não-passa;
- 5) Dois tipos de cabeçote de fixação da ferramenta na máquina: a) cabeçote fixo; b) cabeçote auto-reversível;
- 6) Duas condições de velocidade de corte: a) 37,5 m/min; b) 75 m/min;
- 7) Duas condições de lubrificação: a) usinagem a seco; b) usinagem com Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL);

Neste documento estão descritas as atividades e os resultados obtidos nesta pesquisa.

No capítulo II é apresentada uma revisão bibliográfica, onde são abordadas informações teóricas necessárias ao bom entendimento deste trabalho. Nesta revisão são considerados os seguintes assuntos: conceitos básicos sobre usinagem de roscas; ferramentas de corte; tipos de cabeçotes utilizados no rosqueamento interno; torque no rosqueamento com machos de corte; revestimento das ferramentas de corte; fluidos de corte (MQL); desgaste e avarias em ferramentas de corte e usinagem com altas velocidades de corte.

No capítulo III são descritos, detalhadamente, os procedimentos adotados para a realização dos experimentos, bem como os equipamentos e materiais utilizados.

O capítulo IV traz a apresentação e a discussão dos resultados obtidos, e no capítulo V são apresentadas as conclusões do trabalho. O capítulo VI apresenta as sugestões para trabalhos futuros.

As referências bibliográficas, utilizadas na pesquisa e na elaboração do texto, são apresentadas no capítulo VII.

## **CAPÍTULO II**

### **REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **2.1 Usinagem**

A competitividade industrial força o setor produtivo a se renovar constantemente, melhorando os produtos já disponíveis ou até mesmo criando novos projetos. Na usinagem isso não é diferente. Diversos fabricantes de máquinas e ferramentas buscam soluções para a melhoria da sua linha de produção e de produtos, pesquisando ou acompanhando os clientes no chão-de-fábrica. O estudo detalhado dos processos de usinagem, realizados principalmente em condições reais de corte, buscando investigar as influências dos diferentes parâmetros de usinagem (velocidade de corte ( $V_c$ ), avanço ( $f$ ), profundidade de corte ( $a_p$ ), material da peça e da ferramenta, condição de lubrificação, entre outros) sobre a performance no corte dos metais, é necessário, pois contribui para o entendimento do processo, e entendimento é o passo mais próximo da capacidade de prever (SHAW, 1984).

Dentro deste contexto, o rosqueamento é um processo de usinagem que merece atenção especial, pois normalmente é uma das últimas operações realizadas sobre a peça que está sendo fabricada, e que, portanto já possui um alto valor agregado. Assim, qualquer problema durante este processo pode resultar em refugo e/ou retrabalho o que implica em grande perda de tempo, e conseqüentemente, de dinheiro para a empresa (CAO; SUTHERLAND, 2002; REIS, 2004).

#### **2.2 Rosqueamento**

Para se entender o processo de rosqueamento e suas peculiaridades, deve-se ter bem definido o conceito de rosca, e conhecer suas terminologias e seus símbolos.

A terminologia e os símbolos usados em roscas são definidos pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas), através da NBR 5876 – Terminologia e Simbologia de roscas, a qual segue em linhas gerais as normas ISO, DIN, ANSI (STEMMER, 1992). Segundo a norma P-TB-41 - Terminologia e Simbologia de Roscas (ABNT, 1986), a rosca pode ser definida como sendo “uma superfície composta, gerada por um ou mais perfis quando todos os seus pontos descrevem hélices (rosca cilíndrica) ou espirais cônicas (rosca cônica) coaxiais e de mesmo passo”. Assim, se na superfície externa ou interna de um sólido de revolução cônico ou cilíndrico, for construída uma hélice ou várias hélices paralelas e de seção constante tem-se o que se denomina de rosca.

As roscas são usadas intensivamente em numerosos elementos de máquinas e são classificadas em dois tipos básicos: roscas de fixação, as quais são utilizadas em parafusos, porcas, prisioneiros, hastes roscadas, tendo por objetivo prender peças entre si. Existem também as roscas de movimento, que normalmente são usadas em fusos de máquinas operatrizes, como tornos e fresadoras destinadas a transmitir potência e movimento, transformando movimentos giratórios em lineares (STEMMER, 1992).

A dimensão, o passo e a porcentagem da profundidade da rosca determinam a quantidade de metal removido em qualquer operação que se destine à obtenção de uma rosca, e tem um grande efeito sobre a eficiência e a vida da ferramenta de corte (JOHNSON, 1989). A Fig. 2.1 mostra o perfil básico de uma rosca métrica ISO, conforme ABNT (1986), onde  $D$  é o diâmetro maior teórico da rosca interna,  $d$  é o diâmetro maior da rosca externa,  $D_1$  é o diâmetro menor da rosca interna,  $d_1$  é o diâmetro menor teórico da rosca externa,  $D_2$  é o diâmetro de flancos da rosca interna,  $d_2$  é o diâmetro de flanco da rosca externa,  $P$  é o passo e  $H$  é a altura do triângulo fundamental.

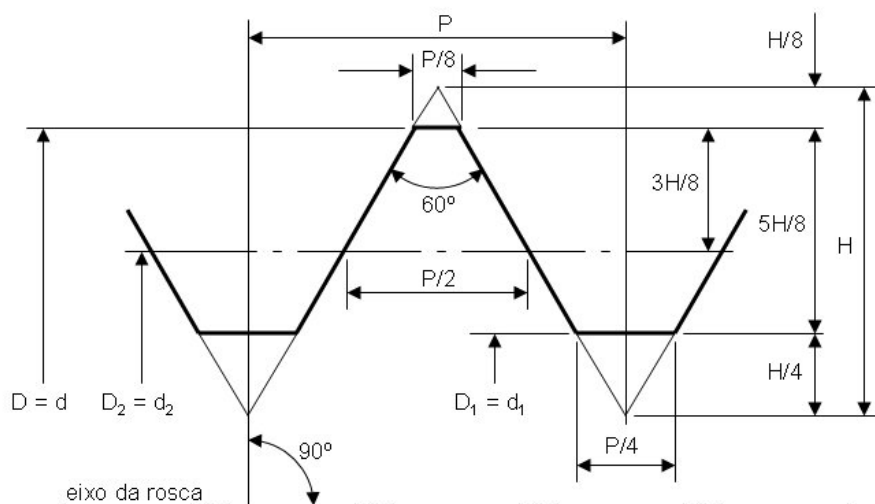


Figura 2.1 – Perfil básico da rosca métrica ISO (ABNT, 1986)

Uma vez entendido o conceito de rosca, pode-se definir rosqueamento como sendo um processo mecânico, de usinagem ou conformação, destinado à obtenção de filetes de rosca, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Este processo envolve movimentos relativos de rotação e avanço entre a peça e a ferramenta, onde uma delas gira enquanto a outra se desloca, simultaneamente, segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada em relação ao eixo de rotação, ou apenas uma delas executa os dois movimentos, ou seja, gira e avança, enquanto a outra fica parada (FERRARESI, 1995).

O rosqueamento interno é realizado para a obtenção de roscas fêmeas, ou seja, roscas em superfícies internas cilíndricas ou cônicas de revolução (FERRARESI, 1995). Esta operação pode ser realizada por diferentes tipos de ferramentas de corte, sendo elas: ferramentas de perfil único; ferramentas de perfil múltiplo; machos de usinagem ou de conformação e fresas. Dentre as ferramentas citadas, o macho de corte é, atualmente, o mais empregado nas operações de rosqueamento interno, devido a sua alta produtividade, e ao fato de apresentar maior precisão na rosca produzida, tanto para pequenos quanto para os grandes diâmetros.

O procedimento para o rosqueamento interno com macho de corte envolve usinagem e retirada de material. O macho de corte é uma ferramenta de múltiplas arestas de corte que, através do movimento rotativo combinado com o axial, executa a usinagem na superfície interna de um furo, cujo diâmetro é um pouco menor que o diâmetro externo do macho de corte, para formar filetes de rosca após a remoção de cavacos, conforme pode ser visto na Fig. 2.2. (MÜLLER; SOTO, 1999).

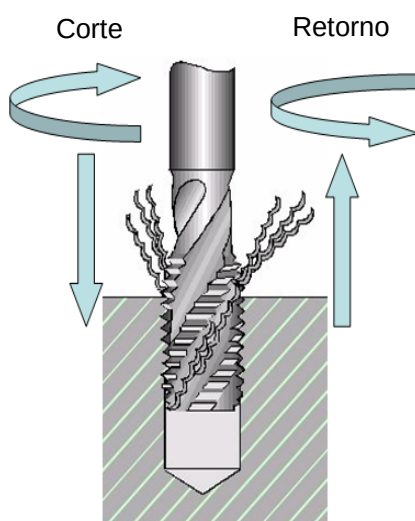


Figura 2.2 – Detalhe do rosqueamento interno com macho de corte (figura adaptada de (MÜLLER; SOTO, 1999))

A ferramenta penetra no pré-furo, girando de acordo com o passo da rosca e ao atingir o final da rosca, pára, reverte a rotação e retorna até uma certa distância fora do furo. Assim, a execução de roscas internas é um dos problemas mais complexos da usinagem, representando um grande desafio na fabricação, devido as dificuldades de remoção dos cavacos e lubrificação inadequada das arestas de corte das ferramentas. O processo exige altos padrões de confiabilidade, pois as peças normalmente são caras e a quebra do macho deve ser sempre evitada. Adicionalmente, há uma relação fixa entre velocidade de corte e avanço, definida pelo passo da rosca, que não pode ser alterada (SKF, 1987; REITER et al., 2006).

A situação se agrava ainda mais, quando as roscas são feitas em furos cegos, onde os machos são submetidos a condições de trabalho bastante severas. Enquanto na abertura de uma rosca passante, os filetes de entrada trabalham livremente e o macho não fica sob carga quando do seu retorno, na abertura de roscas em furos cegos, os filetes de entrada do macho, ao retornar, precisam cortar alguns cavacos, ocasionando uma sobrecarga elevada e variável sobre o macho. Além disso, os cavacos devem encontrar espaço suficiente nos canais do macho, no fundo do furo cego, ou devem ser eliminados para trás (REIS, 2004).

## **2.3 Macho de corte**

Os machos de corte são ferramentas de múltiplo corte específicas para a execução de roscas internas. Eles podem ser utilizados manualmente ou em diversos tipos de máquinas, como furadeiras, tornos, centro de usinagem, rosqueadeiras, podendo ser fixos por desandadores (operação manual) ou em mandris rígidos ou flutuantes (STEMMER, 1992; FERRARESI, 1995; BEZERRA, 2003; REIS, 2004).

O macho é uma ferramenta de corte sofisticada tanto em sua utilização como em sua fabricação, empregado para o corte de roscas internas cilíndricas ou cônicas, e que possui filetes externos e rasgos longitudinais, originando daí o aparecimento de arestas cortantes e sulcos necessários à saída dos cavacos (FREIRE, 1976). Combinando o movimento rotativo com o axial, o macho de corte usina roscas internas, sendo imprescindível que a classe ou tolerância da rosca fique dentro da faixa determinada, pois o processo termina com um único avanço da ferramenta (OSG, 1999). O custo do rosqueamento interno com macho normalmente se eleva quando a dureza do metal da peça é superior a 25 HRC (266HV ou 253HB), de tal forma que, embora aços com dureza próxima a 52 HRC (544HV ou 500 HB) possam ser rosqueados, a eficácia é baixa e o custo é alto (JOHNSON, 1989).

A característica geométrica do macho de corte, composta de vários canais e com extremidade cônica, resulta numa ação de corte praticamente realizada pelas arestas de corte da região cônica, mais a aresta de corte do primeiro filete de rosca completo, que geralmente é da parte cilíndrica. Desta forma, a velocidade de corte é variável ao longo da entrada, sendo menor nos primeiros filetes e maior no filete da região cilíndrica (BEZERRA et al., 2001). Assim, o desgaste ocorre principalmente nesta região (cônica). Similar a outros tipos de arestas de corte, o desgaste desenvolve-se sobre as superfícies de saída e de folga, dependendo do material da peça e das condições de usinagem (BEZERRA, 2003). A Fig. 2.3 mostra alguns detalhes de um dorso de um macho de corte, cujas arestas de corte efetivamente executam a usinagem.

O primeiro filete da parte cilíndrica é o que define o diâmetro final da rosca. À medida, em que o desgaste se desenvolve, tem-se início a ação de corte do filete seguinte da parte cilíndrica e assim sucessivamente, até que o nível de desgaste sobre os filetes não permita a produção de roscas dentro da tolerância especificada (BEZERRA, 2003; REIS, 2004).

Existem diversos tipos de machos, os quais são classificados de acordo com suas aplicações, material a ser usinado, geometria de corte, tipo de revestimento e natureza da operação.

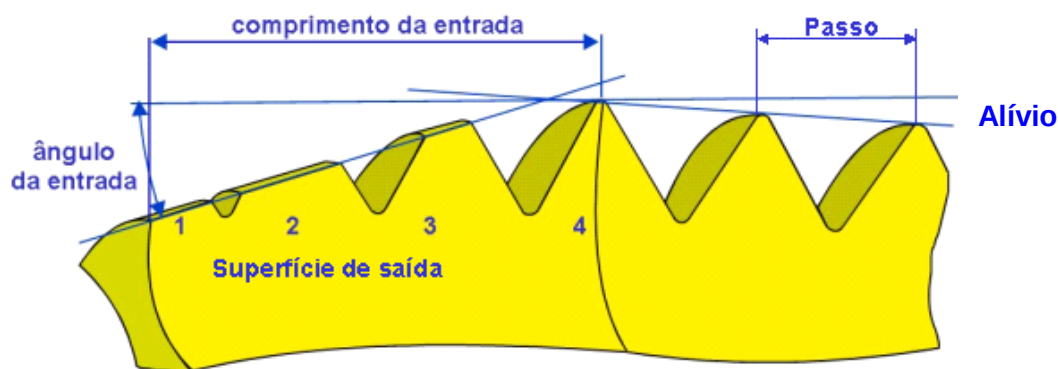


Figura 2.3 – Características da entrada de um macho de corte (Titex Plus, 1999, apud BEZERRA, 2003)

Quanto à forma de aplicação, os machos de corte podem ser classificados em machos manuais e machos máquina. Os machos manuais por sua vez se dividem em machos regulares e machos seriados. Os machos manuais regulares são os mais empregados na produção, pela sua simplicidade e disponibilidade no mercado. Apesar do nome, são usados geralmente na abertura de roscas em máquinas. São fornecidos usualmente em jogos de três, de idênticas dimensões, diferenciadas apenas pelo comprimento do chanfro de entrada. Já os machos manuais seriados são empregados na abertura manual de roscas,

especialmente roscas em furos profundos e em materiais tenazes, sendo também fornecidos em jogos de três, e usados sucessivamente. O macho seriado nº 1 (desbastador), remove o grosso do material, o nº 2 (intermediário) aprofunda a rosca e o nº 3 (acabador) faz o acabamento da rosca (STEMMER, 1992).

Tanto os machos manuais quanto os machos para máquina são produzidos com canais retos, em hélice, ou com uma combinação dos dois. Os machos possuem canais por três razões principais: formar arestas de corte, proporcionar folga para saída dos cavacos, e conduzir fluído para a região de corte. Alguns tipos de machos possuem quatro canais, sendo utilizados para o rosqueamento de materiais metálicos que produzem cavacos moles e fibrosos. Para facilitar a remoção do cavaco no rosqueamento de furos profundos, três ou até dois canais podem ser usados, pois com a diminuição do número de canais e o conseqüente aumento da largura dos mesmos, o espaço para remoção do cavaco aumenta (DILIDDO, 1987; JOHNSON, 1989).

A Fig. 2.4 apresenta os principais tipos de machos encontrados no mercado. Eles são classificados em função do tipo de material a ser usinado e conseqüentemente do tipo de cavaco apresentado. Os machos com canais retos são utilizados tanto para furos cegos quanto para furos passantes em materiais que produzem cavacos curtos ou quebradiços, pois os mesmos ficam retidos nos canais. Por esta razão, e também pela facilidade na sua fabricação e afiação quando comparada a dos machos helicoidais, são normalmente os mais utilizados nas indústrias (OSG, 2005).

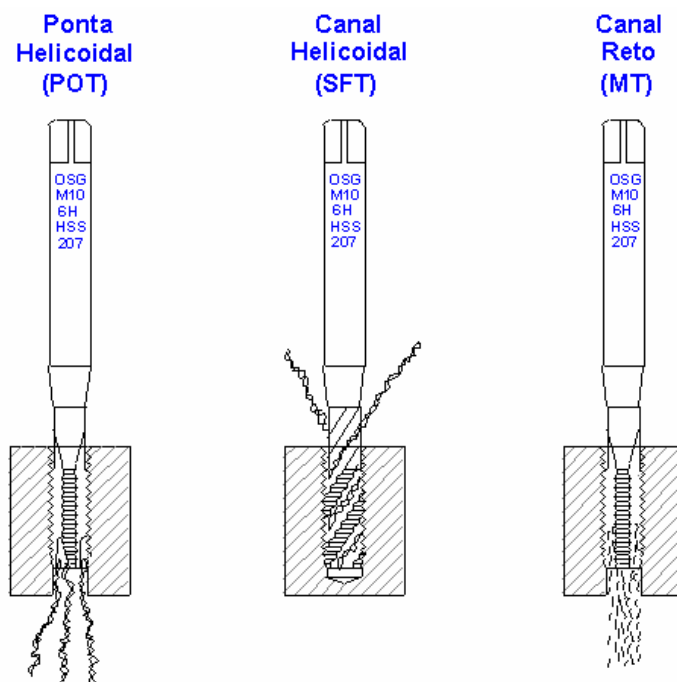


Figura 2.4 – Três tipos básicos de machos (OSG, 2005)

Os machos com ponta helicoidal são usados na produção somente para abertura de roscas com máquina, em furos passantes, em materiais macios de cavaco longo, como alumínio, latão, metais fundidos sob pressão, etc. A ponta helicoidal joga o cavaco para frente, no sentido de avanço da ferramenta. Por isso, os machos com esta geometria são recomendados principalmente para furos passantes, podendo também ser empregados em furos cegos, onde o furo é bem mais profundo do que à parte roscada. Devido ao fato dos canais nos machos com ponta helicoidal terem pouca influência na tarefa de retirada dos cavacos eles podem ser mais estreitos do que nos machos de canal reto sem ponta helicoidal (JOHNSON, 1989). As arestas de corte angulares produzem um acabamento fino nas roscas. Além disso, com os canais livres de cavacos, o fluido de corte pode se mover mais livremente ao longo dos canais até as arestas de corte, passando a exercer suas funções, refrigerante e lubrificante, de uma forma mais efetiva (STEMMER, 1992).

