

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

Livros Grátis

<http://www.livrosgratis.com.br>

Milhares de livros grátis para download.

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, Programa 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. Programa 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/TiAlN. 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/TiAlN. 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
<i>DLC</i>	"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
Fx	Força radial
FUTURA	Denominação comercial para revestimento de multicamadas de TiN/TiAlN
Fz	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 ₂	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 _B	Desgaste de flanco médio
VB _B max.....	Desgaste de flanco máximo
Vc.....	Velocidade de corte
WCC.....	Carboneto de Tungstênio Carbono

SUMÁRIO

Resumo	ix
Abstract	x
Lista de Símbolos	xi
I – Introdução	01
II – Revisão Bibliográfica	05
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

III – Procedimentos Experimentais	51
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
IV – Resultados e Discussões	73
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
V – Conclusões.....	131
VI – Proposta para Trabalhos Futuros.....	133
VII – Referências Bibliográficas.....	135

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 a 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 ABNTN (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.

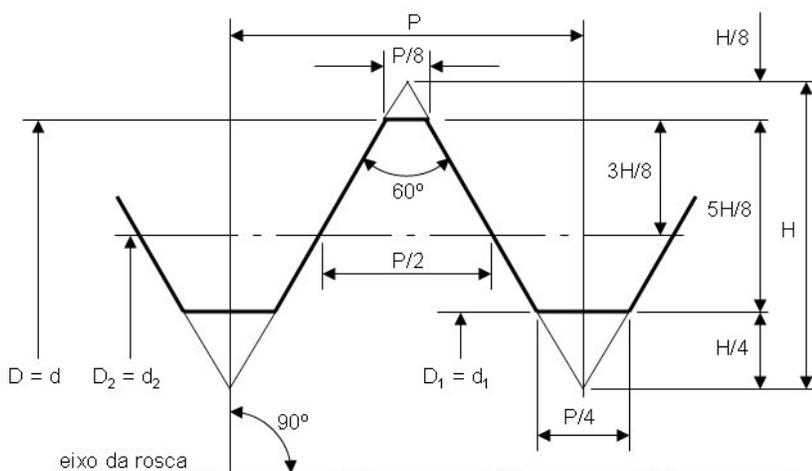


Figura 2.1 – Perfil básico da rosca métrica ISO (ABNT, 1986)

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).

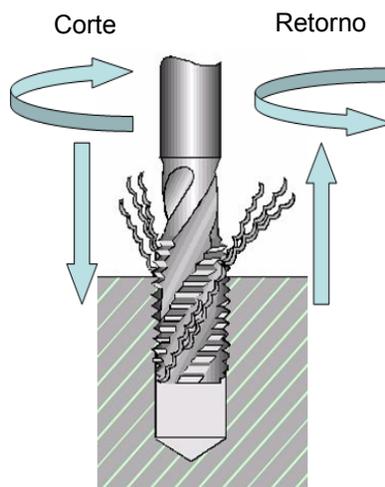


Figura 2.2 – Detalhe do rosqueamento interno com macho de corte (figura adaptada de (MÜLLER; SOTO, 1999))

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.

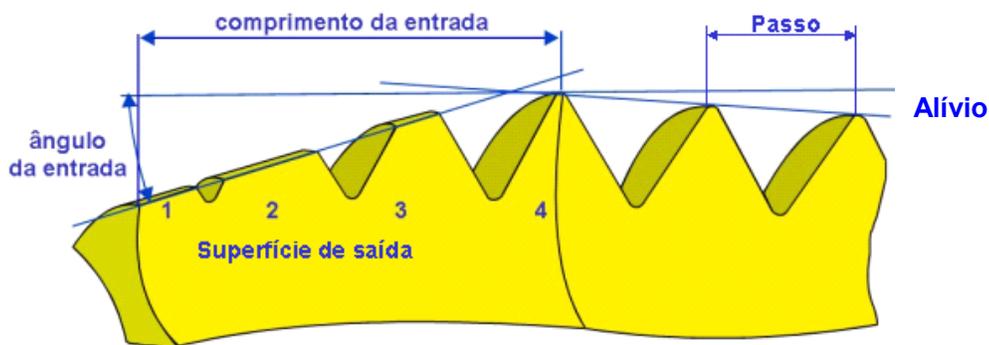


Figura 2.3 – Características da entrada de um macho de corte (Titex Plus, 1999, apud BEZERRA, 2003)

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 fluido 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).

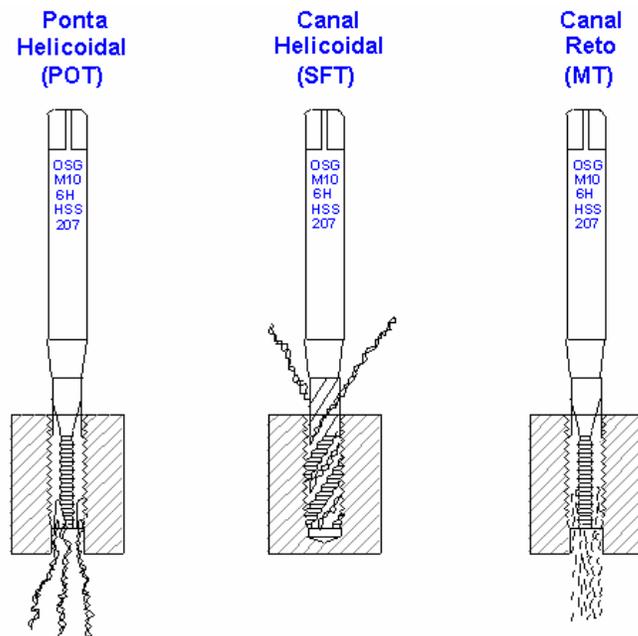


Figura 2.4 – Três tipos básicos de machos (OSG, 2005)

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.

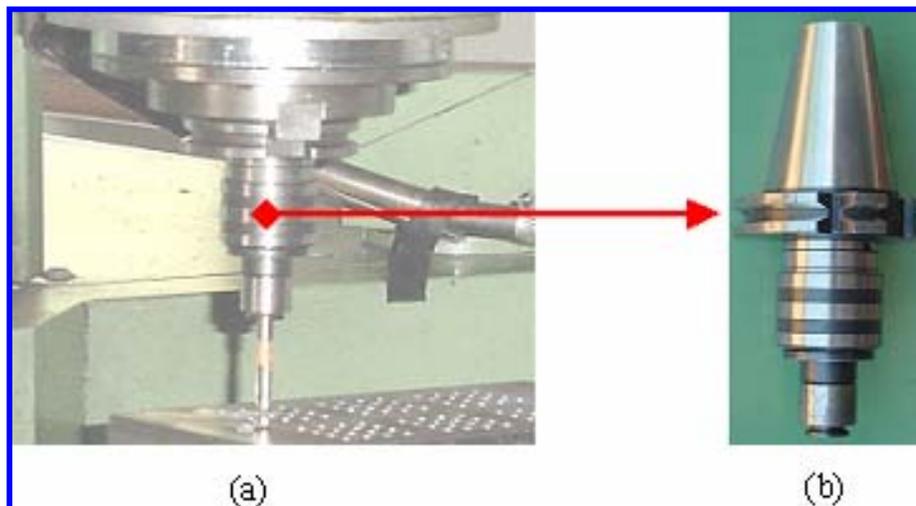


Figura 2.5 – Cabeçote flutuante utilizado para o rosqueamento interno com macho: a) montado na máquina; b) em detalhe (REIS, 2004)

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).

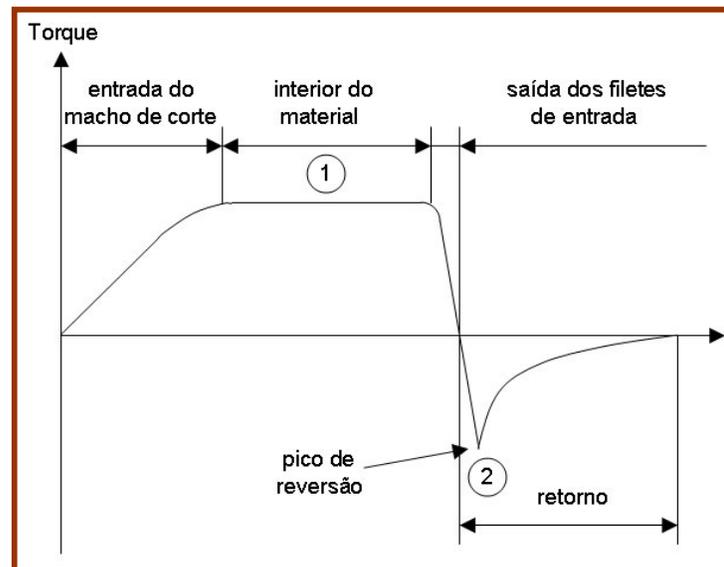


Figura 2.6 – Representação esquemática do comportamento do torque no rosqueamento (FANTIN, 1992)

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 fluidos 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. Exhaustivos 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.

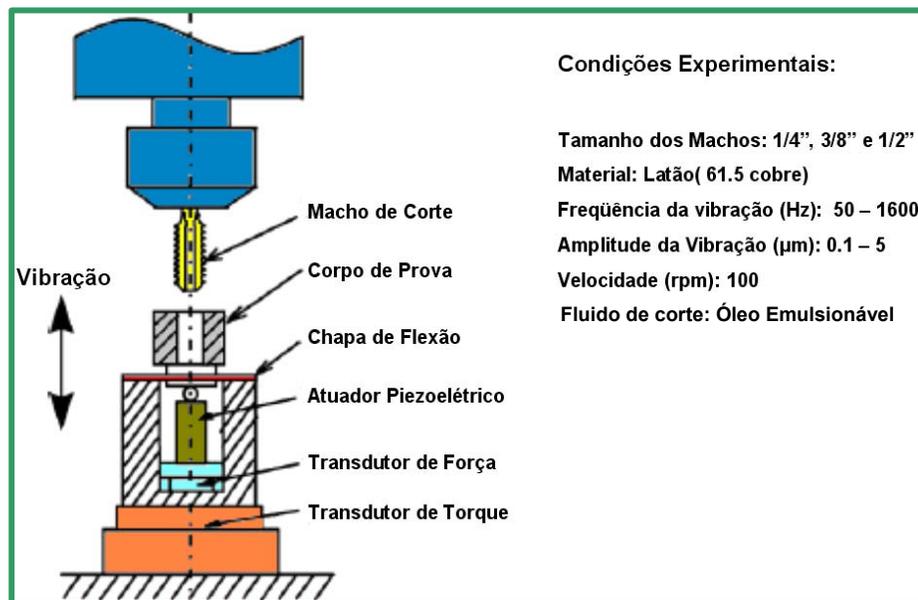


Figura 2.7 – Esquema do aparato utilizado para a indução de vibração ao processo de rosqueamento interno com macho de corte (ZHANG; YANG; WANG, 2003)

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.

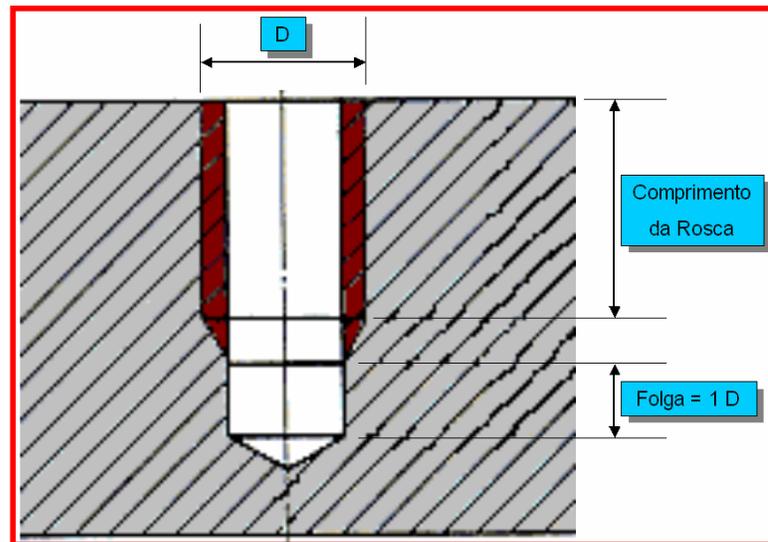


Figura 2.8 – Folga necessária para o rosqueamento com furo cego (OSG, 1999)

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 (comprimento do chanfro)	Comprimento da Rosca	Material			
		Aço em Geral		Ferro fundido	
		Comprimento da folga no furo		Comprimento da folga no furo	
		D até 6mm	D acima 6mm	D até 6mm	D acima 6mm
Canal Reto (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 (4,5~5,0 filetes) 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 (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.

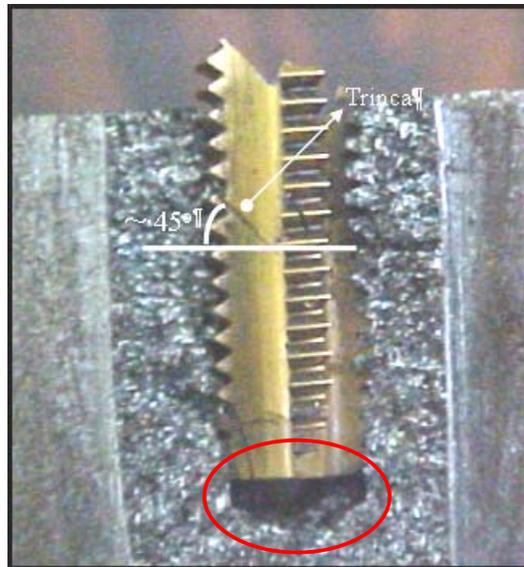


Figura 2.9 – Macho quebrado em uma peça de ferro fundido (REIS, 2004)

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).

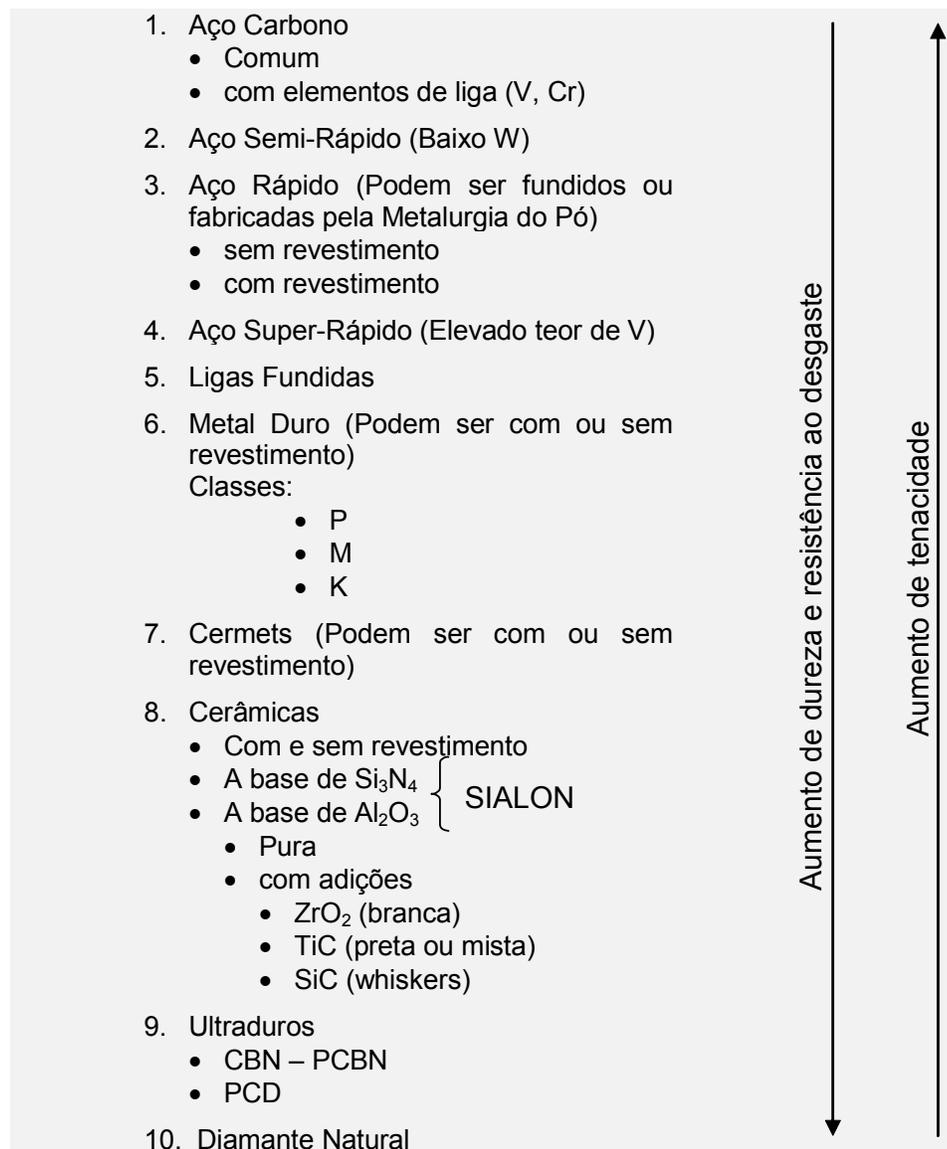


Figura 2.10 – Classificação das ferramentas de corte (MACHADO; DA SILVA, 2004)

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 às aquelas 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.

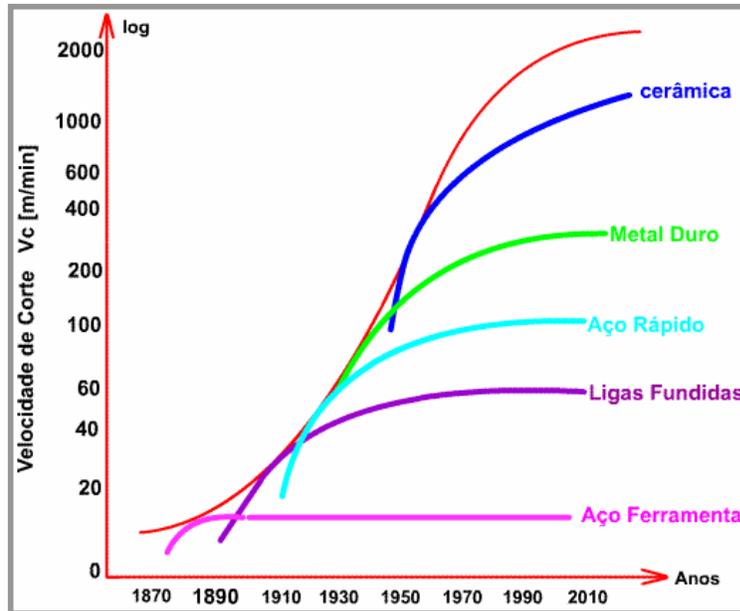


Figura 2.11 – Evolução das velocidades de corte ao longo do tempo (CIMM, 2005)

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 Metallurgical-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 AISi 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*), 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 μm , 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 (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 NH_3 e 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 Al_2O_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

(Al_2O_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).

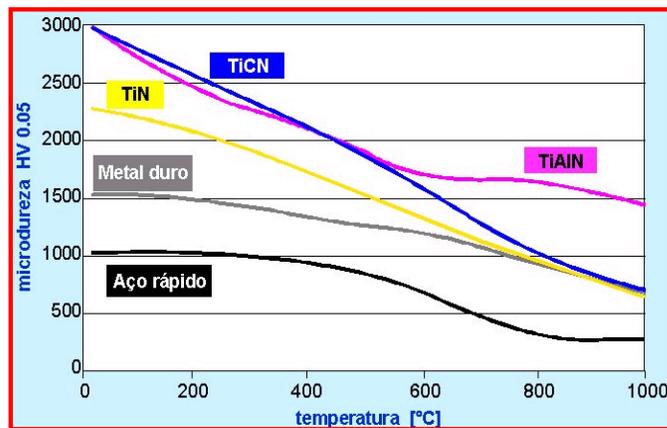


Figura 2.12 - Microdureza em relação à ferramentas e revestimentos (ISCAR, 2001)

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

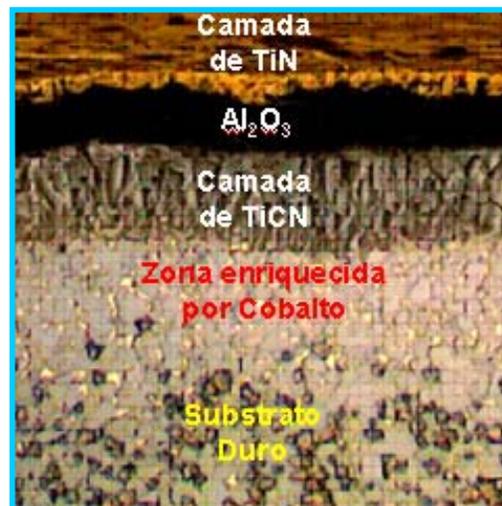


Figura 2.13 – Exemplo de combinação dos revestimentos (SANDVIK, 1999, modificada)

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 (Al_2O_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.

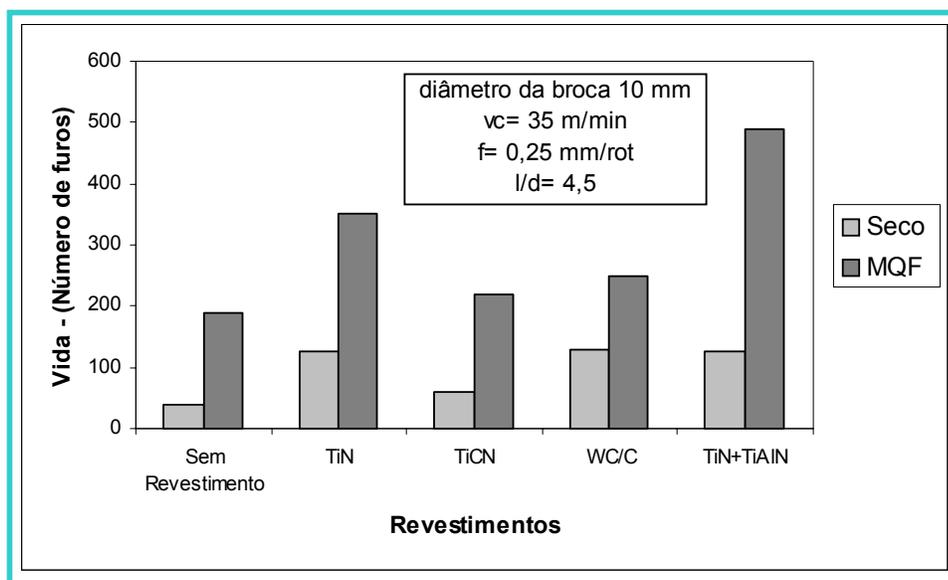


Figura 2.14 – Desempenho das brocas de aço-rápido no corte a seco e com aplicação de mínima quantidade de fluido (SANTOS, 2002)

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).

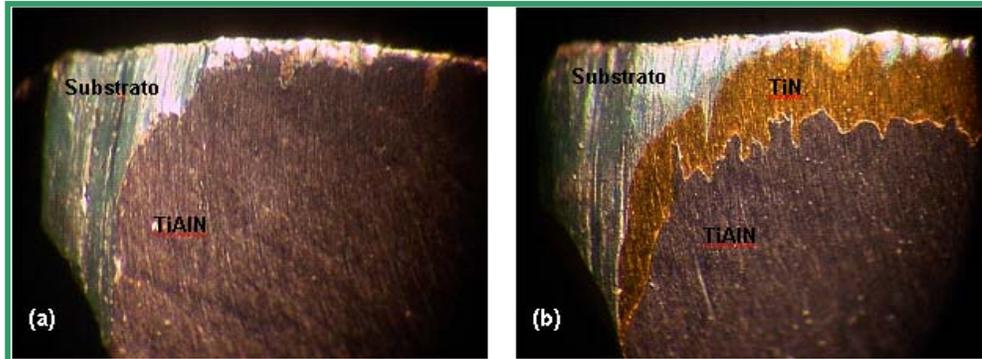


Figura – 2.15 (a) e (b) - Aspecto das pontas de corte da broca 2 revestida de TiN/TiAlN após 4000 furos (VIANA, 2004)

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).

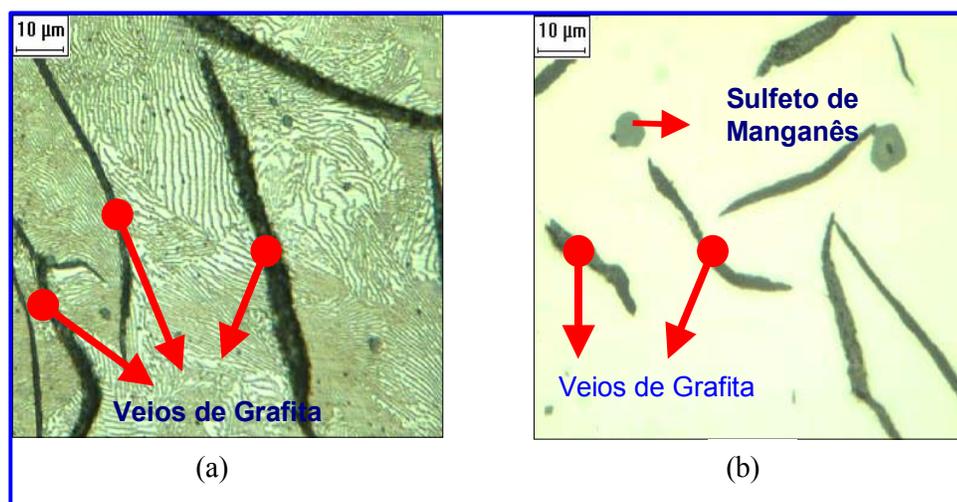


Figura 2.16 – Microestrutura do ferro fundido cinzento: a) veios de grafita, matriz perlítica; (b) inclusões de sulfeto de manganês (MACHADO et al., 2005)

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.

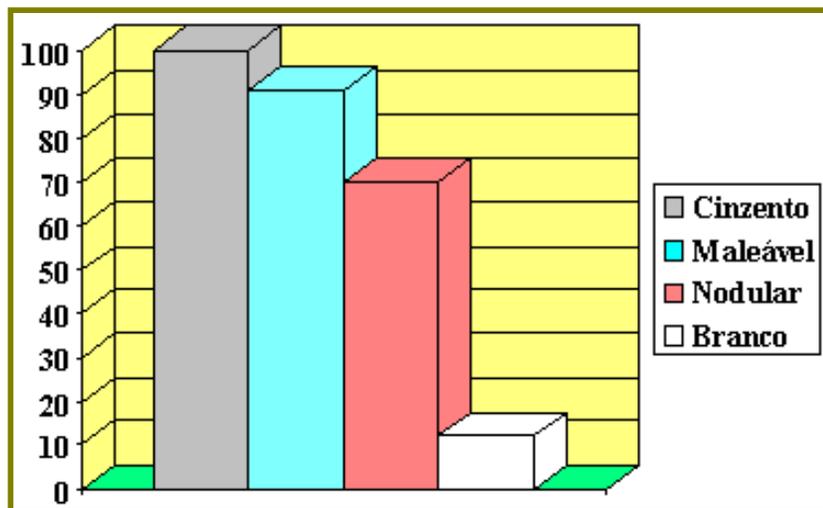


Figura 2.17 - Usinabilidade dos principais tipos de ferros fundidos (ISCAR, 2001)

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 Fluidos de Corte

A vinte anos atrás, falar de usinagem sem fluido 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 fluidos 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 Fluidos 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 $l\text{h}^{-1}$) na usinagem. É comum o uso de MQL no processo de manufatura. Usando essa técnica, somente 6 – 70 $ml\text{h}^{-1}$ 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 μm) 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 fluidos 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, Al_2O_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 conseqüências 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 fluidos 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.

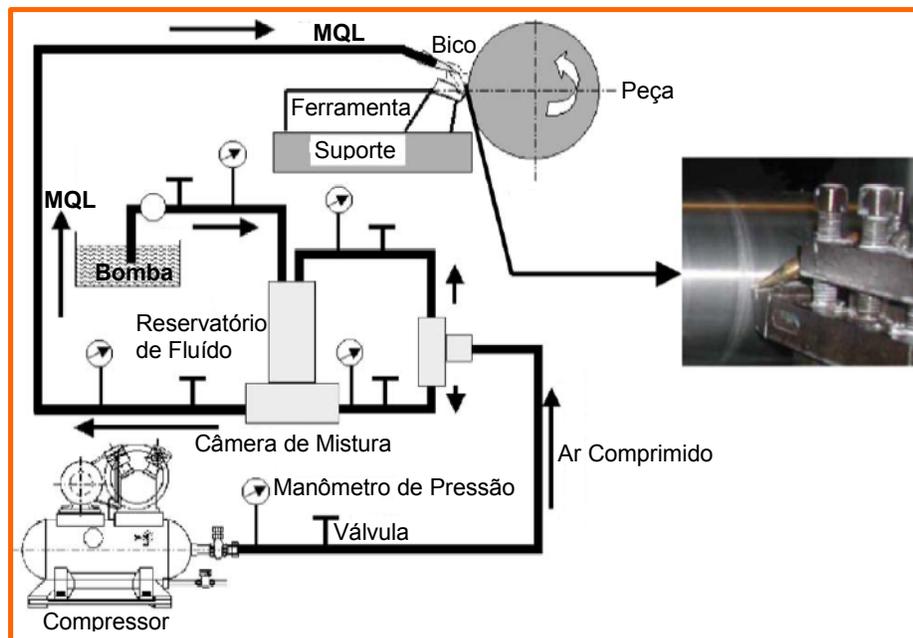


Figura 2.18 – Vista esquemática da unidade de MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação) (DHAR et al., 2006)

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).

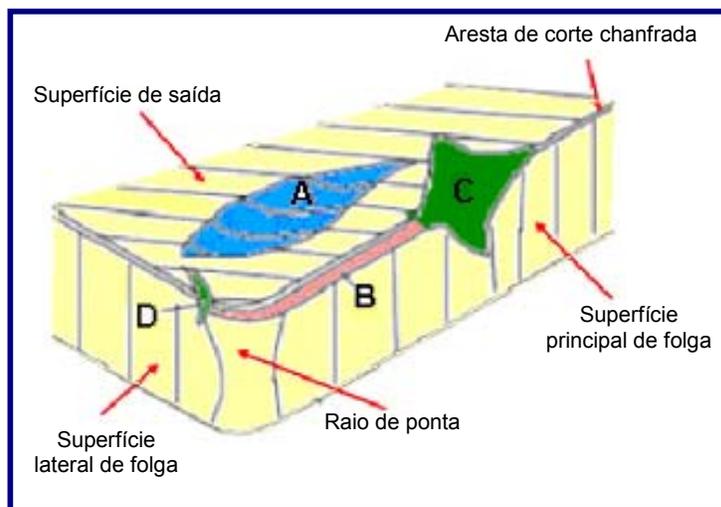


Figura 2.19 - Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte (DEARNLEY; TRENT, 1982, apud MACHADO; DA SILVA, 2004, modificada)

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).

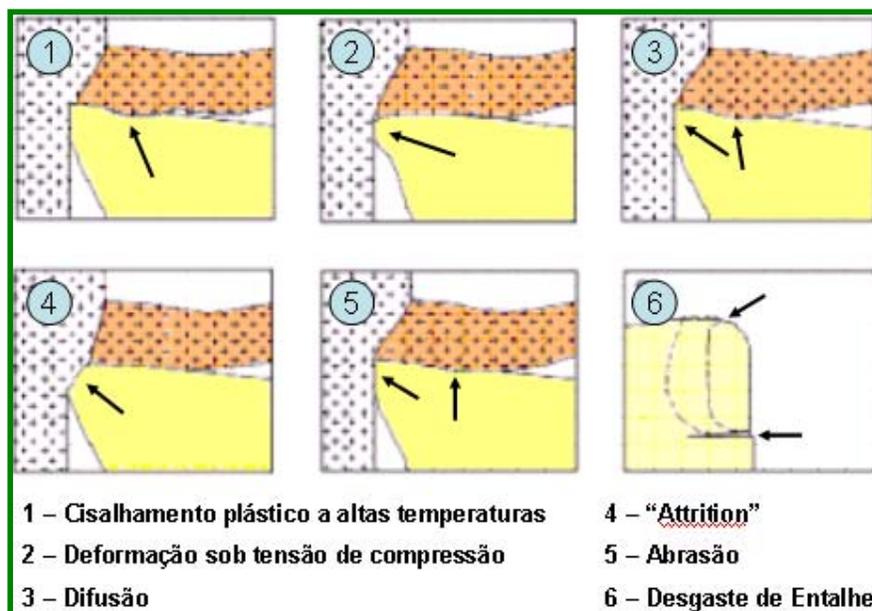


Figura 2.20 – Mecanismos e Processos de Desgaste que podem acontecer nas ferramentas de corte (TRENT; WRIGHT, 2000, modificada)

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 contém 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).

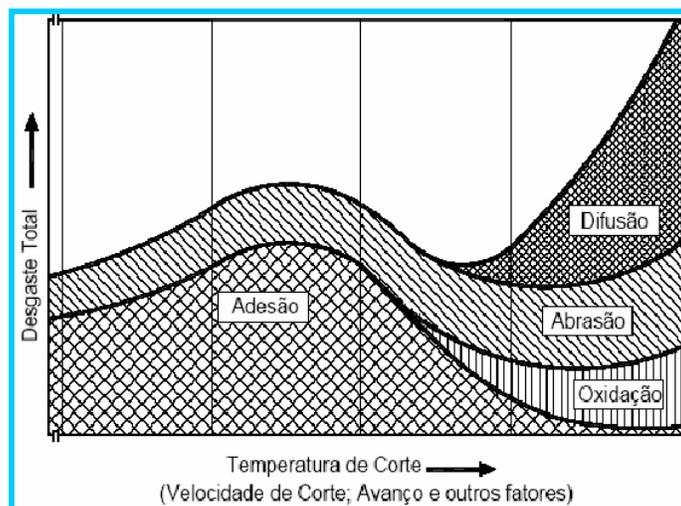


Figura 2.21 – Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte (VIEREGGE, 1970, apud MACHADO; DA SILVA, 2004)

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.

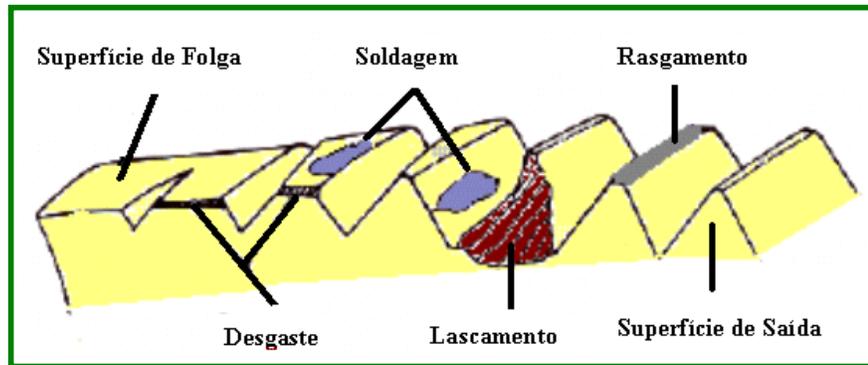


Figura 2.22 - Principais tipos de desgaste e avarias (CATÁLOGO DA OSG, 1999)

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.

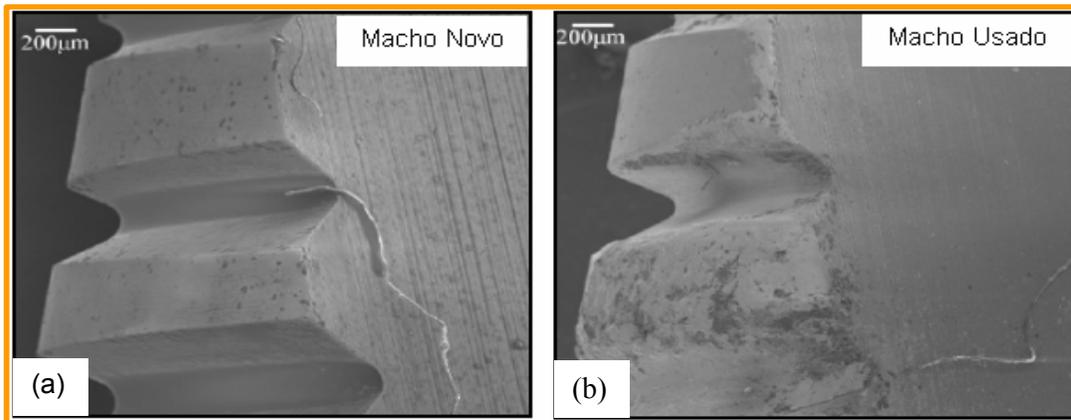


Figura 2.23 – Desgaste apresentado no 3° e 4° filetes de dois machos de corte revestidos com TiAlN; a) Macho novo; b) Macho em fim de vida (BEZERRA, 2003)

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).

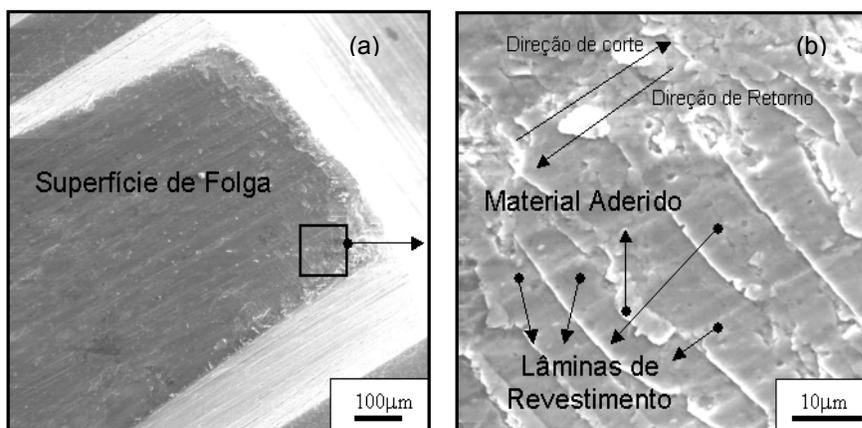


Figura 2.24 – Fotos da superfície de uma ferramenta de HSS-E revestida com TiN (elétrons secundários): a) Aspecto do desgaste sobre a superfície de folga; b) Detalhe de uma região onde o revestimento está se soltando (REIS, 2004)

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.

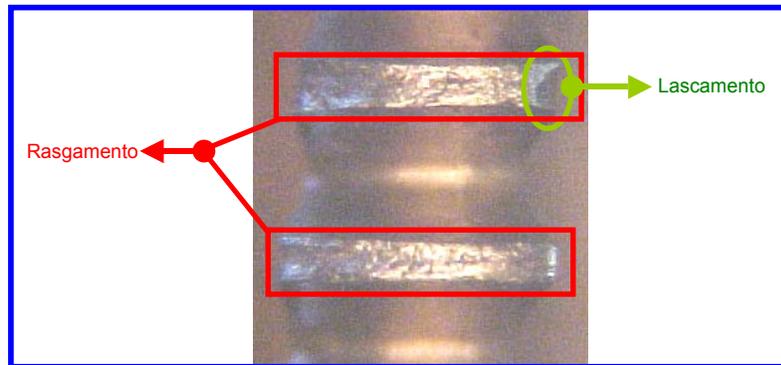


Figura 2.25 - Foto realizada através de um microscópio ferramenteiro após usinar 1800 roscas com macho HSS-NI, terceiro e quarto dente (REIS, 2004)

(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 fluido 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 usinar 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.

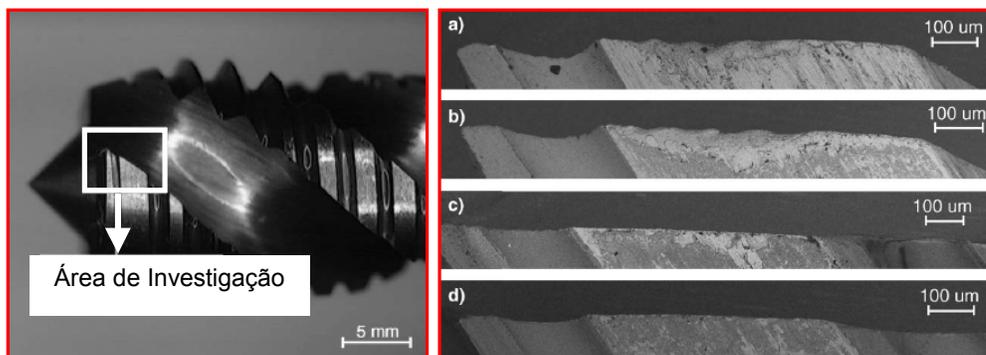


Figura 2.26 – Micrografias da aresta de corte (MEV) de (a) CrC, (b) CrN, (c) TiAlN, (d) TiCN (REITER et al., 2006)

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.

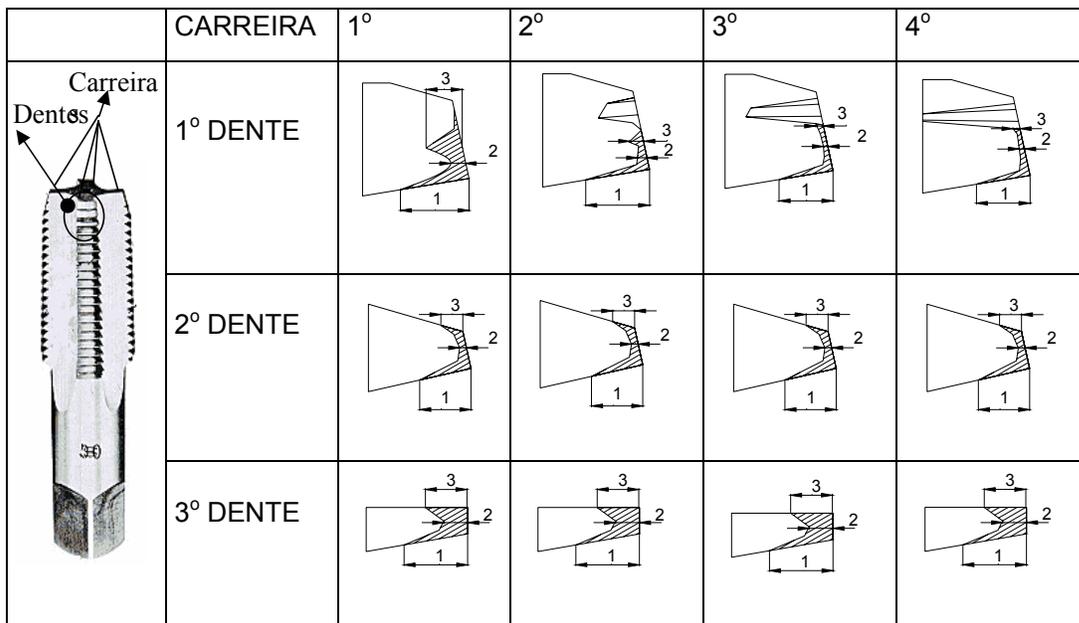


Figura 2.27 - Cotas críticas de desgaste em machos de corte (REIS, 2004)

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.

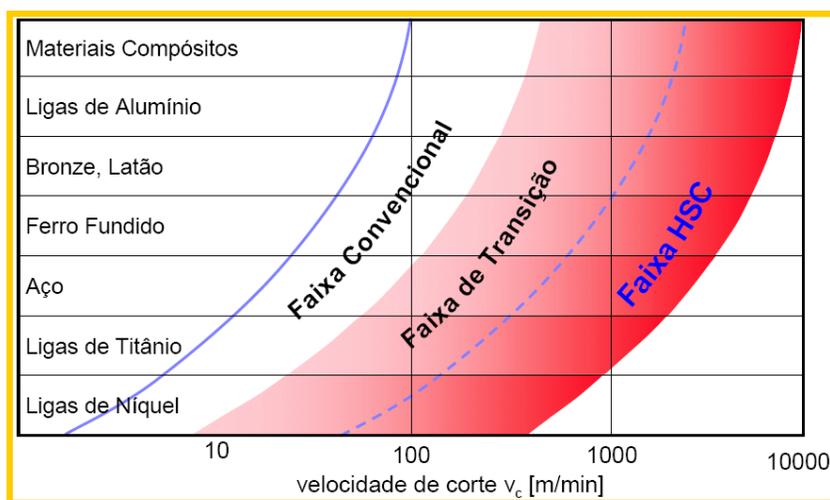


Figura 2.28 – Definição atual de usinagem com alta velocidade de corte (SCHULZ, 1997)

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).

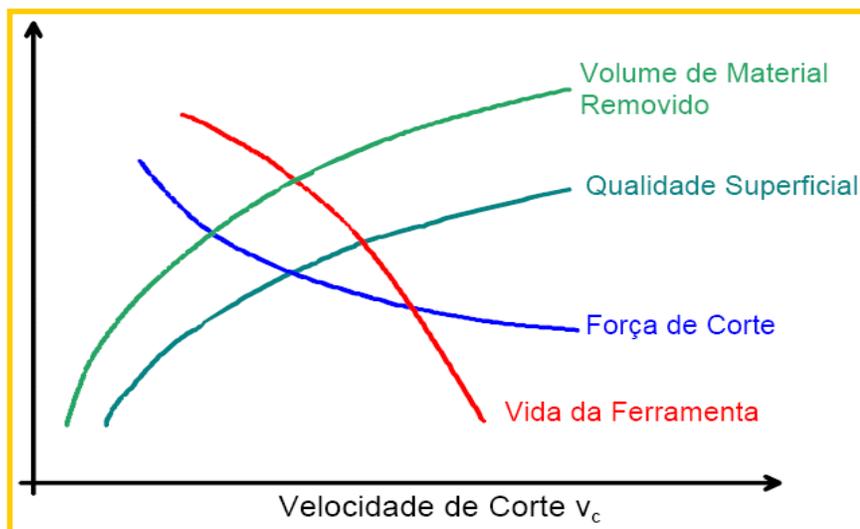


Figura 2.29 – Influência das Características do Processo HSC (SCHULZ, 1997)

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 quádruplo 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.

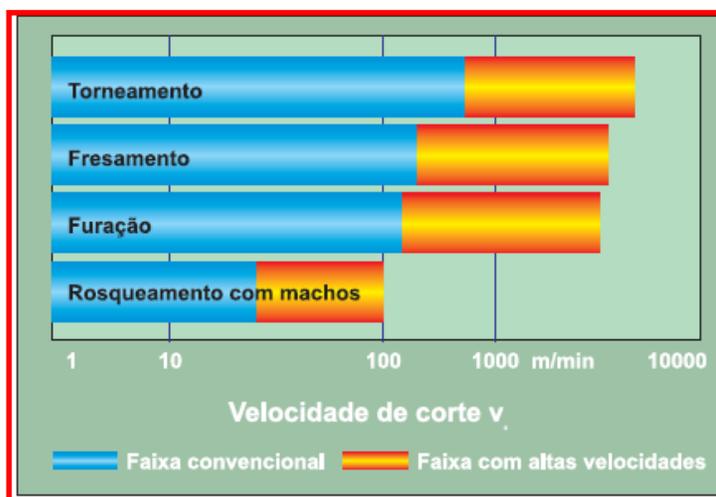


Figura 2.30 – Comparação de faixas de velocidades convencionais e *HSC* (TITEX PLUS, apud BEZERRA, 2003)

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 à 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.

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTOS EXPERIMENTAIS

Neste capítulo são descritos os procedimentos experimentais realizados e a partir dos quais foram obtidos os resultados que serviram de base para a execução deste trabalho. Os ensaios foram realizados no ferro fundido cinzento GH 190 (equivalente ao FC 200/250 da norma AISI), utilizado na fabricação de blocos de motores automotivos.

Inicialmente foram feitos vários testes preliminares para definir os parâmetros de usinagem, tais como as velocidades de corte a serem utilizadas. Estes serviram também para conhecer melhor o processo, principalmente com relação ao funcionamento dos dispositivos de fixação que seriam utilizados: cabeçote fixo, flutuante e auto-reversível. Os resultados desses testes não serão apresentados aqui.

O cabeçote fixo foi o único que permitiu a usinagem em velocidades consideradas altas para o rosqueamento. Com esse acessório (ou dispositivo) foi possível fabricar roscas com velocidade de corte de até 75 m/min, a máxima permitida pela máquina utilizada.

Com essas condições de corte não foi possível utilizar todos os cabeçotes, devido a limitações técnicas dos mesmos. Optou-se por não utilizar o cabeçote flutuante nos testes definitivos devido à não calibração das roscas usinadas com velocidades superiores a 30 m/min com esta fixação. Já com cabeçote auto-reversível foi possível calibrar todas as roscas testadas, mas não foi possível rosquear com velocidades superiores a 47 m/min, devido à limitação técnica desse equipamento, o qual não permite utilizar rotações superiores a 2500 rpm.

Deste modo, optou-se por utilizar nos testes definitivos dois cabeçotes e três velocidades de corte, que são respectivamente, o fixo (10, 37,5 e 75 m/min) e o auto-reversível (10 e 37,5 m/min).

Nos testes preliminares foram testadas duas condições de lubrificação: seco e MQL. Entretanto, após a realização destes pré-testes, definiu-se que o uso de lubrificante só seria utilizado para as condições mais severas, ou seja, para a usinagem com altas velocidades

de corte e para as ferramentas que apresentaram os piores resultados nos testes preliminares. A justificativa para a não utilização de MQL para as ferramentas com melhores desempenhos está relacionada ao número excessivo de testes, o que comprometeria a realização desse trabalho.

Nestes testes preliminares foram usinadas várias roscas com três tipos de materiais para machos de corte: HSS (aço rápido), HSS-E (aço-rápido com 3% de vanádio) e HSS-PM (aço-rápido obtido pela metalurgia do pó). Em função dos resultados obtidos ficou definido que os critérios de fim de vida dos machos seriam relacionados à falha catastrófica das ferramentas ou a não calibração dos furos rosqueados, medida através de um calibre passa-não-passa padronizado. O número máximo de furos rosqueados não ultrapassaria 1000 roscas por ferramenta.

Determinou-se que nos ensaios definitivos, as roscas seriam feitas em furos cegos, pois a maioria das roscas do bloco de motor é fabricada neste tipo de furo. É também durante a fabricação de roscas em furos cegos que são geradas as condições mais severas de rosqueamento, em termos de calor e torque produzidos, bem como dificuldade de saída do cavaco.

Nos ensaios definitivos foram utilizadas ferramentas de corte fabricadas em quatro tipos de aço-rápido: 1) HSS-E: aço-rápido AISI-M3 com 3% de Vanádio, conhecido como aço super-rápido, com dureza de aproximadamente 879 HV (66,4 HRC), fabricado pelo método de fundição convencional; 2) HSS: aço-rápido AISI-M7, fabricado pelo método convencional, que possui uma dureza medida de 871 HV (aproximadamente 66,2 HRC); 3) HSS PM: aço-rápido AISI-M7, fabricado pelo processo de metalurgia do pó, cuja dureza medida é 920HV (aproximadamente 67,5 HRC); 4) HSS NI: aço-rápido AISI-M7, fabricado pelo processo convencional e tratado superficialmente, cuja macrodureza medida é de 808 HV (64,5 HRC). O tratamento superficial utilizado foi a nitretação à plasma, realizado a uma temperatura de 480° C durante 90 minutos, para obtenção de uma camada nitretada cuja espessura estimada é de 0,04 mm e microdureza de 1000 a 1250 HmV0,3.

Foi ainda avaliado o desempenho de dois tipos de revestimentos: TiN (nitreto de titânio) e multicamadas de TiN/TiAlN nas ferramentas de HSS-E e HSS-PM. Como forma de monitorar os esforços gerados durante a evolução dos desgastes nas ferramentas para as diferentes condições de corte empregadas neste trabalho foi feito o acompanhamento do sinal de torque para as condições de ferramenta nova e em fim de vida.

Estudos das formas e mecanismos de desgastes presentes nas ferramentas ensaiadas foram feitos por meio de análises em MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura) e em microscópio óptico. As roscas fabricadas com cada tipo de ferramenta em cada velocidade de corte, também foram analisadas no MEV.

3.1 Planejamento Experimental

Os ensaios definitivos foram divididos em duas etapas, onde foram utilizadas como variáveis independentes os substratos das ferramentas, as velocidades de corte, o tipo de cobertura e o sistema de fixação das ferramentas (mandril fixo e auto-reversível). Consideraram-se como constantes o material dos corpos de prova, a máquina-ferramenta e o tipo de refrigeração/lubrificação.

Além dessas duas etapas, foram feitos vários testes complementares com o objetivo de entender melhor os principais mecanismos de desgaste apresentados nos machos de corte utilizados em altas velocidades de corte. Esses testes ocorreram para as ferramentas que tiveram os piores resultados nos ensaios preliminares e serão detalhados a seguir.

Para a primeira etapa foram considerados três variáveis independentes ou de entrada. Variou-se a velocidade de corte em alta (75 m/min) e moderada (37,5 m/min); os substratos das ferramentas (HSS-PM e HSS-E); e finalmente os revestimentos (TiN e multicamadas (TiN/TiAlN)). Utilizou-se para esse experimento um planejamento fatorial com três fatores e dois níveis (2^k), pois possuem ampla aplicação industrial. Essas condições permitem a avaliação em separado dos efeitos individuais e dos efeitos de interação dos fatores num experimento no qual todos fatores variam simultaneamente num padrão de tentativas cuidadosamente organizado. Dessa forma, classificou-se a velocidade de corte, o substrato e a cobertura, para efeito do planejamento, como apresentado na Tab. 3.1.

Tabela 3.1 Variáveis utilizadas na primeira etapa do planejamento estatístico

Variável	Fator (estudado)	Valor codificado (Fatorial 2^3)
Velocidade (Vc)	A1 = 37,5 m/min	-1
	A2 = 75,0 m/min	1
Substrato (Sub)	B1 = HSS-E	-1
	B2 = HSS PM	1
Revestimento (Rev)	C1 = TiN	-1
	C2 = TiN/TiAlN	1

A Tab. 3.2 apresenta os principais testes e seus respectivos fatores de controle, desenvolvida pelo *Software Statistical*. Com o objetivo de acompanhar e medir os desgastes no microscópio ferramenteiro, trocava-se as ferramentas de corte a cada 160 roscas, permitindo que dessa forma os testes fossem aleatórios. Isso possibilitou a cada ferramenta usinar em corpos de prova diferentes e em dias distintos. Como os testes deste trabalho foram baseados em experimentos fatoriais, todas as combinações possíveis dos níveis dos fatores, ou variáveis independentes, citadas acima foram testadas. Portanto, tem-se dois

níveis de velocidade de corte, dois tipos de substratos e mais dois de revestimento, os quais resultam em oito combinações a serem examinadas. É importante advertir que não houve repetições dos testes em nenhuma situação, devido ao grande número de ensaios necessários neste trabalho.

Tabela 3.2 Testes e respectivos fatores analisados com cabeçote fixo

Ensaio	Velocidade de corte	Substrato	Revestimento	Fatores
01	1 (75 m/min)	1(PM)	1(TiN/TiAlN)	A2B2C2
02	-1 (37,5 m/min)	1(PM)	1(TiN/TiAlN)	A1B2C2
03	1 (75 m/min)	-1(HSS-E)	1(TiN/TiAlN)	A2B1C2
04	-1 (37,5 m/min)	-1(HSS-E)	1(TiN/TiAlN)	A1B1C2
05	1 (75 m/min)	1(PM)	-1(TiN)	A2B2C1
06	-1 (37,5 m/min)	1(PM)	-1(TiN)	A1B2C1
07	1 (75 m/min)	-1(HSS-E)	-1(TiN)	A2B1C1
08	-1 (37,5 m/min)	-1(HSS-E)	-1(TiN)	A1B1C1

A segunda situação (etapa) analisada foi a comparação do desempenho dos dois tipos de cabeçotes. Também para análise estatística foram consideradas três variáveis independentes ou de entrada. Variou-se o tipo de cabeçote (fixo ou auto-reversível); os substratos das ferramentas (HSS-E e HSS-PM); e novamente os revestimentos: TiN e multicamadas (TiN/TiAlN). Desta vez a velocidade de corte foi considerada constante, pois os testes ocorreram com velocidades moderadas (37,5 m/min). Os demais parâmetros de corte foram mantidos constantes. Utilizou-se também para esse experimento um planejamento fatorial com três fatores e dois níveis (2^k). Assim, o planejamento ficou classificado conforme a Tab. 3.3.

Tabela 3.3 Variáveis utilizadas na segunda etapa do planejamento estatístico

Variável	Fator Estudado	Valor codificado (Fatorial 2^3)
Cabeçote (Cab)	A1 = Fixo	-1
	A2 = Auto-Reversível	1
Substrato (Sub)	B1 = HSS-E	-1
	B2 = HSS PM	1
Revestimento (Rev)	C1 = TiN	-1
	C2 = TiN/TiAlN	1

A Tab. 3.4 mostra a disposição dos testes e suas respectivas ordens de realização, embora, da mesma forma que a anterior, os testes foram realizados aleatoriamente, sempre usinando 160 roscas e medindo os desgastes no microscópio ótico.

Tabela 3.4 Testes e respectivos fatores analisados com velocidade de corte constante

Ensaio	Tipo de Cabeçote	Substrato	Revestimento	Fatores
09	1(Reversível)	1(PM)	1(TiN/TiAlN)	A2B2C2
10	-1(Fixo)	1(PM)	1(TiN/TiAlN)	A1B2C2
11	1(Reversível)	-1(HSS-E)	1(TiN/TiAlN)	A2B1C2
12	-1(Fixo)	-1(HSS-E)	1(TiN/TiAlN)	A1B1C2
13	1(Reversível)	1(PM)	-1(TiN)	A2B2C1
14	-1(Fixo)	1(PM)	-1(TiN)	A1B2C1
15	1(Reversível)	-1(HSS-E)	-1(TiN)	A2B1C1
16	-1(Fixo)	-1(HSS-E)	-1(TiN)	A1B1C1

Também avaliou-se os machos HSS-E sem revestimento (SR) e revestidos com TiN, em duas situações: à seco e com MQL. Para completar essa série de ensaios foram utilizados dois machos de HSS que sofreram tratamentos termoquímicos de nitretação. A Tab. 3.5 apresenta a configuração desses testes.

Tabela 3.5 Condições de teste complementares

Teste	Revestimento	Velocidade de Corte (m/min)	Cabeçote	Condição
17	HSS TiN	10	Fixo	Seco
18	HSS TiN	10	Reversível	Seco
19	HSS TiN	75	Fixo	Seco
20	HSS-E TiN	75	Fixo	MQL
21	HSS-E (SR)	75	Fixo	Seco
22	HSS-E (SR)	75	Fixo	MQL
23	HSS Nitretado	75	Fixo	Seco
24	HSS Nitretado	75	Fixo	MQL

Com isso, foi possível comparar o desempenho de duas classes de machos: HSS e HSS-E. Além disso, avaliou-se a eficiência do revestimento TiN versus o efeito da lubrificação no rosqueamento de ferro fundido, em alta velocidade de corte. Não foi feito nenhum teste utilizando MQL para as ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN, pois essas ferramentas tiveram um desempenho muito superior às ferramentas

sem revestimento e revestidas com TiN, na condição a seco, quando testadas nos testes preliminares e na primeira etapa dos testes, utilizando cabeçote fixo.

A tab. 3.6 resume a combinação dos vinte testes realizados nesta etapa do trabalho, sendo possível destacar os quatro tipos de substratos (HSS, HSS NI, HSS-E e HSS-PM), bem como os dois tipos de revestimentos empregados (TiN e multicamadas TiN/TiAlN, designado como Futura). Percebe-se também que em quatro condições foram utilizadas ferramentas sem revestimento.

Tabela 3.6 Ferramentas, revestimentos e condições de corte utilizadas na segunda etapa

Teste	Ferramenta	Revestimento	Velocidade de Corte (m/min)	Fluído de Corte	Cabeçote
01	HSS-PM	TiN/TiAlN	75	Seco	Fixo
02	HSS-E	TiN/TiAlN	75	Seco	Fixo
03	HSS-PM	TiN	75	Seco	Fixo
04	HSS-E	TiN	75	Seco	Fixo
05	HSS-E	TiN/TiAlN	37,5	Seco	Fixo
06	HSS-PM	TiN/TiAlN	37,5	Seco	Fixo
07	HSS-PM	TiN	37,5	Seco	Fixo
08	HSS-E	TiN	37,5	Seco	Fixo
09	HSS-E	TiN	75	MQL	Fixo
10	HSS-E	Sem Revestimento	75	Seco	Fixo
11	HSS-E	Sem Revestimento	75	MQL	Fixo
12	HSS NI	Sem Revestimento	75	Seco	Fixo
13	HSS NI	Sem Revestimento	75	MQL	Fixo
14	HSS	TiN	10	Seco	Fixo
15	HSS	TiN	75	Seco	Fixo
16	HSS	TiN	10	Seco	Reversível
17	HSS-PM	TiN/TiAlN	37,5	Seco	Reversível
18	HSS-PM	TiN	37,5	Seco	Reversível
19	HSS-E	TiN/TiAlN	37,5	Seco	Reversível
20	HSS-E	TiN	37,5	Seco	Reversível

Conforme descrito anteriormente, foram feitos alguns testes complementares (cabeçote fixo e auto-reversível), utilizando os machos que falharam prematuramente nos testes preliminares. Utilizou-se duas velocidades de corte (10 e 75 m/min) e em três

situações de corte utilizou-se MQL, com o objetivo de avaliar o efeito do uso de refrigerante/lubrificante nas condições mais severas.

Neste caso, somente em uma situação foi utilizado o cabeçote auto-reversível, quando comparou-se o desempenho dos machos HSS revestidos com TiN em baixa velocidade de corte (10 m/min) versus o desempenho de uma ferramenta semelhante em alta velocidade de corte (75 m/min). Os testes com baixa velocidade de corte (10 m/min) foram realizados devido ao fato de ainda hoje serem empregadas essas velocidades de corte no parque industrial do Brasil.

3.2 Máquina-Ferramenta

Todos os testes foram realizados em um Centro de Usinagem Vertical CNC da linha Discovery modelo 760 com comando numérico Siemens 810 (Fig 3.1), cujas características estão descritas na Tab. 3.7. Os programas utilizados para os ciclos de rosqueamento foram o Ciclo 84, próprio para rosqueamento com macho rígido e o Ciclo 840, próprio para mandris flutuantes.



Figura 3.1 – Centro de usinagem vertical, modelo Discovery 760 (ROMI)

Tabela 3.7 Características do centro de usinagem discovery 760

Especificações técnicas	Valores	Especificações técnicas	Valores
Faixa de velocidades	10 a 10.000 RPM	Potência total instalada	15 KVA
Avanço rápido (eixos x / y)	25.000mm/min	Curso long. da mesa (x)	762 mm
Avanço rápido (eixos z)	20.000 mm/min	Curso trans. da mesa (y)	406 mm
Avanço de corte	1 a 5.000 mm/min	Curso vert. do cabeçote	508 mm
Pot. do motor principal CA	9 KW/12,5 cv	Comando	Siemens 810

3.3 Machos de Corte

Todas as ferramentas testadas neste trabalho são machos de corte para rosca métrica M6X1, cujas principais características geométricas são apresentadas na Tab 3.8

Tabela 3.8 Características geométricas dos machos utilizados nos ensaios

Macho máquina ISO 529 M6x1 6H (Canal reto)			
Características	Dimensões	Características	Dimensões
Nº de canais	3	Nº de filetes no chanfro	2
Ângulo de entrada	20°	Ângulo de saída ou de corte	12° a 14°
D(Diâmetro externo)	6mm (M6)	Passo	1 mm
D2 (Diâmetro efetivo)	5,350 mm	D1 (Diâmetro interno)	4,917mm
H1(altura do filete)	0,541 mm	Ângulo da rosca	60°

A Fig 3.2 mostra dois machos de corte M6X1, revestidos com multicamadas (TiN/TiAlN) (a) e TiN (b), coberturas muito utilizadas no meio industrial, as quais representaram os principais focos de investigação deste trabalho. Os machos utilizados possuem uma geometria específica (fora de catálogo), pois estas ferramentas são fabricadas exclusivamente para atender a montadora Fiat Automóveis Ltda.

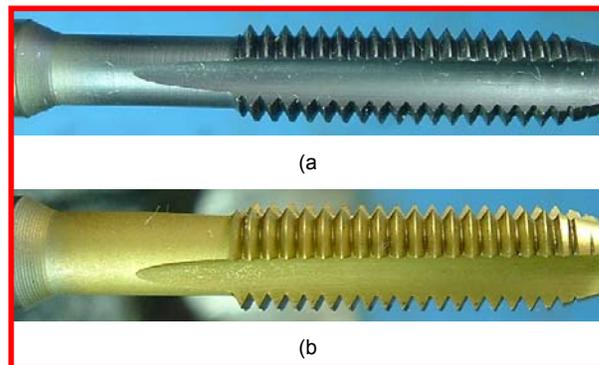


Figura 3.2 Ferramentas de corte utilizadas: a) HSS-PM TiN/TiAlN (Futura) e b) HSS-E TiN

3.4 Corpo-de-prova, ferramentas e seqüência de execução dos testes

Conforme mencionado anteriormente os corpos-de-prova usinados foram barras de ferro fundido cinzento GH 190 (classificação segundo norma FIAT de 1991) cujas principais características são apresentadas na Tab. 3.9.

Tabela 3.9 Características do ferro fundido cinzento GH-190

Composição Química (%)					Características Estruturais			Dureza (HB)
C	Si	Cr	S	P	Matriz	Grafita	Cementita e carbono livre	207
3,2-3,5	2,0-2,5	≤ 0,2	≤ 0,15	≤ 0,10	Perlítica lamelar max. 5% de ferrita	Tipos B e D	Max. 1%	

A Figura 3.3 apresenta algumas micrografias do ferro fundido cinzento (GH 190), que caracterizam a estrutura da matriz (perlítica), com grafitas em forma de veios. Também é possível observar partículas de sulfeto de manganês e algumas regiões onde há predominância de ferrita, rica em fósforo, com precipitados de Fe_3P (steadita), indicado pelas setas dessa figura.

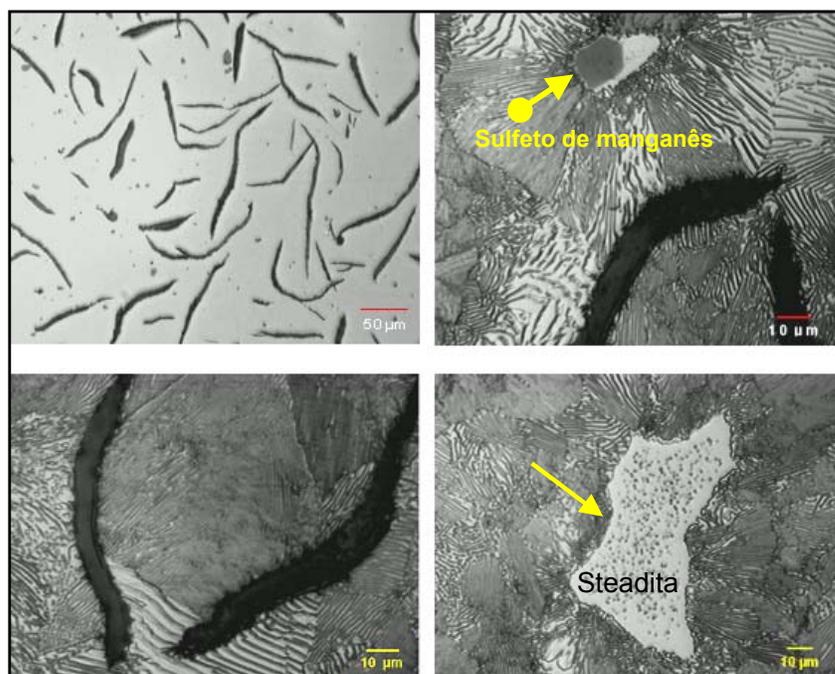


Figura 3.3 – Micrografias do ferro fundido cinzento GH-190; inclusões de sulfeto de manganês e ferrita rica em fósforo, com precipitados de Fe_3P (steadita)

A Fig 3.4 apresenta as principais dimensões das placas rosqueadas, assim como os detalhes das roscas fabricadas. Cada placa foi fresada (fresamento frontal) na superfície superior e inferior, com o objetivo de aplainar a região a ser rosqueada, garantindo a planicidade e o paralelismo, bem como retirar impurezas superficiais, comuns nas ligas fundidas em areia.

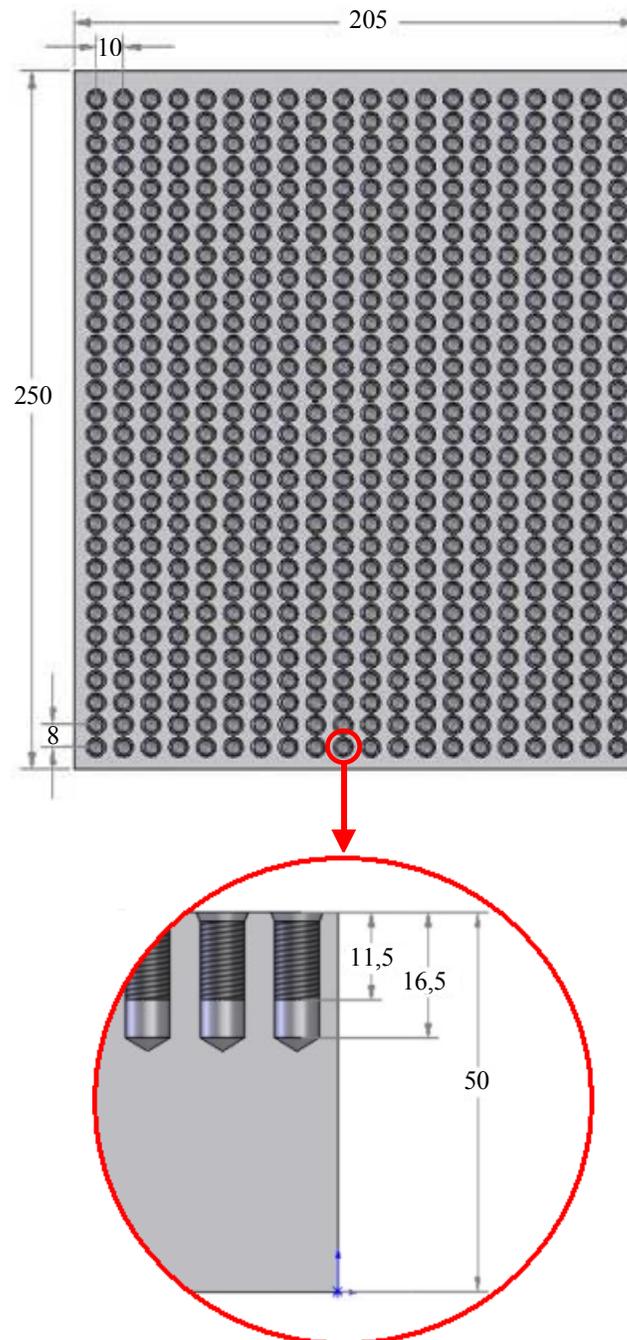


Figura 3.4 – Corpo de prova (ferro fundido GH 190) utilizado nos experimentos

A espessura das barras final foi de aproximadamente 50 mm, o que proporcionou a usinagem de roscas nos dois lados da peça. Os pré-furos tinham 16.5 mm de profundidade, dos quais as roscas feitas atingiam 11,5 mm de comprimento.

As figs 3.5 (a), (b) e (c) mostram o corpo de prova sendo furado, rosqueado e calibrado, respectivamente.

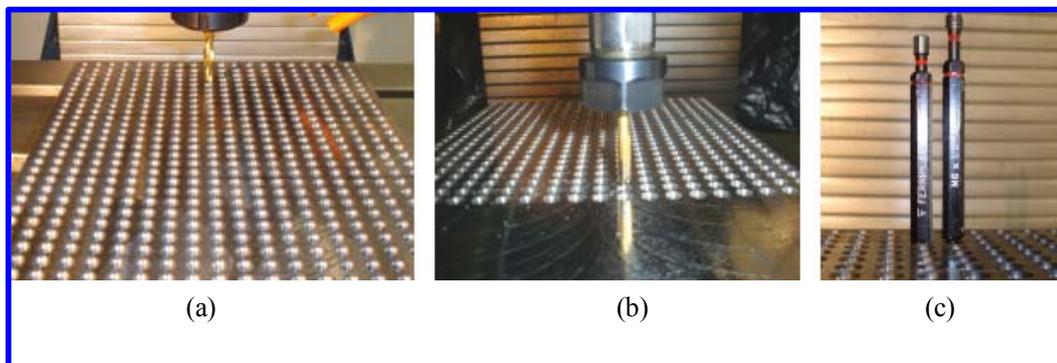


Figura 3.5 – Corpo de prova utilizado nos testes; (a) Furação; (b) Rosqueamento; (c) Calibre passa-não passa para furação e rosqueamento

O material usinado foi fixado em uma morsa, a qual estava fixa por parafusos na mesa principal do centro de usinagem. As ferramentas utilizadas foram colocadas nos mandris, armazenadas no magazine da máquina, sendo retiradas, dos cabeçotes, somente para a medição do desgaste no microscópio ótico. Para fabricar os pré-furos foram utilizadas brocas de metal duro escalonadas (SPLS), revestidas com TiN e cujas dimensões são $\text{Ø}5.0 \times \text{Ø}7.0 \times 76 \times 38\text{mm}$, haste 1885 HE 7. A geometria da broca (cônica) entre os diâmetros de 7 e 5 milímetros proporciona ao furo o chanfro necessário para a abertura das roscas.

A seqüência de furação e rosqueamento foi planejada e programada no CNC, de forma que a broca furava 20 furos em cada etapa dos testes, na direção do eixo X da máquina e em seguida trocava-se a ferramenta (broca) por uma ferramenta de rosquear (macho). No intervalo entre a furação e o rosqueamento, o programa admitia uma parada, permitindo a limpeza dos furos com ar comprimido para retirada dos cavacos deixados pela operação de furação. A usinagem dos furos foi feita com velocidade de corte de 30 m/min e o controle dos furos usinados feito com um calibre Ferriplax 15177 a cada 20 furos usinados.

Durante todos os ensaios as roscas foram conferidas periodicamente com um calibre (Ferriplax 19264) passa-não-passa para rosca M6x1,0 6H, com o objetivo de verificar se as roscas feitas obedeciam às tolerâncias especificadas. A cada vinte roscas fabricadas eram

calibradas três roscas, nesta ordem: a terceira; a décima; e a décima sétima. Em alguns casos específicos, quando havia dúvida quanto à calibração, aumentava-se o número de roscas inspecionadas, calibrando outras roscas feitas anteriormente (roscas vizinhas). Sabe-se que um simples cavaco aderido na rosca é motivo de não haver calibração e comprometer os testes. As roscas eram reprovadas caso o calibre de rosca não enroscasse totalmente na extremidade passa, e/ou enroscasse mais de um filete de rosca completo na extremidade não-passa, em no mínimo três roscas subseqüentes. Portanto, a presença de roscas defeituosas implicava no fim dos testes com o macho que as fabricaram.