Os machos com canal helicoidal podem ter canais com sentido direito ou esquerdo, sendo que os canais com sentido direito são os mais comuns. Estes machos são indicados principalmente para furos cegos, pelo fato do cavaco sair no sentido contrário ao avanço da ferramenta, tirando-o da região de corte (JOHNSON, 1989).

As dificuldades no rosqueamento interno com machos de corte não estão relacionadas somente com a geometria complexa da ferramenta. Outro fator que dificulta ainda mais a operação de rosqueamento é a necessidade de um perfeito sincronismo entre os movimentos de rotação e avanço do macho de corte. Para resolver, ou pelo menos, minimizar este problema, utilizam-se máquinas com comandos CNC (comando numérico computadorizado), que permitem uma sincronização de movimentos axiais e radiais. Porém, nem todas as máquinas com CNC possuem condições de avançar a ferramenta e girá-la simultaneamente, por meio de movimentos de aceleração e desaceleração constantes entre rotação e avanço. As máquinas CNC mais modernas, como a maioria dos centros de usinagem possuem essas características, fornecendo um sincronismo entre as velocidades de avanço e rotação. Quando as velocidades de corte são maiores, o problema se agrava, sendo necessário o uso de acessórios como os cabeçotes auto-reversores e flutuantes.

## **2.4 Cabeçotes para Rosqueamento em Máquinas**

Tradicionalmente o rosqueamento com machos é realizado a velocidades muito baixas: mesmo em centros de usinagem modernos a maioria dessas operações ainda ocorre com velocidades de corte em torno de 20 m/min. Entretanto, as máquinas contemporâneas e/ou o uso de dispositivos de auto-reversão, permitem empregar

velocidades significativamente mais altas no rosqueamento interno com macho de corte. Dependendo do diâmetro da ferramenta e da forma de fixação do macho, pode-se atingir velocidades de corte superiores a 180 m/min com boa qualidade das roscas usinadas (AGAPIOU, 1994; MÜLLER, 2000).

Os dispositivos são utilizados para corrigir a falta de sincronismo de rotação e avanço, normalmente encontrado nas máquinas convencionais, ou até mesmo em algumas máquinas com CNC mais antigos. A Fig. 2.5 mostra um cabeçote flutuante utilizado no rosqueamento interno, o qual possui um sistema de compensação da rosca. O macho gira com uma velocidade constante ao atingir o furo, permanecendo dessa forma até o eixo da máquina desacelerar e parar. Para a saída da ferramenta, é necessária a inversão do sentido de rotação do eixo-árvore da máquina.

Outro dispositivo bastante utilizado atualmente, principalmente para fabricação de roscas em altas velocidades de corte, é uma unidade de rosqueamento auto-reversível de alta velocidade, conhecido também como cabeçote de rosquear auto-reversível. A reversão, necessária para que se inicie o retorno da ferramenta, é executada por este dispositivo, através de um sistema composto de engrenagens cônicas, não havendo necessidade de mudança do sentido de rotação do eixo-árvore da máquina CNC (MÜLLER; SOTO, 1999). Desta forma, a mudança de rotação não é realizada pelo fuso da máquina, mas pela transmissão integrada de mudança, com auxílio de uma compensação de comprimento no sentido da tração do fuso do dispositivo de rosqueamento.

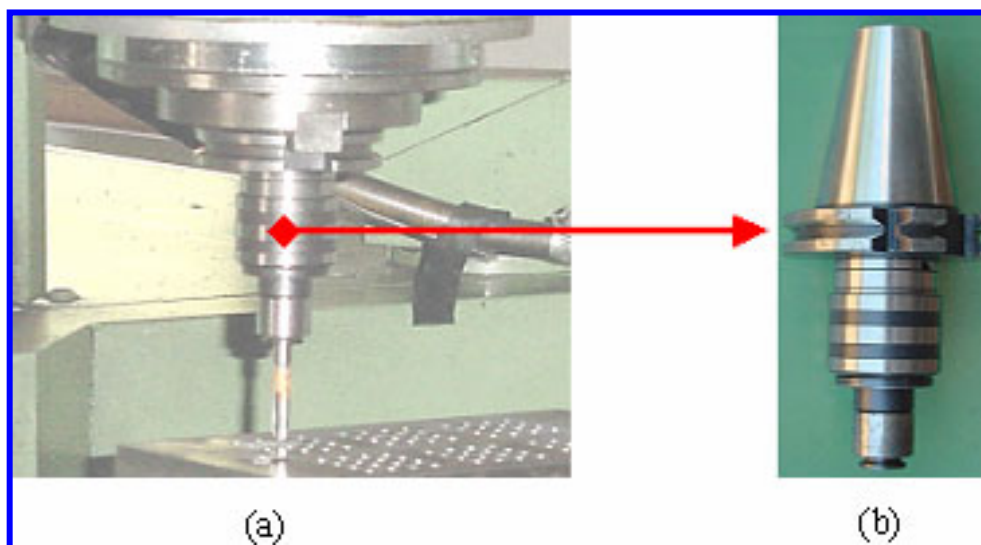


Figura 2.5 – Cabeçote flutuante utilizado para o rosqueamento interno com macho: a) montado na máquina; b) em detalhe (REIS, 2004)

Os cabeçotes de rosquear auto-reversíveis são adequados para uma faixa de roscas de M1 a M20. Conforme o seu tamanho, eles possuem uma faixa de rotações de 1.500 a 6.000 rpm e são adaptados para alimentação interna de líquido refrigerante de até 50 bar. As ferramentas são alojadas numa pinça de fixação com transferência de torque. O ciclo para o rosqueamento com o dispositivo pode ser comparado, em princípio, com os ciclos do mandril de compensação e um fuso síncrono. A diferença é que o processo de corte ocorre com velocidade constante, até que toda a profundidade da rosca seja atingida e, conseqüentemente, com condições constantes de arranque de cavacos. Isto oferece vantagens para a concepção dos machos e ainda permite obter informações claras em relação à influência da velocidade de corte sobre o torque e a vida útil da ferramenta. Pode ser evitada, assim, a formação de arestas postiças de corte e a sua influência sobre a velocidade (LINSS, 2002).

Entretanto, as máquinas com CNC mais modernos possuem outras alternativas para o rosqueamento. Por exemplo, a maioria dos centros de usinagem vem agora com uma função de abertura de roscas síncrona no CNC e pode perfeitamente controlar as taxas de avanço e a rotação, adequando-as para a abertura de roscas a velocidade de até 100 m/min, dependendo das dimensões e geometria do macho de corte, bem como, do material da peça e da ferramenta. Pode-se utilizar um suporte rígido, onde o macho é fixo em um mandril sem compensação. O fuso é sincronizado com os movimentos de rotação e de avanço, correspondendo durante todo o tempo de usinagem. Neste caso o sincronismo é definido pelo comando da máquina, normalmente girando em torno de 3.000 rpm (MÜLLER, 2000; LINSS, 2002). O problema é que a máquina atinge uma velocidade média bem inferior do que a velocidade programada e não pode explorar a geometria, revestimentos e materiais avançados encontrados nos machos de corte atuais (MÜLLER; SOTO, 1999; KOELSCH, 2002). O tempo de usinagem e a depreciação da máquina são maiores, quando comparado com os cabeçotes auto-reversíveis, pois o ciclo de rosqueamento é composto de aceleração, desaceleração e parada do eixo-árvore. Para o retorno do macho acontece o inverso, aumentando o tempo de usinagem (BEZERRA, 2003).

A maioria das máquinas CNC com ciclos síncronos de abertura de roscas limitam a velocidade de operação a 2500 rpm, mas as velocidades máximas de algumas máquinas CNC menores excedem os 3500 rpm. Embora as velocidades e a aceleração rápidas do fuso sejam cruciais para tempos de ciclo rápidos, a abertura de roscas a alta velocidade significa mais do que simplesmente aumentar a velocidade do fuso. A máquina também deve ser capaz de suportar rigidamente a ferramenta, sem desvios, e sincronizar exatamente o avanço com a velocidade, para evitar que a folga prenda o macho de corte, aumentando o torque (KOELSCH, 2002).

## 2.5 Torque no Rosqueamento

O rosqueamento interno com macho de corte é uma das operações de usinagem que mais exigem da ferramenta de corte. Sendo assim, um dos maiores problemas desse processo é a quebra do macho, geralmente devido ao torque excessivo, causado principalmente pelo aumento do atrito, gerado pelo acúmulo de cavacos dentro dos furos e pela falta de lubrificação na interface cavaco/ferramenta, elevando sensivelmente as forças de corte (FANTIN, 1992; CAO; SUTHERLAND, 2002; REITER et al., 2006).

O conhecimento das forças que agem na cunha de corte e o estudo de seus comportamentos são de grande importância, não somente porque a potência requerida para executar o corte pode ser avaliada, mas também porque elas devem ser consideradas no projeto das máquinas e seus componentes, acessórios e ferramentas de corte (CAO; SUTHERLAND, 2002; ZHANG; YANG; WANG, 2003).

O alto valor agregado que normalmente as peças que vão ser rosqueadas possuem, faz com que a quebra de um macho durante o processo, ou a perda da qualidade da rosca fabricada, implique em altos custos industriais (peças refugadas e re-trabalho). Retirar um macho quebrado, sem danificar a peça é uma tarefa árdua, demanda tempo e exige um pessoal com vasto conhecimento técnico (FANTIN, 1992; MEZENTSEV et al., 2002; CAO; SUTHERLAND, 2002), o que implica em perda de produtividade.

A Fig. 2.6 representa esquematicamente o comportamento do sinal de torque no processo de rosqueamento interno de furos passantes com machos de corte. Quanto maior for a dimensão da rosca, maior será o torque resultante. Dependendo da geometria do macho, do tipo de material e do tipo de furo, cego ou passante, pode ocorrer um aumento expressivo do valor do torque, o que vai depender da relação profundidade rosqueada versus diâmetro do furo, devido à condução não favorável dos cavacos, assim como o aumento da fricção provocado nas ranhuras da ferramenta e da parte rosqueada (BEZERRA, 2003).

O sinal representativo do torque na operação de rosqueamento se compõe de diferentes fases (Fig. 2.6). Apenas duas são exploradas no processamento de dados: a zona 1 onde se identificam os valores médio e máximo do sinal de torque; e a zona 2 que contém o valor máximo do pico de reversão. A exploração da zona 1 permite otimizar as condições de corte e controlar o desgaste da ferramenta. Estes dados são utilizáveis para a pesquisa de geometrias ótimas de machos de corte. Na zona 2 o valor máximo do pico de reversão informa sobre a qualidade do furo realizado. Este pico é representativo do torque devido ao atrito quando do retorno do macho de corte (FANTIN, 1992; REITER et al., 2006).

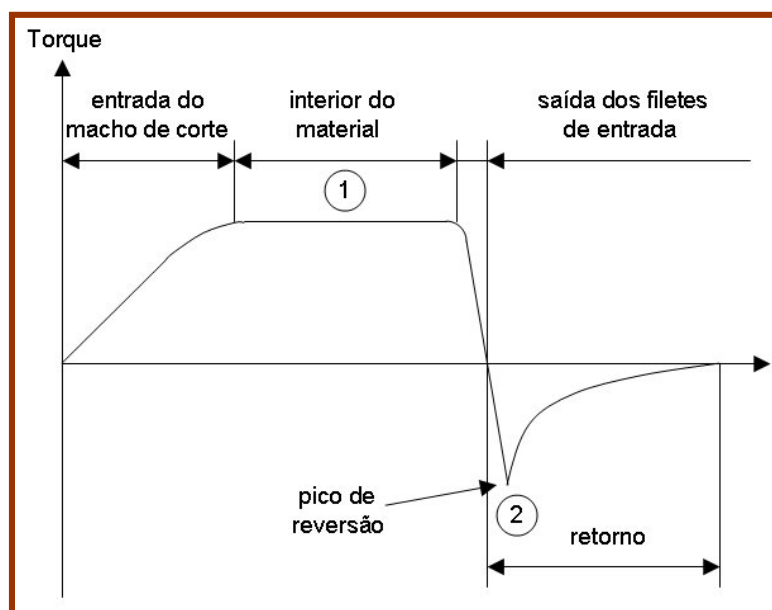


Figura 2.6 – Representação esquemática do comportamento do torque no rosqueamento (FANTIN, 1992)

Cao e Sutherland, (2002), desenvolveram uma técnica de modelagem do rosqueamento interno com macho de corte HSS, sem revestimento, variando muitos parâmetros de usinagem, como a geometria das ferramentas, a profundidade das roscas, os fluídos de corte, as velocidades de rosqueamento e as profundidades do pré-furo. O modelo estima a força axial e o torque resultante da formação do cavaco e da fricção da ferramenta com a peça. Exaustivos testes foram feitos em aço ao carbono. No entanto, os resultados sempre foram diferentes.

Em seus experimentos, Cao e Sutherland, (2002), perceberam que não foi possível uma repetibilidade nas medidas de torque no rosqueamento. A explicação dessa variação está relacionada com o processo de formação do cavaco, e com seu comportamento após ter sido gerado. Devido a geometria dos machos de corte, de tempos em tempos os cavacos ficam presos (enclausurados), nos canais destas ferramentas, e isto provoca uma oscilação na magnitude dos sinais de torque e força.

De todos os processos de fabricação nas indústrias modernas, o rosqueamento ainda é um dos que consome maior tempo, sendo às vezes um entrave na produção (“gargalo”), causando interrupção da linha produtiva (ZHANG; YANG; WANG, 2003). Entretanto, a produtividade melhorou muito com a introdução de novas tecnologias provenientes de pesquisas aeroespaciais e automotivas, as quais aumentaram as exigências e a qualidade

dos furos rosqueados, especialmente para os furos de pequenos diâmetros e grandes profundidades.

Entre as novas tecnologias empregadas nas operações de rosqueamento, está a indução de vibrações no processo. Zhang; Yang; Wang (2003), analisaram a influência de vibrações induzidas no processo de rosqueamento, e constataram que pode haver uma relação entre amplitude e frequência, as quais podem reduzir o torque, melhorando a vida das ferramentas e a qualidade das roscas. Acredita-se que a vibração diminui a fricção entre a ferramenta e a peça, favorecendo a usinabilidade. A Fig 2.7 representa o esquema montado por esses pesquisadores.

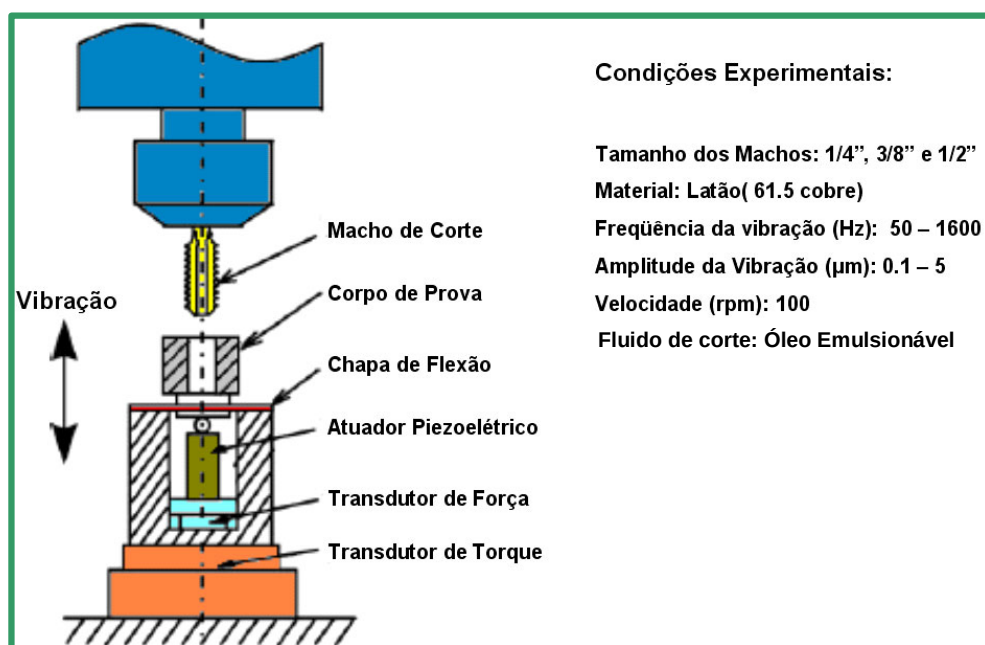


Figura 2.7 – Esquema do aparato utilizado para a indução de vibração ao processo de rosqueamento interno com macho de corte (ZHANG; YANG; WANG, 2003)

Outro fator que pode provocar um aumento no sinal de torque durante o rosqueamento em furos cegos, é a presença de cavacos no final do furo. A compactação dos cavacos no fundo do furo, pode vir a quebrar o macho, principalmente no retorno, onde o torque é máximo (negativo). Sendo assim, é necessário deixar um espaço, suficiente, no final do pré-furo, conforme a Fig. 2.8 (OSG, 1999), para que o cavaco possa se acomodar de tal forma que não exerça esforços sobre a ferramenta quando esta chega ao fim do furo.