3.5 Sistema de Indexação dos Machos de Corte

Conforme descrito anteriormente, foram empregados dois tipos de cabeçotes no rosqueamento interno com macho de corte, sendo um fixo e o outro auto-reversível.

O uso de cabeçotes fixos para rosquear só é possível em máquinas CNC modernas que possuem um perfeito sincronismo entre os motores de avanço e rotação, além disso, os CNCs destas máquinas possuem um ciclo próprio para rosqueamento com este tipo de cabeçote (Fig. 3.6). As figs 3.6 (a) e (b) apresentam o cabeçote fixo, fora do magazine e montado no eixo-árvore da máquina.



Figura 3.6 – Cabeçote fixo; (a) fora do magazine e (b) em operação

Mesmo em máquinas modernas, certos cuidados devem ser tomados quando se trabalha com altas rotações no rosqueamento. Como por exemplo, para se garantir que o rosqueamento seja realizado com a velocidade programada, deve-se iniciar o ciclo de rosqueamento a uma certa distância do furo, de tal forma que o eixo (ferramenta) ao

percorrer esta distância tenha tempo suficiente para atingir a velocidade de corte da operação. Assim, neste trabalho, quando se empregaram velocidades de corte moderadas (37,5 m/min) e altas (75 m/min), o macho foi posicionado a 25 e 35 milímetros acima do corpo de prova, respectivamente, distância necessária para garantir que a velocidade de corte fosse a esperada (37,5 e 75 m/min) ao atingir a parte chanfrada do furo a ser rosqueado (Fig 3.6 (b)). O retorno da ferramenta foi através da inversão da rotação e do avanço do eixo-árvore da máquina CNC.

O Cabeçote auto-reversível utilizado foi o CST TAPMATIC RDTIC - 50 com capacidade máxima de trabalho para macho de corte até M12 e macho laminador até M9. Este equipamento pode trabalhar até uma rotação máxima de 2500 rpm. O cabeçote com a indicação de seus componentes fundamentais podem ser conferidos na Fig 3.7.

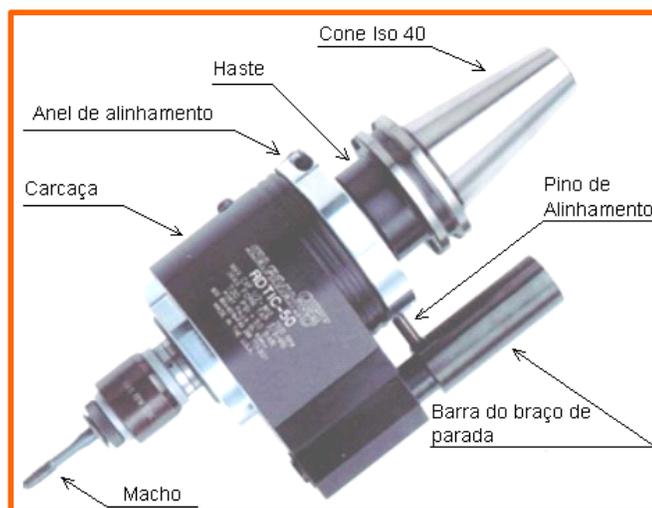


Figura 3.7 – Cabeçote de rosquear auto-reversível CST TAPMATIC RDTIC-50 (BEZERRA, 2003, modificado)

As principais funções do sistema de indexação são evitar que a carcaça do cabeçote de rosquear auto-reversível rotacione, de forma a suportar o torque proveniente da reversão do macho de corte ou de laminação após a confecção da rosca interna, e propiciar uma orientação à máquina para a posição correta do cabeçote quando este substitui uma outra ferramenta durante a troca de ferramentas. A inversão da rotação não é feita pela máquina como no caso dos cabeçotes fixos e flutuantes. A auto-reversão acontece dentro do cabeçote, através de um jogo de engrenagens cônicas. Ao atingir a profundidade programada o eixo árvore da máquina pára de avançar, mantendo somente o giro de rotação. O macho continua penetrando no furo até vencer a inércia rotacional e parar.

Enquanto isso o eixo-árvore inicia o movimento de retorno, possibilitando a distensão de uma mola, até haver a inversão da rotação dentro da carcaça do mandril. Uma das vantagens desse processo em relação aos cabeçotes fixos e flutuantes é que a máquina realiza o movimento de rotação apenas num sentido, não necessitando de reversão. Esse cabeçote é muito utilizado em máquinas que não possuem sincronismo de velocidade e avanço, como por exemplo, máquinas CNC antigas ou em furadeiras de coluna ou radiais.

3.6 Avaliação dos níveis de desgaste atingidos pelas ferramentas

Durante os ensaios, além do monitoramento da qualidade geométrica das roscas produzidas, por meio de um calibre passa-não-passa, mediu-se também o desgaste de flanco das ferramentas de corte a cada 160 roscas fabricadas, em um microscópio ferramenteiro, com ampliação de 40 vezes. Os valores de desgaste de flanco das ferramentas foram medidos nas três superfícies de folga, entre os três canais do macho de corte, e nos três primeiros filetes do mesmo, que correspondem à região do macho responsável pelo corte efetivo de material (SHA; NI; WU, 1990, apud REIS, 2004). A escolha das dimensões representativas do desgaste de flanco, que foram medidas no presente trabalho, se baseou nos resultados do trabalho de Reis (2004), no qual o autor procurou definir as cotas representativas do desgaste de flanco, por meio das quais se pudesse acompanhar a evolução do desgaste de flanco. Em seu trabalho Reis (2004) definiu as formas de desgastes apresentadas em um macho de corte com quatro canais, e fez um estudo estatístico da evolução das cotas críticas apresentadas na Fig. 2.27 do capítulo anterior. Entre as cotas que melhor representaram a evolução do desgaste estão as cotas 1 dos dentes 1, 2 e 3. Nos pré-testes do presente trabalho verificou-se que as formas de desgastes apresentadas nas superfícies de folga dos machos de corte com três canais foram semelhantes àsquelas presentes nos machos com quatro canais, de tal forma que as cotas escolhidas para acompanhar a evolução do desgaste de flanco nos machos de corte testados, foram as cotas 1 dos dentes 1, 2 e 3.

O critério de medição adotado foi o mesmo desenvolvido e aplicado por Reis (2004). Para auxiliar a medição direta do desgaste no microscópio ferramenteiro foi utilizado um dispositivo desenvolvido no laboratório com o objetivo de fixar o macho na mesma posição e poder girá-lo até 360°, garantindo assim a visualização dos principais ângulos e superfícies da ferramenta. Este dispositivo é mostrado na Fig. 3.8.

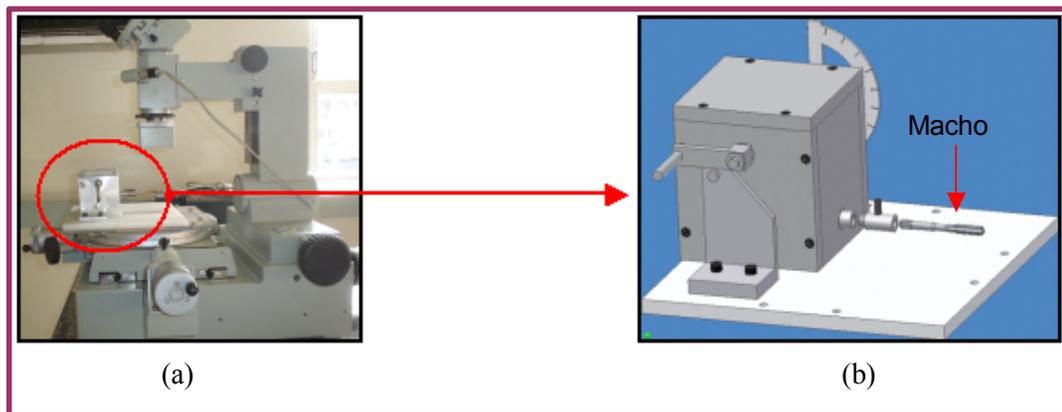


Figura 3.8 (a) Foto da montagem feita para a medição de desgaste no microscópio ferramenteiro; (b) Desenho do dispositivo fabricado

As ferramentas e equipamentos utilizados na avaliação dos níveis de desgaste foram os seguintes:

- ✓ Todos os 20 machos ISO 529 M6x1 6H utilizados nessa pesquisa (Tab. 3.6);
- ✓ Microscópio ferramenteiro (Fig 3.8a);
- ✓ Microscópio eletrônico de Varredura (MEV – Marca LEO 940 A)

Reis (2004) convencionou chamar de carreiras e dentes (D) as partes do macho mostradas na Fig. 2.27. Essas partes, correspondentes aos machos com três canais, são apresentadas na Fig 3.9.

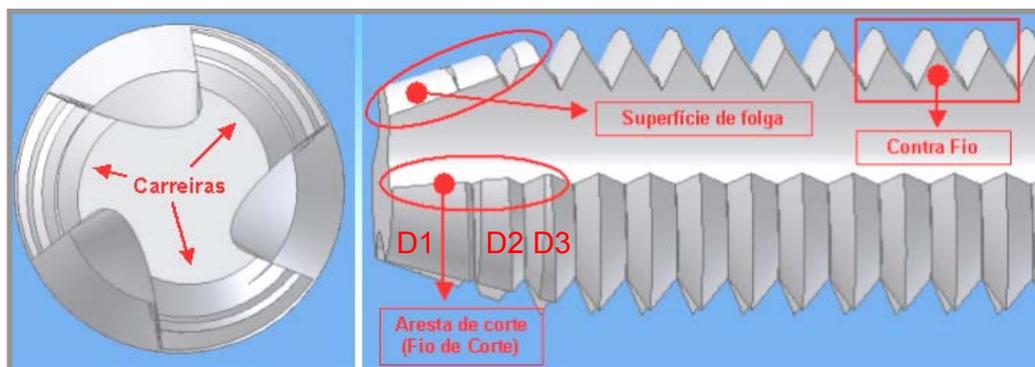


Figura 3.9 – Representação esquemática de um macho de corte e suas respectivas geometrias

Assim, as análises e medições de desgastes feitas neste trabalho se concentraram nos três primeiros dentes (D1, D2, D3) de cada carreira. As medições foram feitas na

superfície de folga e as análises de desgaste em toda extensão da ferramenta, com destaque para as arestas de corte ou fio de corte e no contra fio ou calcanhar (STEMMER, 1992; OSG, 2005).

3.6.1 Análises no MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura)

Na microscopia eletrônica de varredura os sinais de maior interesse para a constituição da imagem são os elétrons secundários e os retro-espalhados. À medida que o feixe de elétrons primários vai varrendo a amostra estes sinais vão sofrendo modificações de acordo com as variações da superfície. Os elétrons secundários fornecem imagem de topografia da superfície da amostra e são os responsáveis pela obtenção das imagens de alta resolução, já os retro-espalhados fornecem imagens características de variação de composição. Devido a estes recursos, o MEV se tornou uma arma poderosa para análises dos mecanismos e formas de desgaste desenvolvidas nas ferramentas de corte durante os processos de usinagem. Desta forma, utilizou-se um MEV neste trabalho, com o objetivo de analisar as superfícies das ferramentas testadas e das roscas produzidas, nas diferentes condições de teste, com o intuito de se explicar os fenômenos que ocorrem em escala micrométrica durante a usinagem e que determinam as formas de desgaste nos machos de corte, bem como as características das superfícies das roscas fabricadas.

Além disso, utilizou-se neste trabalho análises de EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva) com o objetivo de fazer análises qualitativas do nível de desgaste de ferramentas revestidas com TiN e TiN/TiAlN. Para avaliar o nível de desprendimento dos revestimentos foi feita análise química das ferramentas revestidas com TiN e multicamadas de TiN/TiAlN.

A microanálise por Energia Dispersiva (EDS) é um dos mais importantes instrumentos para a análise química de materiais orgânicos e inorgânicos. Através da identificação dos raios-X emitidos pela amostra, quando da interação com o feixe eletrônico, é possível determinar a composição de regiões com até 1 μm de diâmetro. É uma técnica não destrutiva, podendo determinar quantidades de até 1 a 2% dos elementos presentes na amostra.

3.7 Estudo do Comportamento do Torque

Para compreender melhor o efeito do desgaste dos machos de corte na usinagem, foi feito a medição do torque gerado durante o rosqueamento com todas as ferramentas utilizadas neste trabalho. Iniciou-se com as ferramentas novas e em seguida com as

ferramentas em fim de vida. Os testes ocorreram no NUMA (Núcleo de Manufatura Avançada) da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, em uma máquina CNC ROMI, Discovery 560, com características semelhantes às da máquina utilizada nos testes de usinagem com machos de corte, realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) da Universidade Federal de Uberlândia (UFU). A justificativa de se medir o torque em outra Universidade foi o fato dos equipamentos necessários não estarem disponíveis no momento, o que poderia acarretar prejuízos para o andamento dos testes.

Com cada macho foram abertas roscas em três furos consecutivos, e durante esse tempo foram adquiridos os sinais de torque a uma taxa de 1000 pontos por segundo. Dessa forma, a cada três furos, trocava-se a ferramenta e repetia-se o ensaio. Todas as roscas realizadas nestes testes foram checadas periodicamente com um calibre passa-não-passa para rosca M6x1,0 6H (Ferriplax 19264), com o objetivo de verificar se as mesmas obedeciam às tolerâncias especificadas. A metodologia de execução dos testes foi a mesma empregada nos ensaios realizados no LEPU/FEMEC/UFU. Para as ferramentas que foram utilizadas com MQL, o critério também foi igual, observando a quantidade de óleo e ar comprimido, além da posição dos bicos de aspersão do fluido. Utilizou-se óleo pulverizado com ar comprimido, com uma vazão de 30 ml/hora.

3.7.1 Equipamentos utilizados para medir o torque

Para medição do sinal de torque foi utilizado um dinamômetro *Kistler* 9272 Fig (3.10 (a)), cujos dados técnicos são apresentados na Tab. 3.10. A Fig 3.10 (b) mostra a montagem do equipamento e do corpo de teste utilizado.

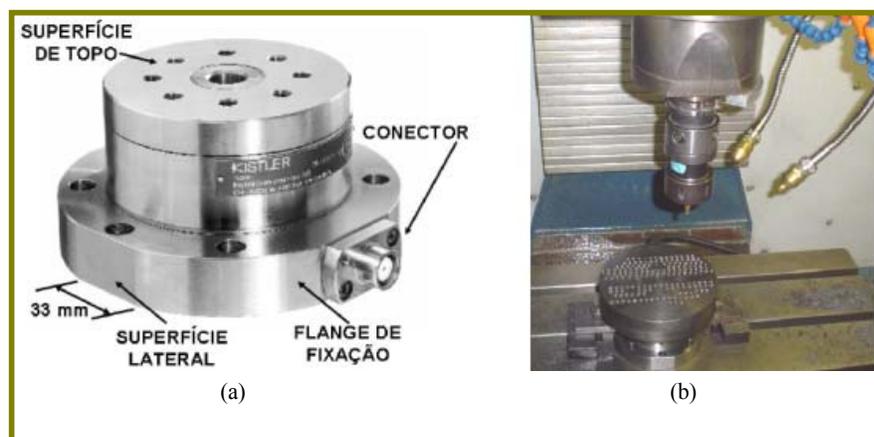


Figura 3.10 – (a) Dinamômetro *Kistler* 9272; (b) montagem do corpo de prova na máquina

As placas de ferro fundido foram torneadas na forma de disco, com um diâmetro de 170 mm possuindo uma espessura de 42 mm, para acompanhar o formato do dinamômetro utilizado. O material foi furado e fixado ao dinamômetro por quatro parafusos com cabeça *Allen*, conforme permitia o dinamômetro. O equipamento foi ajustado na mesa por chapas e parafusos e o programa adaptado para cada condição de teste. A programação foi a mesma utilizada na Discovery 760, alterando somente a quantidade de testes e o intervalo de rosqueamento.

Tabela 3.10 – Dados técnicos do dinamômetro *Kistler* 9272

Dados Técnicos		Valor
Faixa 1	Fx, Fy	-5... 5KN
	Fz	-5... 20 Nm
	Mz	-200...200 Nm
Limite	Fx, Fy	< 0.02 N
	Fz	< 0.02 N
	Mz	< 0.02 Ncm
Frequência Natural		4 KHz
Proteção		IP67
Peso		4.2 Kg

Também utilizou-se um amplificador de carga multicanal modelo 5019 da *Kistler*, conforme a Fig. 3.11.



Figura 3.11 – Amplificador de carga multicanal *Kistler* modelo 5019

Esse amplificador permite a ajustagem de alguns parâmetros individualmente para cada um dos quatro canais disponíveis para trabalhar com o dinamômetro 9272 tais como filtro passa baixa, constante de tempo, sensibilidade do sensor em pC por unidade mecânica

e escala em unidades mecânicas por Volts. Trabalha com uma faixa de tensão para os sinais de -10 a 10 Volts (BEZERRA, 2003).

O filtro passa baixa pode ser de 10, 30, 100, 200, 1000, 3000, 10000 ou 30000 Hz. A faixa de trabalho da sensibilidade do sensor é de 1×10^{-2} a $9,99 \times 10^3$ pC por unidade mecânica. No caso da escala, a faixa de trabalho é de 1×10^{-3} a $9,99 \times 10^6$ unidade mecânica por Volts. A constante de tempo pode ser ajustada para curto, média ou longa. Além disso, esse amplificador possui duas opções para entrada de sinais: através de 4 soquetes BNC; ou por meio de um conector de oito vias que pode ser conectado com o cabo de oito vias 1677A5, também fabricado pela *Kistler*. Os sinais de saída podem ser enviados através de conexão IEEE bus, RS-232C com um conector de 25 pinos, controle remoto de função *reset-operate* com conector de 25 pinos, conector de 15 pinos para quatro canais de medição ou soquetes BNC para 4 canais de medição, Fig 3.12. Para coletar os sinais provenientes do módulo de entrada e saída de sinais modelo BNC-12, utilizou-se uma placa de aquisição A/D modelo PCIMIO-16E-4, da *National Instruments*. A placa mencionada foi instalada em um computador PC (processador AMD K6 II 350 MHz, 128 MB de memória RAM e 4.3 GB de disco rígido).

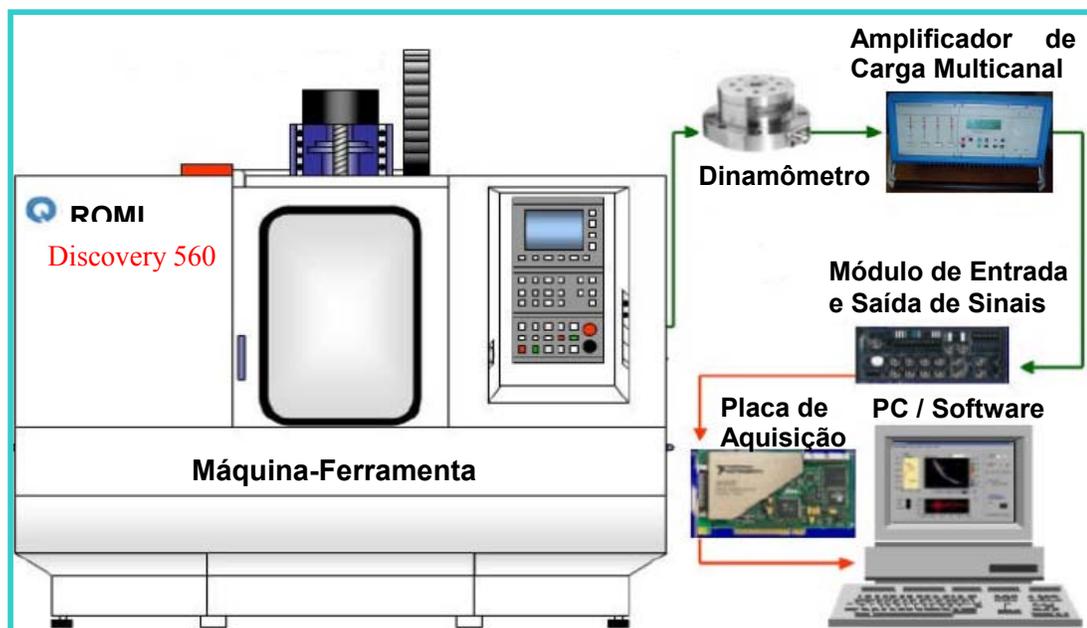


Figura 3.12 – Sistema de aquisição do sinal de torque (BEZERRA, 2003), Modificada

3.8 Sistema de lubrificação utilizado nos teste

Na usinagem de ferro fundido cinzento normalmente não é utilizado fluido de corte ou refrigerante de corte, pois os cavacos produzidos são em forma de lascas ou pedaços (ruptura). Entretanto, sabe-se que quando o usuário optar por utilizar algum tipo de fluido de corte, com o objetivo de aumentar a produtividade e/ou reduzir custos, os benefícios virão desde que utilizados corretamente. O fluido de corte deve ser aplicado usando um método que permita que ele chegue o mais próximo possível da aresta de corte, dentro da interface cavaco-ferramenta, para que ele possa exercer suas funções apropriadamente (MACHADO; DA SILVA, 2004).

A princípio estudava-se a possibilidade de rosquear todos os furos com as condições a seco e com MQL. Entretanto, após alguns testes, principalmente depois de observar alguns resultados considerados muito bons com algumas ferramentas de corte (macho) revestidos com TiN/TiAlN, optou-se por utilizar MQL somente em algumas ferramentas, sem revestimentos ou tratados superficialmente por nitretação, ou naqueles machos que apresentassem baixo índice de produtividade. A Fig 3.13 mostra o aparato montado na máquina CNC.

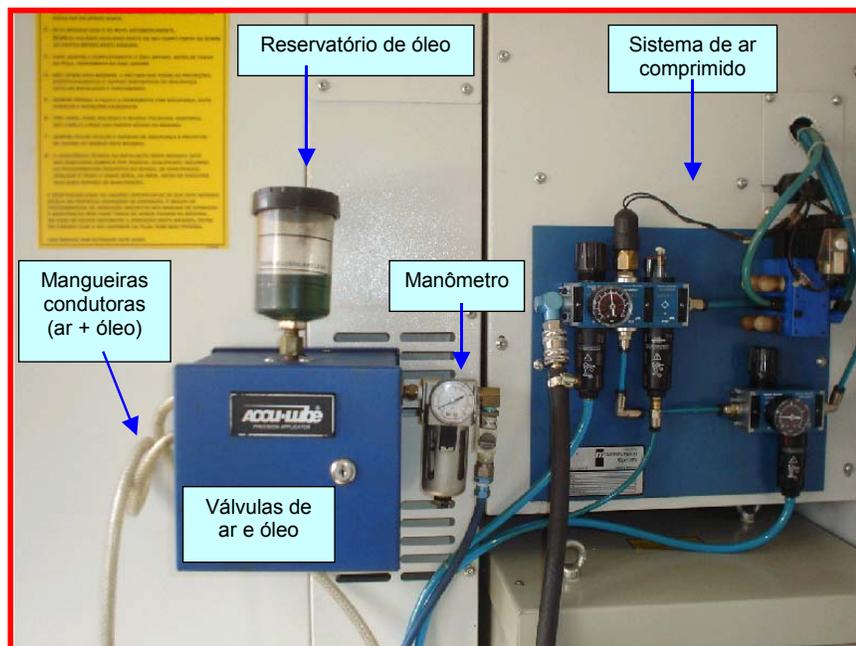


Figura 3.13 – Equipamento de mínima quantidade de lubrificante (MQL)

O aparelho pulverizador do fluido, fabricado pela *ITW Fluid Products Group* (*Accu-Lube®/LB-2000*), Modelo O2AO-STD, trabalhou com um fluxo contínuo de ar comprimido,

ajustado em torno de 4,3 bar, e “*spray*” intermitente de fluido na frequência de 1 pulso por segundo e utilizou-se um fluido biodegradável, atóxico e insolúvel em água, com composição química de óleos vegetais (soja, milho e canola) e aditivos anticorrosivos. A Tab. 3.11 mostra algumas características típicas deste óleo. O fluido de corte foi conduzido através de uma mangueira de menor diâmetro que chega ao bico, dentro de uma outra maior que conduz o ar comprimido. A mistura ar comprimido-fluido era injetada externamente sobre a ferramenta-peça por meio de 2 bicos, com uma vazão de 30 ml/hora de óleo lubrificante.

Tabela 3.11 - Características típicas do óleo vegetal *Accu-Lube*[®]/LB-2000

Propriedade	Valor
Densidade, g/ml (20/-3 °C)	0,900 – 0,940
Ponto de Ebulição	>100°C
Ponto de Fulgor	>300°C

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios de rosqueamento expostos anteriormente. São abordados os seguintes itens: Análise estatística da vida das ferramentas de corte; Influência do tipo de fixação; Desgaste de flanco apresentado nos machos de corte; Mecanismos de desgaste; Qualidade das roscas fabricadas e finalmente o torque no rosqueamento.

4.1 Análise estatística da vida das ferramentas de corte

4.1.1 - Resultados da primeira etapa

Neste item serão discutidos os resultados numa visão estatística, sem, no entanto, se preocupar com os fenômenos de usinagem responsáveis pelos efeitos. Na primeira etapa foram utilizadas como variáveis independentes (fatores) a velocidade de corte, o substrato da ferramenta e o tipo de revestimento e a variável dependente (resposta) foi o número de roscas produzidas. A Fig. 4.1 mostra, graficamente, os resultados da vida dos machos de aço-rápido (PM) e super-rápido (HSS-E), revestidos com nitreto de titânio (TiN) e multicamadas de TiN/TiAlN (denominada comercialmente por Futura), usinando com cabeçote fixo e com velocidades de corte moderada (37,5 m/min) e alta (75 m/min).

É importante ressaltar que, devido a dificuldades de realização de cada teste (feitos em laboratório e não na indústria), não houve repetições para todas as ferramentas de corte, o que seria recomendado para dar maior confiabilidade aos resultados. A partir dos resultados mostrados na Fig. 4.1 observa-se que a única condição de corte em que se conseguiu atingir o limite de 1000 roscas fabricadas foi quando se utilizou uma ferramenta de HSS-PM revestida com TiN/TiAlN e com velocidade de corte em 37,5 m/min. Nas demais

condições, os testes foram encerrados antes de se chegar a 1000 roscas, pois a qualidade geométrica das mesmas foi reprovada pela análise com o calibre passa-não-passa, exceto a ferramenta HSS-E revestida com TiN/TiAlN e utilizada com 75 m/min, que falhou catastróficamente.

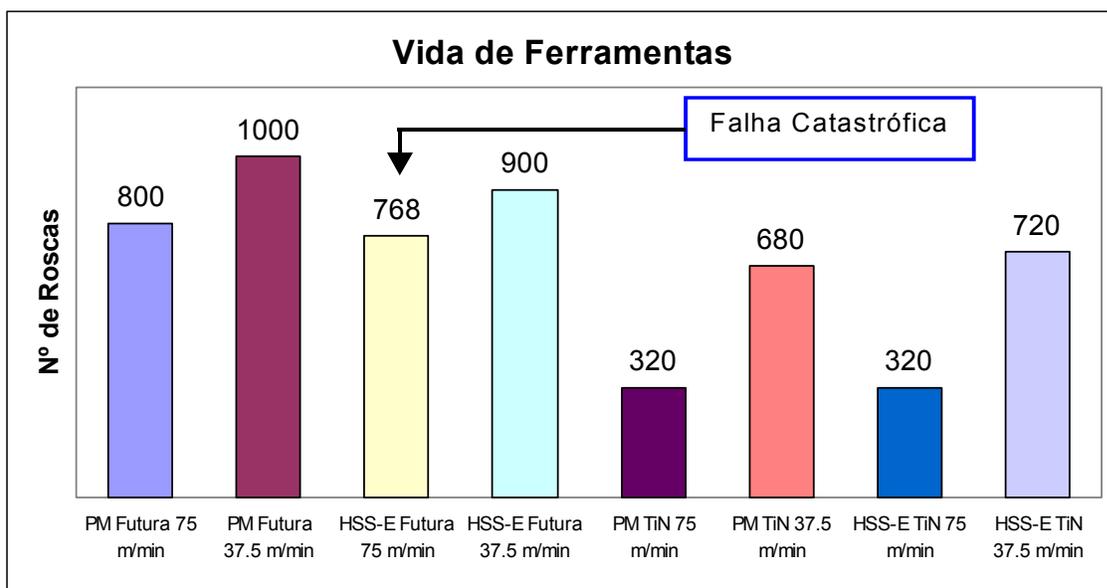


Fig. 4.1 – Vida das ferramentas em função do número de roscas fabricadas para as diferentes condições de substrato, revestimento e velocidade de corte utilizadas na primeira etapa deste trabalho

Para proceder à análise estatística dos dados da primeira etapa foi utilizado o quadro de ANOVA (análise de variância) com intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %. A Tab. 4.1 mostra o resultado da análise de variância dos dados.

Tabela 4.1: Resultado da análise variância completa

	Coeficiente	Desvio Padrão	T(1)	Nível de Probabilidade (p)	-95,%	+95,%
Média/Interação	688,5	13,5	51,0000	0,012481	516,966	860,033
(1) Vc	-136,5	13,5	-10,1111	0,062758	-308,034	35,033
(2) Sub	11,5	13,5	0,8119	0,550821	-160,034	183,033
(3) Rev	178,5	13,5	13,2222	0,048056	6,966	350,033
1 by 2	-3,5	13,5	-0,2593	0,838506	-175,034	168,033
1 by 3	53,5	13,5	3,9630	0,157357	-118,034	225,033
2 by 3	21,5	13,5	1,5926	0,356944	-150,034	193,033

Pelo nível de probabilidade p é possível verificar quais são os fatores significativos na determinação do número de roscas usinadas. Um fator é considerado significativo se a probabilidade p for menor ou igual ao nível de significância (neste caso considerado de 0,05). De acordo com a Tab. 4.1, somente o revestimento (Rev) foi uma variável significativa, ou seja, teve influência relevante na resposta (número de roscas usinadas). Entretanto, a velocidade de corte (V_c) poderia ter sido considerada, também, como significativa, já que a probabilidade p foi de apenas 0,06, o que é bem próximo de 0,05. A Tab. 4.1 apresenta os coeficientes de um modelo para representar a vida da ferramenta (N° de Roscas) em função de todos os fatores, inclusive os não significativos. Este modelo é representado pela seguinte equação:

$$\text{Vida} = 688,5 - 136,5 \cdot V_c + 11,5 \cdot \text{Sub} + 178,5 \cdot \text{Rev} - 3,5 \cdot V_c \cdot \text{Sub} + 53,5 \cdot V_c \cdot \text{Rev} + 21,5 \cdot \text{Sub} \cdot \text{Rev} \quad (4.1)$$

Como alguns fatores (variáveis) não foram significativos é possível simplificar este modelo. Isto pode ser feito ignorando os efeitos que não foram significativos (onde p é maior que 0,05) de um a um, a começar pelo de menor significância (interação entre V_c e Sub). Após ignorar cada efeito não significativo, a análise de variância foi refeita até que se chegou aos coeficientes de um modelo reduzido contendo apenas as variáveis realmente significativas (Tab. 4.2). É importante observar que o fato de ignorar alguns efeitos pode tornar outros efeitos, outrora não significativos, relevantes.

Tabela 4.2: Resultado da análise variância reduzida

	Coeficiente	Desvio Padrão	T(1)	Nível de Probabilidade (p)	-95, %	+95, %
Média/Interação	688,500	14,04457	49,02250	0,000001	649,506	727,494
(1) V_c	-136,500	14,04457	-9,71906	0,000627	-175,494	-97,506
(3) Rev	178,500	14,04457	12,70954	0,000221	139,506	217,494
1 by 3	53,500	14,04457	3,80930	0,018952	14,506	92,494

É possível representar a vida da ferramenta (N° de Roscas) em função dos fatores significativos pela seguinte equação:

$$\text{Vida} = 688,5 - 136,5 \cdot V_c + 178,5 \cdot \text{Rev} + 53,5 \cdot V_c \cdot \text{Rev} \quad (4.2)$$

Apesar de reduzido, o modelo ainda apresenta coeficiente de correlação de 0,98, mostrando que o modelo representa bem o comportamento do processo. É importante

ressaltar que apesar da variável Rev (revestimento) ser do tipo *ON/OFF* (qualitativa e não quantitativa) e, por isso, não ser adequada para a composição do modelo, decidiu-se incluí-la no modelo apenas para facilitar a análise de sua influência na resposta.

Pelo modelo reduzido (ignorando os efeitos não significativos), observou-se que a velocidade de corte (V_c), o revestimento (Rev) e a interação entre estas duas variáveis têm influência significativa sobre a resposta (número de roscas fabricadas). Observa-se pela equação que o aumento da velocidade de corte tende a reduzir a vida das ferramentas (o coeficiente de V_c é negativo). Esta tendência de diminuição da vida com o aumento da velocidade de corte já era esperado e está relacionada com o aumento da temperatura, como será discutido posteriormente. Pela equação nota-se, também, que o uso do revestimento multicamadas de TiN/TiAlN teve um desempenho bem superior ao das ferramentas revestidas com TiN (o coeficiente de revestimento é positivo). Esse resultado pode estar relacionado com o efeito da temperatura na interface cavaco-ferramenta, o qual será abordado também neste trabalho. O que surpreendeu, analisando a equação do modelo para a previsão de vida da ferramenta, foi a ausência do termo relacionado ao substrato (não foi uma variável significativa). Era de se esperar um aumento de vida das ferramentas quando o substrato obtido através da metalurgia do pó (HSS- PM) fosse utilizado. A razão pela qual o substrato não foi influente na resposta pode ser o fato de se ter trabalhado com velocidades de corte elevadas (nível de *HSM - High Speed Machining* para o rosqueamento interno). As velocidades exigiram dos revestimentos maiores aderências em relação ao substrato. Uma vez desprendido o revestimento, as ferramentas se desgastaram rapidamente, independentemente do substrato. É fácil observar a predominância do efeito do revestimento sobre o substrato observando a equação do modelo completo (Eq. 1). Nota-se que o coeficiente do revestimento é cerca de 15 vezes maior do que o coeficiente do substrato ($Vida = \dots + 11,5*Sub + 178,5*Rev\dots$).

Pelo modelo reduzido definido estatisticamente, a condição que deu a maior vida foi quando se ajustou a velocidade de corte no nível “-1” (37,5 m/min) e se utilizou o revestimento “1” (multicamadas de TiN/TiAlN). Para estes níveis de variáveis o modelo previu uma vida de 950 roscas, o que é bem próximo dos valores observados experimentalmente. Os machos PM e HSS-E revestidos com TiN/TiAlN, quando rosquearam com velocidade de corte moderada (37,5 m/min), fizeram 1000 e 900 roscas, respectivamente, de acordo com a figura 4.1.

Pela Fig. 4.2 pode se observar a adequabilidade do modelo, já que os valores preditos se aproximam bastante dos valores observados. As Figs. 4.3, 4.4 e 4.5 ilustram melhor a influência das variáveis sobre a resposta. É possível observar a variação significativa na vida da ferramenta (número de roscas usinadas) em função de mudanças nos níveis de

velocidade de corte (Fig. 4.3) e de revestimento (Fig. 4.5). Já o substrato (Fig. 4.4) não acarretou mudanças significativas na vida da ferramenta (a variação foi menor que o desvio padrão).

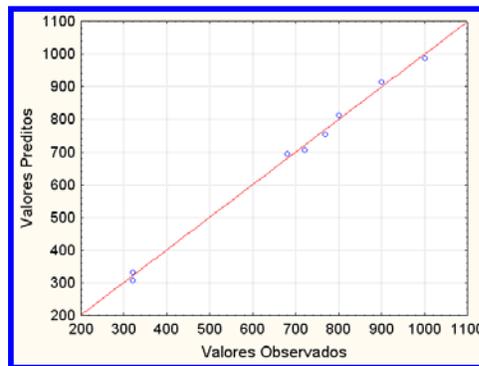


Figura 4.2: Valores preditos X valores observados

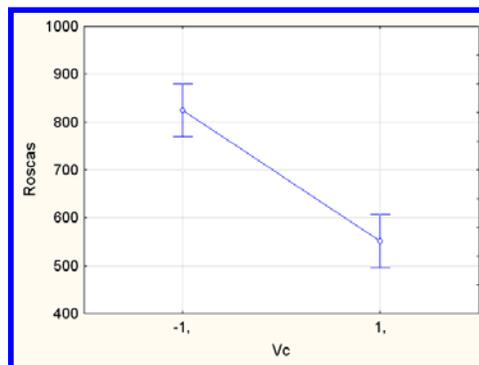


Figura 4.3: Influência da velocidade de corte: 37,5 m/min (-1) e 75 m/min (1)

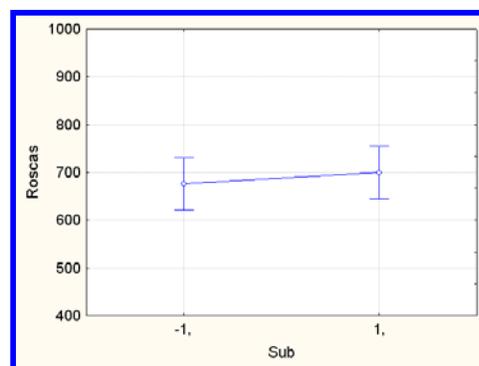


Figura 4.4: Influência do substrato: HSS-E (-1) e HSS-PM (1)

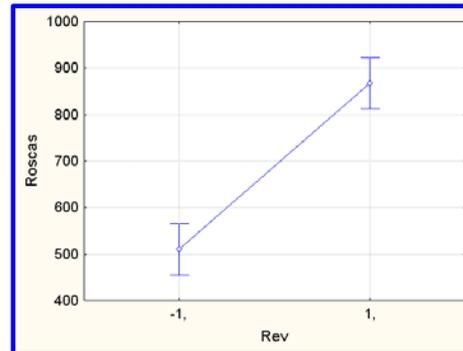


Figura 4.5: Influência do revestimento: TiN (-1) e multicamadas de TiN/TiAlN (1)

4.1.2. - Resultados da segunda etapa

Na segunda etapa foram utilizadas como variáveis independentes (fatores) os tipos de fixação, os substratos das ferramentas e os tipos de revestimentos e a variável dependente (resposta) foi o número de roscas produzidas. A Fig. 4.6 mostra, graficamente, os resultados da vida dos machos de aço rápido (PM) e super-rápido (HSS-E), revestidos com nitreto de titânio (TiN) e multicamadas de TiN/TiAlN, usando com cabeçote fixo e auto-reversível com velocidades de corte moderada (37,5 m/min).

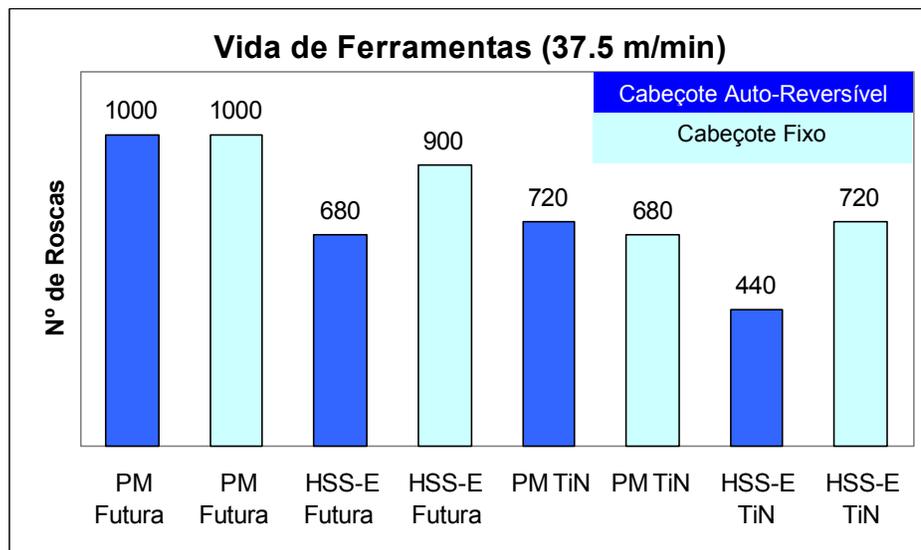


Fig. 4.6 – Vida das ferramentas em função do número de roscas fabricadas, para as diferentes condições de substrato, revestimento e cabeçote, utilizadas na segunda etapa deste trabalho

É importante ressaltar que, mais uma vez, devido a dificuldades de realização de cada teste, não houve repetições para todas as ferramentas de corte, o que seria recomendado para dar maior confiabilidade aos resultados. A partir dos resultados mostrados na Fig. 4.6 observa-se que a única condição de corte em que se conseguiu atingir o limite de 1000 roscas fabricadas, foi quando utilizou-se machos de HSS-PM revestidos com TiN/TiAlN, independente do tipo de cabeçote usado. Nas demais condições, os testes foram encerrados antes de se chegar a 1000 roscas, pois a qualidade geométrica das mesmas foi reprovada pela análise com o calibre passa-não-passa. Para proceder à análise estatística dos dados desta etapa foi utilizado o quadro de ANOVA (análise de variância) com intervalo de confiança de 95 % e nível de significância de 5 %. A Tab. 4.3 mostra o resultado da análise de variância dos dados.

Tabela 4.3: Resultado da análise de variância completa

	Coefficiente	Desvio Padrão	T(1)	Nível de Probabilidade (p)	-95, %	+95, %
Média/Interação	767,5	12,5	61,4	0,010367	608,672	926,327
(1)Cab	-57,5	12,5	-4,6	0,136275	-216,328	101,327
(2)Sub	82,5	12,5	6,6	0,095729	-76,328	241,327
(3)Rev	127,5	12,5	10,2	0,062215	-31,328	286,327
1 by 2	67,5	12,5	5,4	0,116572	-91,328	226,327
1 by 3	2,5	12,5	0,2	0,874334	-156,328	161,327
2 by 3	22,5	12,5	1,8	0,322829	-136,328	181,327

De acordo com a Tab. 4.3, nenhuma variável foi significativa. Entretanto, a variável revestimento (Rev) poderia ter sido considerada como significativa, já que a probabilidade p foi de apenas 0,06, o que é bem próximo de 0,05. A Tab. 4.3 apresenta os coeficientes de um modelo para representar a vida da ferramenta (N° de Roscas) em função de todos os fatores. Este modelo é representado pela seguinte equação:

$$\text{Vida} = 767,5 - 57,5 \cdot \text{Cab} + 82,5 \cdot \text{Sub} + 127,5 \cdot \text{Rev} + 67,5 \cdot \text{Cab} \cdot \text{Sub} + 2,5 \cdot \text{Cab} \cdot \text{Rev} + 22,5 \cdot \text{Sub} \cdot \text{Rev} \quad (4.3)$$

Este modelo pode ser simplificado. Assim, ignorou-se o efeito de um a um, a começar pelo de menor significância (interação entre Cab e Rev). Após desprezar cada efeito não significativo, a análise de variância foi refeita até que se chegou aos coeficientes de um modelo reduzido contendo apenas variáveis realmente significativas (Tab. 4.4).

Tabela 4.4: Resultado da análise variância reduzida

	Coefficiente	Desvio Padrão	T(2)	Nível de Probabilidade (p)	-95, %	+95, %
Média/Interação	767,5	14,93039	51,40521	0,000016	719,985	815,015
(1)Cab	-57,5	14,93039	-3,85120	0,030915	-105,015	-9,984
(2)Sub	82,5	14,93039	5,52564	0,011677	34,985	130,015
(3)Rev	127,5	14,93039	8,53963	0,003374	79,985	175,015
1 by 2	67,5	14,93039	4,52098	0,020236	19,985	115,015

O modelo reduzido da vida da ferramenta (Nº de Roscas) em função dos fatores significativos é dado pela seguinte equação:

$$\text{Vida} = 767,5 - 57,5 \cdot \text{Cab} + 82,5 \cdot \text{Sub} + 127,5 \cdot \text{Rev} + 67,5 \cdot \text{Cab} \cdot \text{Sub} \quad (4.4)$$

Apesar de reduzido, o modelo ainda apresenta coeficiente de correlação de 0,97, mostrando que representa bem o processo. Como descrito anteriormente, na primeira etapa, apesar de estar lidando com variáveis do tipo *ON/OFF* (qualitativas e não quantitativas) e, por isso, não adequadas para a composição de um modelo, decidiu-se construir o modelo apenas para facilitar a análise.

Pelo modelo reduzido, observou-se que o tipo de cabeçote (Cab), o substrato (Sub), o revestimento (Rev) e a interação entre o tipo de cabeçote e revestimento tiveram influência significativa sobre a resposta (número de roscas fabricadas). Observa-se pela equação que a troca do cabeçote fixo pelo auto-reversível tende a reduzir a vida das ferramentas (o coeficiente do cabeçote é negativo). Esse fenômeno está relacionado com a velocidade de corte (constante para o cabeçote auto-reversível) e será abordado posteriormente. Pela equação nota-se, também, que o uso do substrato de HSS-PM proporcionou melhor desempenho, ou seja, maior vida (o coeficiente de substrato é positivo). É importante ressaltar que na primeira etapa esta variável não se mostrou significativa. Pelo modelo vê-se, também que o revestimento com multicamadas de TiN/TiAlN teve um desempenho bem superior ao das ferramentas revestidas somente com TiN (o coeficiente de revestimento é positivo). Esses resultados podem estar relacionados com a tenacidade dos substratos e com o efeito da temperatura na interface cavaco-ferramenta, assuntos que serão abordados nas próximas seções deste trabalho. Pelos coeficientes do modelo, nota-se a predominância do efeito do revestimento sobre as outras variáveis. O coeficiente do revestimento é cerca de 1,5 vez maior do que o coeficiente do substrato e 2,2 maior que o coeficiente do cabeçote.

Pelo modelo reduzido definido estatisticamente, as condições que possibilitaram maior vida foi quando se usou o revestimento “1” (multicamadas de TiN/TiAlN) e HSS-PM como substrato. Para estes níveis de variáveis o modelo prevê para o cabeçote fixo, 967,5 roscas e para o cabeçote auto-reversível, 987,5 roscas, valores bem próximos dos observados experimentalmente, conforme a Fig. 4.6.

Esses valores contradizem o que foi observado na Fig. 4.6, pois o cabeçote auto-reversível fez menos roscas que o fixo. Por conseguinte, quando o substrato foi trocado pelo HSS-E, o modelo prevê 802,5 roscas para o cabeçote fixo, contra 687,5 roscas para o cabeçote auto-reversível. Portanto, o cabeçote fixo foi mais eficiente em termos de quantidade de roscas usinadas.

Pela Fig. 4.7 pode se observar a adequabilidade do modelo, já que os valores preditos se aproximam bastante dos valores observados. As Figs. 4.8, 4.9 e 4.10 ilustram melhor a influência das variáveis sobre a resposta.

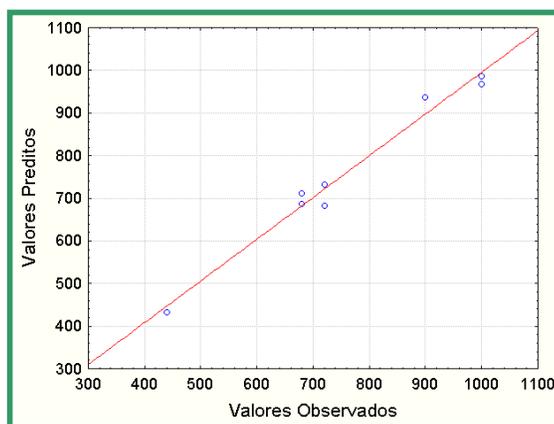


Figura 4.7: Valores preditos X valores observados

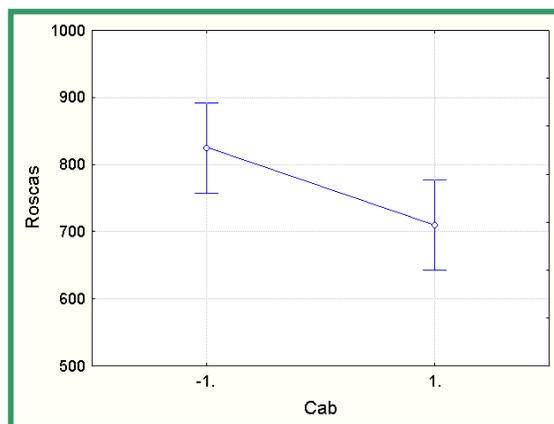


Figura 4.8: Influência do tipo de cabeçote: fixo (-1) e auto-reversível (1)

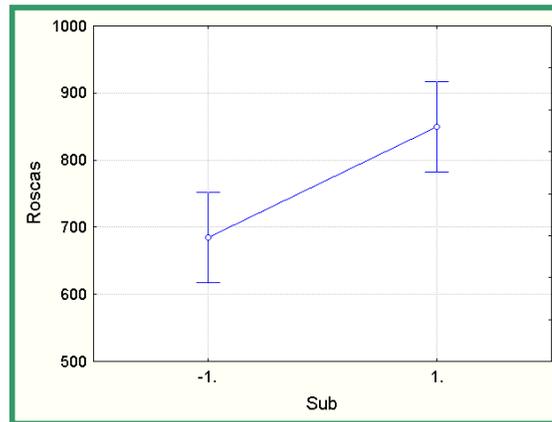


Figura 4.9: Influência do substrato: HSS-E (-1) e HSS-PM (1)

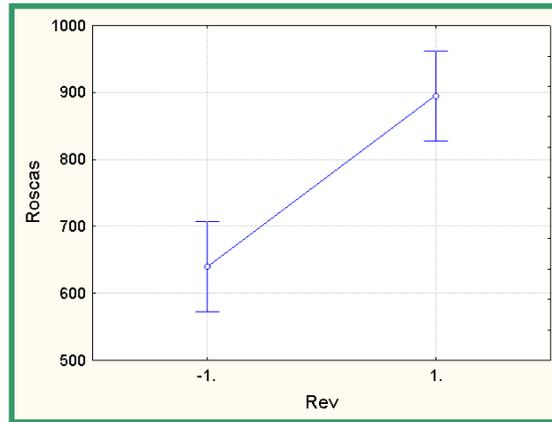


Figura 4.10: Influência do revestimento: TiN (-1) e multicamadas de TiN/TiAlN (1)

É possível observar a variação significativa na vida da ferramenta (número de roscas usinadas) em função do tipo de cabeçote (Fig. 4.8), do tipo de substrato (Fig. 4.9) e do revestimento (Fig. 4.10).

4.1.3. - Resultados dos testes complementares

O gráfico da Fig. 4.11 complementa a investigação sobre o rosqueamento em alta velocidade, com diversas situações de corte, variando o substrato dos machos, o tipo de refrigeração/lubrificação, a forma de fixação das ferramentas e revestimento. Escolheu-se a ferramenta que apresentou os piores resultados nos testes anteriores e comparou com ferramenta sem revestimento e nitretada em alta velocidade de corte (75 m/min). Somente em duas situações foi utilizada velocidade de corte considerada baixa (10 m/min) para as condições testadas neste trabalho (cabeçote auto-reversível e fixo), não apresentadas nesta

figura, sendo dois machos de HSS revestidos com TiN. Nessa situação de corte as ferramentas produziram 1800 roscas, com a calibração em bom estado, mas apresentando níveis de desgaste acentuados.

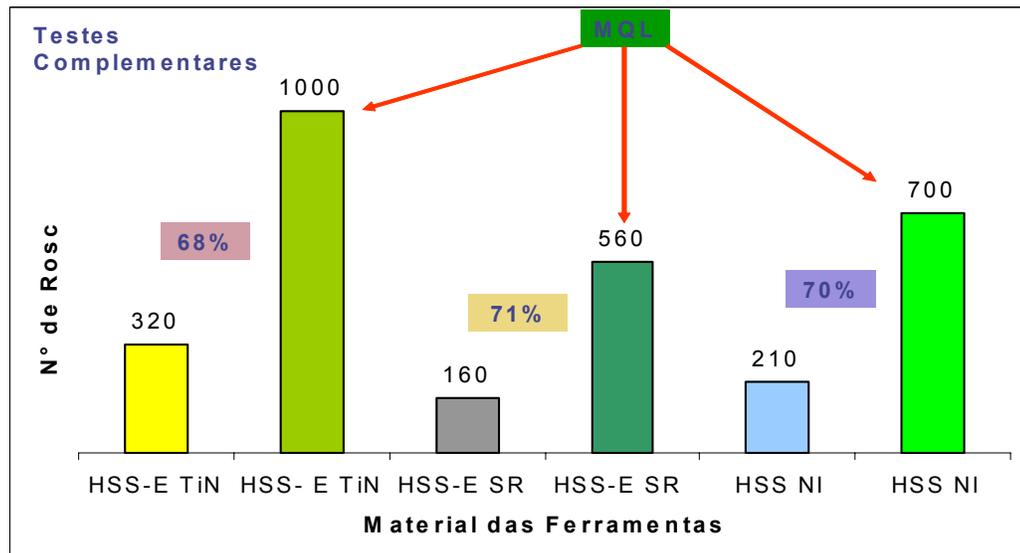


Figura 4.11 - Resultados obtidos para o rosqueamento com o cabeçote fixo, com e sem MQL, utilizando machos de corte em diversas condições de corte

Em três situações de corte foi empregado o uso de mínima quantidade de lubrificante (MQL), buscando relacionar o desempenho dessas ferramentas quando comparados com a usinagem a seco. Em alta velocidade pode-se observar que a única condição de corte em que se conseguiu atingir o limite de 1000 roscas fabricadas, foi quando se utilizou uma ferramenta de HSS-E revestida com TiN com aplicação de MQL. Nas demais condições os testes foram encerrados antes de se chegar a 1000 roscas, pois a qualidade geométrica das roscas fabricadas foi reprovada pela análise com o calibre passa-não-passa.

A Fig. 4.11 mostra também que a ferramenta revestida com nitreto de titânio (TiN) usada sem refrigeração / lubrificação, fabricou 68% de roscas a menos que a ferramenta que utilizou MQL (mesma condição de corte), e que o macho não revestido usado a seco produziu 71% de roscas a menos que outro semelhante, porém utilizando MQL. Este resultado evidencia a eficiência da técnica MQL em lubrificar e refrigerar o corte, além de proteger as superfícies da ferramenta contra os mecanismos de desgastes atuantes. Outro ponto que se observa na Fig. 4.11, é que quando se revestiu a ferramenta com TiN sua vida aumentou de 160 roscas (número de roscas fabricadas com a ferramenta sem revestimento)

para 320 roscas, enquanto o emprego de MQL em uma ferramenta não revestida implicou em um aumento na vida para 560 roscas, ou seja, o efeito da técnica de MQL na vida da ferramenta foi maior que o efeito causado pelo emprego do revestimento de nitreto de titânio.

Outra análise que pode ser abordada é com relação às ferramentas que sofreram tratamentos termoquímicos de nitretação. Verifica-se através da Fig. 4.11 que o macho nitretado que rosqueou a seco produziu 31% a mais que o macho não nitretado. A outra ferramenta nitretada que foi lubrificada por MQL produziu 25% a mais que o macho não nitretado, na mesma condição de corte. Isso comprova a eficiência da superfície das ferramentas que sofreram algum tipo de tratamento especial, como nitretação ou cobertura como nitreto de titânio (TiN). Da mesma forma, o uso de MQL favoreceu a vida do macho nitretado, aumentando em 70% o seu desempenho em relação ao corte a seco.

Após a análise dos itens 4.1.1, 4.1.2 e 4.1.3 foi observado que o aumento da velocidade de corte reduziu a vida das ferramentas (nº de roscas usinadas), que o revestimento com multicamadas de TiN/TiAlN teve desempenho bem superior ao das ferramentas revestidas somente com TiN e que o tipo de substrato não acarretou mudanças significativas na vida das ferramentas revestidas que usinaram com 75 m/min, mas foi relevante para as velocidades de corte moderadas (37,5 m/min). Já o tipo de cabeçote teve influência no número de roscas fabricadas, pois o cabeçote fixo conseguiu fabricar aproximadamente 16% de roscas a mais do que o cabeçote auto-reversível ($V_c = 37,5$ m/min). Ficou evidente também que o uso de MQL no rosqueamento de ferro fundido cinzento aumentou significativamente a vida das ferramentas.

4.2 Influência do Tipo de Fixação

Conforme visto anteriormente (Fig. 4.6) o cabeçote fixo produziu em média 16% a mais do que o cabeçote auto-reversível, em termos de quantidade de roscas usinadas. Atribui-se o melhor desempenho do cabeçote fixo a três motivos: 1) melhor sincronismo de velocidade e avanço de corte no ciclo utilizado (ciclo 84 do Comando Siemens - CNC); 2) o ciclo com cabeçote auto-reversível permite que a ferramenta gire livremente após o fim de curso previsto pelo programa CNC, fazendo com que a ferramenta flutue livremente na direção do eixo Z, parando por inércia rotacional. Essa flutuação da ferramenta pode ser responsável por alguns mecanismos de desgaste discutidos nas próximas seções; 3) as velocidades de corte utilizadas para o cabeçote auto-reversíveis são consideradas como constantes

enquanto que para o cabeçote fixo a velocidade de corte não é constante durante todo o ciclo de usinagem.

O tempo de usinagem é um dos principais elementos que compõe os custos de fabricação. Neste sentido, faz-se necessário buscar os melhores recursos disponíveis para melhorar a produtividade. Buscou-se neste trabalho investigar as principais vantagens da utilização dos cabeçotes fixo e auto-reversível no rosqueamento interno com macho de corte. O custo inicial do cabeçote auto-reversível é superior ao do cabeçote fixo. Entretanto, constatou-se que o tempo real de usinagem (tempo de usinagem cronometrado para uma média de 20 roscas) é significativamente menor para o cabeçote auto-reversível, proporcionalmente à velocidade de corte. A Fig. 4.12 comprova a eficiência dos dois cabeçotes, sendo utilizado três velocidades de corte distintas.

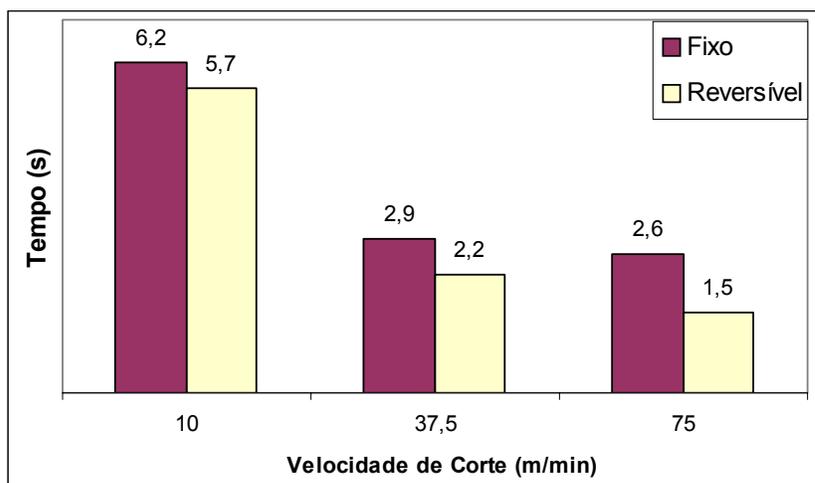


Figura 4.12 – Comparação do tempo de usinagem de um furo empregando os cabeçotes fixo e auto-reversível em três faixas de velocidade (10, 37,5 e 75 m/min)

Com 10 m/min a diferença de tempo foi pequena, inferior a 10%. Contudo, aumentando a velocidade de corte para 37,5 m/min, a diferença foi de 32% a favor do cabeçote auto-reversível. Conforme foi descrito no capítulo III, não foi possível usar com 75 m/min com o cabeçote auto-reversível, devido a limitações técnicas do modelo existente no LEPU. Todavia, foi feita simulação de usinagem sem o cabeçote estar montado no eixo-árvore e constatou-se que a diferença seria de 73% entre os dois cabeçotes. Portanto, em termos de tempo de usinagem, em todas as velocidades de corte testadas, o cabeçote fixo foi o que exigiu maiores tempos de usinagem (tempo ativo e passivo). A justificativa para essa diferença está relacionada ao tempo gasto pelo ciclo de usinagem utilizado para o cabeçote fixo, o qual necessita de acelerar os movimentos de avanço e rotação, para o

estágio de corte e para o retorno da ferramenta. Além disso, quanto maior for a velocidade de corte, maior será o espaço necessário para a aceleração e desaceleração, aumentando o tempo total de usinagem.

Além do mais, cabe ressaltar que o cabeçote fixo deve exigir da máquina ferramenta um sincronismo perfeito entre o avanço de corte e a velocidade de rosqueamento. O consumo de energia também é superior para o cabeçote fixo, devido ao ciclo de usinagem exigir acelerações e desacelerações em cada etapa do rosqueamento além da reversão constante do sentido de rotação, o que não acontece para o cabeçote auto-reversível. Já o ciclo de rosqueamento para o cabeçote auto-reversível funciona como um ciclo de furação, pouco exigindo da máquina-ferramenta (LINSS, 2002).

4.3 Desgaste de flanco apresentado nos machos de corte

4.3.1 Ferramentas sem revestimento e revestidas com TiN

A Fig. 4.13 mostra uma ferramenta revestida com TiN após usinar 320 roscas, evidenciando o desgaste nas superfícies de saída e de folga de cada dente do macho, principalmente na parte cônica e nos primeiros filetes da parte cilíndrica do macho. O desgaste atingiu toda extensão da superfície de folga da parte cilíndrica, até o quarto dente do macho (aproximadamente 2,6 milímetros).

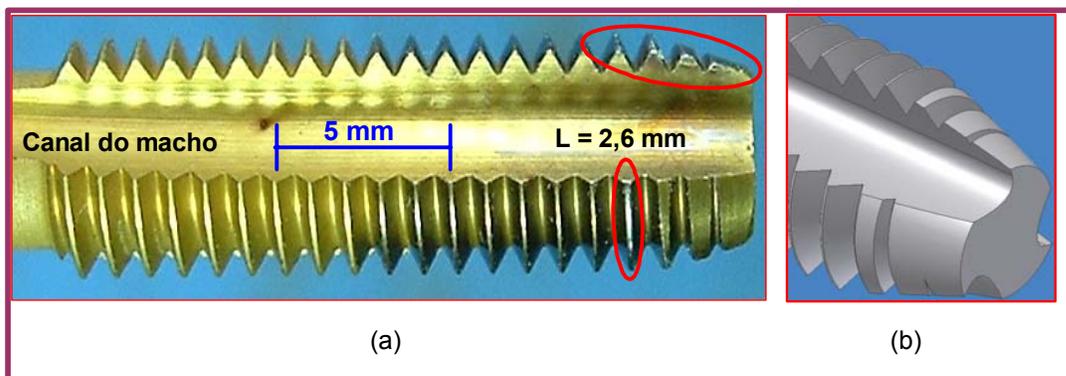


Figura 4.13 – (a) Macho de corte revestido com TiN após usinar 320 roscas em ferro fundido cinzento; (b) detalhe do detalonamento (parte cônica) do macho onde mediu-se o desgaste na superfície de folga

A fim de comparar a evolução do desgaste de flanco nas ferramentas utilizadas neste trabalho, foram plotados os valores máximos de desgaste (em milímetros), medidos em

cada filete, para os três primeiros filetes de cada ferramenta em função do número de roscas feitas, conforme apresenta a Tab. 4.5. Esses valores representam o desgaste do macho de HSS-E revestido com TiN, utilizando MQL, com velocidade de corte de 75 m/min. Este procedimento foi utilizado para todas as demais condições e os resultados são mostrados nas Figs. 4.14 a 4.16.

Tabela 4.5 - Medição dos desgastes nas três carreiras do macho HSS-E TiN (MQL)

Nº de Roscas	Carreira 1	Carreira 2	Carreira 3
0	0	0	0
160	0,195 mm	0,208 mm	0,198 mm
320	0,345 mm	0,478 mm	0,275 mm
400	0,513 mm	0,572 mm	0,327 mm
560	0,594 mm	0,612 mm	0,604 mm
720	0,618 mm	0,691 mm	0,736 mm
1000	0,833 mm	0,858 mm	0,852 mm

Os gráficos das Figs. 4-14, 4-15 e 4-16 apresentam uma comparação dos desgastes das ferramentas de HSS-E, revestidas com TiN e sem revestimento, com duas condições de corte: a seco e com MQL. Observa-se nestas figuras que a ferramenta sem revestimento utilizada na condição a seco (HSS-E SR SECO) já apresentava elevados níveis de desgaste em todos os três primeiros filetes após usinar 160 roscas, sendo que no terceiro filete o desgaste atingiu todo o comprimento de pelo menos uma das superfícies laterais (compreendidas entre dois canais da ferramenta), caracterizando um tipo específico de avaria desenvolvido em machos de corte, devido ao mecanismo de deformação plástica, denominada por alguns autores (OSG, 1999; REIS, 2004) de rasgamento e que corresponde à perda da crista do filete.

O desgaste prematuro para as ferramentas sem revestimento deve-se ao fato de haver contato direto entre o substrato do macho com o material da peça. Em altas velocidades de corte a temperatura na usinagem é alta, comprometendo o desempenho das ferramentas de corte. Para os machos revestidos com nitreto de titânio pode-se dizer que o desgaste foi reduzido, principalmente os desgastes abrasivos, devido a sua alta dureza, a qual garante uma superfície mais resistente ao microcorte, microlascamento e ao microsulcamento (ZUM GAHR, 1987). Além disso, os revestimentos dificultam a adesão do material usinado à ferramenta, diminuindo a ocorrência de “*attrition*”.

Os revestimentos “endurecedores” apresentam um reduzido desgaste por abrasão e proporcionam pequena adesão aos cavacos que se soltam do material que está sendo

usinado. Isto, por sua vez, leva à redução da abrasão causada por partículas duras (inclusões) da peça ou da própria ferramenta, menores coeficientes de atrito e conseqüentemente menores forças de corte.

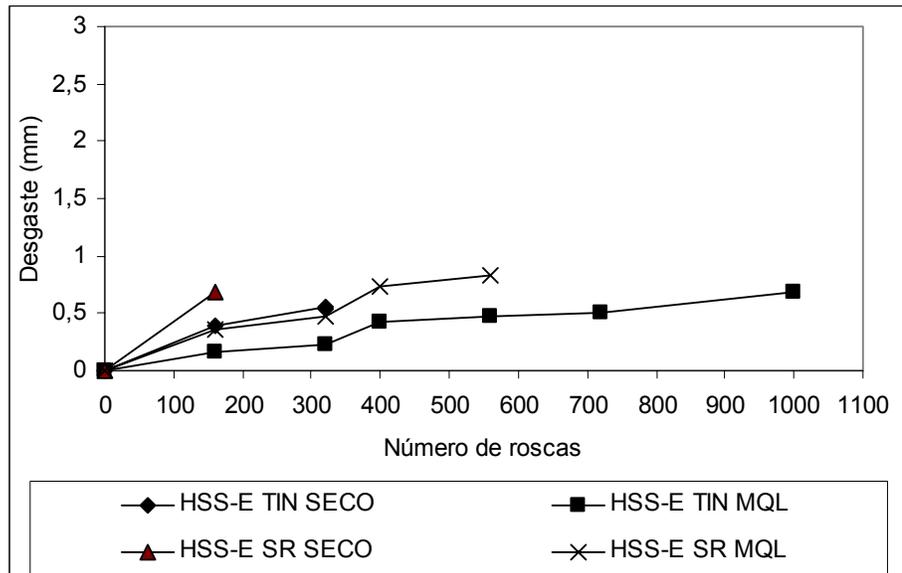


Figura 4.14 - Desgaste de flanco no primeiro filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), usando cabeçote fixo

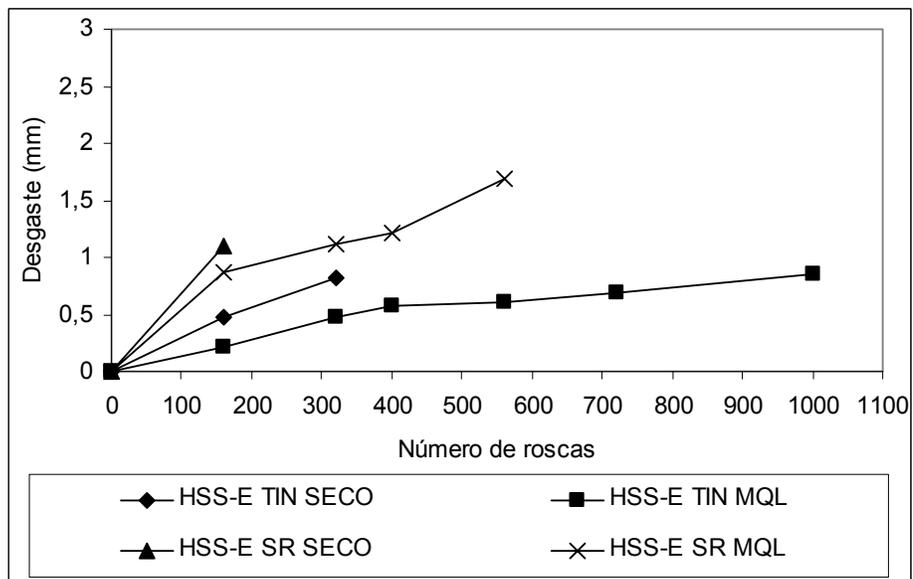


Figura 4.15 - Desgaste de flanco no segundo filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), usando cabeçote fixo

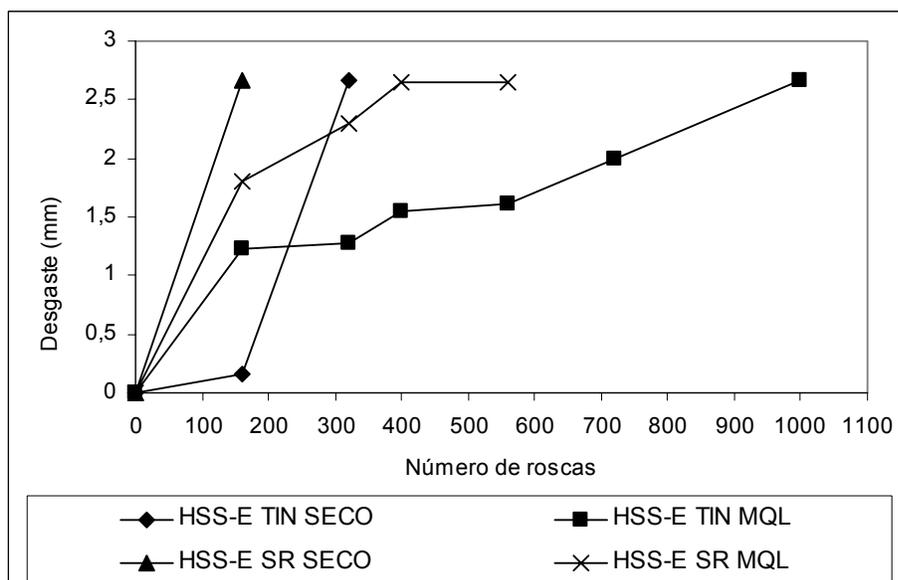


Figura 4.16 - Desgaste de flanco no terceiro filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), usando cabeçote fixo

4.3.2 - Ferramentas de HSS-E e PM revestidos com TiN e TiN/TiAlN com altas velocidades de corte

Observa-se nos gráficos das Figs. 4.17 a 4.22 que as ferramentas revestidas com TiN tiveram desgastes consideráveis. Com 320 roscas, o desgaste para a ferramenta HSS-E TiN ficou próximo de 0,6 mm de comprimento, no primeiro filete da ferramenta (Fig. 4.17). No segundo filete esse desgaste, foi maior, chegando a 0,8 mm (Fig. 4.18). O desgaste (rasgamento) no terceiro filete atingiu todo o comprimento do dente ($\pm 2,6$ mm), comprometendo assim a qualidade das roscas fabricadas.

As ferramentas fabricadas pelo processo da Metalurgia do Pó (PM), revestidas com TiN tiveram desempenho pouco superior ao das ferramentas fabricadas pelo processo convencional (HSS-E). Para o rosqueamento com altas velocidades, o desgaste das ferramentas de aço-rápido (PM) foi inferior nos dois primeiros filetes e muito próximos no terceiro filete.

O desempenho das ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN foi superior às ferramentas revestidas com TiN, independentemente dos substratos analisados. O número de roscas usinadas com os machos de aço-rápido PM, revestidos com TiN/TiAlN, foi em torno de 150% superior ao das ferramentas do mesmo material, revestidas com TiN (Fig. 4.1). O desgaste ficou inferior a 0,8 mm para os dois primeiros filetes do macho PM, revestido com multicamadas, na condição de alta velocidade de corte. Para o terceiro filete o

desgaste foi de aproximadamente 1,5 mm, após usar 800 roscas. Na mesma condição de usinagem, a ferramenta de aço super-rápido (HSS-E) revestido com TiN, fez 320 roscas e o desgaste no terceiro dente ficou acima de 2,5 mm de desgaste (rasgamento).