Por outro lado, apesar de uma profundidade excessiva do furo ser bastante benéfica para o rosqueamento, ela pode causar grandes perdas operacionais na furação de tal forma que nem todo material permitirá uma furação profunda. Desta forma os fabricantes de

machos e brocas fornecem tabelas, tais como a Tab. 2.1 (OSG, 1999), para a determinação da folga no pré-furo em função do tipo de macho e do comprimento da rosca.

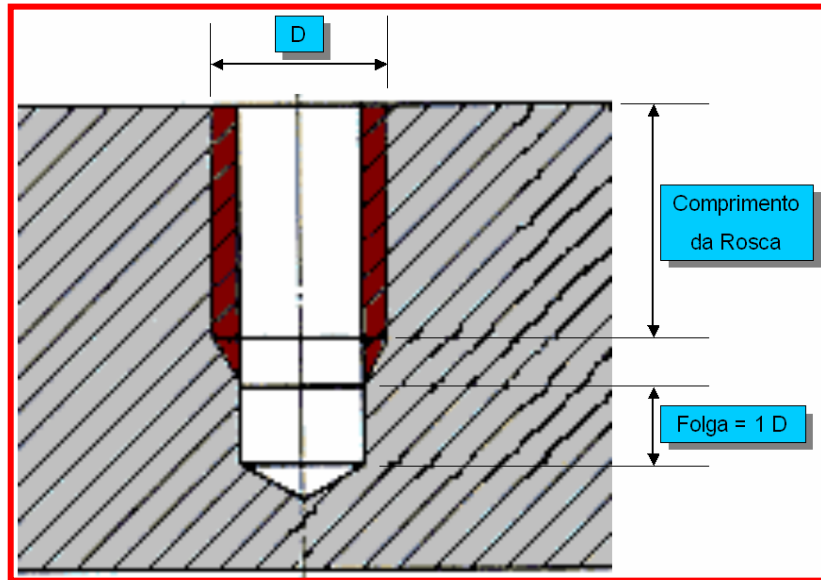


Figura 2.8 – Folga necessária para o rosqueamento com furo cego (OSG, 1999)

Tabela 2.1 Determinação da folga no pré-furo em função do tipo de macho e do comprimento da rosca (OSG, 1999).

| Tipo de macho<br>(comprimento do chanfro)                         | Comprimento<br>da Rosca | Material                        |                |                                 |                |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|
|                                                                   |                         | Aço em Geral                    |                | Ferro fundido                   |                |
|                                                                   |                         | Comprimento da folga<br>no furo |                | Comprimento da folga<br>no furo |                |
|                                                                   |                         | D até<br>6mm                    | D acima<br>6mm | D até<br>6mm                    | D acima<br>6mm |
| Canal Reto<br>(2,0 filetes)                                       | 1D                      | 0,5D                            | 0,5D           | 0,5D                            | 0,3D           |
|                                                                   | 2D                      | 1,0D                            | 0,5D           | 1,0D                            | 0,5D           |
|                                                                   | 3D                      | 1,0D                            | 1,0D           | 1,0D                            | 1,0D           |
| Ponta Helicoidal<br>(4,5~5,0 filetes)<br>Canal Reto (4,0 filetes) | 1D                      | 1,5D                            | 1,0D           | 1,0D                            | 0,5D           |
|                                                                   | 2D                      | 2,0D                            | 1,5D           | 1,5D                            | 1,0D           |
|                                                                   | 3D                      | 2,5D                            | 2,0D           | 1,5D                            | 1,0D           |
| Canal Helicoidal<br>(2,5 filetes)                                 | 1D                      | 0,5D                            | 0,5D           | 0,5D                            | 0,5D           |
|                                                                   | 2D                      | 0,5D                            | 0,5D           | 1,0D                            | 0,5D           |
|                                                                   | 3D                      | 0,5D                            | 0,5D           | 1,0D                            | 0,5D           |

A Fig. 2.9 mostra um macho quebrado, utilizado por Reis (2004), em seus pré-testes, após rosquear ferro fundido cinzento, em baixa velocidade de corte. Uma das prováveis causas da quebra da ferramenta pode ter sido o pouco espaço físico deixado no final do pré-furo, provocando uma compactação dos cavacos, e gerando alto torque no retorno da ferramenta.

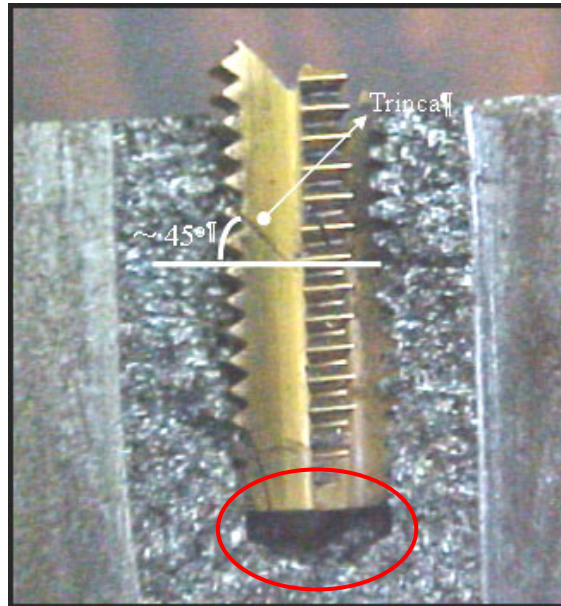


Figura 2.9 – Macho quebrado em uma peça de ferro fundido (REIS, 2004)

## 2.6 Materiais de Ferramentas de Corte

A Fig. 2.10 apresenta a lista dos principais materiais de ferramentas de corte encontradas no mercado mundial. As primeiras ferramentas de corte utilizadas na usinagem eram fabricadas com aço ao carbono e surgiram no início do século XIX, sendo ainda hoje utilizadas em alguns casos, porém, com baixíssimas velocidades de corte. Em seguida vieram as ferramentas de aço-rápido, os metais duros, as cerâmicas e os ultra-duros (STOETERAU, 2000). À medida que se desce na lista, ganha-se em dureza (ou resistência ao desgaste) e perde-se em tenacidade, e vice-versa. A ordem na lista, também, obedece a ordem cronológica de aparecimento das ferramentas no mercado mundial, com poucas exceções (MACHADO; DA SILVA, 2004).

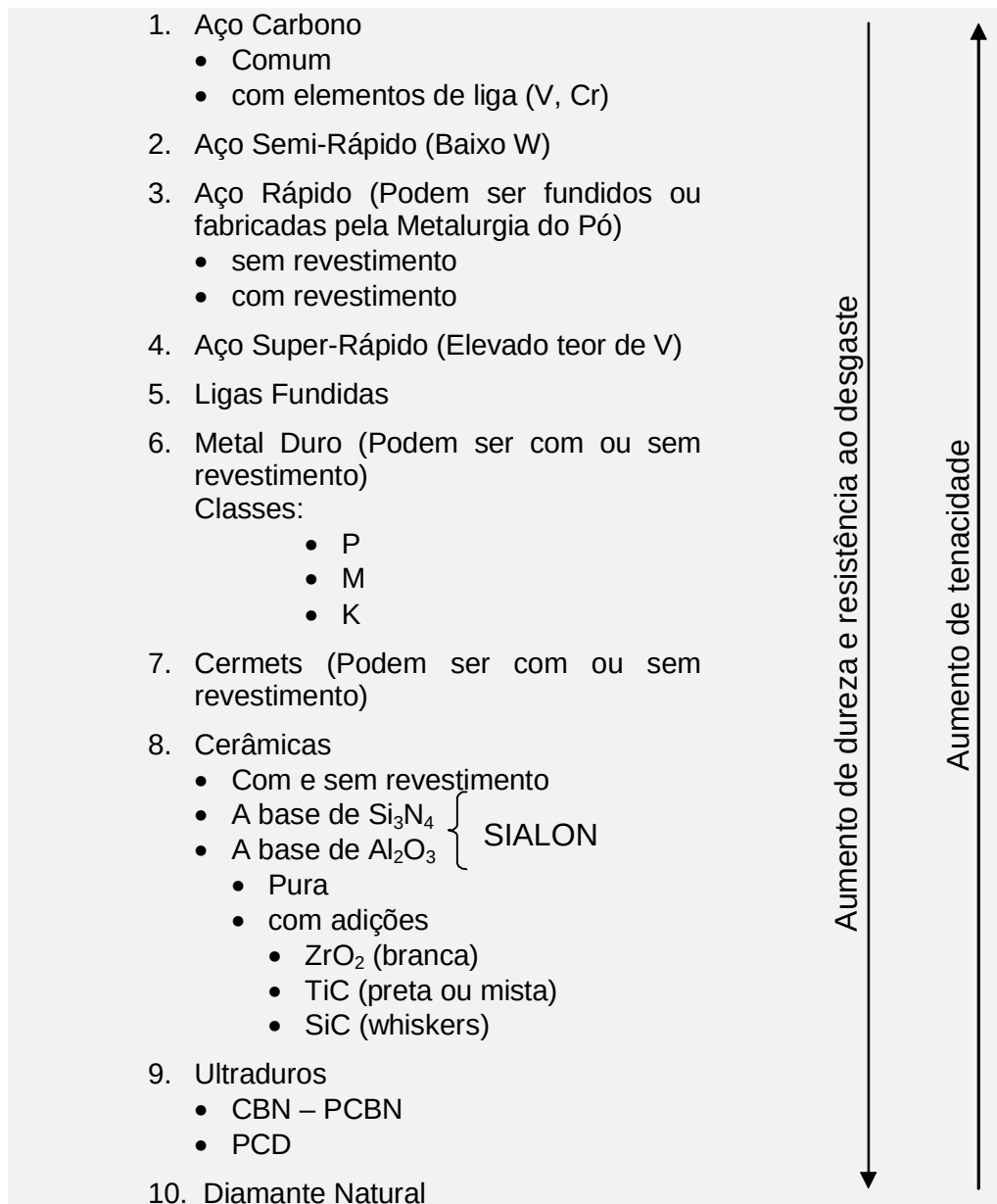


Figura 2.10 – Classificação das ferramentas de corte (MACHADO; DA SILVA, 2004)

Para completar, a Fig. 2.11 esquematiza a evolução das principais classes de materiais de ferramentas em função das velocidades de corte. Todos os grupos apresentaram evoluções significativas ao longo dos anos. É claro que cada tipo de ferramenta possui algumas aplicações específicas, onde seu desempenho é superior à maioria dos outros grupos. Embora não conste nesta figura, as ferramentas de nitretos e as ferramentas conhecidas como ultraduros, surgidas na década de 1980, podem apresentar velocidades ainda superiores àsquelas indicadas, em certas aplicações.

Desde a década de 1980, quando praticamente se aboliu a utilização do aço carbono comum como material de ferramenta, os aços rápidos se tornaram a principal matéria prima

para fabricação de machos de corte, e ainda hoje mantém este posto. Sendo assim, uma breve revisão sobre esta classe de material de ferramenta é realizada na subseção a seguir.

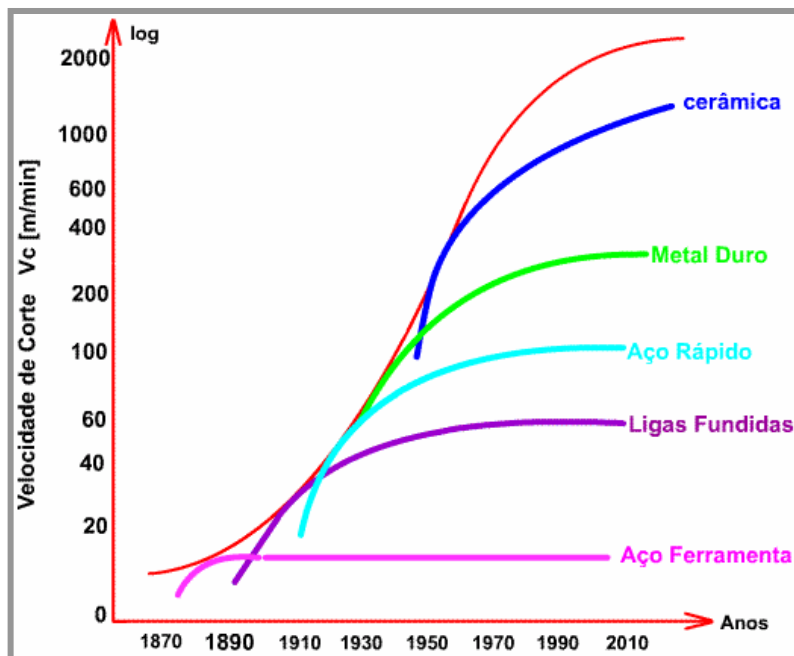


Figura 2.11 – Evolução das velocidades de corte ao longo do tempo (CIMM, 2005)

### 2.6.1 Ferramentas de Aços-Rápidos

Essa classe de materiais de ferramentas surgiu na virada do século XIX e até hoje está no mercado, contradizendo aqueles que acham que os aços-rápidos estão superados. As qualidades deste grupo de materiais são tão grandes que atualmente, mesmo passado mais de um século elas ainda sobrevivem no meio de vários outros grupos com fantásticas propriedades (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Ainda hoje, existem diversas aplicações do aço-rápido na fabricação de ferramentas de corte, podendo destacar: as brocas helicoidais, as ferramentas para plainar e usinar madeira, as fresas de todos os tipos, os alargadores, os machos e cossinetes de roscas, as ferramentas para trabalho a frio, as ferramentas para desbaste e acabamento, as brochas, os escareadores, entre outras.

A combinação dos principais elementos de liga que formam essa classe de ferramentas passou por diversas mudanças, melhorando suas propriedades, chegando à perfeita combinação dos elementos de liga e o domínio do processo de tratamento térmico. Além do carbono como elemento formador de carbonetos complexos, aumentando a dureza e a resistência ao desgaste, os principais elementos constituintes são o tungstênio (W), molibdênio (Mo), cobalto (Co) e o vanádio (V), possuindo dureza entre 60 e 67 HRC. Os

aços-rápidos possuem resistência à temperatura na faixa de 520 a 600 °C (MACHADO; DA SILVA, 2004).

O tungstênio é um dos elementos responsáveis pelo endurecimento secundário, chegando a 20% em peso na composição dos aços-rápidos, podendo ser substituído pelo molibdênio, sem perda de suas propriedades, porém com a metade de sua quantidade em massa. O elemento vanádio aparece com teores que variam de 1 a 5% e é desoxidante, mas sendo forte formador de carboneto, favorecendo o corte à quente. Os aços-rápidos de alto teor de carbono e alto teor de vanádio são conhecidos como aços super-rápidos ou aços-rápidos especiais (HSS-E), possuindo maior resistência ao desgaste e, portanto, maior eficiência no corte. Cabe aqui ressaltar, que a denominação HSS-E pode ser usada tanto para os aços-rápidos que possuem em sua formulação mais que 2,6% de vanádio, quanto para aqueles que contêm alguma quantidade de cobalto em sua composição (SKF, 1987; REIS, 2004).

O cromo aparece em teores sempre em torno de 4%, favorecendo a temperabilidade dos aços-rápidos. O cobalto também aumenta significativamente a dureza a quente, melhorando a eficiência das ferramentas em operações de corte com altas velocidades. É comum encontrar outros elementos químicos na composição dos aços-rápidos, como enxofre, titânio, boro e nióbio, porém, em menores quantidades.

Além da composição química dos aços-rápidos, a forma com que são fabricados influencia diretamente no desempenho das ferramentas de corte (SANTOS, 1999). Esses aços são fundidos ou fabricados pela metalurgia do pó PM – HSS (*Powder Metalurgical-Hight Speed Steel*), os quais apresentam melhorias significativas na resistência ao desgaste, comparadas a ferramentas fabricadas pelo método convencional (aço-rápido fundido). Uma limitação para a expansão das ferramentas fabricadas pela metalurgia do pó é a forma geométrica, geralmente complexa, como no caso das fresas, machos e brocas. Necessita-se de matrizes para a compactação do pó, as quais devem possuir o negativo da ferramenta, inibindo, portanto, suas aplicações (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Nas ferramentas de HSS – PM, as partículas de carbonetos são mais finas e a dispersão é mais uniforme. Os pós são obtidos de aços previamente ligados, pelo processo de atomização, o que garante partículas (da ordem de 100 µm) contendo carbonetos bem finos (1 a 3 µm) e distribuídos, praticamente como no estado líquido (MACHADO; DA SILVA, 2004).