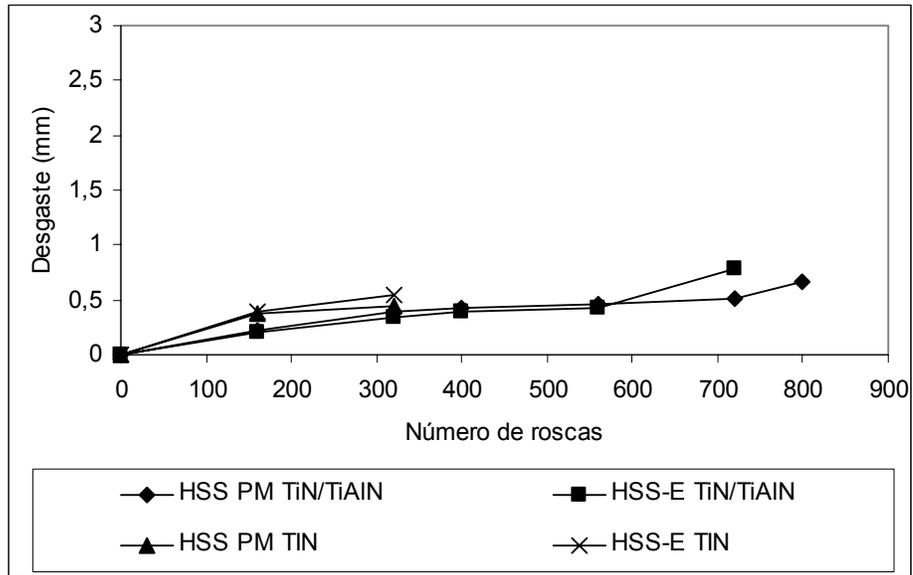


Figura 4.17 - Desgaste de flanco no primeiro filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), com cabeçote fixo

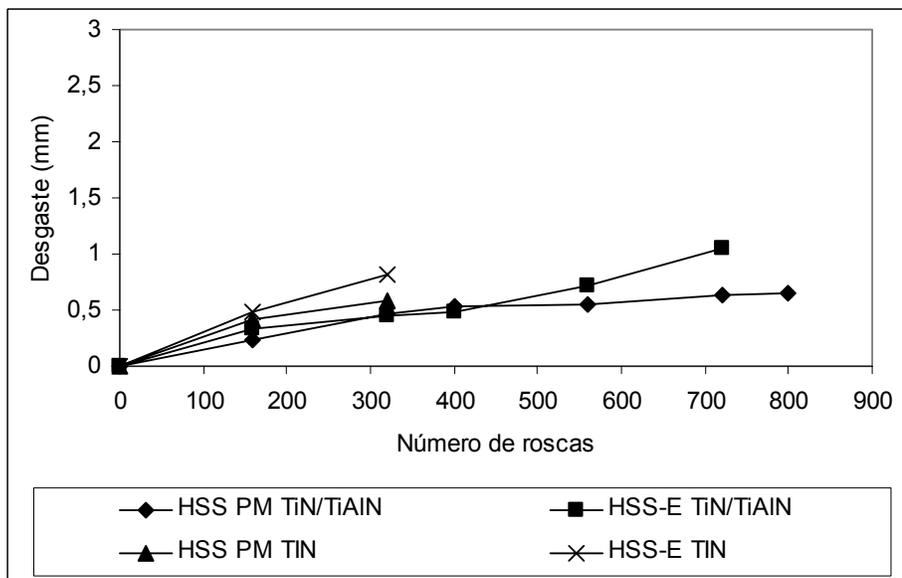


Figura 4.18 - Desgaste de flanco no segundo filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), com cabeçote fixo

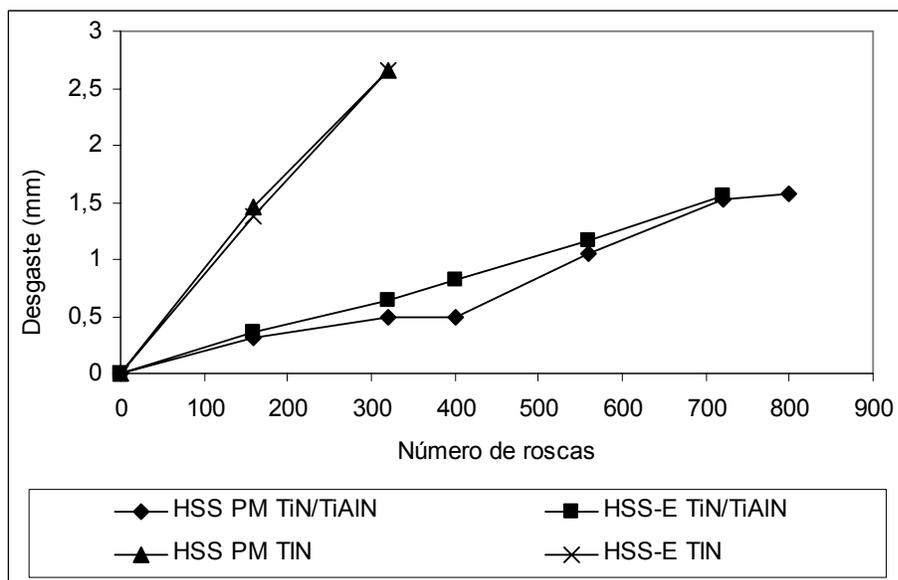


Figura 4.19 - Desgaste de flanco no terceiro filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=75$ m/min), com cabeçote fixo

Acredita-se que as temperaturas atingidas no processo de rosqueamento, desenvolvidas neste trabalho, foram elevadas, principalmente quando se utilizou alta velocidade de corte (75 m/min). Embora o tempo de contato entre cada dente do macho seja relativamente curto, pode-se afirmar que o corte para o rosqueamento é contínuo, proporcionando o aumento da temperatura nos flancos dos dentes e na superfície de saída. Além do calor gerado devido ao atrito e às altas taxas de remoção de material, pode-se ainda acrescentar o problema do acúmulo de resíduos (cavacos) nos canais das ferramentas, responsáveis pelo aumento do desgaste e acréscimo do torque no rosqueamento.

Sabe-se que praticamente toda a energia consumida na usinagem é convertida em calor e que esse fenômeno é um dos grandes problemas para as ferramentas de corte. A dissipação da energia térmica nas zonas de cisalhamento primária e secundária afeta fortemente a resistência das ferramentas, pois as temperaturas nestas regiões são muito altas. Daí, a necessidade de utilizar substratos resistentes a altas temperaturas ou melhorar a superfície das ferramentas, adicionando revestimentos que diminuam o atrito ou que melhorem a dissipação do calor. Os resultados apresentados até o momento mostram que as ferramentas recobertas com multicamadas de TiN/TiAlN tiveram um desempenho muito superior ao das ferramentas revestidas com TiN. Esses resultados podem estar relacionados com o efeito da temperatura na interface cavaco-ferramenta. O alumínio

presente na cobertura multicamada TiN/TiAlN, reage com o meio ambiente na região de corte, formando uma camada externa de óxido (Al_2O_3) que é altamente dura, protegendo as outras camadas de revestimentos e conseqüentemente blindando o substrato dos machos de corte (PALDEY; DEEVI, 2003; HARRIS et al., 2003; VIANA, 2004; REITER et al., 2006). Essa reação química acontece em altas temperaturas, comprovando a melhor atuação das ferramentas revestidas com o revestimento TiN/TiAlN em alta velocidade de corte.

Essas camadas de óxidos também podem exercer a função de lubrificante sólido e isolante térmico na interface e agir como um obstáculo à condução do calor para o interior da ferramenta durante o corte (PALDEY; DEEVI, 2003; VIANA, 2004), mantendo a integridade desta, o que pode favorecer o aumento em sua vida útil e conseqüentemente aumentar o número de peças fabricadas.

4.3.3 - Ferramentas de HSS-E e PM revestidos com TiN e TiN/TiAlN em velocidades de corte moderadas

Na condição de corte moderada (37,5 m/min), o desgaste das ferramentas de corte, revestidas com multicamada (TiN/TiAlN), também foi significativamente menor, como pode ser visto nos gráficos das figuras 4.20, 4.21 e 4.22.

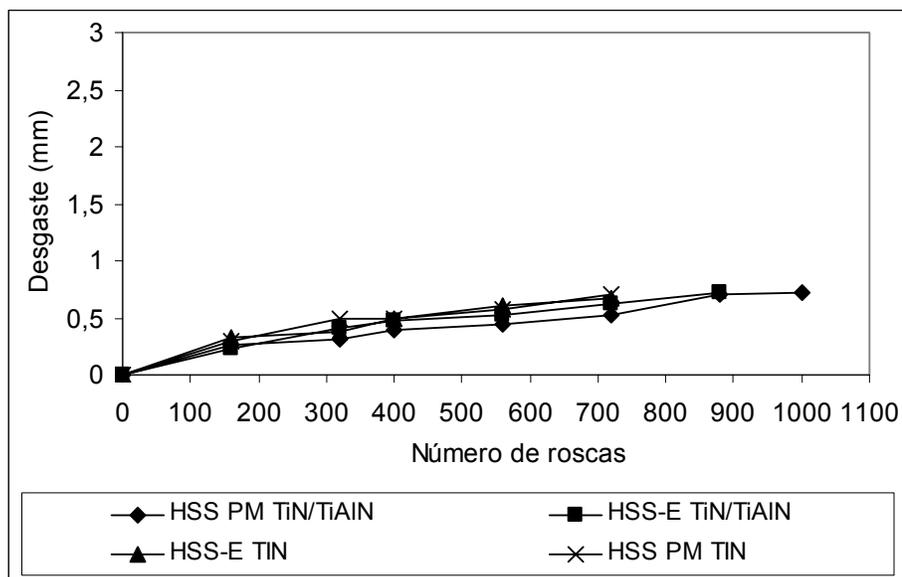


Figura 4.20 - Desgaste de flanco no primeiro filete versus o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c=37,5$ m/min), cabeçote fixo

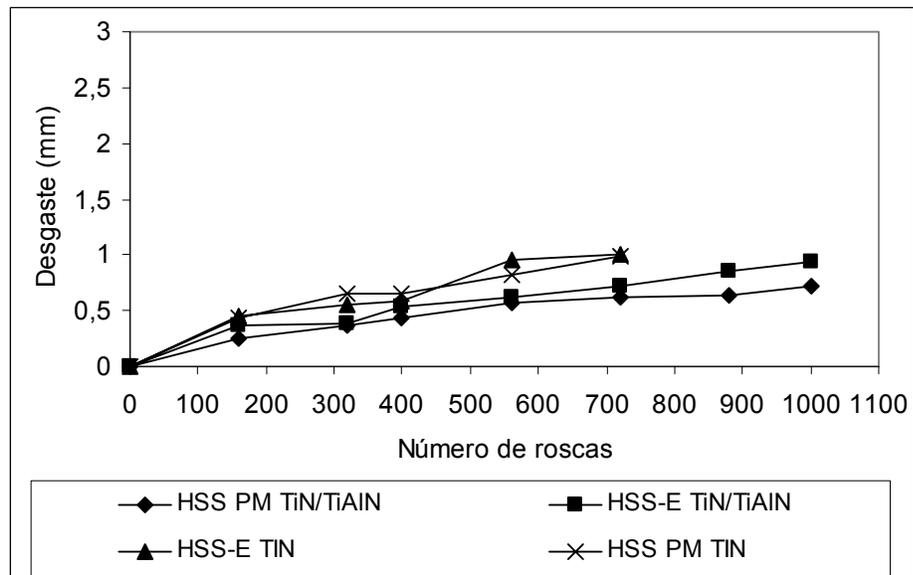


Figura 4.21 - Desgaste de flanco no segundo filete versos o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c = 37,5$ m/min), cabeçote fixo

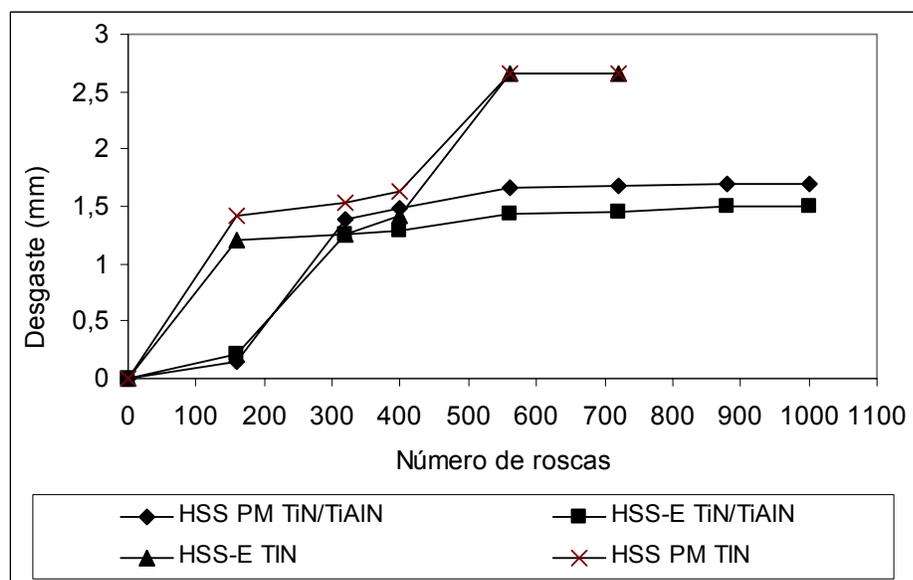


Figura 4.22 - Desgaste de flanco no terceiro filete versos o número de roscas para as quatro condições testadas ($V_c = 37,5$ m/min), cabeçote fixo

Verificou-se que os desgastes do macho de aço-rápido (PM) revestido com multicamadas, e do macho de aço super-rápido (HSS-E), também revestido com TiN/TiAlN,

foram inferiores aos desgastes dos machos revestidos com TiN, mesmo considerando que as ferramentas revestidas com multicamadas fizeram em média 300 roscas a mais que as outras ferramentas. A ferramenta de HSS-PM TiN, terceiro filete, atingiu 2,5 mm de desgaste com 560 roscas usinadas, enquanto que uma ferramenta semelhante, revestida com TiN/TiAlN, fez 1000 roscas e o desgaste ficou próximo de 1,5 mm, conforme a Fig. 4.22.

4.4 Mecanismos de Desgaste

A literatura apresenta vários mecanismos de desgaste e avarias para as diversas ferramentas de corte, principalmente para o torneamento e o fresamento. Entretanto, são poucos os estudos feitos em ferramentas sólidas rotativas de aço-rápido, como os machos de corte. Neste trabalho foi possível fazer algumas análises dos principais mecanismos de desgaste nessas ferramentas, como por exemplo, a adesão e a abrasão. Também foi considerada a deformação plástica superficial por cisalhamento a altas temperaturas e/ou deformação plástica da aresta de corte sob altas tensões de compressão, que normalmente não são consideradas como mecanismos de desgaste, mas sim um dos processos de destruição das ferramentas de corte (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004).

As boas propriedades térmicas e mecânicas dos revestimentos de TiN e multicamadas de TiN/TiAlN fizeram com que o desgaste das ferramentas fosse pequeno enquanto o revestimento esteve presente na superfície dos machos. Contudo, após o desprendimento desses revestimentos, os desgastes nos machos foram severos.

4.4.1 Mecanismos de desgaste apresentados nas ferramentas revestidas com TiN em HSM

A visualização e medição das dimensões do desgaste em microscópio ótico evidenciaram um maior nível de desgaste nas ferramentas revestidas com TiN do que as ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN. Os primeiros filetes daquelas ferramentas sofreram desgastes severos, com rasgamento até o quarto dente. As fotomicrografias da Fig. 4.23 mostram o estado de desgaste apresentado pelo macho de HSS-E revestido com nitreto de titânio, após usinar 320 roscas, a 75 m/min.

Além da deformação plástica ocorrida nessa condição de corte, houve também outros mecanismos de desgaste que podem ter influenciado no aumento do torque e conseqüentemente no final da vida da ferramenta. Com 160 roscas fabricadas já era perceptível o destacamento do revestimento nos primeiros dentes do macho. Com o

aumento do número de roscas, verificou-se que havia rasgamento na superfície de folga dos dentes da parte cilíndrica do macho, provavelmente resultantes das altas compressões existentes nas superfícies da ferramenta. Além do aumento da temperatura, devido ao acréscimo do desgaste, as forças de corte aumentaram significativamente, assim como os ruídos na operação de usinagem.

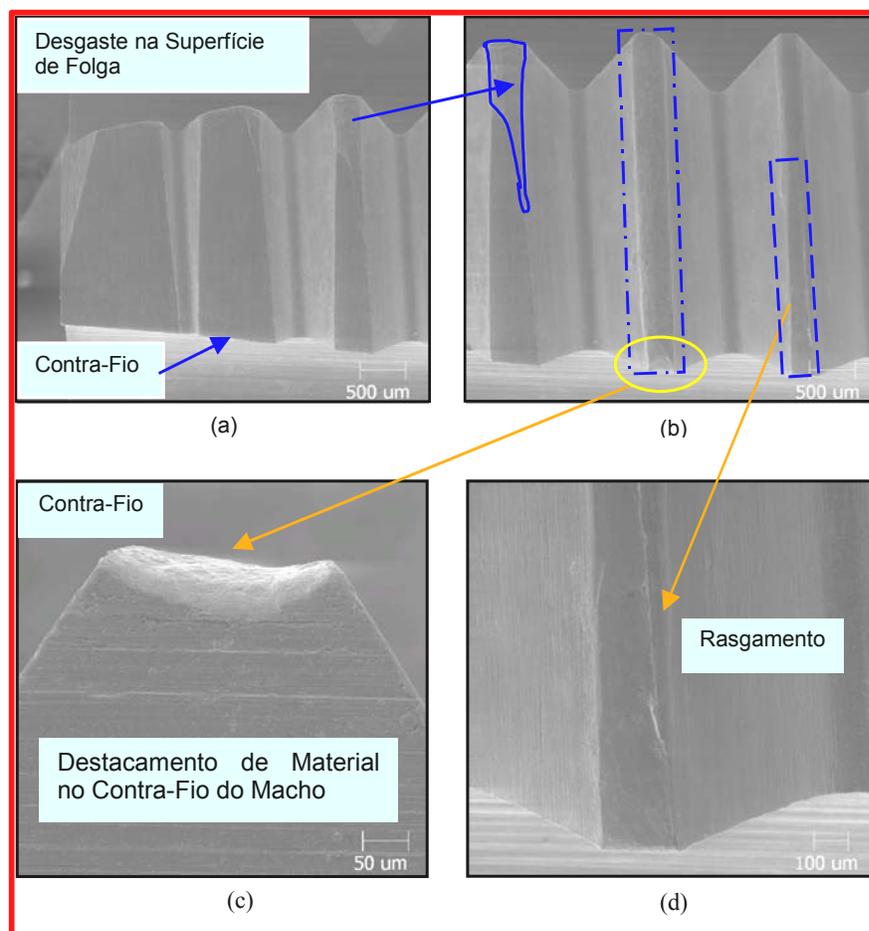


Figura 4.23 – Fotomicrografias (MEV) da ferramenta HSS-E revestida com TiN após usar 320 roscas com velocidade de corte de 75 m/min

Na Fig. 4.24 são apresentadas fotomicrografias feitas no MEV, onde observa-se também a presença de partículas, aderidas sobre as superfícies da ferramenta, sugerindo que o mecanismo de desgaste por adesão (*attrition*) pode ter contribuído para a deterioração da ferramenta (macho HSS – PM).

O fluxo de cavacos sobre as superfícies de saída dos machos pode transportar elementos duros (fragmentos de desgaste) do próprio material da peça e também pequenos

grãos ou partículas arrancados da própria ferramenta, por adesão, como, por exemplo, partes do revestimento (nitreto de titânio – dureza de 2500 Hv), os quais, arrastados juntos com os cavacos, promovem o mecanismo de desgaste, por abrasão (TRENT; WRIGHT, 2000; ZUM GAHR, 1987; MACHADO; DA SILVA, 2004).

Assim, pode-se concluir que os altos níveis de desgaste, observados nas ferramentas revestidas com TiN, causados pelos mecanismos citados anteriormente, foram provavelmente os responsáveis pelos altos valores do sinal do torque medido no rosqueamento com estas ferramentas, que serão discutidos posteriormente.

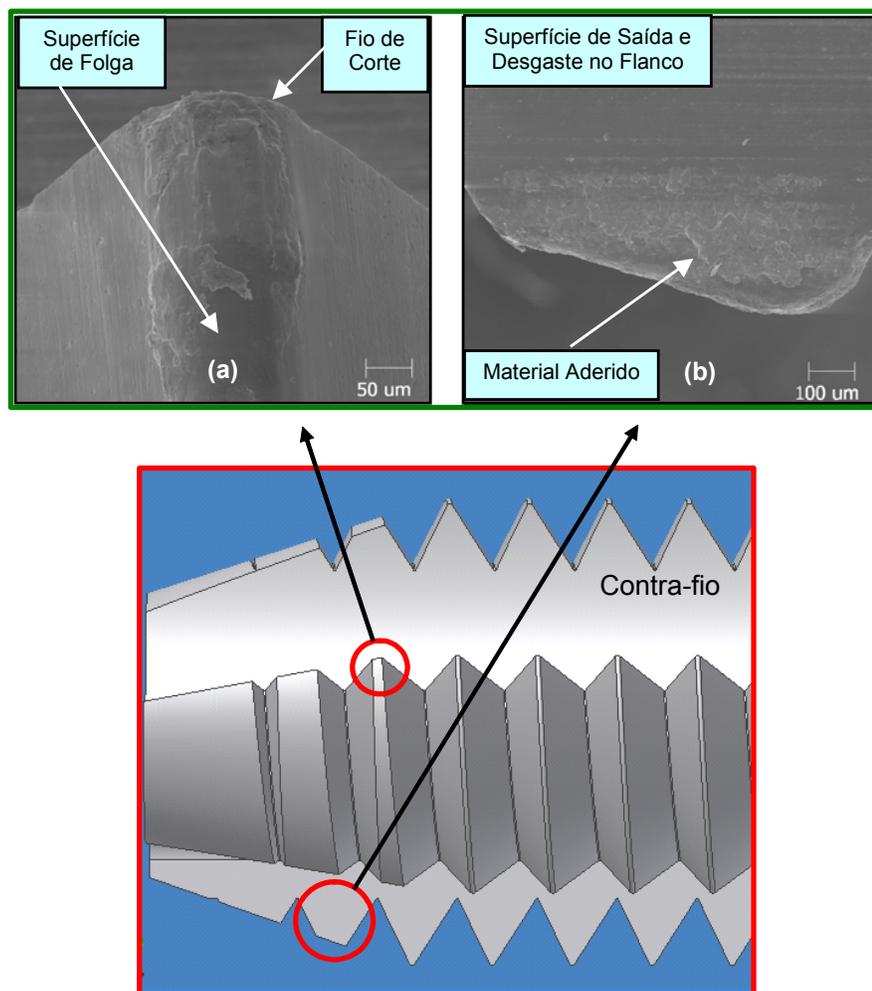


Figura 4.24 – Desenho esquemático mostrando o desgaste na superfície de saída e de folga do segundo e terceiro dente de um macho PM revestido com TiN, usando cabeçote fico com 75 m/min. (a) Fotomicrografias (MEV) apresentando detalhes do desgaste no terceiro dente (superfície de folga); b) detalhes na superfície de saída

4.4.2 Microanálise por Energia Dispersiva (EDS) nas ferramentas revestidas com TiN

O objetivo das análises desse trabalho foi investigar a presença de elementos químicos sobre as superfícies das ferramentas, com a finalidade de identificar os principais mecanismos de desgaste ocorridos na usinagem de ferro fundido cinzento GH 190. Foram escolhidas algumas regiões críticas na superfície de saída de um macho HSS-E revestido com TiN, após usinar 320 roscas com uma velocidade de corte de 75 m/min. A Fig. 4.25 apresenta fotos no MEV mostrando material aderido ao substrato após o destacamento do revestimento, na região considerada até então como área desgastada.

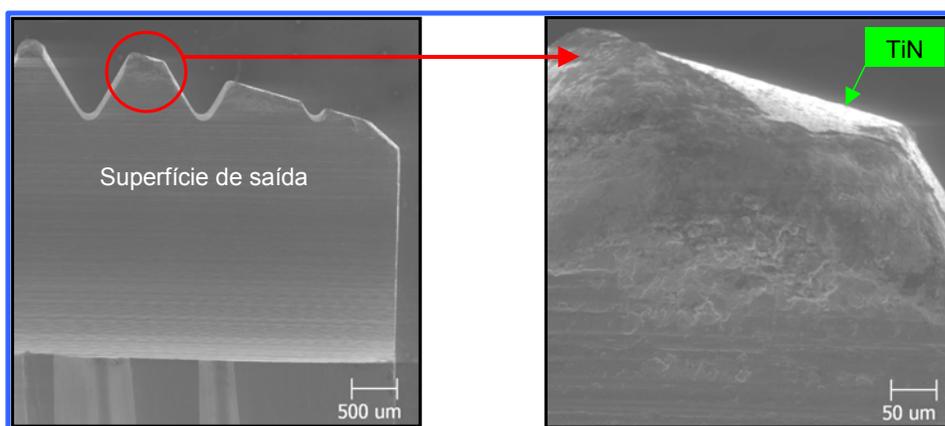


Figura 4.25 – Fotomicrografia feita em MEV de uma ferramenta de HSS-E (TiN) após usinar 320 roscas em ferro fundido cinzento com $V_c = 75$ m/min

Para compreender melhor os mecanismos de desgaste que atuaram na superfície desta ferramenta, foi feito um espectro da análise química por meio de uma micro-sonda EDS (Espectroscopia por Energia Dispersiva), onde foram feitas três análises (sobre a linha horizontal e os pontos 1 e 2), de acordo com a Fig. 4.26.

Na região com desgaste traçou-se uma linha horizontal e fez-se EDS em toda sua extensão. Os resultados apresentaram uma grande quantidade de ferro (Fe), possivelmente do substrato após o destacamento do revestimento e também do ferro fundido (fofo), caracterizando adesão. Também é possível notar a presença dos elementos químicos: silício (Si), fósforo (P) e titânio (Ti), em menores quantidades. O titânio aparece com maior ênfase nas extremidades da linha, comprovando a presença do revestimento (TiN) nas bordas da ferramenta. A presença de fósforo e silício, provavelmente se deve a adesão de ferro fundido ao substrato do macho de corte.

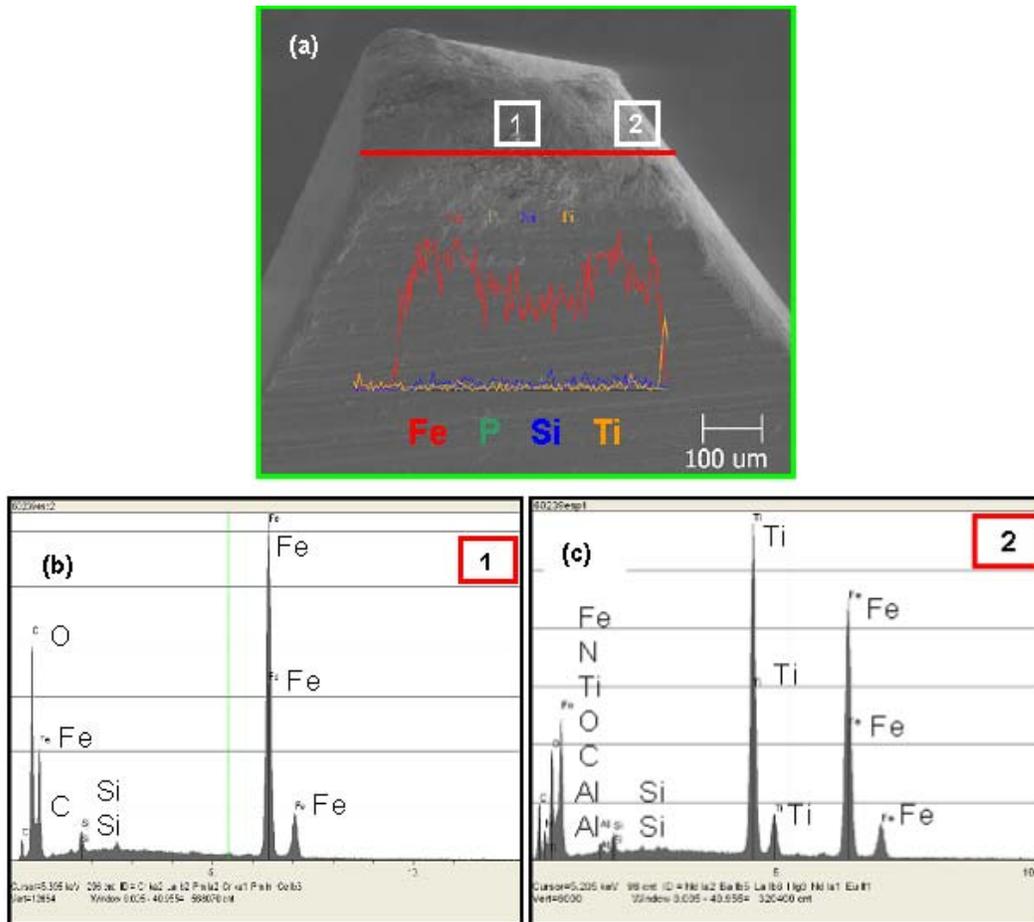


Figura 4.26 – Espectro por energia dispersiva (análise química): (a) fotomicrografia feita em MEV apresentando as três regiões analisadas e os principais elementos químicos presentes na região demarcada pela linha; (b) espectro da análise química da região 1; (c) espectro da análise química da região 2

Para esclarecer melhor a presença desses elementos químicos na região estudada, foram feitos alguns espectros em regiões distintas, denotadas na Fig. 4.26 como pontos 1 e 2. Na região 1, conforme era esperado, constatou-se a presença de ferro, carbono e silício. Já na região 2, percebe-se a presença dos mesmos elementos químicos da região 1, acrescidos de titânio (Ti), nitrogênio (N), oxigênio (O) e pequenas quantidades de alumínio (Al). Como esta região compreende o substrato desgastado e uma parcela da superfície de folga do macho, a qual ainda está revestida com TiN, acredita-se que o titânio e o nitrogênio são oriundos da camada de revestimento. A presença do oxigênio pode estar relacionada à formação de algum tipo de óxido, uma vez que as temperaturas de usinagem foram altas, devido as condições de corte utilizadas neste trabalho.

Uma análise mais detalhada do espectro (análise química) dos elementos que são mais significativos, na região varrida sobre a linha horizontal, apresentada na Fig. 4.26, pode ser vista na Fig. 4.27.

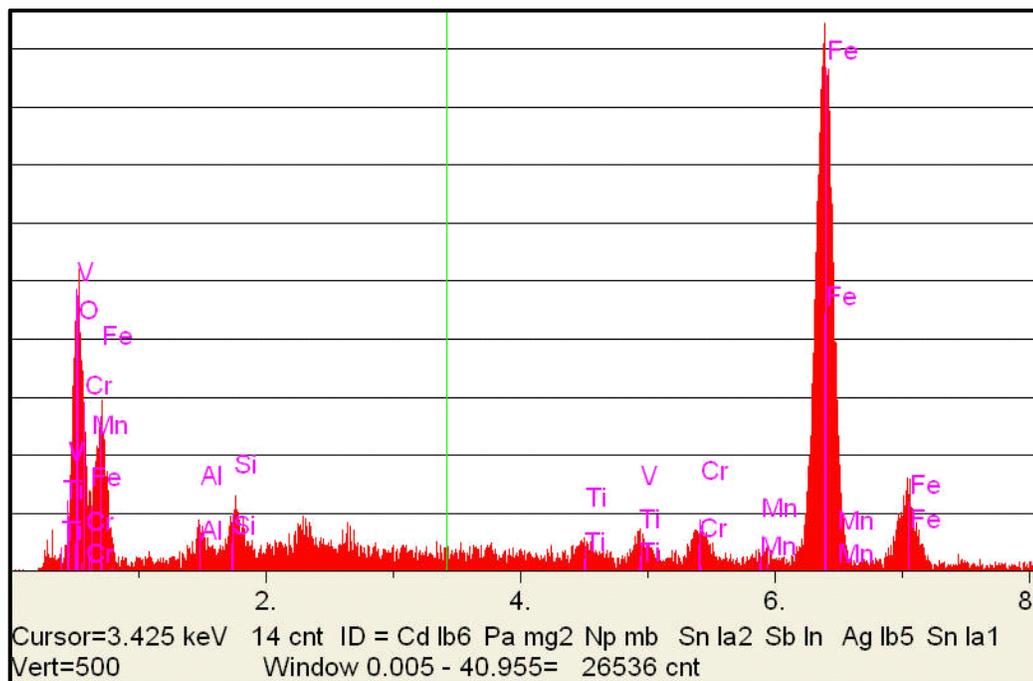


Figura 4.27 - Espectro da análise química sob a superfície demarcada pela linha central da figura 4.26

É importante salientar que, nas análises químicas das ferramentas, percebe-se a presença de outros elementos químicos, porém em forma de resíduos. No espectro da Fig. 4.27 são apresentados somente os elementos mais significativos. Estes resíduos não foram identificados por dois fatores: 1) A sonda de análise química apresenta dificuldade em analisar elementos leves e 2) a quantidade mostrada era insuficiente para ser identificada no gráfico.

4.4.3 Mecanismos de desgaste apresentado nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN em HSM

Através do microscópio ótico não foi possível detectar os principais mecanismos de desgaste nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN, no início do rosqueamento. O desgaste passou a ser observado a partir do momento em que ocorreu a remoção da camada de revestimento, na região da superfície de folga, em forma de

pequenas lascas. Esse mesmo acontecimento foi constatado em trabalhos anteriores, na furação e rosqueamento de ferro fundido cinzento GH 190 (SANTOS, 1999; REIS, 2004), e na furação da liga de Alumínio - Silício (VIANA, 2004), ficando comprovado que o desgaste de flanco das brocas e machos evolui a partir desses pequenos lascamentos (SANTOS, 1999; REIS, 2004; VIANA, 2004).

Para as ferramentas utilizadas neste trabalho, esse fenômeno foi verificado em todas as ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN, independente do substrato e das velocidades de corte, conforme pode-se observar através da fotomicrografia (MEV) apresentada na Fig. 4.28.

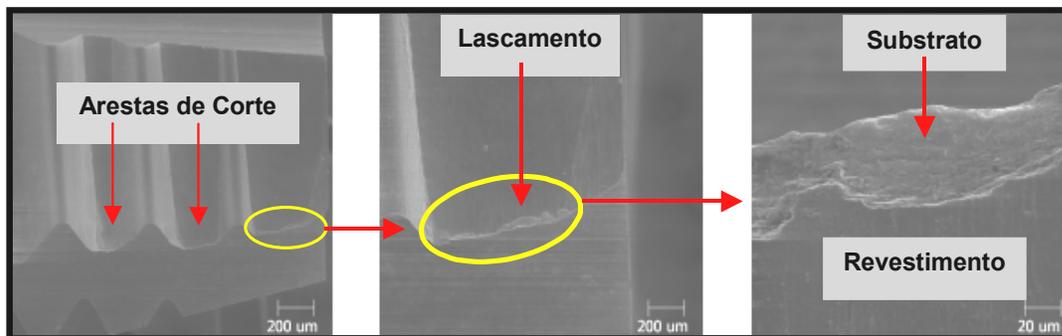


Figura 4.28 – Fotomicrografia feitas no MEV apresentando detalhes de lascamentos observados em um macho fabricado pela metalurgia do pó (PM), revestido com multicamadas de TiN/TiAlN

Com o aumento do lascamento e conseqüente exposição do substrato ao contato direto com o material a ser usinado, aumentou-se o atrito entre o macho e o corpo de prova, provocando fortes ruídos e o acréscimo progressivo das forças de corte. A única ferramenta que foi eliminada por falha catastrófica neste trabalho, macho HSS-E empregado a 75 m/min, revestido com multicamadas de TiN/TiAlN, apresentou seguramente esse tipo de desgaste. Com 720 roscas fabricadas o desgaste observado em microscópio ótico era pequeno. Entretanto, notava-se a presença de pequenos lascamentos na superfície de folga e os ruídos na usinagem eram muito intensos. Com 768 roscas usinadas a ferramenta quebrou, não permitindo análises mais detalhadas, como fotos no MEV, dos mecanismos de desgastes apresentados.

Para as condições moderadas (37,5 m/min), também ocorreram lascamentos, principalmente na região cônica ou nos primeiros dentes do macho. A Fig. 4.29 mostra duas fotomicrografias feitas no MEV, da superfície de folga de um macho de HSS-E, em fim de vida. A presença de lascas no revestimento pode ser observada tanto nos dois primeiros

dentos (parte cônica do macho), como no primeiro dente da parte cilíndrica (terceiro dente da ferramenta), o qual apresenta destacamentos do revestimento na superfície de folga do macho. A ausência do revestimento afetou diretamente o sinal de torque, conforme será descrito em uma seção posterior. Além disso, pode ter ocorrido abrasão e adesão (*attrition*).

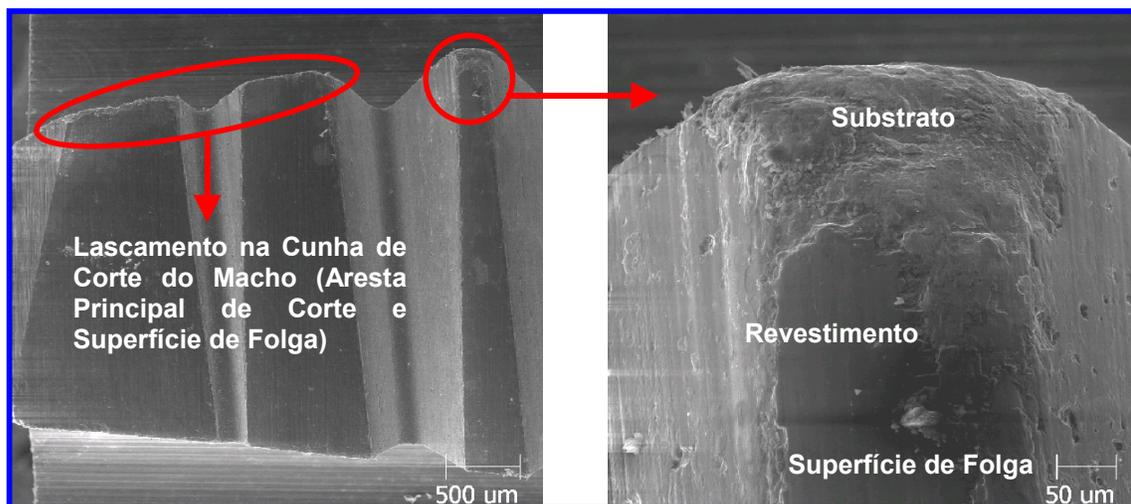


Figura 4.29 – Fotomicrografias feitas no MEV apresentando detalhe da cunha cortante de um macho de corte (HSS-E) revestido com multicamada TiN/TiAlN após usar 900 roscas

A abrasão pode provocar nas ferramentas de corte microsulcamento, microcorte ou microlascamento, esse último podendo chegar ao macrolascamento. As conseqüências desse mecanismo de desgaste para os machos de corte são graves, pois as ferramentas de corte podem perder a aresta de corte e danificar o detalonamento (alívio na superfície de folga do macho), aumentando a área de contato entre a ferramenta e a peça, implicando em maiores atritos e aumento das forças de corte (REIS, 2004).