A microestrutura homogênea dos aços HSS-PM lhes confere um alto nível de tenacidade combinado com uma alta resistência térmica e excelente resistência ao desgaste por abrasão. Estas características associadas a coberturas e geometrias específicas para cada material ou aplicação permitem que estes materiais sejam utilizados na fabricação de

machos de corte que irão trabalhar em altas velocidades, proporcionando redução dos ciclos e, conseqüentemente a diminuição dos custos, além de favorecer a qualidade do acabamento das roscas. Se com as antigas gerações de machos era possível atingir velocidades não muito superiores aos 25 m/min (nos aços em geral), com o HSS-PM, devidamente revestidos, pode-se superar os 60 m/min (SANDVIK, 1999).

Os aços HSS-PM podem ser usados com sucesso, também, na fabricação de machos que irão trabalhar a seco e em faixas de velocidade convencionais, nas quais apresentam inclusive, performance significativamente mais vantajosa que a dos machos de HSS convencionais (MÜLLER, 2000). Estes machos podem, ainda, serem utilizados com bastante propriedade no rosqueamento de uma ampla gama de materiais como aços, ferros fundidos, ligas AlSi e uma grande variedade de outros metais não-ferrosos.

## 2.7 Tratamentos Superficiais e Revestimentos

Há diversas formas de melhorar as propriedades mecânicas, térmicas e tribológicas das ferramentas de corte para uso em usinagem. Além dos tratamentos de têmpera e revenimento, comum nas ferramentas de aço ao carbono e aço-rápido, existem diversos meios e formas de endurecimento superficial, como a nitretação, a oxidação, a carbonitretação e os revestimentos sólidos duros. Além desses revestimentos duros, há uma tendência na pesquisa dos chamados lubrificantes sólidos, que são revestimentos de baixa dureza, mas que oferecem baixo coeficiente de atrito contra diversos materiais, dentre os quais os mais utilizados são o *DLC* (*Diamond Like Carbon*),  $\text{MoS}_2$  (Bissulfeto de Molibdênio) e o WCC (Carboneto de Tungstênio Carbono) (VIANA, 2004).

Dessa forma, os revestimentos usados em ferramentas de usinagem podem ser classificados como endurecedores ou lubrificantes, de acordo com suas propriedades. As camadas dos chamados materiais macios enquadram-se no segundo tipo. As camadas do primeiro tipo destacam-se, sobretudo por sua dureza, freqüentemente superior a 2.500 HV. Além do reduzido desgaste por abrasão, essas camadas proporcionam pequena adesão aos cavacos que se soltam do material que está sendo usinado. Isto, por sua vez, leva à redução da abrasão por adesão ("attrition" – TRENT; WRIGHT, 2000), coeficiente de atrito minimizado e menores forças de corte (SCHULZ et al., 2000).

Na busca de novas ferramentas tem-se focado bastante na utilização de revestimentos aplicados ao substrato. E antes de decidir pelo revestimento a ser utilizado na ferramenta, é necessário uma análise prévia dos processos disponíveis para a aplicação destes. A deposição de revestimentos tem como objetivo alterar as propriedades de uma superfície.

Entre as características modificadas por meio de revestimentos pode-se destacar as propriedades óticas, magnéticas, eletrônicas, químicas, resistência mecânica e resistência ao desgaste (HOGMARK; JACOBSON; LARSSON, 2000).

Em geral, as camadas de revestimentos, como o nitreto de titânio (TiN), possuem espessura de 2 a 8  $\mu\text{m}$ , dureza na faixa de 2000 – 2500 HV e uma razão H/E (relação entre dureza e módulo de elasticidade) de aproximadamente 0.06. Normalmente são aplicados em substratos com dureza sensivelmente menor, como no caso dos aços-rápidos, os quais possuem dureza entre 800 – 900 HV e razão H/E de aproximadamente 0.04 (LEYLAND; MATTHEWS, 2000, apud FRANCO JR, 2003). Nas ferramentas de corte, portanto, ocorre uma transição abrupta dessas propriedades na interface revestimento/substrato, a partir de onde sempre iniciam as falhas.

Uma boa opção para aproximar as propriedades do substrato e da camada de TiN, sem causar prejuízo à tenacidade das ferramentas, é modificar as propriedades do substrato, somente em regiões próximas à interface com o revestimento. A nitretação poderá ser uma solução para essa técnica (FRANCO JR., 2003).

## 2. 7.1 Nitretação nas Ferramentas de Usinagem

A nitretação é um procedimento usado normalmente para o tratamento das superfícies metálicas, a qual aumenta a dureza superficial, melhora a resistência à corrosão, diminui a fadiga e o desgaste nas ferramentas. Além disso, diminui o atrito devido à incorporação de átomos de nitrogênio na estrutura do material. A nitretação pode ser através de um banho de sal cianídrico ( $\text{NaCNO}$ ) a uma temperatura de 500 a 550°C, com duração entre 30 e 90 minutos (OSG,1999) ou através de técnicas de controle de plasma utilizando um gás de reação, como por exemplo uma mistura de  $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_2$ , por um período de aproximadamente uma hora (SAKAMOTO et al., 2001). Um mau controle do processo de nitretação pode causar um excesso de camadas, que por sua vez apresenta alguns inconvenientes (OSG, 1999; FRANCO JR., 2003), entre eles a fragilização da ferramenta tornando-a lascável e quebradiça.

Devido ao endurecimento superficial, os machos nitretados são inadequados para uso em rosqueamento de furos cegos e de pequenos diâmetros, e em materiais tenazes onde o lascamento pode tornar-se um problema (DILIDDO, 1987). Assim, deve-se evitar o uso das ferramentas nitretadas na usinagem de aços em geral. Entretanto, alguns fabricantes de ferramentas afirmam ser possível o rosqueamento de materiais que causam um desgaste excessivo, nas ferramentas, tais como: ferro fundido, alumínio fundido, ligas de alumínio silício e baquelite (OSG, 1999). Todavia, a dureza das ferramentas nitretadas é inferior às

ferramentas que são recobertas com filmes de TiN (nitreto de titânio), TiCN (carbonitreto de titânio), TiAlN (nitreto de titânio alumínio) e vários outros tipos de “revestimentos duros”.

#### 2.7.2 Revestimentos das Ferramentas de Corte

Na usinagem, o atrito da ferramenta com a peça e com os cavacos, geralmente em altas velocidades e a energia gasta para deformar o material, geram grande quantidade de calor, que é dissipada pela peça, cavacos e ferramenta de corte. Este calor gerado precisa ser reduzido e/ou extraído da ferramenta e da peça, principalmente a fim de minimizar o desgaste da ferramenta, a dilatação térmica da peça e o dano térmico à estrutura superficial da peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999). Uma das soluções para o problema é a aplicação de grande quantidade de fluidos de corte, o que confronta com a tendência de se utilizar quantidades cada vez menores de fluido de corte, motivada por fatores econômicos e ambiental (OLIVEIRA, 2003).

Uma solução é revestir as ferramentas de corte evitando o contato direto entre o substrato e o material da peça durante a usinagem, reduzindo o atrito na interface cavaco-ferramenta e até oferecendo a possibilidade de substituir o fluido de corte (NOUARI; GINTING, 2006). O substrato é responsável pela forma, resistência mecânica e rigidez da ferramenta. O papel da interface é garantir uma boa adesão do revestimento com o substrato. A adesão do revestimento depende das características químicas do substrato e das tensões térmicas na interface. Através do uso de revestimentos espera-se obter uma redução do atrito entre as superfícies da ferramenta e da peça usinada, proteção térmica, proteção contra a difusão e resistência a altas temperaturas (MÜLLER; SOTO, 1999; PALDEY; DEEVI, 2003). Os revestimentos proporcionam às ferramentas altas durezas superficiais, resistência mecânica, resistência ao desgaste, melhorando as propriedades físicas, químicas e tribológicas das ferramentas (YUHARA, 2000).

A presença de uma camada de baixa condutividade térmica e termicamente estável protege o núcleo da ferramenta das elevadas temperaturas atingidas na superfície (CSELLE; BARIMANI, 1995; YUHARA, 2000; HARRIS et al., 2003; MACHADO; DA SILVA, 2004). A geração do calor pode ser reduzida com a diminuição do coeficiente de atrito. Se isto acontecer, não somente a geração de calor é diminuída, mas também os esforços e a potência de corte.

Os revestimentos também reduzem as tensões mecânicas e térmicas nas ferramentas de corte, isolando o metal de base da ferramenta, possibilitando acréscimos nas velocidades e nas taxas de avanço para diversos materiais. O sucesso das ferramentas revestidas é justificado pelo seu alto índice de aplicação no mercado. Mais de 40% de todas as

ferramentas de corte utilizadas nas indústrias modernas são revestidas, e, além disso, elas executam acima de 80% de todas as operações de usinagem (CSELLE; BARIMANI, 1995).

O TiN (nitreto de titânio) foi o precursor dos revestimentos duros e é ainda muito utilizado, sendo o revestimento mais indicado para a situação em que se têm diversos materiais a serem usinados com a mesma ferramenta, pois além de alta dureza (2500 HV), possui boas propriedades físicas, químicas e mecânicas, proporcionando às ferramentas dureza, tenacidade, aderência (sobre o aço-rápido e o metal duro), estabilidade térmica e reduzindo o coeficiente de atrito, facilitando o escoamento dos cavacos (YUHARA, 2000).

É evidente que o TiN não é apropriado para a usinagem de todos os metais, abrindo um campo de implementações para outras camadas de revestimentos como o TiCN e TiAlN. Mesmo assim há um grande número de empresas que ainda continuam utilizando ferramentas revestidas com TiN, devido a tradição e principalmente devido a excelente performance no aumento da taxa de remoção de material, com boa resistência à abrasão e corrosão. Outro fator determinante é a sua aparência estética (cor dourada), sugerindo alta qualidade para a maioria dos usuários, permitindo que o desgaste seja supervisionado facilmente.

O nitreto de titânio alumínio, patenteado pela Balzers como TINAL, proporciona um aumento considerável na vida útil das ferramentas. Surgiu na década de 1980 e é muito utilizado na fabricação de peças de ferro fundido cinzento e ligas de alumínio-silício, principalmente nas linhas automotivas, podendo atuar sem refrigeração. As ferramentas revestidas com TiAlN proporcionam grandes reduções nos custos de produção, aumentando a produtividade, principalmente na usinagem com altas velocidades de corte (HARRIS et al., 2003).

A principal vantagem do TiAlN é a sua característica de formar um filme protetivo de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , extremamente denso e com alta adesão em sua superfície, durante a usinagem, o que garante uma maior resistência à difusão do material do revestimento para a peça (GU et al., 1999; YUHARA, 2000; HARRIS et al., 2003; PALDEY; DEEVI, 2003). Esta proteção é ainda mais efetiva quando a usinagem é feita em altas velocidades de corte, às quais geram altas temperaturas na interface cavaco/ferramenta. Também pode-se destacar a baixa condutividade térmica desse revestimento nos processos de usinagem, assegurando que a maior parte do calor seja dissipado pelo cavaco, permitindo velocidades de corte maiores, já que a carga térmica no substrato é menor.

Conforme pode ser visto na Fig. 2.12, a diferença entre as durezas dos revestimentos TiN e TiAlN é aumentada com o acréscimo da temperatura, o que pode estar causando uma ampliação na diferença de vida entre as ferramentas (revestidas com TiN e TiAlN) quando se eleva a velocidade de corte. Além desse aumento de dureza, à quente, esses óxidos

( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) que se formam na superfície das ferramentas revestidas por TiAlN, podem atuar como uma camada que aumenta a lubrificidade na interface e age também como uma barreira à condução do calor para o interior da ferramenta, mantendo a integridade desta, o que favorece o aumento em sua vida útil e conseqüentemente aumenta o número de roscas usinadas quando se trabalha em alta velocidade de corte (PALDEY; DEEVI, 2003).

O revestimento TiAlN é mais duro do que o revestimento TiN, mas sua superfície é mais áspera do que o TiN, aumentando assim o coeficiente de fricção entre a ferramenta e a peça (GU et al., 1999).

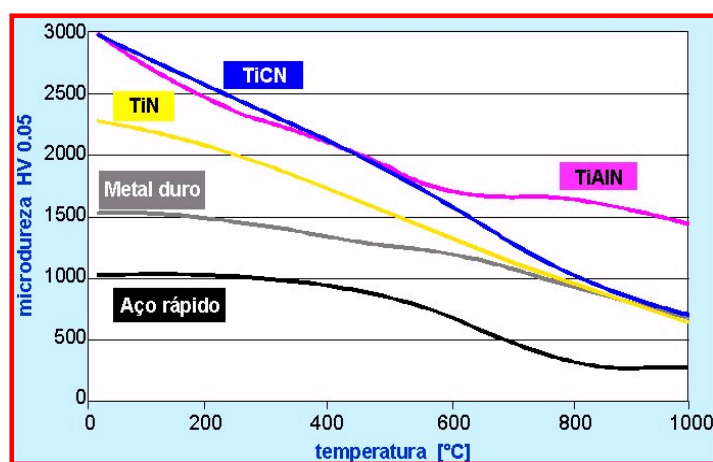


Figura 2.12 - Microdureza em relação às ferramentas e revestimentos (ISCAR, 2001)

A Fig. 2.13 representa esquematicamente a formação de algumas camadas de revestimento utilizada em ferramentas de corte.

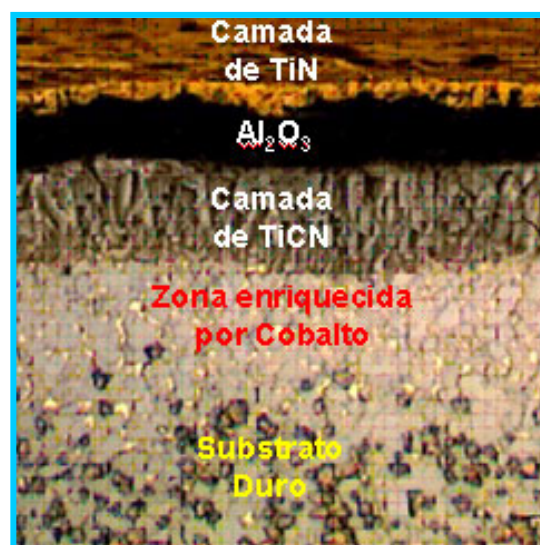


Figura 2.13 – Exemplo de combinação dos revestimentos (SANDVIK, 1999, modificada)

A camada superior (TiN – dureza de 2500 HV) tem como função reduzir a tendência de formação de arestas postiças de corte e facilitar a detecção do desgaste. A segunda camada ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) é uma cobertura espessa para resistir termicamente e aos desgastes superiores. A camada de carbonitreto de titânio (TiCN – dureza de 3500 HV) é muito resistente ao desgaste com uma adesão extremamente boa. A zona enriquecida por cobalto favorece uma aresta segura e tenaz. O substrato de metal (aço-rápido) deve ser tratado termicamente e sofrer um revenimento adequado.

Santos (2002), comparou o desempenho de brocas de aço-rápido sem revestimento e revestidas com TiN, TiCN, TiAlN/WCC e TiN/TiAlN (multicamadas), na usinagem de barras de ferro fundido cinzento GH 190, nas condições a seco e com MQL. Os resultados de vida da ferramenta em função do tipo de revestimento, obtido neste trabalho são apresentados na Fig. 2.14.

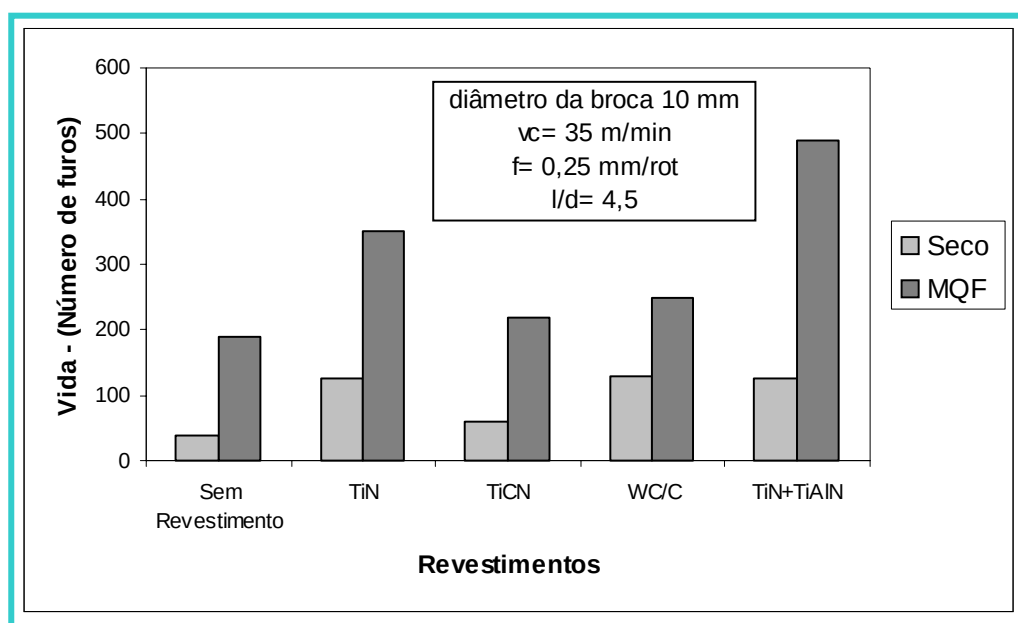


Figura 2.14 – Desempenho das brocas de aço-rápido no corte a seco e com aplicação de mínima quantidade de fluido (SANTOS, 2002)

Os valores médios mostram que as ferramentas revestidas com TiN, TiAlN/WCC e TiN/TiAlN apresentaram desempenhos superiores ao das ferramentas não revestidas e revestidas com TiCN tanto para usinagem a seco quanto para usinagem com mínima quantidade de fluido (SANTOS, 2002).

Viana, 2004, estudou os efeitos dos revestimentos TiN e TiAlN na usinagem de ligas de alumínio e silício, e mostrou que os destacamentos das camadas de revestimentos

podem ser observados claramente pela diferença de cor entre elas. A camada de TiAlN é de cor preta e a TiN dourada, conforme a Fig. 2.15 (a) e (b).

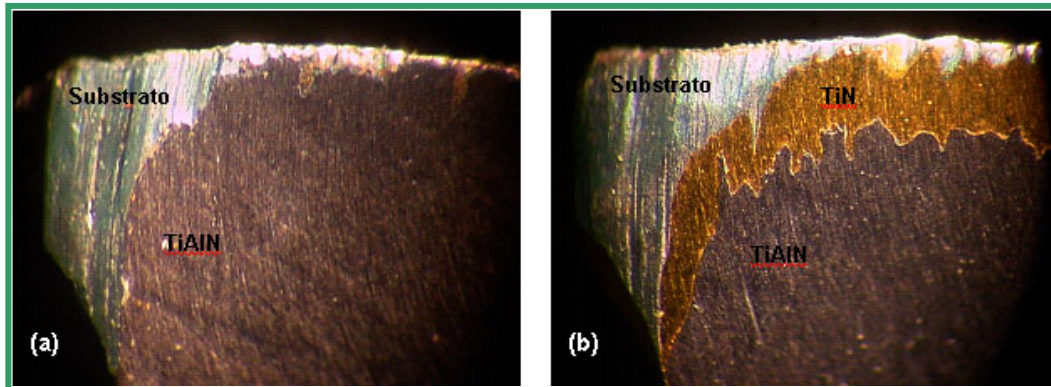


Figura – 2.15 (a) e (b) - Aspecto das pontas de corte da broca 2 revestida de TiN/TiAlN após 4000 furos (VIANA, 2004)

Na usinagem a seco o calor gerado pelas altas tensões de deformações na zona de cisalhamento secundária será isolado pelo revestimento da ferramenta, não penetrando indiscriminadamente no substrato do material. Dessa forma, é conveniente que a camada apresente dureza a quente mais elevada. O desenvolvimento desses novos revestimentos influenciou a usinagem com altíssimas velocidades de corte (HSM), a usinagem com MQL e incentivou a usinagem a seco em diversas classes de materiais.

Recentemente os fabricantes de ferramentas têm apostado muito em outros modelos de revestimentos, como as aplicações nanométricas, à base de alumínio, cromo e nitrogênio, com bons desempenhos em termos de resistência à abrasão, à oxidação, à altas temperaturas (BALZERS, 2005), principalmente em usinagem a altas velocidades de corte.

## 2.8 Ferro Fundido Cinzento

Os ferros fundidos são ligas ternárias Fe-C-Si, apresentando o carbono entre 2 e 4%, e podendo conter também alguma quantidade de outros elementos de liga como, o manganês, o fósforo e o enxofre, além do níquel, cobalto, alumínio, cromo, molibdênio e cobre. Suas principais propriedades são a boa rigidez, resistência à compressão e ponto de fusão relativamente baixo (CHIAVERINI, 1977; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

A influência dos elementos de liga presentes nos ferros fundidos pode ser dividida em dois tipos: os formadores de carbonetos (cromo, cobalto, manganês, molibdênio e vanádio)

que prejudicam a usinabilidade devido ao fato de que carbonetos são partículas muito duras e abrasivas; e os grafitizantes (silício, níquel, alumínio e cobre) que auxiliam a usinabilidade (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Dentre os metais usináveis, os ferros fundidos apresentam-se em uma faixa intermediária, comportando-se desde muito fácil, no caso dos ferros fundidos cinzentos ferríticos ( $HB \approx 120$ ), até muito difícil de se usinar, como no caso dos ferros fundidos brancos ( $HB \approx 550$ ). Este comportamento, além de depender da composição química está diretamente relacionado com a microestrutura do ferro-fundido, de tal forma que as porcentagens de perlita e cementita influenciarão na dureza e conseqüentemente no desgaste das ferramentas de corte (MACHADO; DA SILVA, 2004).

Os tipos de ferros fundidos mais importantes nos processos de fabricação são o cinzento, nodular, nodular bainítico, vermicular e branco. Dentre estes se destaca o ferro fundido cinzento, que tem grande aplicação em peças da indústria automobilística, sendo o material mais utilizado na fabricação de blocos de motores à combustão interna. O ferro fundido cinzento é composto de grafita, que se apresenta em forma de veios, correspondendo à cerca de 10 % em volume (Fig. 2.16), em meio a uma matriz de ferrita + perlita, em quantidades que podem variar de 0 a 100%, obtendo-se assim as diversas classes de ferro fundido cinzento (MACHADO et al., 2005).

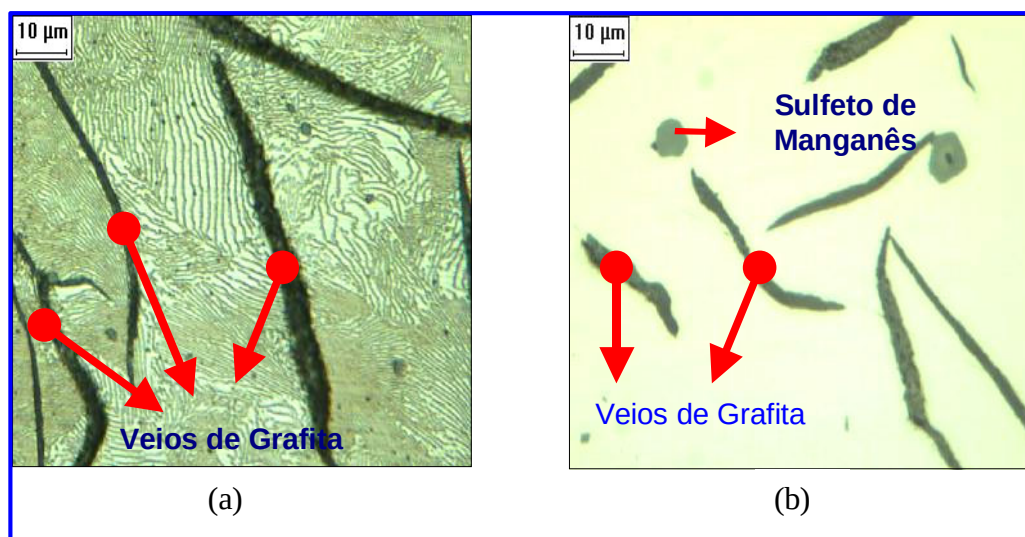


Figura 2.16 – Microestrutura do ferro fundido cinzento: a) veios de grafita, matriz perlítica; (b) inclusões de sulfeto de manganês (MACHADO et al., 2005)

Em geral, os ferros fundidos cinzentos apresentam uma usinabilidade melhor que os demais tipos de ferros fundidos, como pode ser visto na Figura 2.17, a qual apresenta o ferro fundido cinzento com um índice de usinabilidade igual a cem por cento.

Isto acontece porque o carbono na forma de grafita tende a melhorar a usinabilidade dos ferros fundidos cinzentos, facilitando a deformação e a propagação de trincas nos planos de cisalhamento primário e secundário. Tal comportamento proporciona menores forças de usinagem, resultando em uma redução da quantidade de energia consumida para realizar o corte, bem como, do calor gerado, o que implica em menores temperaturas de usinagem. A vida das ferramentas é considerada alta para os ferros fundidos cinzentos, principalmente devido as menores taxas de desgaste, pois esse metal apresenta os cavacos em forma de pedaços ou lascas, sendo, portanto, descontínuos, proporcionando total controle dos cavacos (MACHADO et al., 2005). Outra característica importante é a presença de sulfetos de manganês nos ferros fundidos cinzentos (cerca de 0,5% em volume). Este elemento se apresenta na forma de inclusões que atuam como lubrificante na interface cavaco ferramenta, sendo bem mais efetivas, neste sentido, que os veios de grafita.

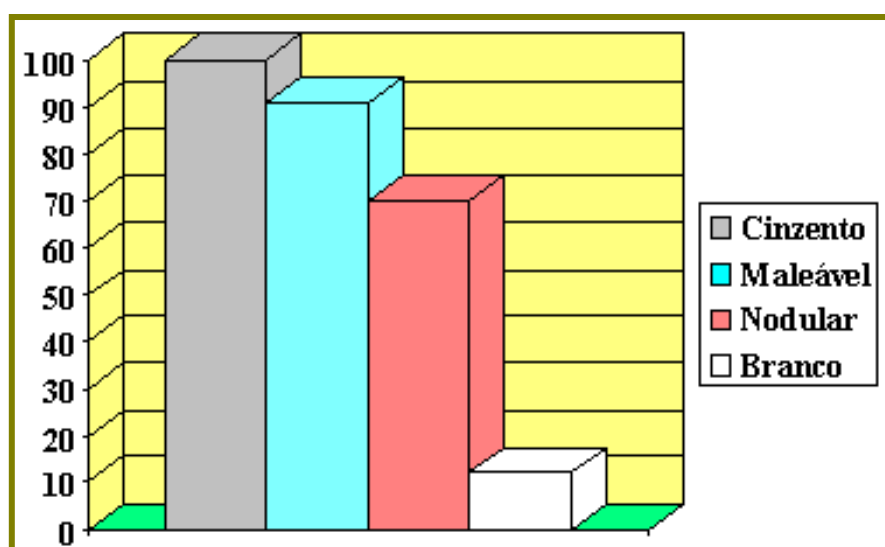


Figura 2.17 - Usinabilidade dos principais tipos de ferros fundidos (ISCAR, 2001)

Entretanto, a usinagem de ferros fundidos cinzentos também possui alguns problemas. A presença de partículas duras, principalmente formadas na solidificação, reduz a usinabilidade consideravelmente. O aparecimento de alguns elementos de ligas, como os microcarbonetos ou até mesmo impurezas, diminui a vida das ferramentas de corte. Outro aspecto negativo para a vida das ferramentas é a presença de areia de moldagem ou alguns produtos utilizados na reação metal / molde (MACHADO et al., 2005) durante o processo de fundição da peças de ferro fundido cinzento.

## **2.9 Flúidos de Corte**

A vinte anos atrás, falar de usinagem sem fluído de corte era algo inaceitável. A maioria dos usuários, fabricantes de óleos lubrificantes e de ferramentas de corte defendiam a utilização dos chamados fluidos de corte, destacando seus benefícios junto ao setor produtivo da indústria metal-mecânica. As justificativas se baseavam na melhoria do acabamento superficial das peças, na expulsão dos cavacos da região de corte, no controle dimensional, no aumento da vida das ferramentas, na redução das forças e vibrações, dentre outras.

No entanto, os fluídos de corte vem encontrando nos últimos anos restrições com relação ao seu uso nos principais processos de usinagem, principalmente nos países mais conscientizados. Os fatores que justificam esta rejeição ao emprego dos fluidos de corte estão relacionados com os altos custos operacionais, às questões ecológicas, às exigências legais para preservação do meio ambiente e a saúde do ser humano (BELLUCO; DE CHIFFRE, 2002; OLIVEIRA, 2003; COSTA et al., 2004). Desta forma iniciou-se, nos últimos anos, uma busca por novas técnicas que permitissem a redução da quantidade de fluido de corte ou até mesmo a extinção de seu emprego nos processos de usinagem.

Entre estas novas técnicas, se destaca a usinagem com MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante), que vem sendo cada vez mais utilizada em função do surgimento de novas tecnologias como: máquinas operatrizes com maior potência, rigidez e rotações mais elevadas e, principalmente, pelo grande desenvolvimento dos materiais, revestimentos e geometrias que aumentam a resistência das ferramentas de corte ao desgaste e que permitem que estas trabalhem em temperaturas elevadas, compensando a redução ou ausência dos meios lubri-refrigerantes no processo.

### **2.9.1 Flúidos de Corte com MQL (Mínima Quantidade de Lubrificante)**

As limitações das operações a seco podem ser reduzidas através da técnica de Mínima Quantidade de Lubrificante (MQL) que age com base no princípio de utilização de pequenas quantidades de óleo de corte sem resíduos (BEZERRA, 2003; COSTA et al., 2004). Nesta tecnologia a função de lubrificação é assegurada pelo óleo e a de refrigeração, mesmo que pequena, pelo ar comprimido. Esta pequena quantidade de fluido é suficiente para reduzir o atrito no corte, diminuindo a tendência à aderência em materiais com tais características.

Nos países desenvolvidos, principalmente na Europa, há uma forte tendência em diminuir o uso de fluido de corte convencional (Emulsão: 300 – 4000  $\text{lh}^{-1}$ ) na usinagem. É comum o uso de MQL no processo de manufatura. Usando essa técnica, somente 6 – 70  $\text{mlh}^{-1}$  de lubrificantes são usados na manufatura de peças usinadas (DERFLINGER; BRÄNDLE; ZIMMERMANN, 1999; BEZERRA, 2003).

Entretanto, mesmo em pequenas quantidades, há poluição do ambiente (presença de partículas líquidas e gasosas de diâmetros muito pequenos, da ordem de 2.5  $\mu\text{m}$ ) e a obrigatoriedade do uso de ar comprimido para levar o óleo até a região de corte, eleva os níveis de ruídos, aumentando a poluição sonora e do ar (SALES, 1999). Atualmente é possível reter grande parte desse óleo, utilizando máquinas hermeticamente fechadas, as quais possuem um sistema de exaustão, transportando os vapores (óleo, ar aquecido, impurezas) para um sistema refrigerado, fazendo com que o óleo fique retido e não polua o ambiente fabril.

É necessário, todavia, fazer alguns estudos de casos para comparar o desempenho da técnica de MQL com os resultados da usinagem a seco e com fluido em abundância, de preferência envolvendo o uso de ferramentas revestidas. O uso de MQL só é viável quando o tempo de usinagem, o tempo de vida da ferramenta e a qualidade superficial da peça forem pelo menos semelhantes às conseguidas com a usinagem usando-se os métodos tradicionais de aplicação do fluido de corte. Do ponto de vista econômico o corte sem fluido será adotado como uma prática comum quando os custos de produção de uma peça, sem os benefícios dos fluidos de corte, forem equivalentes aos custos de compra, manutenção e descarte dos fluidos segundo as normas ambientais.

Estima-se que o custo dos líquidos lubrificantes/refrigerantes (compra, estocagem, manutenção, descarte, etc) gira em torno de 7 a 20% do custo total de fabricação (usinagem), enquanto que o custo com ferramental (suportes, insertos) variam de 2 a 4% do custo total da usinagem. Conseqüentemente, utilizando essa técnica inovadora (MQL), há uma redução notável dos custos, devido a redução dos fluídos de corte (NOUARI; GINTING, 2006; ATTANASIO et al., 2006).

Attanasio et al., (2006), pesquisaram as vantagens e desvantagens do uso de MQL, na vida das ferramentas de corte, em termos de redução do desgaste, comparado com a usinagem a seco. Na pesquisa foi utilizado aço normalizado 100Cr6, com ferramentas de metal duro revestido, com tripla camada (TiN,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e TiCN). Ficou evidente neste trabalho que o desgaste de flanco foi menor para os teste que utilizaram MQL, mas a diferença não foi significativa. A eficiência dessa técnica de lubrificação foi prejudicada devido a pouca penetração do lubrificante na interface cavaco/ferramenta.

Kishawy et al., 2005, investigaram o uso de MQL e de diversos outros meios de lubrificação na usinagem de ligas de alumínio-silício fundidas (A 356), utilizando *HSM*. Eles investigaram as consequências do aumento da temperatura na usinagem, monitorando o desgaste das ferramentas de corte, as forças de corte e o acabamento das ligas fresadas. Esse grupo de pesquisadores concluiu que as forças de corte diminuíram quando utilizou-se MQL, comparado à usinagem à seco e que as forças ficaram muito próximas dos resultados obtidos com fluido em forma de jorro.

Outros pesquisadores (DHAR et al., 2006) investigaram o uso de MQL no torneamento de aço AISI 1040. O objetivo desse grupo foi investigar a influência dos fluídos de corte na temperatura de corte, na formação dos cavacos e no acabamento superficial. Foi comparado o desempenho da usinagem a seco, com fluido em forma de jorro e de MQL. A Fig. 2.18 representa esquematicamente o aparato utilizado para fazer os testes com o uso de MQL.