4.4.4 Microanálise por Energia Dispersiva (EDS) nas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN

Conforme mencionado anteriormente, foi feito também EDS em um macho (HSS-PM), revestido com multicamadas de TiN/TiAlN. Essa ferramenta produziu 800 roscas, com velocidade de corte de 75 m/min e o desgaste encontrava-se bastante avançado, conforme verifica-se nas fotomicrografias da Fig. 4.30, feitas no MEV.

Observa-se que o desgaste na superfície de saída foi intenso, principalmente no terceiro dente da ferramenta. Houve destacamento do revestimento, e conseqüentemente um aumento das forças de corte, pois o atrito na usinagem provocou intenso ruído. O flanco

do macho apresenta desgaste severo, justificando os altos valores de torque, conforme será abordado posteriormente.

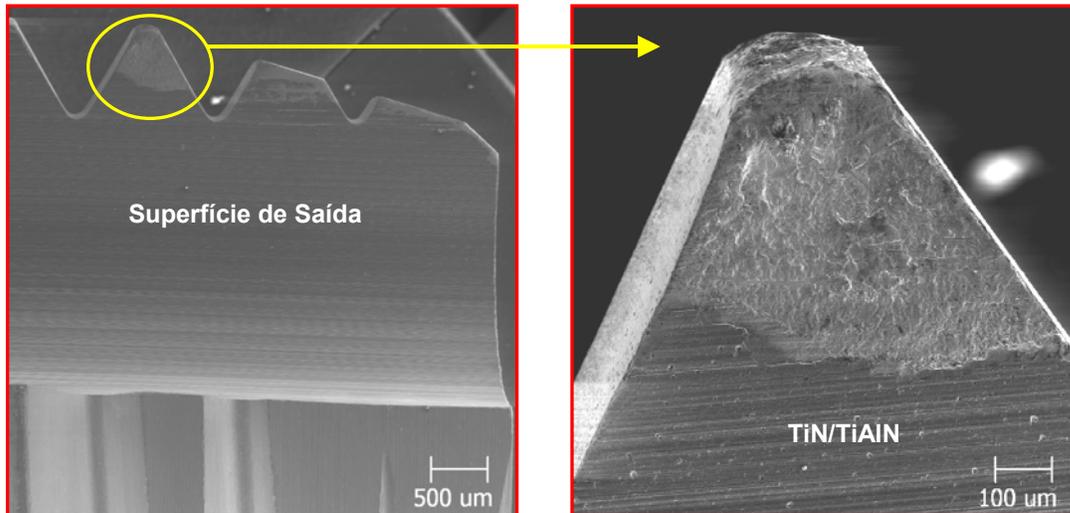


Figura 4.30 – Fotomicrografias, feita em MEV, de uma ferramenta de HSS–PM, revestida com multicamadas de TiN/TiAlN, após usinar 800 roscas em ferro fundido cinzento com $V_c = 75$ m/min

A Fig. 4.31 apresenta um espectro da análise química dessa ferramenta. As análises foram feitas na posição marcada pela linha vertical (área desgastada e revestida com TiAl/TiAlN). Os resultados apresentaram os cinco elementos químicos mais significativos (maiores valores do espectro). Na região que ainda havia revestimento os elementos químicos titânio (Ti), alumínio (Al) e nitrogênio (N) apresentaram maiores picos, assegurando a presença desses elementos.

Entretanto, também verifica-se a presença de fósforo (P) e ferro (Fe), com menores intensidades. Na região de desgaste ocorreu o contrário: o nível de ferro aumentou (devido à presença desse elemento no substrato e provavelmente também devido à adesão de ferro fundido no substrato). Em contra-partida, o nível dos elementos alumínio e titânio caem drasticamente nessa região, comprovando o destacamento do revestimento. Existe somente uma posição em que o alumínio aparece em alta intensidade na região desgastada. Acredita-se que alguma partícula desse elemento encontra-se aderida no substrato, oriunda das partículas do revestimento, evidenciando o “attrition”. Essas partículas duras (nitretos de titânio alumínio) podem causar desgaste abrasivo, como o microcorte e o microlascamento nas superfícies de folga e de saída das ferramentas de corte, conforme descrito anteriormente (ZUM GAHR, 1987).

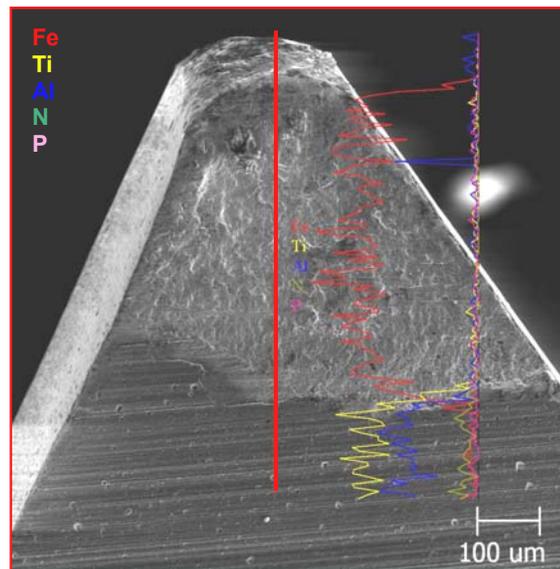


Figura 4.31 - Espectro por energia dispersiva (análise química): fotomicrografia feita em MEV apresentando o destacamento do revestimento (TiN/TiAlN), e os principais elementos químicos presentes sobre uma linha central (paralela à superfície de saída do macho)

A Figura 4.32 apresenta as regiões (1, 2 e 3) onde foram feitos alguns espectros aleatórios na superfície dessa ferramenta. O objetivo dessa divisão foi estudar, através das análises químicas, os principais elementos presentes na superfície de saída desgastada e na parte que ainda possui revestimento. Além disso, essa figura mostra, em destaque, uma parte da superfície de saída (desgaste), evidenciando a presença de material aderido e de riscos abrasivos.

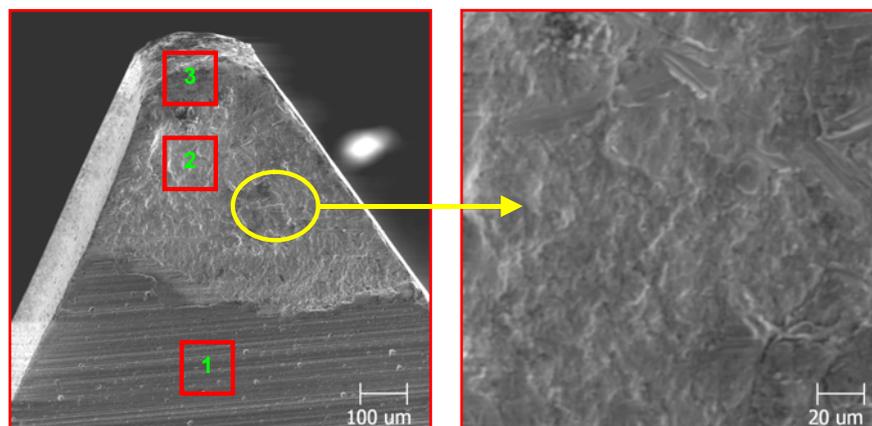


Figura 4.32 - Foto feita em MEV apresentando as três regiões analisadas e detalhe da superfície desgastada

A Fig. 4.33 apresenta os principais elementos químicos presentes na região 1 (EDS).

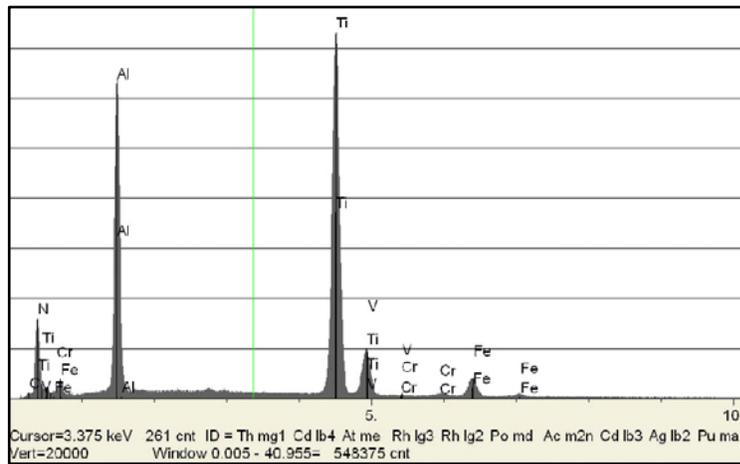


Figura 4.33 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 1 da Fig. 4.32

Observa-se que os elementos químicos que compõem o revestimento (Ti, Al, N) estão bem representados nesta figura. Isso comprova o bom estado do revestimento nessa região. Verifica-se também a presença de ferro (Fe), vanádio (V) e cromo (Cr). Esses elementos provavelmente são do substrato do macho de corte analisado.

A Fig. 4.34 aponta os principais elementos químicos presentes na região 2 (EDS).

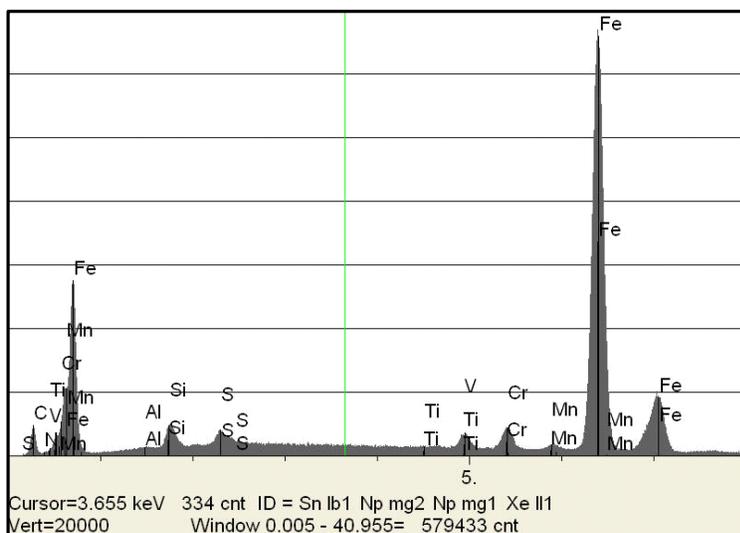


Figura 4.34 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 2 da Fig. 4.32

Observa-se a presença de ferro, manganês, cromo, vanádio, silício, alumínio, titânio, fósforo, carbono e nitrogênio. Essa composição indica uma mistura entre os materiais do macho (substrato) e do metal usinado (ferro fundido).

A Fig. 4.35 apresenta os constituintes químicos da região 3. Essa região é uma mistura entre a superfície de folga e de saída (aresta de corte) e caracteriza os elementos presentes no desgaste de flanco do macho de corte. Observa-se que a constituição química assemelha-se com a os elementos químicos da região 2, que também é uma região desgastada (superfície de saída da ferramenta). Entretanto, pode-se verificar a presença de oxigênio e a ausência de manganês. Isso pode ser esclarecido em função das posições das amostras. O desgaste na posição da amostra 2, deve ter uma incidência maior desse elemento (Manganês), no substrato do macho de corte. Já o oxigênio, pode ser uma pequena amostra de algum tipo de óxido, comum na usinagem em *HSM*, devido às altas temperaturas de corte.

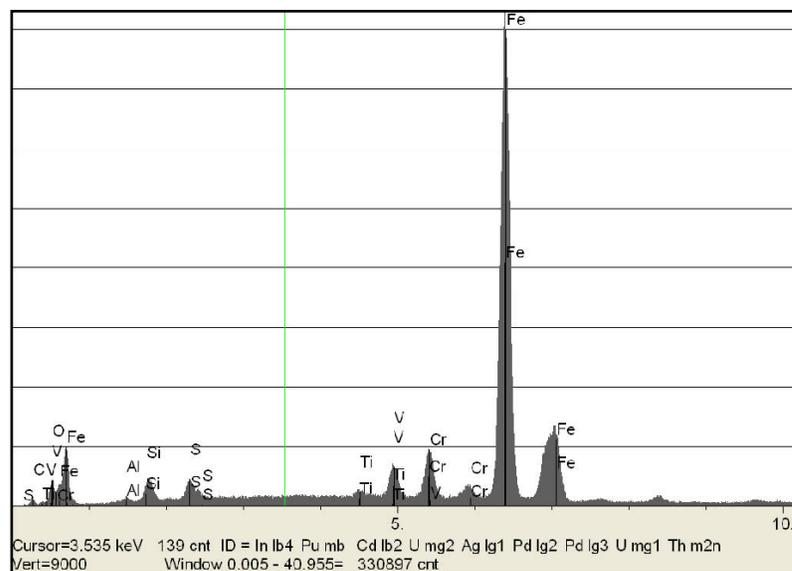


Figura 4.35 – Espectro por energia dispersiva (análise química) dos principais elementos químicos presentes na região 3 da Fig. 4.32

4.4.5 Mecanismos de desgaste apresentado nos machos estudados nos testes complementares

Conforme descrito no planejamento estatístico, foram feitos alguns testes complementares, com algumas ferramentas que tiveram os piores resultados nos pré-testes, com o objetivo de comparar os resultados com os demais testes. Assim, foram feitos testes

em baixa velocidade de corte (10 m/min), empregando-se os dois tipos de cabeçote utilizados neste trabalho, com machos de HSS revestidos com nitreto de titânio (TiN).

Além disso, avaliou-se os principais mecanismos de desgaste apresentados em ferramentas de HSS-E sem revestimento, HSS nitretadas e a influência do MQL nos mecanismos de desgaste.

As microfotografias da Fig. 4.36 mostram os desgastes nos primeiros dentes do macho de HSS-E TiN, nas duas condições de corte; a) e b) 75 m/min e c) e d) 10 m/min. Houve destacamento do revestimento em quase todos os dentes, principalmente na parte cônica dos machos de corte.

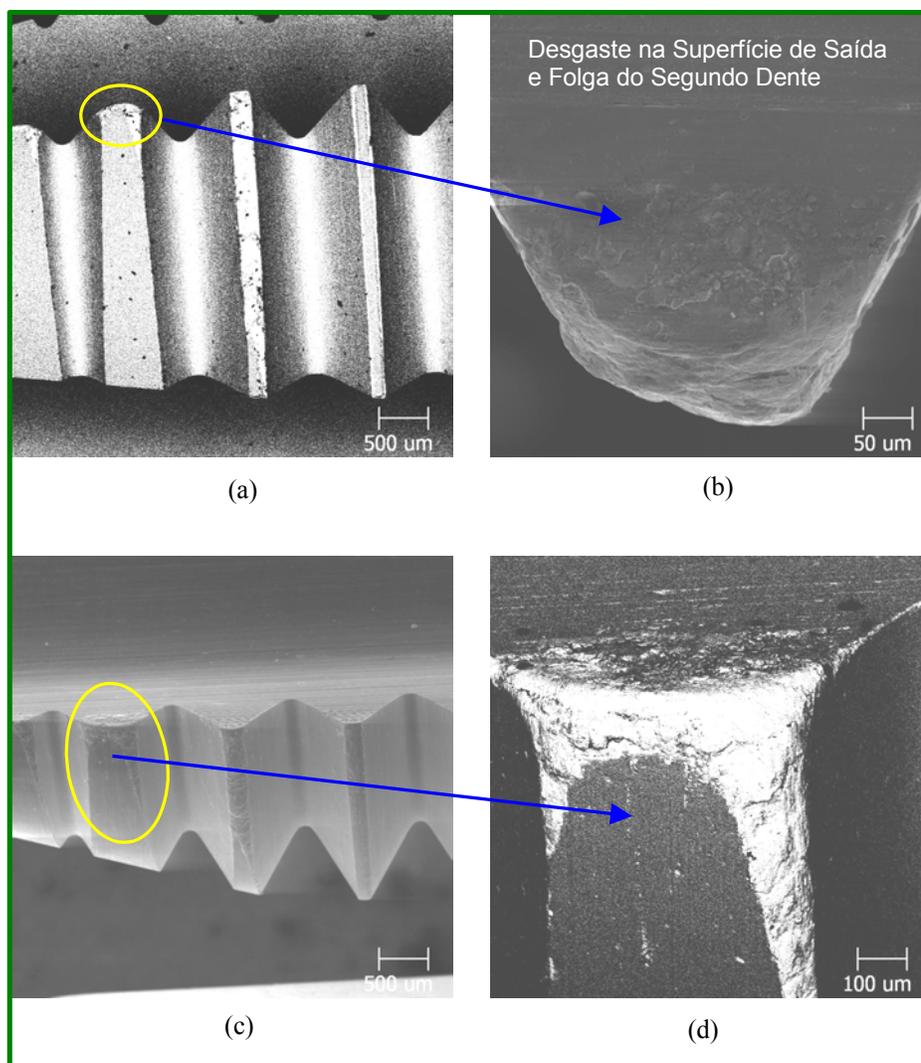


Figura 4.36 – Fotomicrografias evidenciando detalhes dos mecanismos de desgaste apresentados nos machos HSS-E revestidos com TiN; (a) e (b) 75 m/min; (c) e (d) 10 m/min

Conforme descrito anteriormente, para as velocidades de corte denominadas de *HSM* (75 m/min), além dos desgastes abrasivo e adesivo, ocorreu o processo de desgaste denominado desgaste por deformação plástica, comum em usinagem com ferramentas de HSS em altas velocidades de corte, devido às altas temperaturas desenvolvidas na interface cavaco-ferramenta. A Fig. 4.36 (a) e (b) mostra o estado de deformação do segundo dente do macho utilizado com velocidade de corte de 75 m/min. A aresta de corte foi totalmente destruída, aumentando a área de contato entre o macho e a peça e conseqüentemente, aumentando as forças de corte.

Para baixas velocidades de corte (10 m/min) os principais mecanismos de desgaste também foram a adesão e a abrasão. A Fig. 4.36 (c) e (d) apresenta o alto nível de desgaste nas superfícies de folga e saída do segundo dente do macho. Acredita-se que em todas as velocidades de corte empregadas neste trabalho, existiu a APC (aresta postiça de corte), pois o ferro fundido cinzento GH 190 apresenta duas fases: perlita lamelar com no máximo 5% de ferrita. Além disso, com o cabeçote fixo, pode-se dizer que as velocidades de corte variaram muito, devido a aceleração e a desaceleração, conforme descrito anteriormente. No entanto, as velocidades permaneciam na faixa em que a APC pode ser estável ou instável (10 a 75 m/min).

A Fig. 4.37 mostra uma seqüência de fotomicrografias de uma ferramenta de HSS-E (após usinar 160 roscas a seco) feitas no MEV. O cabeçote utilizado foi o fixo em alta velocidade de corte (75 m/min). Além das avarias apresentadas nos filetes 3, 4 e 5 das superfícies de folga do macho, Fig. 4.37 (b), pode-se destacar o detalhe da perda de material na porção final da ferramenta no quarto dente da primeira carreira, em função da deformação plástica ocorrida no contra-fio ou calcanhar da superfície de folga do macho de corte Fig. 4.37 (d). Esta perda de material no contra-fio ocorre como conseqüência da deformação plástica da crista que começa na aresta cortante levando à perda do detalonamento (condição criada, durante a fabricação da ferramenta, pela remoção de material na região traseira das cristas do macho, que produz folga e reduz o atrito durante o processo de rosqueamento), e se estende por todo o comprimento da crista, de tal forma que o material escoar em direção ao contra-fio, produzindo um acúmulo de material deformado nesta região da crista do filete (Fig. 4.37 (c)). Ao continuar o processo de deformação o material se rompe, formando uma cavidade, Figs. 4.37 (b e d). Cabe ressaltar que nesta ferramenta este processo se estendeu por vários filetes de tal forma que se observou rasgamento até o oitavo filete do macho.

Provavelmente isso ocorreu devido à falta de refrigeração, acarretando altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta, promovendo o aquecimento rápido da ferramenta de corte. Isto, possivelmente causou o amolecimento do material do macho,

conduzindo-o a deformação plástica. Devido às elevadas velocidades de corte, a temperatura aumenta nas zonas de cisalhamento, promovendo o aquecimento da superfície de saída da ferramenta e favorecendo as condições de aderência. Isto estende o fluxo de deformações plásticas à sub-superfície. Quanto maior a taxa de deformação, maior o nível de temperatura e da abrangência do fluxo plástico, contribuindo para a elevação dos níveis de microdureza (SALES, 1999).

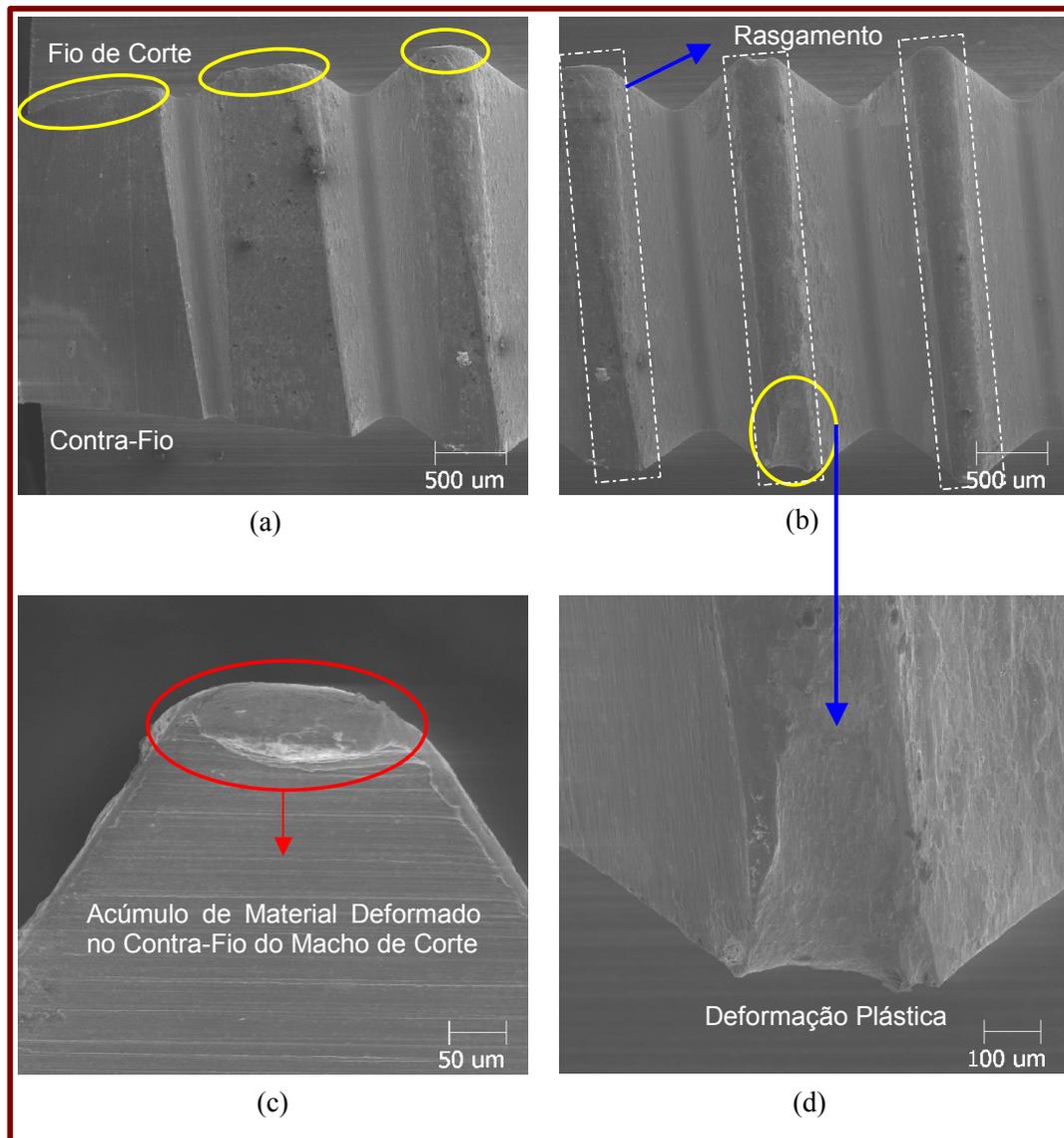


Figura 4.37 – Principais desgastes apresentados nos machos de corte sem revestimento, quando usinaram em alta velocidade de corte (75 m/min) com cabeçote fixo e sem refrigeração

Esse mecanismo de deformação plástica também foi observado nas ferramentas de HSS-E e PM, revestidas com TiN, usadas com *HSM*. Embora o número de roscas fabricados por essas ferramentas tenha sido maior, devido a presença da camada de TiN, após um certo número de roscas produzidas ocorria o destacamento do nitreto de titânio, e a ferramenta ficava com o substrato descoberto, passando a se comportar como uma ferramenta não revestida.

Para as ferramentas que sofreram tratamentos termoquímicos de nitretação os mecanismos de desgaste foram semelhantes aos observados nos machos sem revestimento. Houve adesão de material e observou-se riscos na direção de corte (superfície de folga) caracterizando o mecanismo de desgaste abrasivo. Como os testes ocorreram em alta velocidade de corte (75 m/min), observou-se o acúmulo de material deformado no contra-fio da ferramenta, conforme observado na Fig. 4.37. Embora o uso de MQL tenha diminuído o nível de desgaste em função do número de roscas fabricadas (para os machos nitretados), os mecanismos de desgaste foram semelhantes aos apresentados para as ferramentas sem revestimento.

4.4.6 – Mecanismos de desgaste apresentado nos machos utilizados com MQL

Embora o uso de MQL à base de soja, milho e canola, tenha aumentado a vida das ferramentas de corte testadas neste trabalho, constatou-se que a deformação plástica também existiu, principalmente na superfície de folga, especificamente no contra-fio da ferramenta. Tal deformação na crista pode ser vista na Fig. 4.38 onde é apresentada uma seqüência de fotomicrografias do macho HSS-E, sem revestimento, após usinar 560 roscas, com MQL. As fotos das Figs. 4.38 (a, b e c) apresentam em detalhe os desgastes nas arestas de corte e nas superfícies de folga dos primeiros dentes dessa ferramenta. Pode-se notar também que no quarto dente houve o rompimento do material no contra-fio do macho, devido à deformação plástica ocorrida nesta situação de corte. Ao continuar o processo de deformação o material se rompe e forma a cavidade apresentada na Fig. 4.37 (d).

Verifica-se através da Fig. 4.38 (d, e, f) a formação de um aglomerado de material do substrato do macho no contra-fio de praticamente todos os dentes do macho. Acredita-se que há o rompimento desse excesso de material no contra-fio do macho após o aumento do desgaste, durante o retorno da ferramenta dentro da rosca já usinada.

A presença dessa avaria nos machos testados com o uso de MQL é justificada pelo fato do fluido utilizado apresentar boas propriedades lubrificantes, mas pobres características refrigerantes. Dessa forma o fluido atua reduzindo o atrito e, portanto o calor gerado, mas não impede a elevação da temperatura na interface cavaco-ferramenta resultante da má refrigeração (retirada do calor gerado), principalmente em altas

velocidades de corte, exigindo ferramentas com coberturas mais eficientes. Mesmo que o uso de MQL permita a refrigeração através do ar comprimido, a técnica da mínima lubrificação não impede o aumento das temperaturas na superfície das ferramentas.

Embora tenha sido constatado que houve melhores resultados com o uso de óleo lubrificante no rosqueamento de ferro fundido, acredita-se que a lubrificação e, sobretudo a refrigeração não teve papel importante na retirada de calor da peça e da ferramenta, nas condições testadas, ou seja, com velocidades de corte de 75 m/min. Apesar da ferramenta sem revestimento utilizada com MQL (HSS-E SR MQL), ter fabricado 560 roscas (pelo critério do calibre) ela já apresentava níveis elevados de desgaste após usinar 320 roscas, inclusive apresentando rasgamento em alguns filetes.

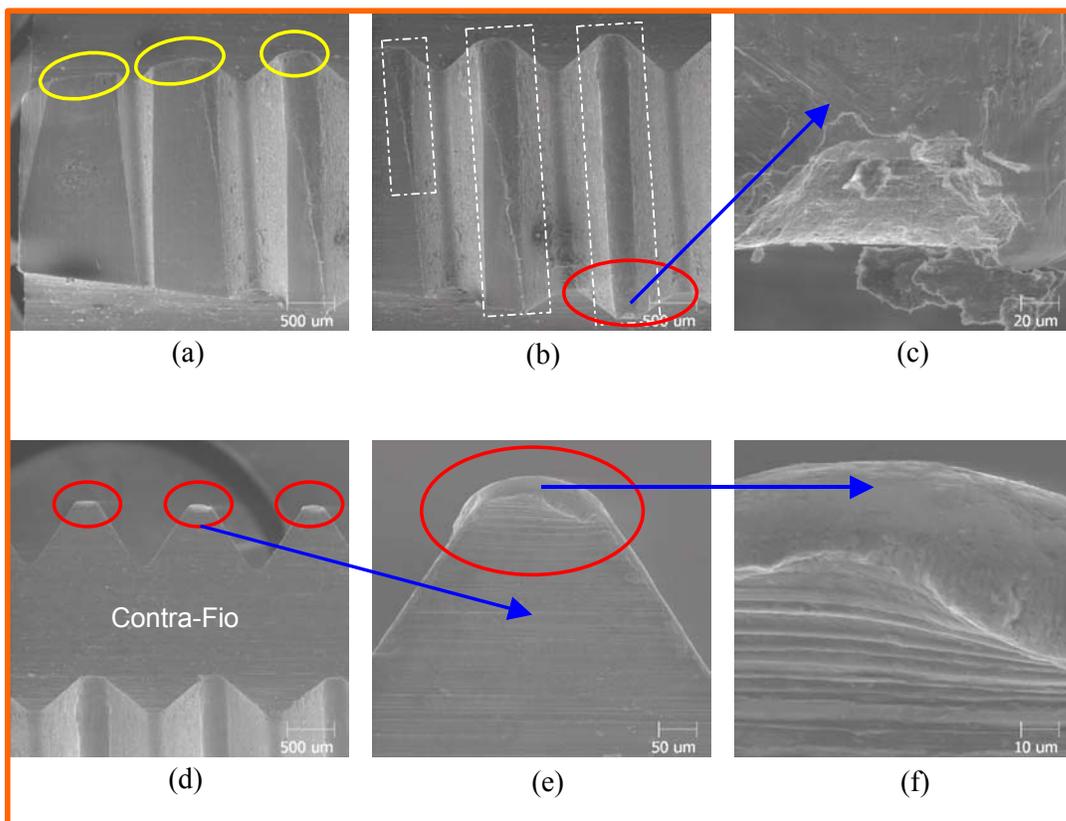


Figura 4.38 – Fotomicrografias de um Macho HSS-E sem revestimento, após usinar 560 roscas com velocidade de corte de 75 m/min, aplicando MQL; (a, b,c) desgastes, rasgamentos e deformação plástica; (d,e, f) formação de um aglomerado de material do substrato do macho por deformação nos contra-fios da ferramenta

Mesmo para as ferramentas revestidas com TiN onde foram aplicados MQL, com altas velocidades de corte (75 m/min), percebeu-se que os desgastes ocorreram com grande

intensidade. Na Fig. 4.39 observa-se fotomicrografias feitas no MEV da superfície de folga da ferramenta de HSS-E, revestida com TiN, após usinar 1000 roscas. Utilizou-se as técnicas de elétrons secundários (Fig. 4.39(a)) e elétrons retro-espalhados (Fig. 4.39(b, c, d, e, f)). A região clara nas fotos dessa figura equivale ao material da ferramenta mostrando que nestas regiões o revestimento foi arrancado deixando o substrato visível.

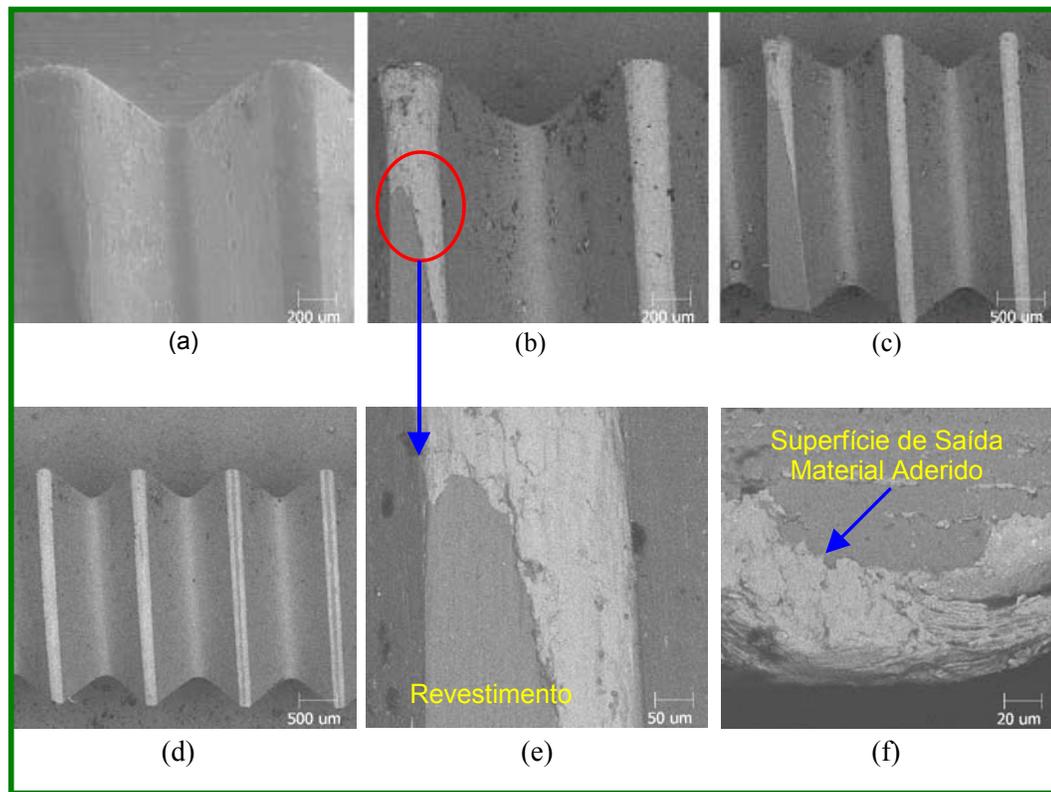


Figura 4.39 - Fotomicrografias feitas no MEV apresentando as formas de desgaste presentes no macho HSS-E revestido com TiN utilizando-se MQL : a) técnica de elétrons secundários; b), c), d), e) e f) técnica de elétrons retro-espalhados

Assim, observa-se claramente que houve desgaste excessivo em um dos filetes e rasgamento nos outros oito dentes seguintes. Cabe ressaltar que além do mecanismo de deformação plástica que levou ao rasgamento de alguns filetes das ferramentas utilizadas, outros dois mecanismos de desgaste estiveram presentes: abrasão e adesão. Na verdade o que parece ocorrer é uma evolução dos mecanismos abrasivo e adesivo para a deformação plástica com o decorrer da usinagem. Ou seja, a ferramenta em um estado avançado de desgaste, provocados pelos mecanismos adesivo e abrasivo, passa a gerar temperaturas cada vez maiores durante o corte o que resulta em um amolecimento do material da ferramenta e conseqüentemente em deformação plástica do filete.

4.4.7 Mecanismos de desgaste apresentado nos machos em função do tipo de cabeçote

Embora os mecanismos de desgaste fossem os mesmos para os dois cabeçotes, a forma como ocorreram esses desgastes merece uma análise mais criteriosa. Para o cabeçote auto-reversível a maioria das ferramentas apresentou um tipo de avaria não observada para o rosqueamento, com cabeçote fixo independente dos substratos, dos revestimentos e das velocidades de corte. Esse tipo de avaria será discutido a seguir.