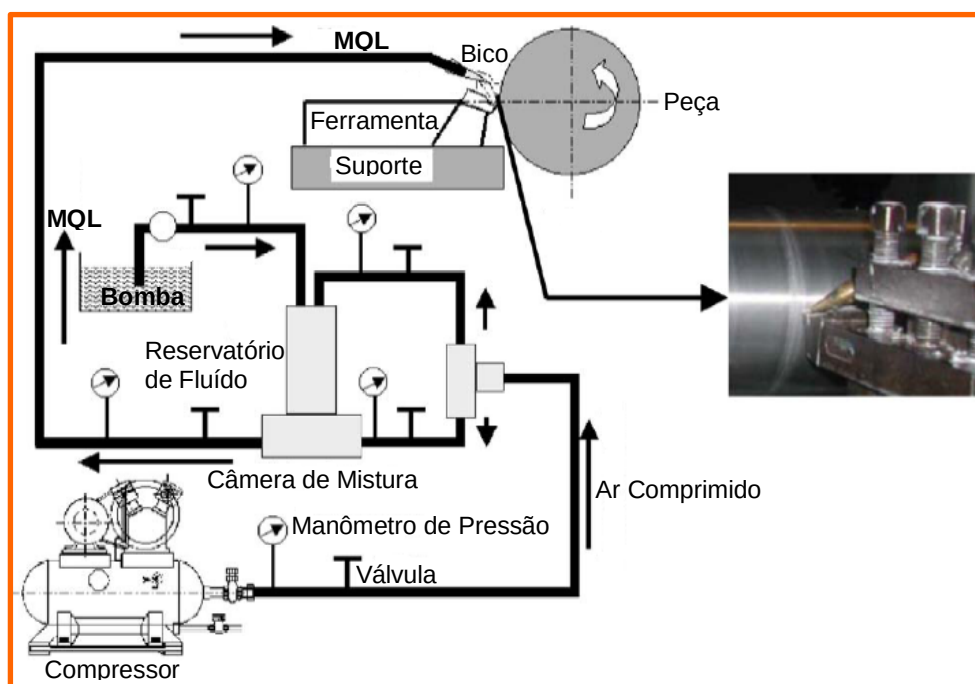


Figura 2.18 – Vista esquemática da unidade de MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação) (DHAR et al., 2006)

Segundo os autores, o uso de MQL foi melhor do que a usinagem com aplicação de fluido convencional em forma de jorro, pois a mínima lubrificação reduziu a temperatura de corte, uma vez que melhorou a interação entre os cavacos e a ferramenta, além de conservar a aresta de corte das ferramentas utilizadas. Também foi possível melhorar a qualidade dimensional das peças usinadas devido a redução do desgaste e da falha das

ferramentas quando aplicaram MQL. Devido á mínima quantidade de lubrificação ter sido mais eficiente do que nos casos de usinagem a seco, a técnica de MQL proporcionou melhorias na quebra dos cavacos, pois melhorou a interação entre cavacos e ferramenta.

## **2.10 Critério de Fim de Vida das Ferramentas de Corte**

Existem vários critérios que podem ser tomados como conceito de vida da ferramenta. Contudo, normalmente é o grau de desgaste das ferramentas que determinará o momento da troca das ferramentas ou sua substituição (MACHADO; DA SILVA, 2004). Deste modo a vida da ferramenta pode ser determinada pelo receio da quebra da aresta de corte, pelo máximo desgaste admitido, por uma falha catastrófica, podendo ser expressa pelo intervalo de tempo durante o qual a ferramenta executa o corte sob determinadas condições, pelo comprimento total usinado, número de peças fabricadas ou ainda o volume de material removido. É comum adotar determinados níveis de vibração do sistema, forças e temperatura na usinagem, acabamento superficial ou rebarbas, como indicador de fim de vida. Neste caso, o monitoramento destes parâmetros se torna fundamental para a determinação do fim de vida da ferramenta de corte. Cada situação determina o critério de fim de vida mais adequado. Os principais fatores que influenciam a vida da ferramenta são:

- Material da ferramenta e da peça;
- Máquina ferramenta;
- Fluido de corte;
- Condições de corte.

A compreensão dos complexos fenômenos que ocorrem na interface entre ferramenta e o material usinado (desgaste, adesão, transferência de material, interações entre as superfícies em movimento, e lubrificação) pode contribuir significativamente para a melhoria na vida de ferramenta, qualidade da peça, adequada utilização da máquina-ferramenta e segurança do operador (OLIVEIRA, 2003).

## **2.11 Desgaste, Avarias e Mecanismos de Desgaste das Ferramentas de Corte**

Praticamente todos os ramos da engenharia enfrentam problemas de desgaste e avarias. Os responsáveis pela fabricação (engenheiros, técnicos) e em especial os que trabalham com os processos de usinagem, têm uma preocupação constante em avaliar as dimensões dos desgastes e avarias apresentadas pelas ferramentas de corte, sem,

contudo, em muitos casos, levarem em consideração a natureza do desgaste que elas sofrem. Apesar de sua importância, o desgaste nem sempre recebe a atenção merecida, principalmente quando não é associado ao aspecto econômico. As perdas econômicas conseqüentes de desgastes e avarias são generalizadas e perversas, e não envolvem tão somente os custos de reposição, mas também os custos de depreciação de equipamentos, diminuição da produção, falta de competitividade e aumento do consumo de energia (STOETERAU, 2000)

A usinagem dos metais é um processo complexo. Além das altas temperaturas localizadas, principalmente na interface cavaco-ferramenta, chegando a mais de 1000 °C em alguns casos, e altas tensões, podendo superar 8 Gpa, as ferramentas normalmente sofrem impactos durante os cortes interrompidos e os cavacos retirados da peça podem interagir com o material da ferramenta, ocasionando o fim de suas vidas (SANDVIK, 1999; PALDEY; DEEVI, 2003). Na usinagem de aços e ferros fundidos, ainda hoje o padrão de desgaste é o fator limitante para a velocidade de corte. Essa é uma das inúmeras razões de os fabricantes de ferramentas continuarem a investir no desenvolvimento e na otimização de materiais e geometrias que as tornem cada vez mais resistentes ao desgaste e avarias.

De acordo com a literatura (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004) é comum encontrar três motivos para a substituição das ferramentas de usinagem: avaria; deformação plástica; e desgaste propriamente dito.

A avaria é um processo de destruição da ferramenta de corte que ocorre de maneira repentina e inesperada, causado pela quebra, lasca ou trinca da ferramenta de corte. A diferença entre microlascamento, lascamento e quebra está na dimensão da fratura, que é definida pelo volume de material perdido pela ferramenta. O lascamento é um tipo de avaria gerada pela retirada repentina de grandes partículas do corpo da ferramenta de corte, ao contrário do que ocorre no desgaste propriamente dito que é resultante de uma retirada contínua de partículas muito pequenas da ferramenta. Esta avaria, ocorre principalmente em ferramentas de material frágil e/ou quando a aresta de corte é pouco reforçada. O lascamento prejudica o acabamento superficial da peça e, se continuar aumentando, pode provocar a quebra da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999).

Deformação plástica é a mudança da geometria da ferramenta de corte pelo deslocamento de massa. Ela ocorre por cisalhamento devido às altas tensões atuantes nas superfícies das ferramentas de corte. Em casos extremos pode causar a total destruição da cunha cortante da ferramenta, inclusive com perda de massa. É mais comum ocorrer em ferramentas com resistência ao cisalhamento relativamente baixa e com maior tenacidade, como o aço-rápido, as ligas fundidas e o metal duro.

Existem várias definições de desgaste. Alguns autores, tais como Machado e Da Silva (2004), definem desgaste propriamente dito, como sendo a destruição de uma ou de ambas superfícies que compõem um sistema tribológico, geralmente envolvendo perda progressiva de material. Já a norma ISO 3685 (1977), define o desgaste como sendo a mudança da forma original da ferramenta de corte, resultante da perda gradual do material cortante.

O desgaste é um fenômeno negativo que acontece com todas as ferramentas de corte, principalmente nas condições mais críticas e são fortemente dependentes da combinação do material da peça a ser usinada, do material da ferramenta e da geometria do cavaco. Os parâmetros de corte, como velocidades, avanços e profundidades de corte, assim como, o sistema de arrefecimento da interface cavaco/ferramenta, determinarão a forma de desgaste predominante.

Por maior que seja a dureza e a resistência ao desgaste das ferramentas de corte, e por menor que seja a resistência mecânica da peça de trabalho, a ferramenta de corte sofrerá um processo de destruição que mais cedo ou mais tarde exigirá a sua substituição. A vida útil das ferramentas de corte pode ser limitada por uma série de variedades de formas de desgaste (MACHADO; DA SILVA, 2004), tais como as apresentadas na Fig. 2.19: o desgaste de cratera (área A), o desgaste de flanco (área B) e o desgaste de entalhe (área C e D).

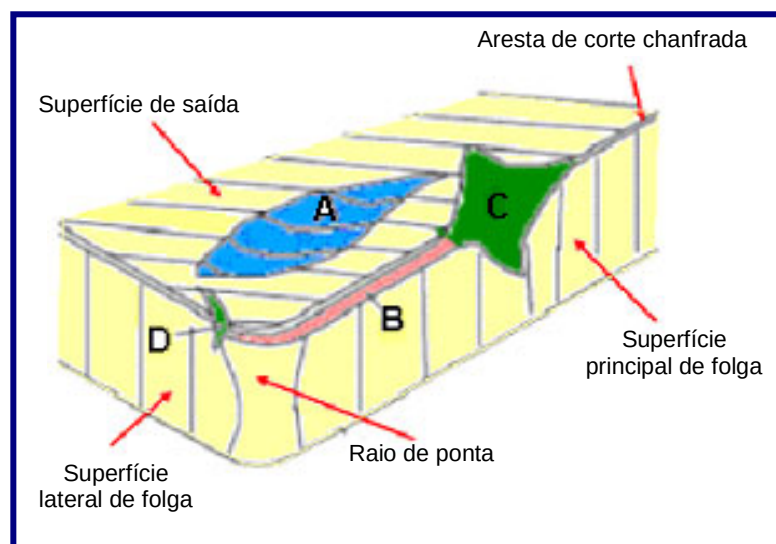


Figura 2.19 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (DEARNLEY; TRENT, 1982, apud MACHADO; DA SILVA, 2004, modificada)

Em condições normais de corte, uma das formas de desgaste apresentada na Fig. 2.20 irá prevalecer, e elas se desenvolvem por vários mecanismos de desgaste. Na literatura a classificação dos mecanismos de desgaste é vasta, não havendo um consenso

entre os pesquisadores, no entanto é comum encontrar os seis mecanismos de desgaste para as ferramentas de corte, conforme enumerados pela Fig. 2.20 (FERRARESI, 1995; ZUM GAHR, 1987; TRENT; WRIGHT, 2000; YUHARA, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004).

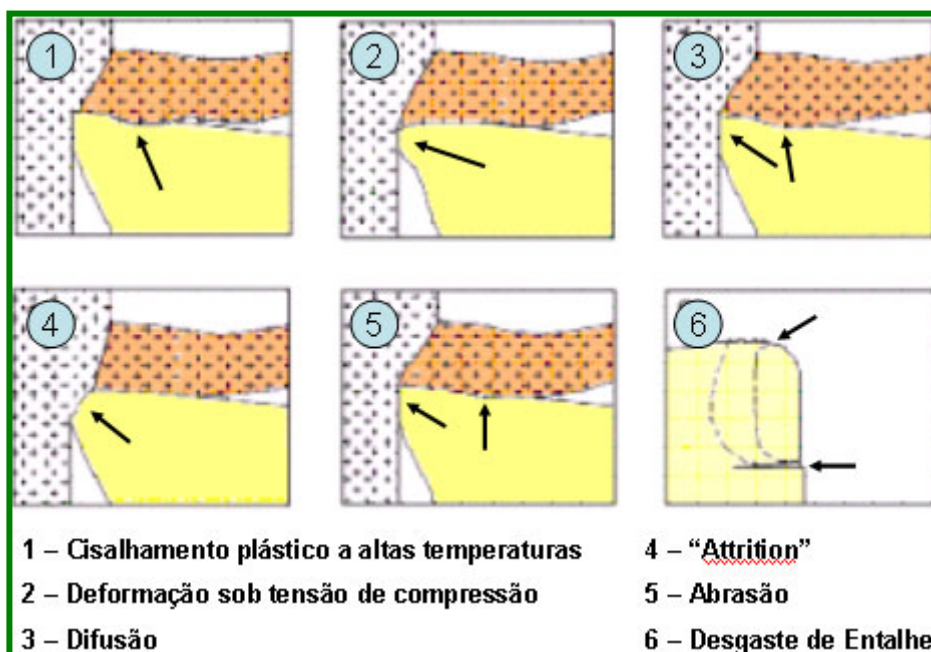


Figura 2.20 – Mecanismos e Processos de Desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte (TRENT; WRIGHT, 2000, modificada)

O cisalhamento plástico é um processo de destruição das ferramentas de corte que ocorre principalmente nas ferramentas de aço-rápido, devido as grandes tensões cisalhantes ocorridas na interface cavaco-ferramenta. As altas temperaturas provocam o escoamento do material da ferramenta próximo à região da interface, gerando crateras na superfície de saída das ferramentas (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004).

A deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão não é propriamente um mecanismo de desgaste e sim um processo de destruição das ferramentas de corte, gerado durante a usinagem de metais com elevada dureza (MACHADO; DA SILVA, 2004), principalmente com altas taxas de avanço e altas velocidades de corte. Nestas condições é comum acontecer falhas catastróficas, principalmente em ferramentas de aço-rápido e metal duro.

A difusão é um mecanismo que envolve a transferência de átomos de um material para outro e depende fortemente da temperatura, da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de cisalhamento secundária e da duração do contato. Esse mecanismo pode atuar

tanto na superfície de saída das ferramentas, como na superfície de folga, ocasionado pela aderência na interface cavaco ferramenta. O aumento da velocidade de corte e do avanço poderá ampliar a taxa de desgaste por difusão nas ferramentas de corte, devido ao conseqüente aumento na temperatura de usinagem. No microscópio, as áreas desgastadas por difusão têm uma aparência lisa (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004), o que facilita a identificação destas regiões.

A aderência ou "*attrition*", ou também referenciado (TRENT; WRIGHT, 2000) como aderência e arrastamento, ocorre geralmente a baixas velocidades de corte, onde o escorregamento de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna atípico. Com o fluxo de material arrancado da peça, pode haver fragmentos microscópicos arrancados da ferramenta, principalmente se houver a APC (aresta postiça de corte). No microscópio, as áreas desgastadas por aderência têm uma aparência áspera (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004).

A abrasão é um mecanismo que envolve a perda de material por microsulcamento ou microcorte (ZUM GAHR, 1987), causado por partículas de elevada dureza relativa (carbonetos, carbonitreto ou até mesmo por partículas da ferramenta) e influenciada pela temperatura de corte, a qual reduz a dureza da ferramenta. Assim, quanto maior a dureza a quente da ferramenta, maior sua resistência ao mecanismo de desgaste por abrasão (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999). Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, entretanto a ação abrasiva é mais acentuada no desgaste de flanco, já que a superfície de folga está em atrito com a peça que é mais rígida, enquanto na superfície de saída o atrito é exercido por um elemento flexível que é o cavaco. No microscópio, as áreas desgastadas por abrasão apresentam uma grande quantidade de riscos.

O desgaste de entalhe também não é propriamente um mecanismo de desgaste, mas sim uma configuração (forma) de desgaste, conforme definido anteriormente e evidenciado na Fig. 2.20. Por falta de consenso, é comum tratar esta forma de desgaste também como um mecanismo. Geralmente ele ocorre na usinagem de materiais resistentes a altas temperaturas, como as ligas de níquel, cobalto, titânio e aços inoxidáveis (MACHADO; DA SILVA, 2004). Um provável mecanismo por meio do qual seria formado o desgaste de entalhe, é a oxidação, que na maioria dos metais é provocada pela presença de água, ar e altas temperaturas. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, o que explicaria o surgimento do desgaste de entalhe (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 1999). O tungstênio e o cobalto, durante o corte, formam filmes de óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente retirados da superfície pela ação do atrito, gerando

desgaste. Porém, alguns óxidos como o óxido de alumínio, são mais duros e resistentes. Assim, alguns materiais de ferramenta, que não contêm óxido de alumínio, desgastam-se mais facilmente por oxidação.

Kopac, 1998, concluiu que o desgaste das ferramentas é uma combinação dos processos físicos e químicos que removem pequenas partes da aresta de corte do material da ferramenta. Estima-se que 50% dos desgastes são por abrasão, 20% por adesão e 10% por ação química (difusão e oxidação). O restante (20%) é uma combinação de todos os outros mecanismos.

O diagrama da Fig. 2.21 mostra os mecanismos de abrasão, adesão, difusão e oxidação, em função da temperatura de corte que sofre influência significativa da velocidade de corte e do avanço, dentre outros parâmetros de usinagem. Observa-se que em baixas temperaturas apenas os mecanismos de adesão e abrasão estão presentes, predominando a adesão. Os mecanismos de oxidação e difusão aparecem somente com altas temperaturas, apresentando um crescimento exponencial para a difusão (MACHADO; DA SILVA, 2004).

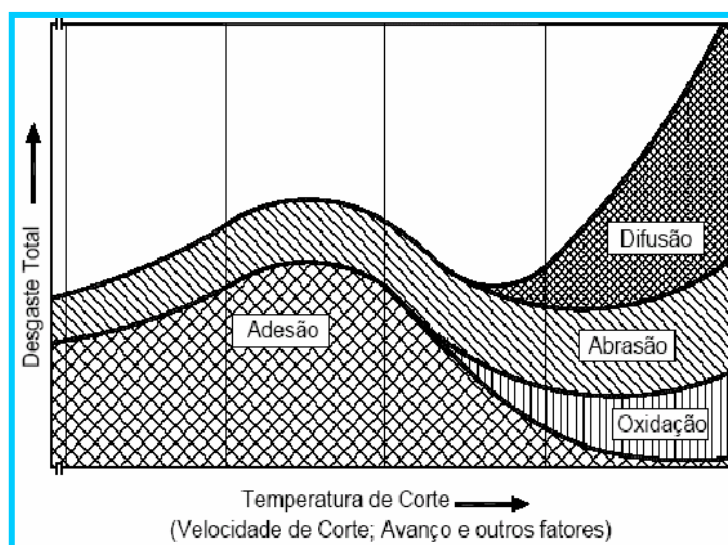


Figura 2.21 – Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (VIEREGGE, 1970, apud MACHADO; DA SILVA, 2004)

#### 2.11.1 Desgaste, Avarias e Mecanismos de Desgaste em Machos de Corte.

A Fig. 2.22 apresenta os quatro tipos principais de avarias e desgastes que ocorrem nos machos de corte, de acordo com os principais fabricantes de ferramentas: 1) O lascamento; 2) O desgaste propriamente dito (abrasão, adesão, difusão, oxidação), que ocorre tanto na superfície de folga como na superfície de saída da ferramenta; 3) O rasgamento que é o arrancamento da camada superior da crista de um ou mais filetes do

macho; 4) A “soldagem” que é na realidade a adesão de materiais da peça sobre as superfícies dos filetes do macho, acompanhada ou não de arrancamento de material da ferramenta (OSG, 1999). Essas formas de desgaste foram verificadas por vários pesquisadores (BEZERRA, 2003; REIS, 2004; REITER et al., 2006, DA MOTA et al., 2006) estudiosos do processo de rosqueamento interno com machos de corte.

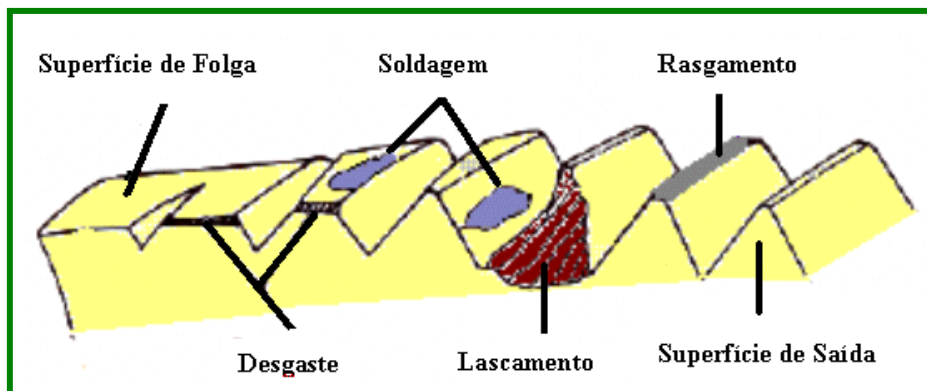


Figura 2.22 - Principais tipos de desgaste e avarias (CATÁLOGO DA OSG, 1999)

A Fig. 2.23 apresenta duas fotografias de machos de corte (HSS-CO – PM, revestidas com TiAlN) utilizados por Bezerra (2003), com velocidade de corte de 60 m/min, em ferro fundido cinzento. O cabeçote utilizado foi o auto-reversível, sem fluido de corte. As fotos são em duas situações: como original (nova) e em fim de vida (usada). Observa-se que o desgaste ocorreu em toda extensão da superfície de folga nos filetes da ferramenta e acredita-se que o mecanismo de desgaste predominante foi abrasivo e adesivo.

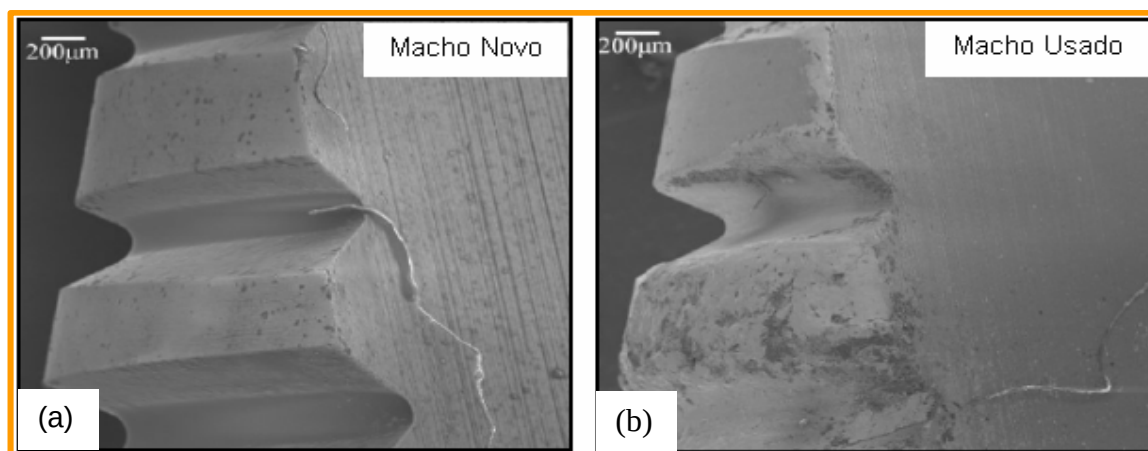


Figura 2.23 – Desgaste apresentado no 3º e 4º filetes de dois machos de corte revestidos com TiAlN; a) Macho novo; b) Macho em fim de vida (BEZERRA, 2003)

A Fig. 2.24 mostra a superfície de folga de um macho de corte, HSS-E, revestido com TiN, após usinar ferro fundido cinzento, em baixa velocidade de corte (8,5 m/min). O trabalho foi desenvolvido por Reis (2004) e ficou constatado que a usinagem em baixas velocidades de corte provoca adesão do material usinado (ferro fundido cinzento). Além da adesão, é possível notar a delaminação do revestimento na superfície de folga do macho. Atribui-se essa falha no revestimento à geração de trincas, às quais se propagam até atingirem o substrato, de tal forma que se formam “lâminas” de revestimento, que durante o estágio de corte se sobrepõem umas às outras. No retorno da ferramenta acredita-se que estas “lâminas” raspam os cavacos que ficam retidos nos filetes de roscas gerados, de tal forma que estes cavacos se aderem à superfície podendo entrar nos espaços existentes entre as lâminas e arrancá-las, e desta forma se daria o destacamento do revestimento. A presença de camadas de revestimento destacadas é catastrófica, principalmente no processo de rosqueamento interno onde estas porções de revestimentos podem ficar retidas no interior do furo e provocar uma aceleração do mecanismo de desgaste abrasivo (REIS, 2004).

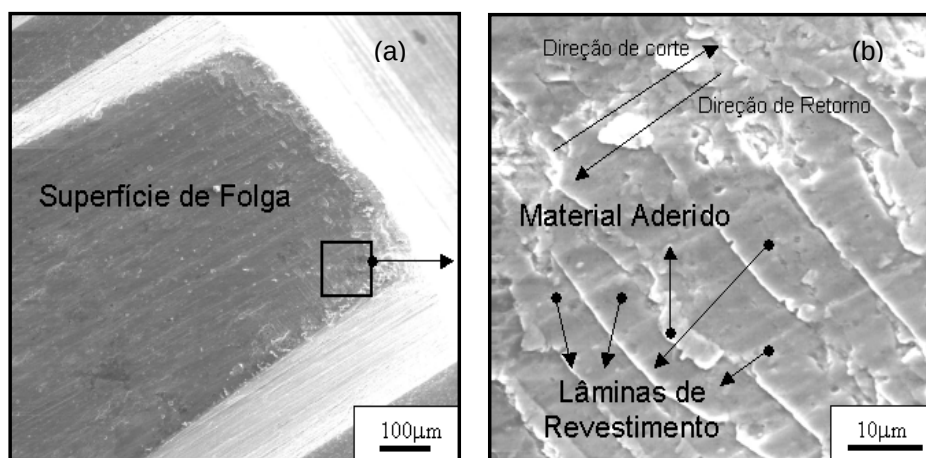


Figura 2.24 – Fotos da superfície de uma ferramenta de HSS-E revestida com TiN (elétrons secundários): a) Aspecto do desgaste sobre a superfície de folga; b) Detalhe de uma região onde o revestimento está se soltando (REIS, 2004)

Além das ferramentas revestidas com TiN e TiAlN, Reis (2004), investigou o comportamento de machos sem revestimento e nitretados no rosqueamento de ferro fundido cinzento, em uma linha de produção automotiva. A Fig. 2.25 ilustra bem o estado de desgaste de um macho HSS-NI, após usinar 1800 roscas. Observa-se que houve “rasgamento” e lascamento de toda a superfície de folga dos dentes 3 e 4 dessa ferramenta. Provavelmente o desgaste ocorreu devido a adesão e a abrasão, pois a temperatura na

interface cavaco-ferramenta não deve ter sido muito alta, em função da baixa velocidade de corte (8,5 m/min), o que favoreceria a difusão e a oxidação da ferramenta.

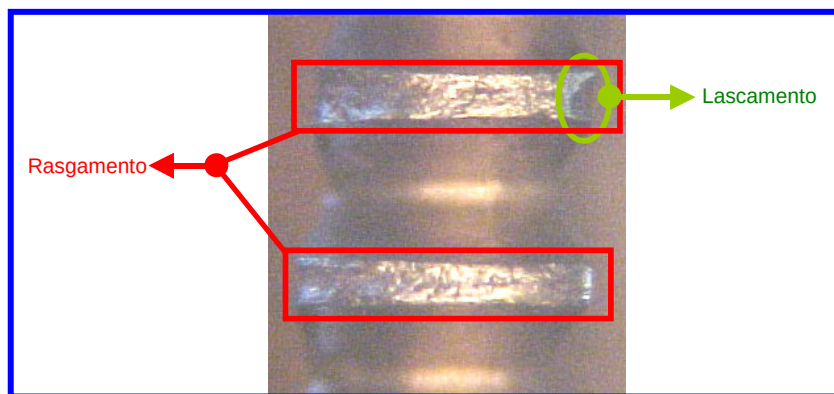


Figura 2.25 - Foto realizada através de um microscópio ferramenteiro após usar 1800 roscas com macho HSS-NI, terceiro e quarto dente (REIS, 2004)

(REITER et al., 2006), investigaram o rosqueamento em aço inoxidável austenítico, DIN 1.4571 em furos cegos, com diversos machos de corte (HSS), com diferentes revestimentos, usando o método PVD – Deposição Física à Vapor. Foi utilizado fluído de corte e a velocidade de corte foi de 3 m/min. A Fig. 2.26 apresenta a configuração de algumas arestas de corte após usar 56 roscas. Verifica-se que a ferramenta revestida com TiCN (d) foi a que teve o menor desgaste, enquanto que o macho revestido com carboneto de cromo obteve o pior desempenho. Atribui-se a esse desgaste acentuado, devido a menor dureza do revestimento do CrC (a), com dureza aproximada de 2200 HV, contra 3100 HV do revestimento TiCN. Além disso, o coeficiente de fricção do CrC é muito maior do que do revestimento TiCN (0,49 X 0,29). As ferramentas revestidas com CrN (b) e TiAlN (c) tiveram desempenhos intermediários.

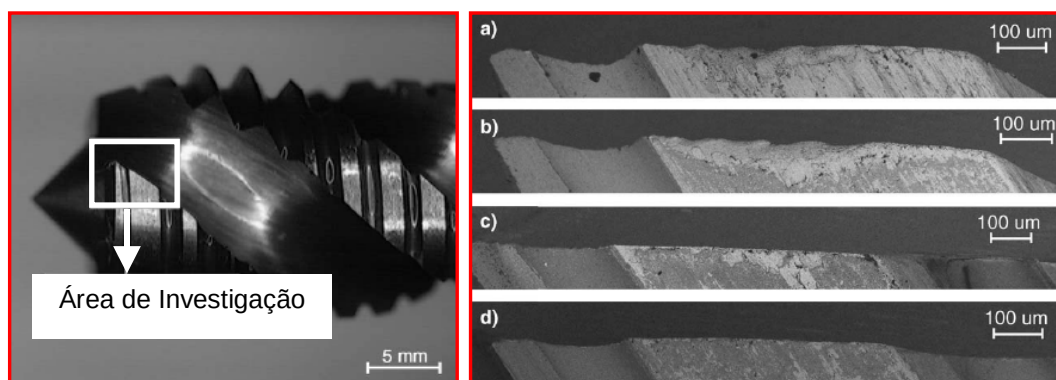


Figura 2.26 – Micrografias da aresta de corte (MEV) de (a) CrC, (b) CrN, (c) TiAlN, (d) TiCN (REITER et al., 2006)

### 2.11.2 Forma de Medir o Desgaste em Machos de Corte

As falhas (avarias e/ou desgastes) das ferramentas de corte em usinagem estão direta ou indiretamente ligadas a grandezas físicas, relacionadas com o material da peça, os tipos de ferramentas e as condições do processo. A análise e a caracterização destas grandezas em tempo real envolve a implementação de sistemas de monitoramento indireto e direto.

As técnicas de monitoração indiretas supervisionam um sinal indireto mensurável em tempo real, correlacionando um ou mais fenômenos físicos com o estado de desgaste da ferramenta. A medição direta envolve máquinas e equipamentos, como microscópio ferramenteiro, microscópio eletrônico, rugosímetro, interferometria a laser, etc. Neste caso normalmente há a interrupção do processo de usinagem, originando tempos ociosos (DE SOUZA, 2004a).

Entretanto, algumas dessas técnicas não podem ser utilizadas em todas as ferramentas de corte, devido a complexidade geométrica de determinados tipos de ferramentas, como os machos de rosquear interno. Por isso, não é possível utilizar os critérios de desgaste comumente apresentados pela literatura e empregados para ferramentas de tornear e fresar, como  $VB_B$  (desgaste de flanco médio) e  $VB_{Bmax}$  (desgaste de flanco máximo), para medir o desgaste de flanco de forma direta nestas ferramentas. Assim, ao contrário do que ocorre com outras ferramentas de corte, não existe um critério de desgaste do macho, que seja habitualmente reconhecido e praticado (SHA; NI; WU, 1990, apud REIS, 2004). Desta forma, os critérios para avaliação do desgaste dessas ferramentas variam de acordo com cada pesquisador ou fabricante.

Em um trabalho recente Reis (2004), desenvolveu uma metodologia para medir e acompanhar a evolução do desgaste na superfície de folga dos machos de corte durante o rosqueamento interno, usando como ferramentas de teste, machos M6 com quatro canais. Esta técnica se baseia na medição das cotas apresentadas na tabela da Fig. 2.27, que foram denominadas, pelo pesquisador, cotas críticas de desgaste. Como pode se observar nesta figura, as cotas críticas se concentram nos primeiros filetes (dentes) do macho de corte, pois é esta porção destas ferramentas que realizam as primeiras ações de corte, sendo assim as primeiras a se desgastar (SHA; NI; WU, 1990, apud REIS, 2004; BEZERRA et al., 2001).

As maiores dificuldades para medir os desgastes nos flancos e nas superfícies de saída dos machos de corte estão relacionadas com a geometria dessas ferramentas e principalmente devido às dificuldades encontradas na operação de visualização das superfícies, quando se utiliza microscópio ótico. É muito difícil haver o controle do foco (imagem refletida pela luz do microscópio) nas superfícies dos machos. O perfil do dente é complexo, devido aos diversos ângulos que compõem este tipo de ferramenta.

Os principais mecanismos de desgaste apresentados nos machos de corte são abrasão e a adesão, de acordo com a literatura (CAO; SUTHERLAND, 2002; BEZERRA, 2003; REIS, 2004; REITER et al., 2006). Esses mecanismos ocorrem em quase todos os tipos de materiais, independente das velocidades de corte. Geralmente as velocidades são baixas, comparadas com as demais operações de usinagem, como o torneamento e o fresamento. Por isso, dificilmente acontece difusão e oxidação, pois as temperaturas atingidas na interface cavaco ferramenta são relativamente baixas.

A Fig. 2.27 apresenta uma série de cotas (críticas) que foram utilizadas por Reis (2004). O acompanhamento do desgaste ocorreu em todas as carreiras do macho e foi medido em todos os primeiros dentes da parte cônica das ferramentas investigadas.

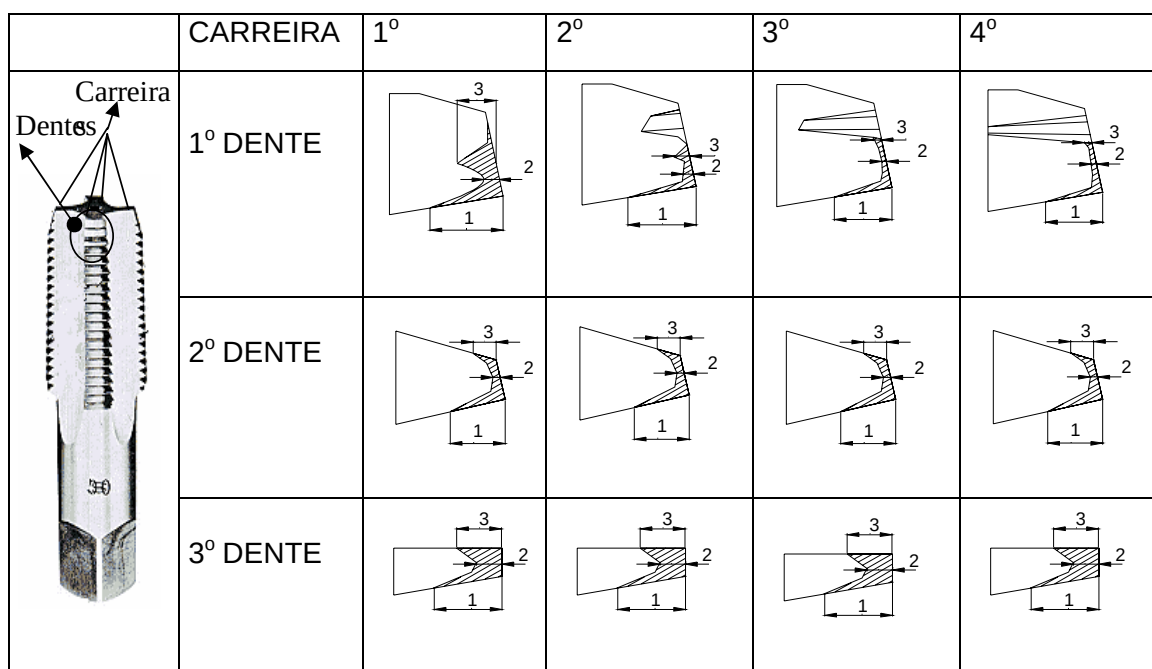


Figura 2.27 - Cotas críticas de desgaste em machos de corte (REIS, 2004)

## 2.12 Usinagem em Altas Velocidades de Corte (*HSM / HSC / HST*) - (*High Speed Machining, High Speed Cutting, High Speed Tapping*)

### 2.12.1 – Definição de *HSM / HSC / HST*

Não existe um consenso da literatura em relação à definição de *HSC/HSM/HST*. Segundo Bezerra et al., (2001), a definição do que é altíssima velocidade de corte está intimamente associado ao tipo de material usinado, tipo de operação de corte e tipo de ferramenta, entre outros itens. Na literatura é comum definir *HSC/HSM* como a usinagem de materiais com velocidades de corte e taxas de avanço que utilizam fatores de 5 até 8 vezes

as velocidades de corte e avanços tradicionais. As definições variam substancialmente conforme se muda de um processo de usinagem para outro. Na usinagem com alta velocidade de corte devem ser considerados também os materiais a serem usinados, além do processo. Pode-se dizer que muitas vezes o limite para a *HSC* é mais determinado por máquinas ultrapassadas que pelas ferramentas (MÜLLER, 2004).