Uma provável explicação para as avarias acontecidas na maioria das ferramentas, deste trabalho, pode estar relacionada com as forças resultantes, Fig. 4.40, encontradas na operação de rosqueamento interno com macho de corte. Para entender melhor o comportamento apresentado por F_z , deve-se ter em mente qual é a origem desta força. Segundo Sha; Ni; Wu, (1990), apud Reis (2004), existem três fontes possíveis para a força axial F_z durante o estágio de corte no rosqueamento:

- 1) Força normal sobre a superfície de folga nas condições de estado estável de corte;
- 2) Força normal sobre a superfície de folga na entrada da rosca;
- 3) Força normal sobre a superfície de saída nos machos de corte cujos canais não são retos

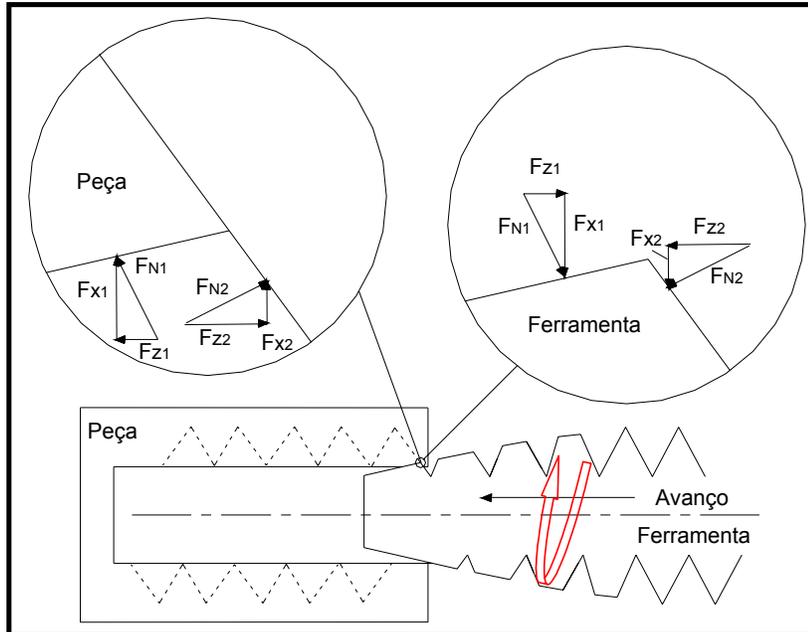


Figura 4.40 – Forças normais exercidas pela peça sobre a ferramenta e vice-versa, com suas respectivas componentes axiais e radiais (REIS, 2004)

Através da Fig. 4.41 pode-se comparar o perfil dos dentes de um macho novo (HSS-E TiN) com outros dentes do mesmo macho em fim de vida, após usinar 440 roscas. Na Fig. 4.41 (a) pode-se observar o início da parte cilíndrica do macho em estado original. Enquanto a 4.41 (b) apresenta o rasgamento em uma das extremidades do dente, comum à maioria dos machos que rosquearam com cabeçote fixo.

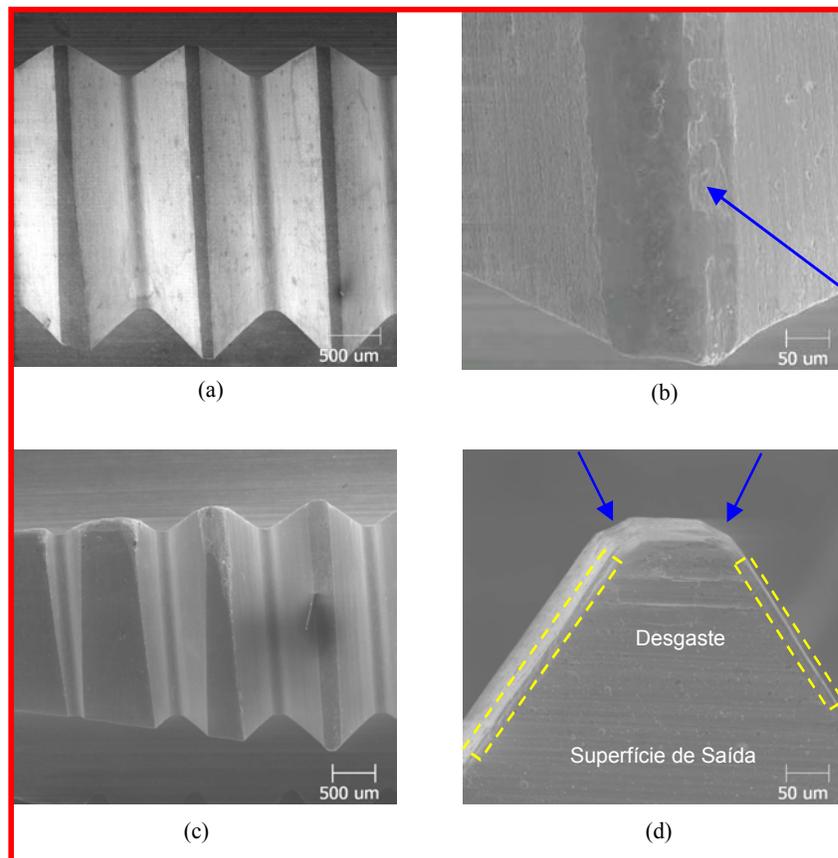


Figura 4.41 – Fotomicrografia apresentando detalhes dos tipos (formas) de desgaste apresentados nos machos de HSS-E revestidos com TiN quando usinaram com cabeçote fixo e auto-reversível; (a) macho novo; (b) macho de HSS-E TiN (fixo); (c) e (d) macho de HSS-E (auto-reversível)

Na Fig. 4.41 (c) verifica-se o perfil dos primeiros dentes de um macho (HSS-E TiN) que foi utilizado com cabeçote auto-reversível. Nota-se que esses dentes sofreram desgastes severos na aresta de corte, havendo também destacamento do revestimento em toda a extensão da superfície de folga. A Fig. 4.41 (d) apresenta o início do rasgamento do quinto dente do macho. Esse desgaste teve início após o quarto dente da ferramenta estar com um

nível de desgaste acentuado. O desgaste nos primeiros dentes da ferramenta proporcionou uma sobrecarga nos dentes posteriores, fazendo com que houvesse um aumento da taxa de sobremetal para os dentes cilíndricos.

A Fig. 4.42 ilustra bem o perfil desse desgaste, ilustrando o destacamento das camadas de revestimento em toda extensão da superfície de folga do macho, formando um chanfro de aproximadamente 45°.

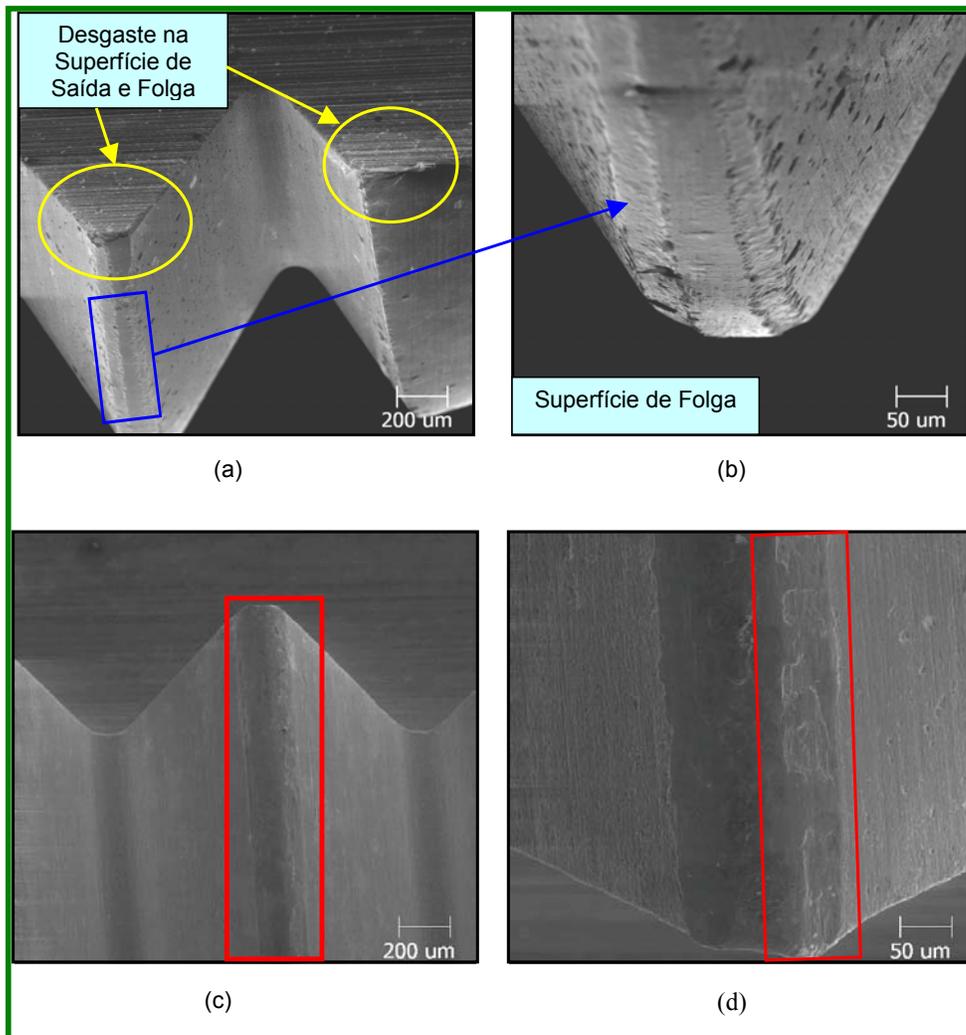


Figura 4.42 – Fotomicrografia da ferramenta HSS-PM revestida com TiN/TiAlN após usar 1000 roscas com uma velocidade de 37,5 m/min, utilizando cabeçote auto-reversível (a e b) e Ferramenta HSS-E revestida com TiN após usinar 720 roscas com uma velocidade de 37,5 m/min, utilizando cabeçote fixo (c e d)

Através de análises feitas no MEV, com elétrons retro-espalhados, verificou-se que o substrato do macho ficou descoberto. Acredita-se que a diferença da forma do desgaste entre os machos utilizados com cabeçotes fixo e auto-reversível esteja relacionado às forças envolvidas no corte e no retorno da ferramenta no furo rosqueado. Para o cabeçote fixo o esforço (torque) é maior no corte, pois o mesmo retorna sincronizado com o perfil da rosca fabricada. Para o cabeçote auto-reversível os dentes do macho servem como guia para o retorno, havendo esforços nos dois lados dos dentes do macho.

A Fig. 4.43 apresenta uma seqüência de fotos feitas no MEV das ferramentas de HSS revestidas com TiN, que foram usinadas com os cabeçotes fixo e auto-reversível.

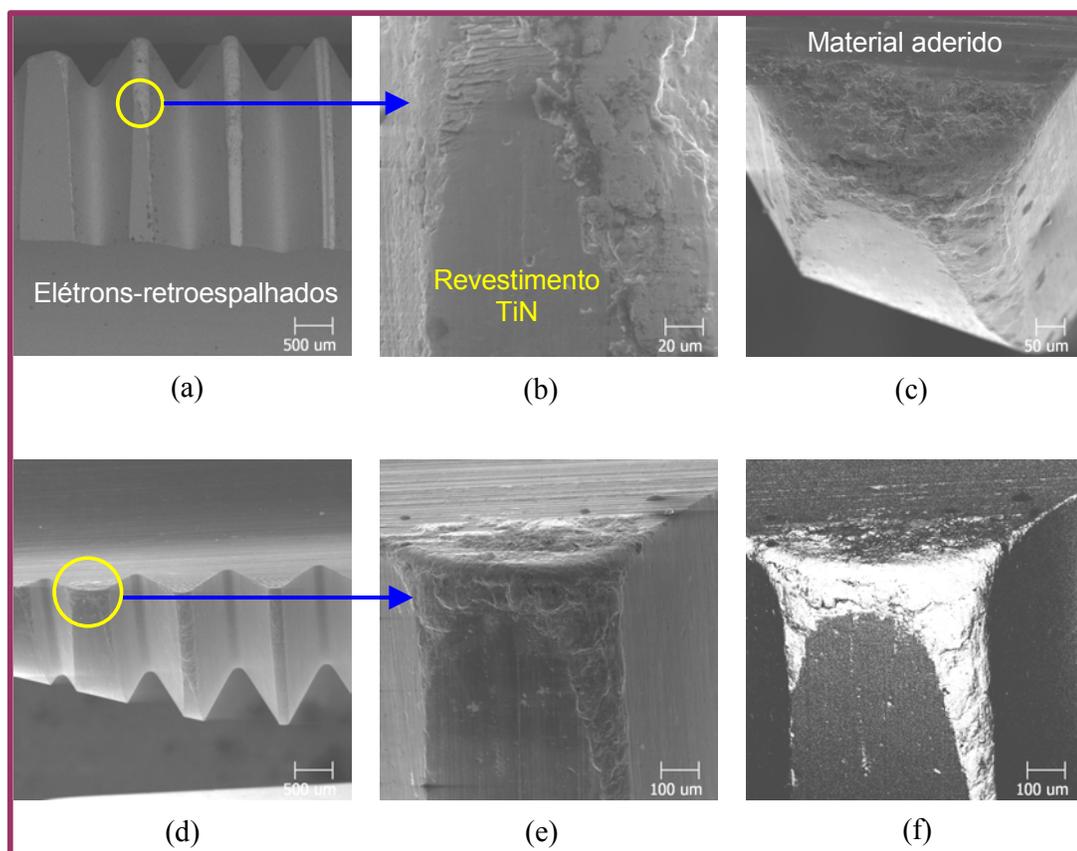


Figura 4.43 - Fotomicrografias feitas pelo MEV apresentando as formas de desgaste presentes na ferramenta (macho de HSS) revestida com TiN (seco), com velocidade de corte de 10 m/min cabeçote fixo: a), b) e c); cabeçote auto-reversível: d), e) e f)

Com ferramentas de HSS revestidas com TiN, foi possível fazer 1800 roscas na condição à seco, com os cabeçotes fixo e auto-reversível. Entretanto, verificou-se que as formas dos desgastes nas superfícies de saída e folga, foram parecidos com os desgastes

apresentados nas ferramentas de HSS-E e PM, revestidas com TiN, para as duas condições de velocidade de corte empregadas.

4.5 Qualidade das roscas fabricadas

A adesão de cavacos de ferro fundido nas roscas fabricadas e nas superfícies de saída e folga dos machos tem grande influência no desgaste e avaria das ferramentas. Verificou-se que para todas as condições de corte utilizadas nesta pesquisa, houve aderência de partículas e aglomerados de ferro fundido, tanto nas roscas fabricadas, como nas superfícies de flanco dos machos, independente dos revestimentos e das velocidades de corte desenvolvidas neste trabalho. O desprendimento desse material aderido pode acarretar prejuízos para as ferramentas de corte, pois partículas (microscópicas) de revestimento ou do próprio substrato podem se desprender do macho, provocando desgaste em suas superfícies de saída e de folga (*attrition*).

A Fig. 4.44 apresenta quatro fotomicrografias feitas no MEV, onde pode-se comparar o acabamento final de roscas fabricadas por ferramentas de HSS-PM, revestidas com TiN/TiAlN, usadas com velocidades de corte de 75 m/min, em duas situações: 1) macho novo e 2) macho em fim de vida. Para as ferramentas revestidas novas a ocorrência de material aderido nos flancos das roscas foi menor do que para as ferramentas em fim de vida, conforme a Fig. 4.44 (a). Já para as ferramentas em fim de vida, observa-se a presença de material aderido à superfície das roscas, Fig. 44 (b, c, d). Tal material pode ter várias origens. Acredita-se que as principais sejam: partículas provenientes de APC formada durante o processo; e pedaços de cavaco que são comprimidos contra a parede das roscas durante o corte e principalmente no retorno da ferramenta.

A mesma observação serve para as ferramentas sem revestimento, as quais apresentaram adesão, independente do estado de conservação do macho de corte. Essa mesma ocorrência foi observada para as ferramentas revestidas, em fim de vida, e portanto, com o revestimento já deteriorado.

Como dito anteriormente, tais partículas podem ter sua origem relacionada com a presença de cavacos tanto no estágio de corte como no retorno das ferramentas. Esta condição é acentuada neste trabalho onde as roscas foram feitas em furos cegos, não permitindo que os cavacos fossem eliminados no fim do furo. Desta forma estes cavacos seriam comprimidos contra a peça pela ferramenta, principalmente durante o estágio de retorno. O escorregamento entre o contra-corpo (macho) e o corpo (ferro fundido cinzento), além dos fragmentos de desgaste provenientes da ferramenta ou do material, são os

maiores responsáveis pelos desgastes abrasivos ocorridos neste tipo de operação. Além disso, os cavacos aderidos são comprimidos contra a ferramenta ou a peça, aumentando a dureza pelo encruamento dos cavacos (ZUM GAHR, 1987).

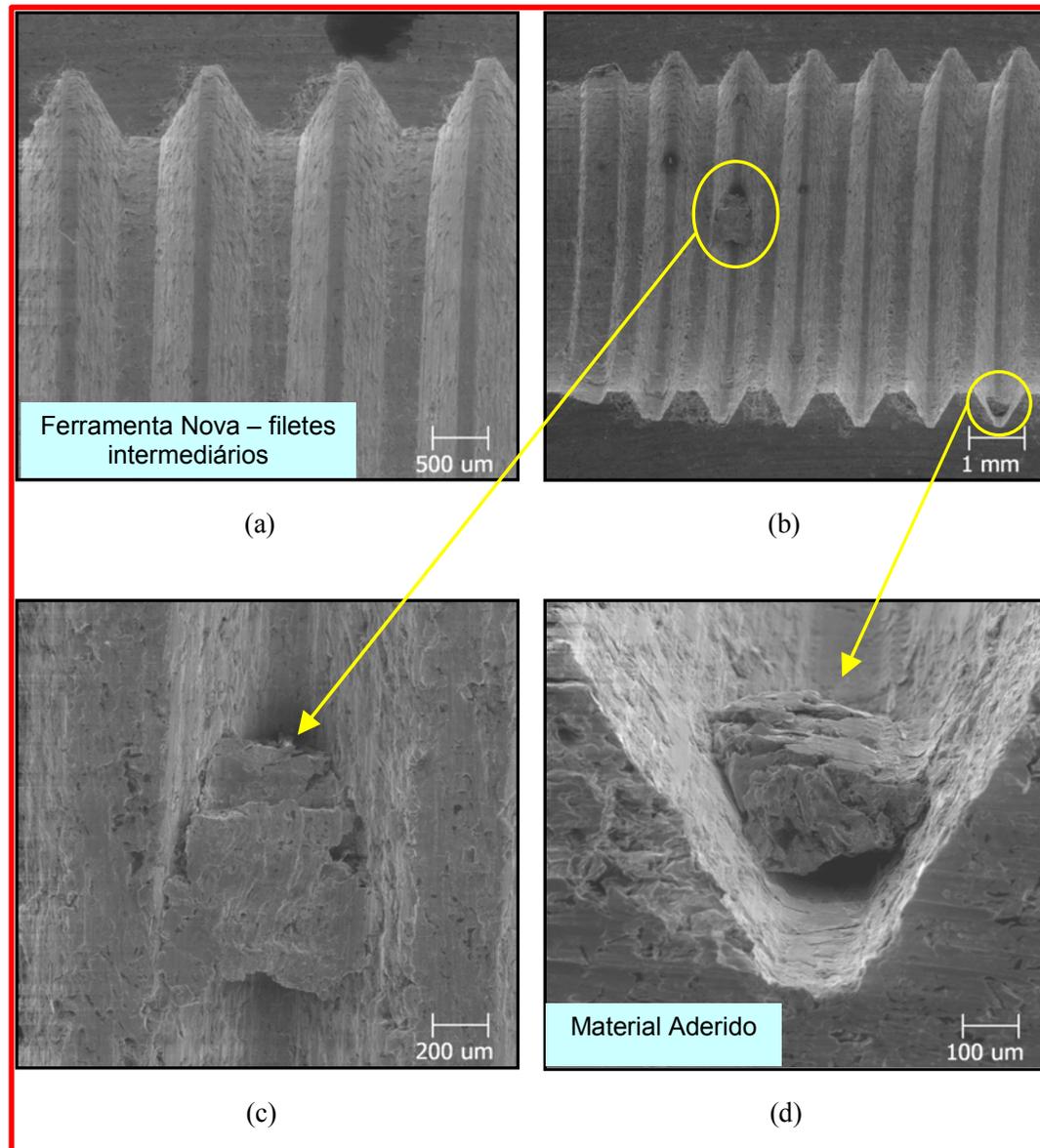


Figura 4.44 – Fotomicrografias das roscas fabricadas com machos PM TiN/TiAlN novo (a) e em fim de vida (b, c e d) com alta velocidade de corte (75 m/min) e detalhes do material aderido

A Fig. 4.45 mostra a adesão de ferro fundido nas roscas fabricadas, com as velocidades de corte moderada (37,5 m/min). A adesão foi observada em todas as situações

de corte, sendo menor para as ferramentas novas. Acredita-se que os motivos são os mesmos já discutidos na seção anterior.

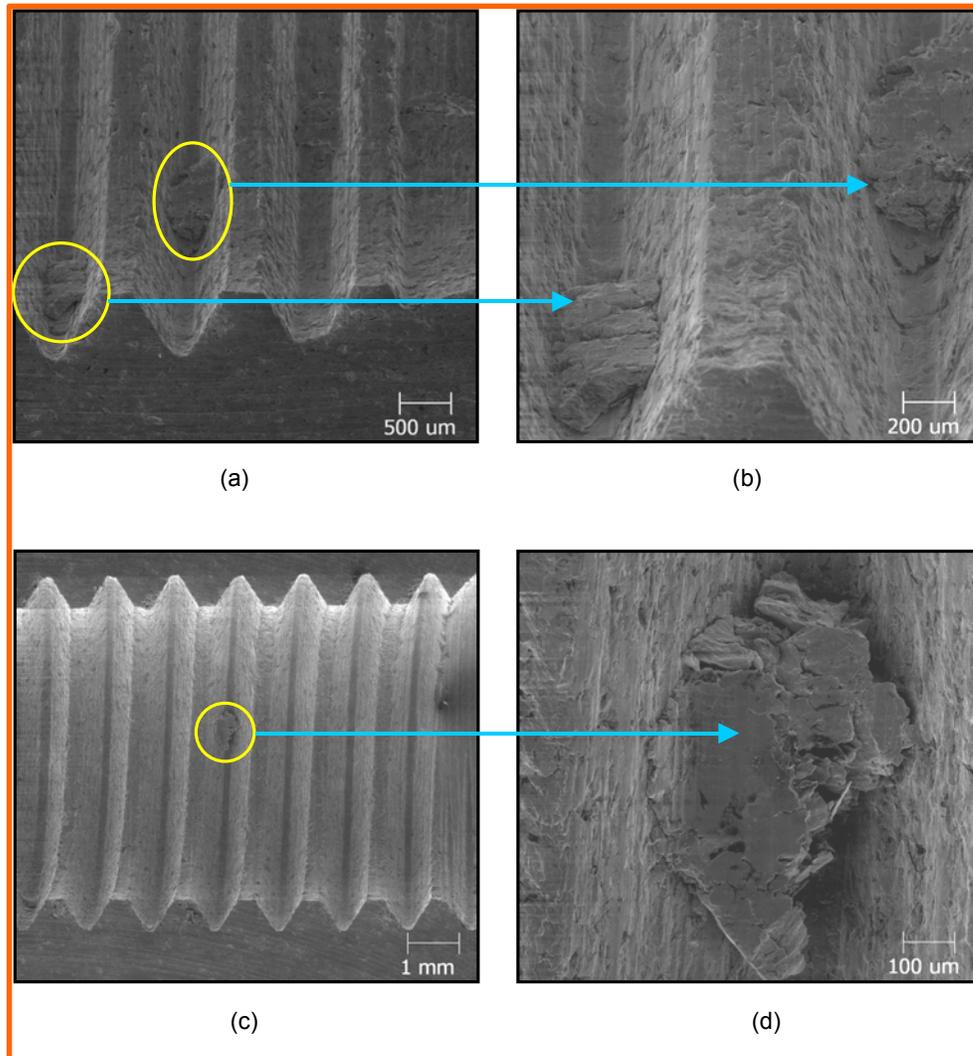


Figura 4.45 – Fotomicrografias das roscas fabricadas com machos HSS-E TiN/TiAlN (a e b) e ferramenta PM TiN/TiAlN (c e d); ambas com cabeçote auto-reversível e com velocidade de corte de 37,5 m/min

4.6 Torque no rosqueamento

Para facilitar o entendimento do comportamento do sinal de torque medido durante o rosqueamento interno com macho de corte, foram plotados gráficos com baixas velocidades

de corte, com o intuito de determinar os três estágios em que se divide esse processo: 1) corte; 2) repouso (parada da ferramenta no final do furo); 3) retorno da ferramenta. A Fig. 4.46 mostra o comportamento do torque durante o rosqueamento com mandril fixo e velocidade de corte de 10 m/min, com uma ferramenta nova.

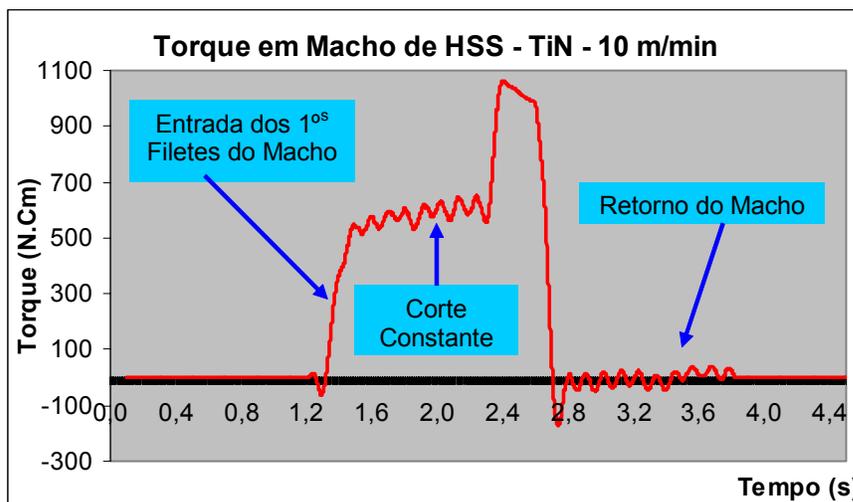


Figura 4.46 – Sinal de torque no rosqueamento com cabeçote fixo - velocidade de corte de 10 m/min

Para facilitar a interpretação o sinal foi filtrado, apresentando uma média móvel de cem pontos. Observa-se que há um aumento no sinal do torque a partir do momento que ocorre o contato do primeiro dente do macho (região cônica) com a peça. Esse aumento persiste até a entrada do sexto dente do macho, o que equivale no caso específico das ferramentas utilizadas neste trabalho, à penetração da região cônica da ferramenta na peça, já que tais ferramentas possuem seis dentes na região cônica, sendo dois em cada carreira. Em seguida, após a inserção do sétimo dente do macho (o primeiro da parte cilíndrica), o sinal do torque permanece praticamente constante, podendo haver pequenas alterações, devido principalmente ao enclausuramento dos cavacos, conforme descrito por Cao e Sutherland, (2002). Após um certo tempo, o sinal de torque sobe novamente, quase que instantaneamente, devido à frenagem do motor da máquina, que proporciona uma diminuição da velocidade de corte, aumentando as forças de corte. Esse valor fica registrado, pois o dinamômetro continua a adquirir o sinal, até haver a inversão da rotação e conseqüentemente o retorno da ferramenta. Para o retorno do macho o sinal do torque diminui drasticamente, podendo apresentar até um sinal negativo, devido a reversão do eixo-árvore da máquina e principalmente ao fato de que a ferramenta encontra-se travada

no final da rosca. À medida que os dentes do macho vão saindo da peça o sinal tende a normalizar, ficando muito próximo de zero. Se o desgaste for muito acentuado, o torque apresenta grandes valores no retorno do macho. Altos valores do sinal de torque durante o retorno da ferramenta podem também estar relacionados ao grande volume de cavacos entre os canais e os dentes da ferramenta, como, por exemplo, quando houver fluido de corte na usinagem de ferros fundidos, conforme será abordado posteriormente.

4.6.1 Comparação do Torque medido com as ferramentas novas utilizando cabeçote fixo e auto-reversível (10 m/min).

Para compreender melhor os sinais de torque buscou-se relacionar a influência dos dois cabeçotes de fixação (auto-reversível e fixo) no rosqueamento com ferramentas no estado original (nova). A Fig. 4.47 apresenta a configuração dos torques medidos com esses cabeçotes, em baixa velocidade de corte (10 m/min), em função do tempo de usinagem.

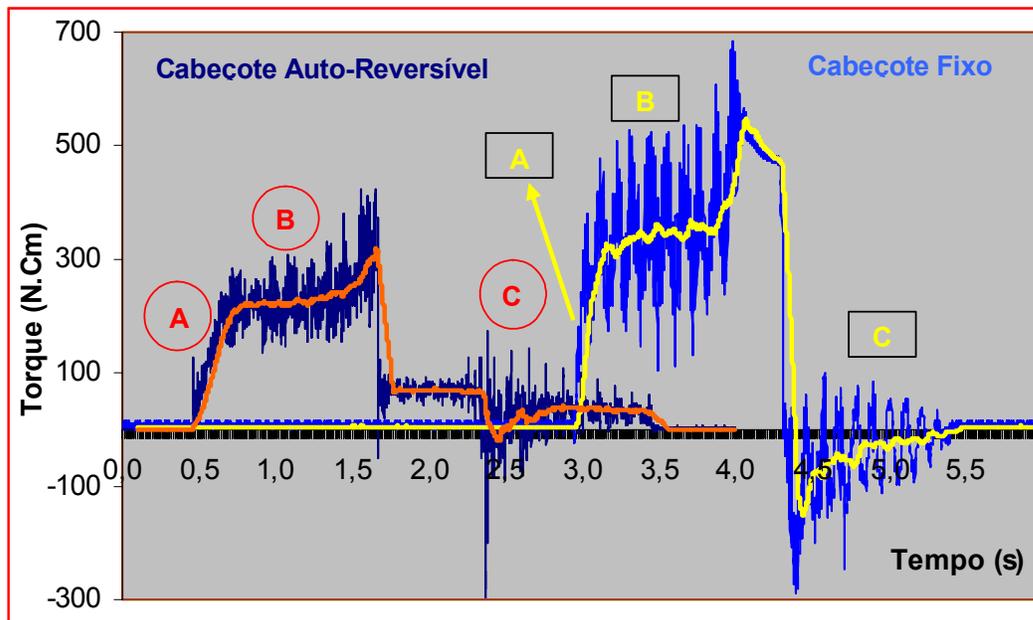


Figura 4.47 – Configuração do torque medido com cabeçote Auto-Reversível e Fixo (10 m/min). “A” constitui a entrada dos primeiros dentes. “B” representa o avanço dos dentes cilíndricos do macho e “C” significa o retorno do macho no furo rosqueado

Verifica-se que os dois sinais de torque apresentam valores distintos, mas a forma possui características semelhantes, com pequenas alterações no traçado dos gráficos. Em ambos os gráficos podem-se verificar o aumento acentuado do torque no momento da

entrada dos primeiros dentes do macho (parte cônica da ferramenta), representada pela letra “A”. Em seguida é possível verificar que o torque aumenta, mas em proporção muito inferior à fase inicial, representando a penetração do macho ao longo da rosca, representado por “B”. E finalmente há a reversão (para o cabeçote fixo é a máquina que inverte a rotação) e conseqüentemente o retorno da ferramenta, representado pela letra “C”. Para o cabeçote auto-reversível o eixo-árvore da máquina não pára de girar e quem faz a inversão de rotação é o próprio cabeçote, através de um conjunto de engrenagens internas.

Para os dois cabeçotes é possível verificar que o torque no retorno do macho possui valores negativos. Isto pode ser explicado em função da inversão da rotação da máquina (cabeçote fixo) ou do cabeçote auto-reversível, promovendo forças no sentido oposto ao corte, pois o macho encontra-se preso aos cavacos (furo cego).

4.6.2 Comparação do Torque medido com as ferramentas novas e em fim de vida utilizando cabeçote fixo com velocidades altas e moderadas

A Fig. 4.48 apresenta o torque medido entre duas ferramentas novas, fabricadas pela metalurgia do pó, revestidas com TiN/TiAlN, empregadas com duas velocidades distintas (75 e 37,5 m/min), utilizando o cabeçote fixo. Os valores do torque foram muito próximos, apresentando alguns picos superiores para a ferramenta que usinou com velocidade de corte moderada (37,5 m/min).

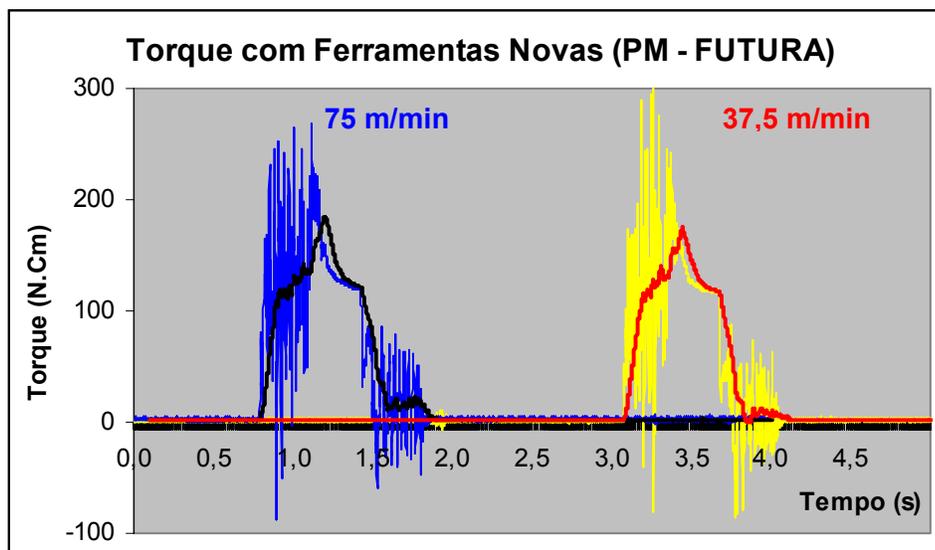


Figura 4.48 – Comparação do torque entre dois machos de corte novos, utilizando o cabeçote fixo em duas velocidades de corte: a) 75 m/min e b) 37,5 m/min

Observa-se que os valores do torque foram relativamente baixos (aproximadamente 200 N.Cm). Já o torque medido com uma ferramenta em fim de vida esses valores podem ser muito diferentes. Na Fig. 4.49 são apresentados os gráficos das médias móveis dos sinais de torque medida no rosqueamento com ferramentas novas e desgastada, já em fim de vida. Nesta figura fica evidenciado o aumento do torque no final da vida do macho.

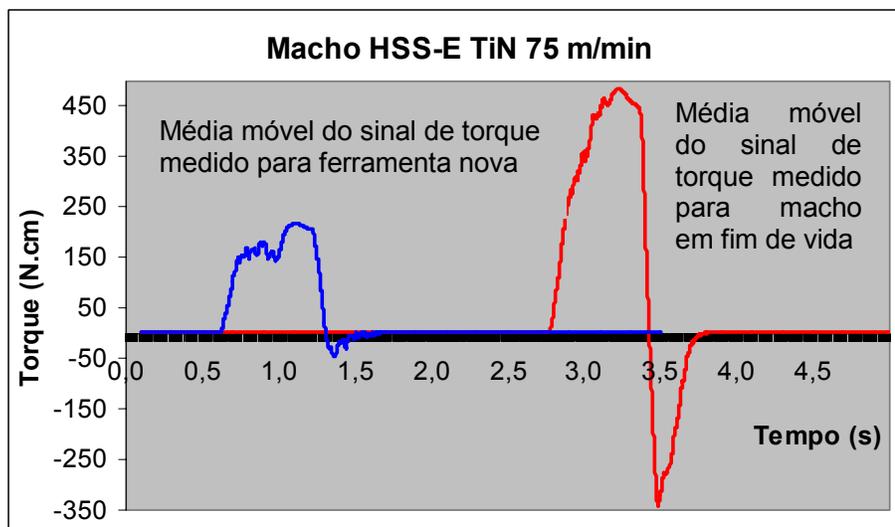


Figura 4.49 – Médias móveis dos torques medidos em duas ferramentas de HSS-E revestidas com nitreto de titânio, sendo a primeira (nova) e a segunda em fim de vida após usinar 320 roscas, com cabeçote fixo

O valor do torque para o macho HSS-E revestido com TiN (novo) foi de aproximadamente 200 N.Cm. Essa mesma ferramenta ao final de vida (após usinar 320 roscas com 75 m/min de velocidade de corte) apresentou um valor médio de torque superior à 450 N.Cm. Conforme foi discutido anteriormente, o desgaste nos primeiros dentes desse macho foi muito acentuado. Houve destacamento do revestimento em quase todos os dentes do macho, o que aumentou o contato do substrato da ferramenta com o corpo de prova. Além disso, a ausência dos revestimentos aumenta a aderência do ferro fundido na ferramenta, proporcionando maiores desgastes e conseqüentemente aumentando o torque.

A Fig. 4.50 apresenta algumas fotomicrografias feitas no MEV, caracterizando a adesão. Dependendo do estado de desgaste do macho e da quantidade de cavacos presos nos canais da ferramenta, os valores de torque podem ser alterados, independentes do tipo de cabeçote e das velocidades utilizadas. Em condições normais (macho novo), os revestimentos facilitam o escoamento dos cavacos sobre as superfícies das ferramentas

revestidas, pois o atrito é reduzido. Contudo, dependendo do grau de desgaste dos machos, o atrito e conseqüentemente o torque são maiores, devido à ausência dos revestimentos.