A Fig. 2.28 apresenta as faixas de velocidades de corte em função do material a ser usinado, tomando como referência o fresamento. Portanto, embora as classificações das zonas de velocidades estejam distribuídas com uma grande margem de segurança, não é garantido tomar como referência esses parâmetros para qualquer operação de usinagem. O rosqueamento com macho cortante, por exemplo, é um processo complexo, onde as velocidades de corte normalmente são muito baixas, de forma que sua classificação não está contemplada nesta configuração. Mas é possível rosquear com *HST* (*High Speed Tapping*), utilizando ferramentas de corte com macho máquina. Por isso, o termo corte a alta velocidade não é de fácil definição.

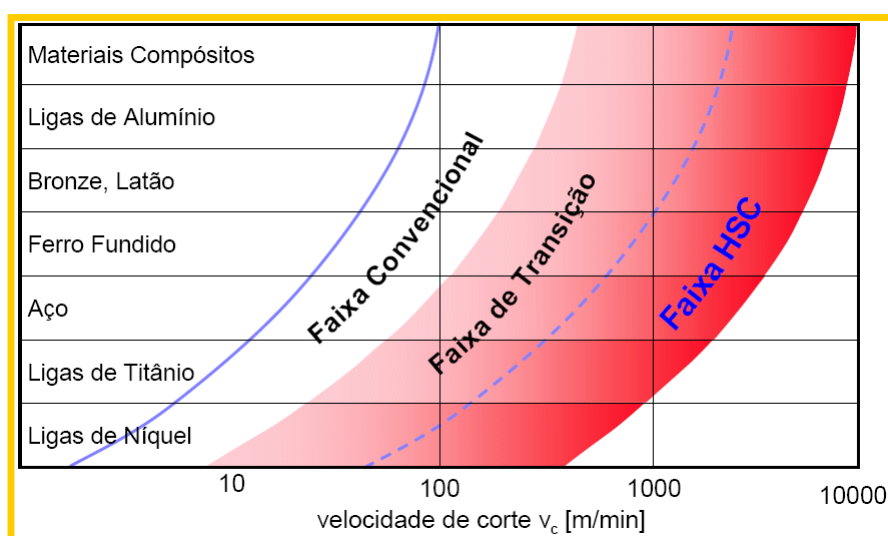


Figura 2.28 – Definição atual de usinagem com alta velocidade de corte (SCHULZ, 1997)

Schulz (1997) afirma que o conceito de usinagem em altíssima velocidade é relativo a um referencial de corte e avanço. Para esse pesquisador a definição para altíssima velocidade é aquela que fica na faixa de 7 a 10 vezes superior à convencional. Ou seja, no caso da usinagem de alumínio, onde hoje se emprega convencionalmente velocidade na faixa entre 300 e 500 m/min, *HSC* seria, portanto, acima de 2100 m/min. No caso do aço, onde a velocidade convencional está na faixa de 200 m/min, *HSC* seria o emprego de velocidades superiores a 1.400 m/min. Além disso, o conceito de *HSC* é dinâmico. Ele

acompanha o desenvolvimento tecnológico em termos de máquinas-ferramentas, ferramentas e recobrimento de pastilhas.

#### 2.12.2 – Histórico da Usinagem em Altas Velocidades de Corte

A idéia de se usinar peças metálicas em altas velocidades de corte, partiu do pesquisador alemão Salomon, na década de 1920, (com patente registrada em 1931, DEUTSCHE PATENTSCHRIFT NR. 523594), que defendia o princípio de que as temperaturas e as forças de corte tendiam a decrescer em altíssimas velocidades (DE SOUZA 2004b). Contudo, um longo percurso foi trilhado até a introdução da usinagem em alta velocidade de corte (*HSM*) na prática, tal como se verifica hoje no chão de fábrica de várias indústrias. Somente com o desenvolvimento dos fusos de alta rotação, no início da década de 1980, com os quais é possível atingir altas velocidades, abriu-se a possibilidade de serem realizadas pesquisas tecnológicas de base nessa área. Salomon quando realizou seus estudos tinha uma série de limitações em termos de máquinas e ferramentas. Para realizar seus experimentos, utilizou-se de uma serra circular de grande diâmetro. Mesmo com baixa rotação, ela permitia uma velocidade periférica bastante alta. O pesquisador realizou seus ensaios com materiais ferrosos e não-ferrosos (DE SOUZA, 2004b). Na usinagem de alumínio, foram utilizadas três velocidades de corte: 440 m/min, 2.100 m/min e 16.700 m/min, consumindo 6, 16 a 17,6 Hp de potência.

O ponto de partida para a usinagem em alta velocidade de corte, da forma que é empregada atualmente, foi a indústria aeroespacial, originalmente na usinagem de ligas de alumínio e mais recentemente na usinagem de ligas de titânio e superligas à base de níquel. Hoje, a *HSC* já ganhou enorme importância na fabricação de peças para componentes automotivos e eletrônicos, além da fabricação de moldes e matrizes em materiais endurecidos, como os aços AISI H13, P20 e D2. Nos dias de hoje, o conceito de *HSC* ou *HSM* é utilizado praticamente em todas as áreas da usinagem (MÜLLER, 2004; COLDWELL et al., 2003).

Essa tecnologia ainda está em desenvolvimento, mas já oferece inúmeras vantagens, representando uma alternativa valiosa para as indústrias, permitindo maior produtividade, redução dos custos, flexibilidade da produção, melhor qualidade superficial e dimensional, além do desenvolvimento de novos materiais, estando cada vez mais presente nas indústrias de produtos usinados que desejam manter, ou expandir, sua participação no atual mercado globalizado. Certamente a usinagem com alta velocidade de corte é uma das novas tecnologias que pode garantir competitividade em curto espaço de tempo (BEZERRA, 2003).

Essa técnica deixou de ser apenas objeto de pesquisa em laboratórios, principalmente na Europa, Japão e EUA e está sendo utilizada com grande êxito, principalmente para o fresamento de metais não ferrosos, nos segmentos aeronáutico, aeroespacial e automobilístico. Desta forma o fresamento em alta velocidade de corte é realizado atualmente tanto para o desbaste quanto para o acabamento, visando altas taxas de remoção de material e o semi-acabamento e acabamento de materiais ferrosos e não-ferrosos. No acabamento é notável o uso de *HSM* para as indústrias que trabalham com moldes e matrizes, ocupando uma vasta cadeia produtiva, dentre as quais a automobilística e a de eletrodomésticos e bens de consumo. Além destas, encontra-se com grande potencial para a tecnologia *HSM*, as áreas de prototipagem rápida, usinagem de ultra-precisão, usinagem de eletrodos para eletro-erosão, indústria óptica, usinagem com baixas temperaturas de processo, entre outras (COLDWELL et al., 2003).

Algumas empresas brasileiras estão começando investir nesta tecnologia, adquirindo máquinas na faixa de transição para *HSC* e investindo em pesquisas científicas para auxiliar a implantação desta tecnologia no ambiente fabril. Entretanto, Schulz (1997), afirmava que existia carência de profissionais qualificados, documentação técnica de suporte e “*Know-How*” para suprir as necessidades de mercado brasileiro. Atualmente sabe-se que essas deficiências já foram eliminadas.

A usinagem em alta velocidade de corte é uma tecnologia considerada promissora, devido aos benefícios propiciados, em termos de redução de custos, tempos de produção e aumento de qualidade ao produto final. Como demonstração disto, observa-se o grande número de trabalhos de pesquisas científicas e tecnológicas relacionados com esta técnica de usinagem (AGAPIOU, 1994; TLUSTY, 1997; SCHULZ, 1997; NOVASKI, 1998; BECK, 1998; SINHOFF, 1999; EZUGWU; OKEKE; MACHADO, 1999; MÜLLER, 2000; BEZERRA et al., 2001, 2002 e 2004; DE SOUZA, 2004b; RENEVIER, 2003; KISHAWY et al., 2005; DA MOTA et al., 2006), e os altos investimentos no seu desenvolvimento por empresas da área metal-mecânica, tais com: fabricantes de máquinas ferramenta, fabricantes de comandos numéricos, fabricantes de ferramentas de corte, empresas que desenvolvem sistemas CAD/CAM específicos para a programação de usinagem em *HSC*. Além é claro, de investimentos em projetos de pesquisas, financiado por entidades de fomento à pesquisa e empresas privadas, em todo mundo. Observa-se também um grande investimento pelas indústrias que utilizam esta tecnologia, dentre estas pode-se citar empresas do ramo automobilístico, aeronáutico e fabricantes de moldes e matrizes, no Brasil e no exterior (NOVASKI, 1998).

### 2.12.3 – Características do Processo HSM

As principais características do processo de usinagem em alta velocidade de corte podem ser resumidas conforme a Fig. 2.29. Pode-se ressaltar que com o aumento da velocidade de corte, aumenta-se o volume do material removido e há uma redução das forças de corte na usinagem. Também se observa uma melhor qualidade superficial usinada e, como fator negativo, tem-se uma redução da vida útil da ferramenta de corte. Com isto, os esforços para otimização do processo HSC deve incluir, principalmente, estudos sobre as estratégias de usinagem que reduzam o desgaste da ferramenta de corte, tornando o processo viável e eficiente (DE SOUZA, 2004b).

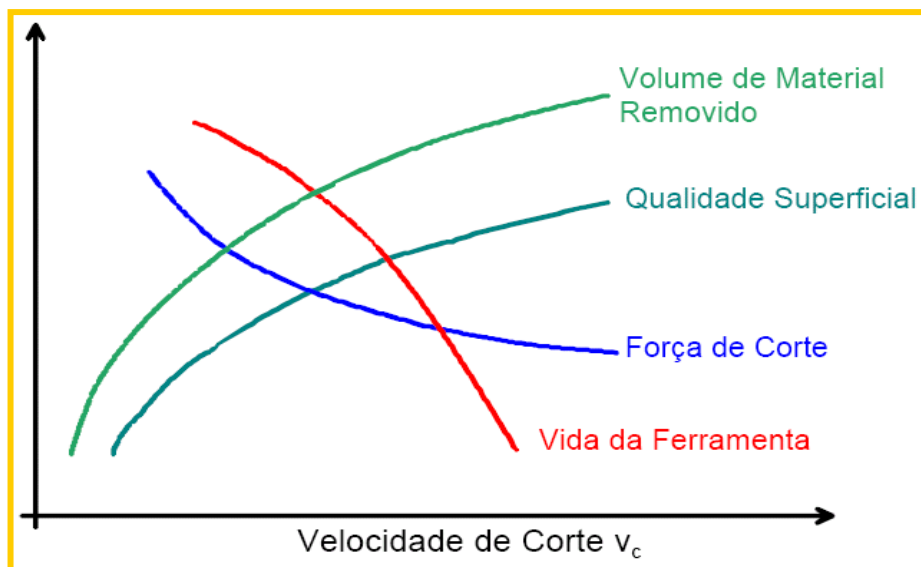


Figura 2.29 – Influência das Características do Processo HSC (SCHULZ, 1997)

As principais vantagens desse processo são: altas taxas de remoção de material; redução das forças de corte proporcional ao aumento das velocidades de corte; melhor dissipação do calor do processo de corte, pois a maior parte da energia térmica gerada se concentra no cavaco (FERRARESI, 1995; MACHADO; DA SILVA, 2004), resultando em mínima distorção da peça, boa capacidade de usinar peças de paredes finas e menor aquecimento da peça usinada; aumento na produtividade devido às reduções nos tempos ativos e inativos; produção de peças com melhor qualidade superficial, o que elimina muitas vezes trabalhos posteriores, e dimensional, especialmente em usinagem de peças delgadas; custos de fabricação reduzidos devido a ciclos totais de produção mais rápidos; e usinagem sem vibrações, pois as oscilações induzidas pelo corte da ferramenta são de alta frequência. Entretanto, os parâmetros de corte para a usinagem otimizada, ainda não são totalmente conhecidos e dominados (FALLBÖHMER et al., 2000; BEZERRA et al., 2001). Nos últimos

anos, a evolução da usinagem nas áreas de torneamento e fresamento, foi notável, mas em algumas áreas como no rosqueamento o desenvolvimento ainda está no início, embora o uso de ferramentas rotativas sólidas esteja desenvolvendo muito rapidamente nos últimos anos (MÜLLER, 2000).

Linss, (2002), comenta que para o rosqueamento do aço ainda hoje se trabalha com velocidades de corte extremamente baixas, na faixa de 5 a 12 e no máximo de 20 m/min. Como já foi dito, em geral, quando se trata de usinagem a alta velocidade, fala-se em velocidade que varia do dobro ao quíntuplo da velocidade de corte padrão. No rosqueamento, isto significa que as velocidades de corte acima de 50 m/min devem ser consideradas como sendo *HST (High Speed Tapping)*. A Fig. 2.30 mostra uma comparação entre as faixas de velocidades convencionais e as velocidades altas, para os principais processos de fabricação.

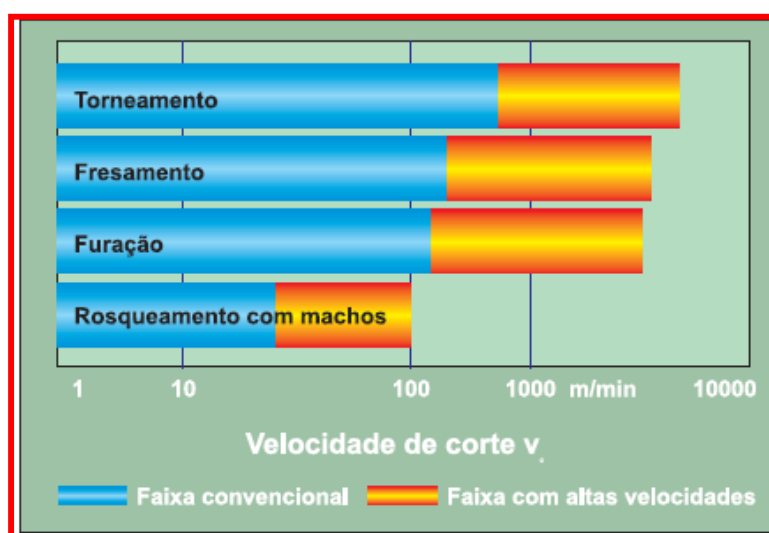


Figura 2.30 – Comparação de faixas de velocidades convencionais e *HSC* (TITEX PLUS, apud BEZERRA, 2003)

São poucos os trabalhos publicados envolvendo a usinagem com ferramentas rotativas sólidas, como os machos de rosquear. As causas são variadas, pois é uma tecnologia pouco conhecida, com grandes deficiências técnicas e operacionais. Normalmente o medo da quebra da ferramenta e a falta de sincronização do avanço e das rotações nas máquinas-ferramenta na hora da mudança do sentido de rotação, dificultam sua operacionalização. As avarias e desgastes são comuns no rosqueamento com altas velocidades de corte, o que reduz a vida das ferramentas, principalmente na usinagem a seco ou em furos profundos onde a lubrificação é insuficiente (LINSS, 2002).

O processo de rosqueamento em alta velocidade de corte (*HST*), ainda é pouco difundido, devido a limitações tais como, material e geometria de ferramenta inadequada, dificuldade das máquinas ferramentas em atingir velocidades e avanços elevados e rápida reversão da rotação (MÜLLER; SOTO, 1999), e, sobretudo, ao pouco conhecimento da fenomenologia inerente à aplicação da tecnologia de alta velocidade de corte ao referido processo.

Todavia, as máquinas-ferramentas de tecnologia mais recente podem trabalhar com altíssimas velocidades, permitindo que os ciclos de usinagem sejam menores. A combinação de modernas ferramentas modulares e, também, fabricadas com novas geometrias de arestas de corte, com novos materiais mais resistentes ao desgaste e novas coberturas tornaram possível a elevação das velocidades de corte, proporcionando um aumento da competitividade industrial (MÜLLER, 2000). A usinagem com altas velocidades proporciona vantagens técnicas e econômicas em certos campos específicos de aplicação.