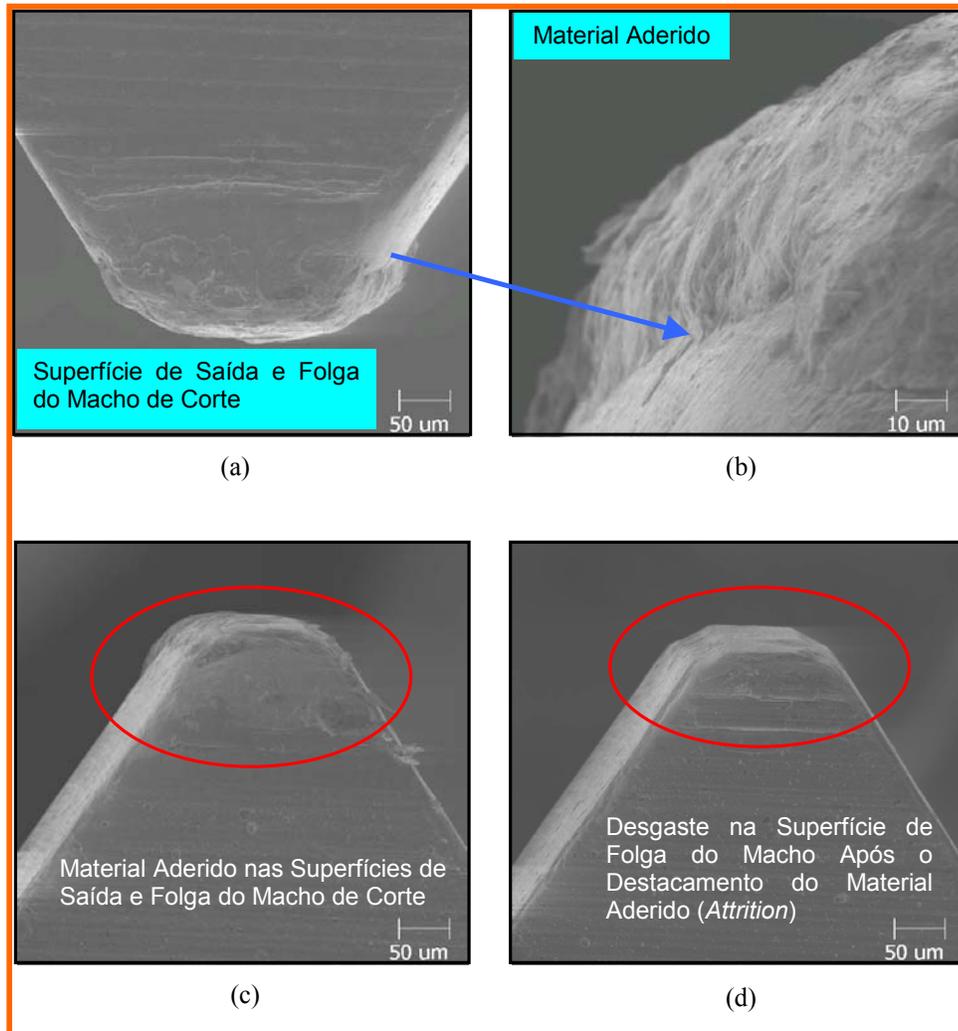


Figura 4. 50 – Fotomicrografias ilustrando a presença de material aderido na superfície de saída e folga dos machos HSS-E TiN (a e b); e PM – TiN/TiAlN (c e d) com cabeçote fixo

4.6.3 Influência dos revestimentos no torque

A Fig. 4.51 apresenta o torque medido na usinagem com duas ferramentas (novas), fabricadas pelo método convencional (HSS-E), sendo uma revestida com nitreto de titânio (TiN) e outra sem revestimento. Os testes foram realizados com velocidade de corte de 75 m/min, utilizando o cabeçote fixo. Pode-se constatar que o torque foi significativamente menor para a ferramenta revestida com TiN. Pode-se atribuir esses resultados à redução da aderência e atrito entre a ferramenta e a peça, diminuindo as forças decorrentes da fricção

entre o macho, a peça e os cavacos (EZUGWU; OKEKE; MACHADO, 1999; YUHARA, 2000; SCHULZ et al., 2000; GUANI; CHOUDHURY; MASJUKI, 2004; REIS, 2004).

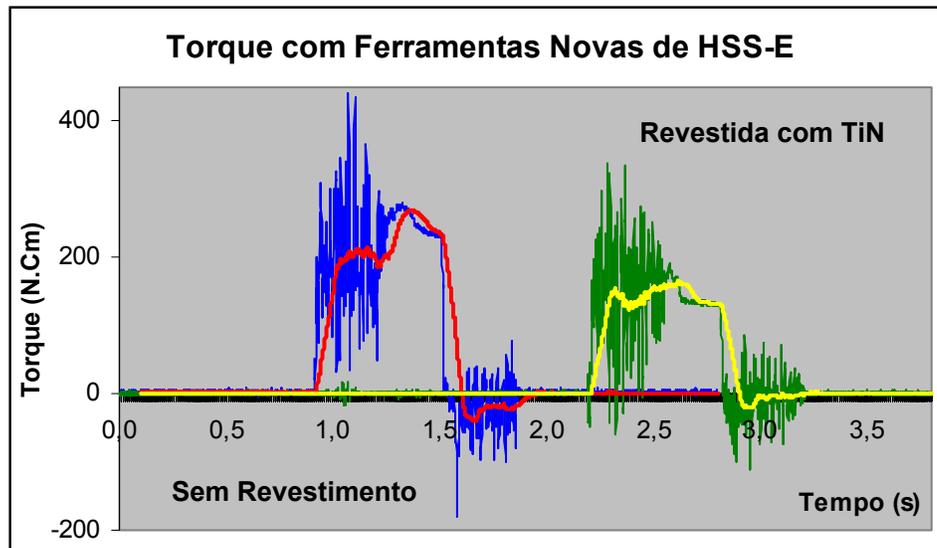


Figura 4.51 – Influência do revestimento TiN no sinal de torque gerado no rosqueamento do ferro fundido cinzento GH 190 utilizando o cabeçote fixo com uma velocidade de corte de 75 m/min

Neste caso os valores registrados para o torque quando a ferramenta estava retornando também foram pouco significativos. Quando a ferramenta encontra-se desgastada, o torque aumenta tanto no corte como no retorno, conforme será descrito posteriormente. Além disso, o sinal de torque é transiente, pois os cavacos podem ficar enclausurados nos canais dos machos, provocando alterações neste sinal (CAO; SUTHERLAND, 2002).

Outro fator que pode aumentar o torque no rosqueamento de ferro fundido cinzento é a condição de lubrificação.

4.6.4 Influência da lubrificação no rosqueamento interno com macho de corte

Nas Figs. 4.52 e 4.53, são plotados respectivamente os gráficos das médias móveis dos sinais de torque medidos no rosqueamento, com machos de HSS-E sem revestimento e revestidos com TiN, em altas velocidades de corte utilizando cabeçote fixo nas condições a seco e com MQL. Verificou-se que o sinal de torque foi alto em todas as condições, se comparados aos medidos no rosqueamento com as ferramentas revestidas com TiN/TiAlN,

que será abordado à seguir. Percebe-se também que para a ferramenta sem revestimento, o torque na condição a seco, foi menor que o medido quando se aplicou MQL.

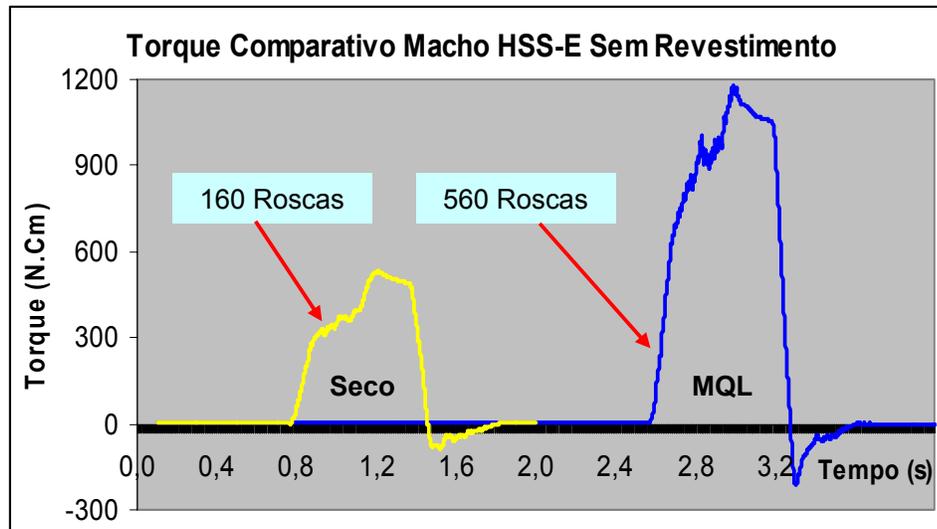


Figura 4.52 - Médias móveis dos torques medidos em duas ferramentas de HSS-E sem revestimento com alta velocidade de corte utilizando cabeçote fixo nas condições a seco e com MQL

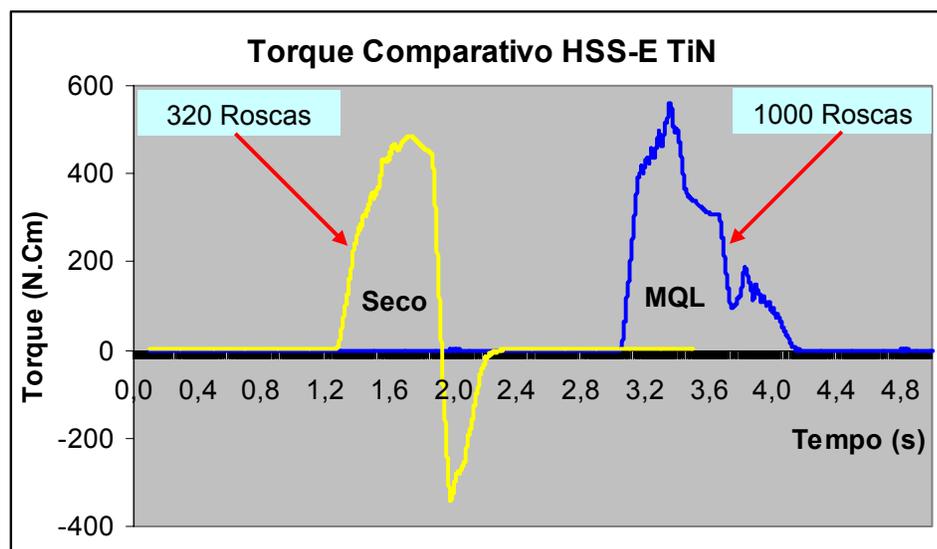


Figura 4.53 – Médias móveis dos torques medidos em duas ferramentas de HSS-E revestidas com TiN com alta velocidade de corte utilizando cabeçote fixo nas condições a seco e com MQL

Acredita-se que os cavacos em contato com o fluido de corte tenham formado uma pasta cinzenta, a qual preencheu os canais do macho, assim como o espaço vazio entre os dentes da ferramenta, aumentando o contato entre a peça e o macho. Cao e Sutherland, (2002), fizeram um estudo de rosqueamento usando diversos tipos de lubrificantes, em aço e mediram o torque em diversas situações de corte. Foi comprovado que o fato de usar óleo lubrificante nesta operação de usinagem não reduziu as forças de corte e que o torque é muito inconsistente e varia de acordo com o enclausuramento dos cavacos, que pode ser o maior motivo da quebra por torção de muitas ferramentas de rosquear.

A Fig. 4.54 apresenta a condição que fica os canais de um macho de corte, após usinar ferro fundido cinzento com óleo lubrificante. Pode-se verificar o empacotamento dos cavacos entre os quatro canais e filetes da ferramenta (DA MOTA et al., 2005).

Observou-se neste trabalho também que os valores do torque eram muito variados. Mesmo repetindo os testes em uma seqüência de três furos, nas mesmas condições de usinagem, os resultados do torque eram distintos. Essa variação aconteceu para todos os testes, independente dos revestimentos, velocidades de corte, tipo de cabeçote e lubrificação. Isso comprova a inconsistência do valor do torque para o rosqueamento.



Figura 4.54 - Fotos ilustrativas de um macho de corte após usinar ferro fundido cinzento com óleo lubrificante (MQL)

4.6.5 Torque medido para as ferramentas revestidas com TiN/TiAlN

A Fig. 4.55 mostra o desempenho das ferramentas revestidas com multicamadas (TiN/TiAlN), nas condições de velocidade de corte alta e moderada, sendo utilizado cabeçote fixo. Observa-se que o sinal do torque durante o estágio de corte foi superior para a velocidade moderada. Esse comportamento a princípio confirma o que diz a literatura corrente (TRENT; WRIGHT, 2000; MÜLLER, 2004; MACHADO; DA SILVA, 2004;), segundo a qual a temperatura na usinagem aumenta proporcionalmente com as velocidades de corte,

favorecendo a deformação plástica do material a ser usinado, nas zonas de cisalhamento primária e secundária, diminuindo as forças de corte.

Entretanto, o nível de desgaste das ferramentas e a quantidade de cavacos enclausurados nos canais e nos dentes do macho também têm grande influência nos valores dos sinais do torque (CAO; SUTHERLAND, 2002), conforme descrito anteriormente. Verifica-se que o macho que usinou com 75 m/min apresentou um torque negativo (durante o estágio de retorno) muito superior à outra ferramenta, comprovando o seu alto nível de desgaste ou caracterizando a presença de material aderido na ferramenta, devido ao fato da ausência do revestimento. Todas as ferramentas deste trabalho foram observadas em microscópio ótico e eletrônico de varredura, o que permitiu constatar que houve a presença de desgastes e avarias, principalmente na superfície de folga dos machos analisados. Assim, a ferramenta que usinou com alta velocidade de corte apresentou lascamento na superfície de folga dos primeiros dentes no final da vida. Já o macho que rosqueou com velocidade de corte moderada apresentou material aderido na superfície de saída, desgaste de flanco e lascamentos na superfície de folga. Provavelmente isso provocou o maior torque medido durante o estágio de corte, além da temperatura ser inferior, quando da comparação com ao rosqueamento em alta velocidade.

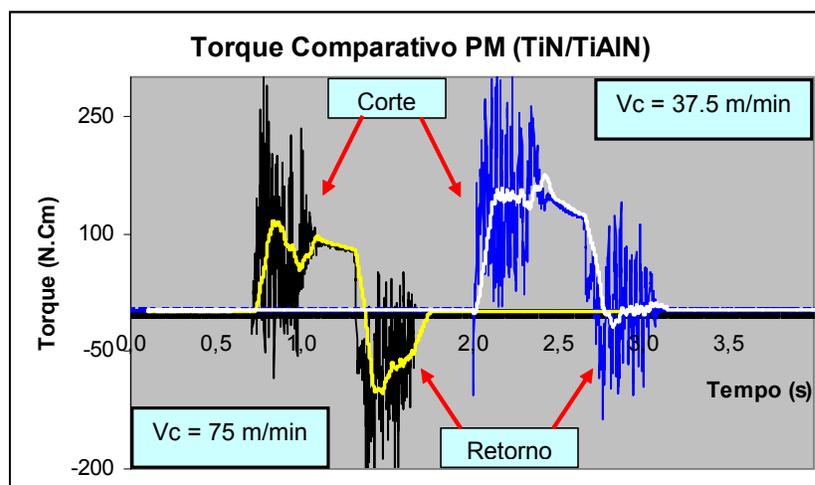


Figura 4.55 – Torque comparativo entre machos revestidos com TiN/TiAlN com velocidades de corte alta e moderada, utilizando cabeçote fixo

4.6.6 Torque medido para as ferramentas revestidas com TiN e TiN/TiAlN

Pode-se dizer que o torque para as ferramentas revestidas com nitreto de titânio (TiN), em fim de vida, é superior ao torque medido com as ferramentas revestidas com

multicamadas (TiN/TiAlN). Atribui-se esse fato ao alto grau de desgaste apresentado pelas ferramentas revestidas com TiN, deixando os substratos descobertos, aumentando o atrito entre a peça e a ferramenta de corte. Avaliando-se diversos gráficos, notou-se que as ferramentas revestidas com nitreto de titânio (TiN) sofreram maiores desgastes, pois o valor do torque foi significativamente maior.

A Fig. 4.56 mostra a comparação entre o torque medido entre duas ferramentas revestidas com multicamadas de TiN/TiAlN e TiN, respectivamente em final de vida. Observa-se que os valores do torque possuem pequenas diferenças. Entretanto, pode-se ressaltar que o torque para o retorno foi maior para a ferramenta revestida com TiN.

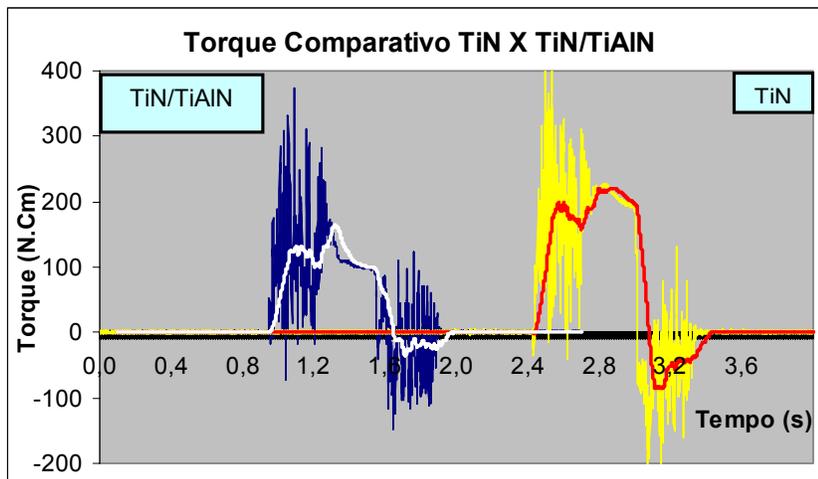


Figura 4.56 – Torque entre dois machos de corte fabricados pela Metalurgia do Pó, revestidos com multicamadas de TiN/TiAlN e TiN, utilizados em alta velocidade de corte (75 m/min)

4.6.7 Torque medido para os dois cabeçotes (fixo e auto-reversível)

Para comparar o comportamento do torque dos cabeçotes utilizou-se somente o resultado obtido durante a usinagem com velocidades moderadas (37,5 m/min) e baixas (10 m/min). Em média, os sinais de torque medidos nos ensaios com cabeçote alto-reversível apresentaram valores superiores aos medidos na usinagem com cabeçote fixo, conforme se observa nas Fig. 4.57. Neste caso, as duas ferramentas produziram o máximo de roscas prevista neste trabalho (1000 roscas).

Entretanto, dependendo do estado de desgaste do macho e da quantidade de cavacos presos nos canais da ferramenta, os valores podem ser alterados, independentes do tipo de cabeçote e das velocidades utilizadas.

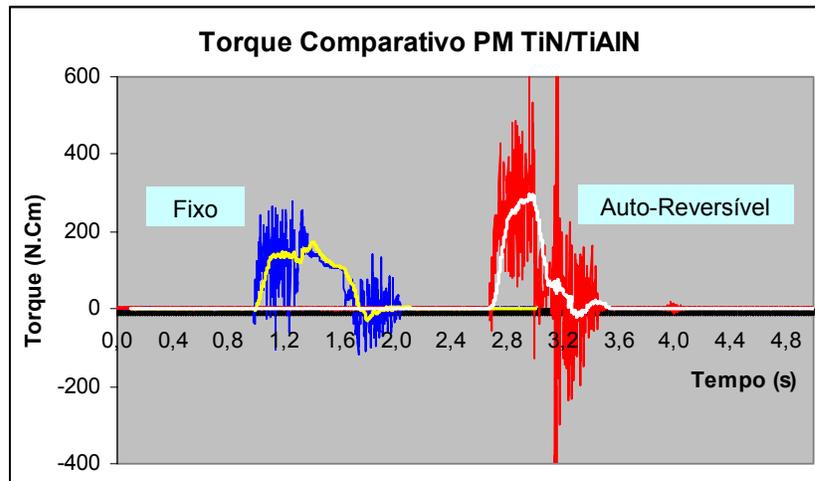


Figura 4.57 - Torque comparativo entre machos revestidos com multicamadas de TiN/TiAlN com cabeçote fixo e auto-reversível, com velocidade de corte de 37,5 m/min

A Fig. 4.58 mostra o torque para duas ferramentas (machos HSS-E TiN), em fim de vida. Para o macho que usinou com o cabeçote fixo foram feitas 720 roscas e o torque ficou em torno de 200 N.Cm. Já para a outra ferramenta (cabeçote auto-reversível), foram feitas 440 roscas e o torque foi superior, chegando próximo a 400 N.Cm (em média).

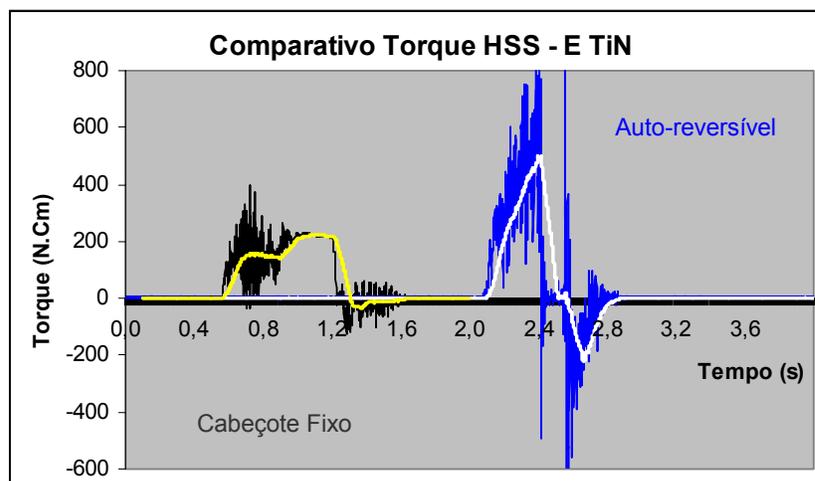


Figura 4.58 - Torque comparativo entre machos revestidos com TiN, utilizando cabeçote fixo e auto-reversível, com velocidades moderadas

CAPÍTULO V

Conclusões

Os resultados desse trabalho permitem afirmar que:

- O aumento da velocidade de corte reduziu a vida das ferramentas (n° de roscas usinadas), que o revestimento com multicamadas de TiN/TiAlN teve desempenho bem superior (vida e resistência ao desgaste) ao das ferramentas sem revestimento e revestidas somente com TiN. Além disso, o tipo de substrato não acarretou mudanças significativas na vida das ferramentas revestidas que usinaram com 75 m/min, mas foi relevante para as velocidades de corte moderadas (37,5 m/min). Já o tipo de cabeçote teve influência no número de roscas fabricadas, pois o cabeçote fixo conseguiu fabricar aproximadamente 16% de roscas a mais do que o cabeçote auto-reversível ($V_c = 37,5$ m/min). Ficou evidente também que o uso de MQL no rosqueamento de ferro fundido cinzento aumentou significativamente a vida das ferramentas.
- Para o cabeçote fixo rosquear em alta velocidade de corte é necessário prever um espaço entre a peça e a ferramenta, com o objetivo de garantir a velocidade programada após a aceleração sincronizada da velocidade e do avanço de corte. Entretanto, essas velocidades (corte e avanço), não são constantes até o final da rosca (furo cego). A máquina necessita de um intervalo de tempo para desacelerar o eixo-árvore e parar no final da rosca. Isso, conseqüentemente, aumentará o tempo de usinagem e os custos de fabricação.

- O rosqueamento com cabeçote auto-reversível permite usinar com velocidade de corte constante. Contudo, para usinar roscas com furos não passantes (cegos) com medidas precisas esse cabeçote não é recomendado, pois a posição de parada do macho não é exata, ao contrário do acontece com o cabeçote fixo (quando programado com encoder).
- A abrasão deve ter sido o principal mecanismo de desgaste predominante em todas as ferramentas utilizadas neste trabalho, embora as fotos feitas no MEV não mostraram com clareza tais evidências. A adesão foi constatada em quase todas as ferramentas analisadas. No entanto, a deformação plástica foi o principal processo de destruição das ferramentas de corte, principalmente no contra-fio dos machos, quando utilizadas com 75 m/min.
- Os sinais de torque permitiram fazer análises do estado de desgaste dos machos, apresentando resultados que possibilitaram comparar o desempenho dos revestimentos, bem como a influencia da velocidade de corte na vida das ferramentas e o desempenho dos cabeçotes fixo e auto-reversível.
- O torque foi maior para as ferramentas sem revestimento e revestidas somente com TiN. O fato de usar MQL (Mínima Quantidade de Lubrificação) em ferro fundido cinzento, não diminuiu o torque. Entretanto, a vida das ferramentas aumentou aproximadamente dois terços, quando comparadas com as ferramentas que usinaram a seco.
- A presença de material aderido na superfície das roscas usinadas e a grande quantidade de cavacos nos canais e nos filetes dos machos proporcionaram variações no torque. O entupimento dos espaços vazios entre a peça e a ferramenta gerou o aumento do torque, proporcionando picos nos gráficos de torque.
- As ferramentas que atingiram alto grau de desgaste proporcionaram piores qualidades das roscas fabricadas.

CAPÍTULO VI

Proposta para trabalhos futuros

A metodologia empregada neste trabalho suscitou dúvidas que fazem jus a investigação posterior, tais como:

1. Investigar o desempenho dos machos revestidos, utilizados neste trabalho, em altas velocidades de corte empregando outros tipos de materiais, como o ferro fundido vermicular e aços de diversas composições.
2. Averiguar o comportamento do sinal de torque e da força de corte no rosqueamento de aços e ferros fundidos, com machos revestidos com outros revestimentos, como o Alcrona e Helica. O uso de fluidos de corte poderá ser investigado na usinagem dos aços.
3. Pesquisar a importância do sincronismo de avanço e velocidade de corte no rosqueamento interno com machos de corte, utilizando máquinas CNC de diversos fabricantes, aplicando técnicas de filmagem de alta velocidade.
4. Investigar a formação dos cavacos em furos cegos e passantes em diversos materiais, utilizando machos de corte com geometrias distintas, e com substratos de metal duro.
5. Fazer uma análise de custos dos processos de rosqueamento, comparando os desempenhos dos dois cabeçotes utilizados neste trabalho (fixo e auto-reversível).

CAPÍTULO VII

Referências bibliográficas

AGAPIOU, J.S. Evaluation of the effect of high speed machining on tapping. **Journal of Engineering for Industry** – Transactions of the ASME, v. 116, n.4, p. 457-462, nov. 1994.

ARTER, R. K. Coated-Cobalt Taps Run Long And Hot. **Tooling & Production**. v. 56, N.9, p. 63-64, 1990.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1986, “P-Tb-41 – Terminologia e Simbologia De Roscas – Terminologia Brasileira”, Rio De Janeiro, Brasil.

ATTANASIO, A.; GELFI, M.; GIARDINI, C.; REMINO, C. Minimal quantity lubrication in turning: Effect on tool wear. **Wear**. v. 260, n.3, p.333-338, fev. 2006.

BALZERS. Balzers Coating Guide for cutting applications. v. 1. Disponível em: <<http://www.coating-guide.balzers.com>>. jul. 2005. 1 CD – ROM.

BECK, H.W. Alta velocidade e ferramentas de alto desempenho reduzem o tempo de usinagem. **Máquinas e Metais**. p. 40 – 47, abr. 1998.

BELLUCO, W.; DE CHIFFRE, L. Surface Integrity and part accuracy in reaming and tapping stainless steel with new vegetable based cutting oils. **Tribology International**. v.35, n.12, p. 865 – 870, dez. 2002.

BEZERRA, A. A.; COELHO, R.T.; DA SILVA, L.R.; BRAGHINI JR, A.; SOTO, M. Investigação do Processo de Rosqueamento com Alta Velocidade de Corte em Ferro

Fundido. **XVI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Uberlândia – MG. Proceedings of COBEM. Manufacturing Process.** v. 14. p. 66-75, 2001.

BEZERRA, A. A.; COELHO, R.T.; DA SILVA, L.R. Monitoração dos Processos de Roscamento: Revisão da Literatura. **Congresso Nacional de Engenharia Mecânica - CONEM.** Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Associação Brasileira de Ciências Mecânicas – Abcm, 10p. 2000.

BEZERRA, A. A.; COELHO, R.T.; BRAGHNI JR. A.; SILVA, L. R.; SOTO, M. Investigação do Sensor de Corrente na Monitoração do Roscamento com Alta Velocidade. **II Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, João Pessoa – PB. Proceedings of CONEM,** 2002.

BEZERRA, A. A. **Estudo do Desgaste no Roscamento com Alta Velocidade em Ferro Fundido.** 2003. 209 f. Tese de Doutorado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

CAO, T.; SUTHERLAND, J. W. Investigation of thread tapping load characteristics through mechanistics modeling and experimentation. **Journal of Machine Tools & Manufacture.** v 42, n. 14, p. 1527-1538, nov. 2002.

CIMM (CENTRO DE INFORMAÇÃO METAL MECÂNICA): Disponível em: "<http://construtor.cimm.com.br/cgi-win/construt.cgi?configuradorresultado+997>"; Acesso em: 20 out. 2005.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos.** 6.ed. S. P: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1977. 576p.

COLDWELL, H.; WOODS, R.; PAUL, M.; KOSHY, P.; DEWES, R.; ASPINWALL, D. Rapid machining of hardened AISI H13 and D2 moulds, dies and press tools. **Journal of Materials Processing Technology.** v. 135, n. 2-3, p 301 – 311, abr. 2003.

COSTA, E.S.; MACHADO, A.R.; SOUZA JR.; E. A. DE.; RAMOS, C.A.D. Desempenho de brocas helicoidais de aço-rápido revestidas com TiN aplicando Mínima Quantidade de Fluido de Corte (MQF). **III Congresso Brasileiro de Fabricação.** Joinville- SC, abr. 2004.

CSELLE, T.; BARIMANI, A. Today's applications and future developments of coatings for drills and rotating cutting tools. **Surface & Coatings Technology** . v. 76-77, n. 2, p. 712 – 718, dec. 1995.

DA MOTA, P. R.; REIS, A. M.; DA SILVA, M. B.; GONÇALVES, R.A. Performance of high speed steel taps at high cutting speed. **Ecole nationale Supérieure d'Arts et Métiers de Metz. Fifth International Conference on High Speed Machining**. v 1, p. 119-127, mar. 2006.

DA MOTA, P. R.; REIS, A. M.; DA SILVA, M. B.; GONÇALVES, R.A. Tapping Operation at High Cutting Speed. **Congresso Internacional de Engenharia Mecânica**. Ouro-Preto – MG. v. 1. nov. 2005. 1 CD ROM.

DERFLINGER, V.; BRÄNDLE, H.; ZIMMERMANN, H. New hard/lubricant coating for dry machining. **Surface and Coating Technology**. v. 113, n. 3, p. 286-292, mar. 1999.

DE SOUZA, A. J. **Aplicação de Multisensores no Prognóstico da Vida da Ferramenta de Corte no Torneamento**. 2004a. 226 f. Tese de Doutorado – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

DE SOUZA, A. F. **Contribuições ao Fresamento de Geometrias Complexas Aplicando a Tecnologia de Usinagem com Altas Velocidades**. 2004b. 186 f. Tese de Doutorado – Universidade de São Paulo (USP – São Carlos).

DHAR, N.R.; ISLAM, M.W.; ISLAM, S.; MITHU, M.A.H. The Influence of minimum quantity of lubrication (MQL) on cutting temperature, chip and dimensional accuracy in turning AISI-1040 steel. **Journal of Materials Processing Technology** . v. 171, n. 1, p. 93-99, jan. 2006.

DILIDDO, T. The tapping key to successful threading. **Cutting Tool Engineering**. v. 39, n.1, p. 65-67. fev.1987.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N.L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais**. 1 ed. mm editora, S. P: 242p. 1999.

EZUGWU, E.O.; OKEKE, C.I.; MACHADO, A.R. High speed threading of inclusion-modified steels with coated carbide tools. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 86, n. 1-3, p. 216 – 225, out.1999.

FALLBÖHMER, P.; RODRÍGUEZ, C.A.; ÖZEL, T.; ALTAN, T. High-speed machining of cast iron and alloy steels for die and mold manufacturing. **Journal of Material Processing Technology**. v. 98, n. 1, p. 104-115, jan. 2000.

FANTIN, J.P. Ensaios com machos: em busca de bons resultados na usinagem. **Revista Máquinas e Metais**. n. 320, p. 58 – 60, set. 1992.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**. 3 ed. v.1, S.P: Editora Edgard Blücher Ltda, 1995. 751p.

FRANCO JR., A. R. **Obtenção de Revestimentos Dúplex por Nitretação a Plasma e PVD-TiN em Aços Ferramenta AISI D2 e H13**. 2003. 196 f. Tese de Doutorado – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.

FREIRE, J.M. Tecnologia Mecânica (Instrumento de Trabalho na Bancada), Livros técnicos e científicos editora S. A., Vol. 1 , 1º ed, 1976. 271p.

GU, JIE.; GARY, BARBER.; SIMON , TUNG.; GU, REN-JYH. Tool life and wear mechanism of uncoated and coated milling inserts. **Wear**. v. 225–229, n. 1, p. 273-284, abr. 1999.

GUANI, J.A.; CHOUDHURY, I.A.; MASJUKI, H.H. Wear mechanism of TiN coated carbide and uncoated cermets tools at high cutting speed applications. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 153-154, p. 1067-1073, nov. 2004.

HARRIS, S. G.; DOYLE, E. D.; VLASVELD, A. C.; AUDY, J.; QUICK, D. A study of the wear mechanisms of $Ti_{1-x}Al_xN$ and $Ti_{1-x}yAlxCr_yN$ coated high-speed steel twist drills under dry machining conditions. **Wear**. v. 254, n. 7-8, p. 723-734, abr. 2003.

HOGMARK, S.; JACOBSON, S.; LARSSON, M. Design and Evaluation in Tribological Coatings. **Wear**. v. 246, n. 1-2, p. 20-33, nov. 2000.

ISO, 1977. Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools. ISO 3685.

ISCAR - ferramentas de corte – Goiânia. **Material Didático**. Palestra apresentada no SENAI-DR/GO. 2001. 1 CD ROM.

JOHNSON, M. Tapping. In: **AMERICAN SOCIETY FOR METALS**. Metals handbook, 9.ed. Metals Park, Ohio, USA. v.16 - Machining, p. 255-267. 1989.

KISHAWY, H.A.; DUMITRESCU, M.; NG, E. –G.; ELBESTAWI, M.A. Effect of coolant strategy on tool performance, chip morphology and surface quality during high speed machining of A356 alloy. **International Journal of Machining Tools & Manufacture**. v. 45, n. 2, p. 219–227, fev. 2005.

KOELSCH, J.R. Rosqueamento de alto desempenho. **Máquinas e Metais**. n. 432, p. 20-35, jan. 2002.

KOPAC, J. Influence of cutting material and coating on tool quality and tool life. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 78, n.1-3, p. 95–103, jun. 1998.

LINSS, M. Processo de rosqueamento de alto desempenho. **Revista Máquinas e Metais**. Aranda Editora – ano XXXIX, n. 443, p. 24-33, dez. 2002.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Apostila de Usinagem dos Metais**. 8. ed. Universidade Federal de Uberlândia. 2004. 257p.

MACHADO, A. R.; BÖHES, L.; DOS SANTOS, M. T.; GUESSER, W. L. **Tecnologias Avançadas de Manufatura**: Coleção Fábrica do Milênio. Capítulo 4. 1. ed. Jaboticabal – SP: Ed. Novos Talentos. 2005. v. 1. 169p.

MEZENTSEV, O. A.; ZHU, R.; DE VOR, R. E.; KAPOOR, S. G.; KLINE, W. A. Use of Radial Force for Fault Detection in Tapping. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. v. 42, n. 4, p. 479-488, mar. 2002.

MÜLLER, P.; SOTO, M. Usinagem sem refrigeração de Furos e Roscas, 4° Seminário Internacional de Alta Velocidade, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste, São Paulo, Brasil, p. 126-133. 1999.

MÜLLER, P. Ferramentas para furar e rosquear com HSC e sem refrigeração. **O Mundo da Usinagem**. p. 13–17, 2000.

MÜLLER, P. Ferramentas rotativas para usinagem em HSC. Usinagem Brasil. Disponível em: http://www.usinagem-brasil.com.br/construtordepaginas/htm/1_1_1738.htm. Acesso em 23 set. 2004.

NAVINSEK, B., PANJAN, P., CEKADA, M., QUINTO, D.T. Interface characterization of combination hard/solid lubricant coatings by specific methods. **Surface and Coatings Technology**. v. 154, n. 2-3, p. 194–203, mai. 2002.

NOUARI, M., GINTING, A. Wear characteristics and performance of multi-layer CVD-coated alloyed carbide tool in dry and milling of titanium alloy. **Surface & Coatings Technology**. v. 200, n. 18-19, p. 5663-5676, mai. 2006.

NOVASKI, O.; CORRÊA M. A HSC como vantagem competitiva. **Revista Máquinas e Metais**. p. 74–89, nov. 1998.

OLIVEIRA, A. J. **Otimização das Condições de Usinagem Visando o Torneamento a Seco do Aço ABNT 1045 em Operações de Desbaste**. 2003. 112 f. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas – Campinas, SP.

OSG. **Manual Técnico – Machos**. OSG ferramentas de precisão Ltda. v.1, São Paulo, p. 1-58, 1999.

OSG ferramentas de precisão Ltda – **Machos, Cossinetes e Fresas** – São Paulo. Material Didático, maio 2005. 1 CD ROM.

PALDEY, S.; DEEVI, S.C. Single layer and multilayer wear resistant coatings of (Ti,Al)N: a review. **Materials Science and Engineering**. v. 342, n. 1-2, p. 58–79, fev. 2003.

REIS, A. M. **Avaliação de Desempenho de Diferentes Materiais de Ferramenta no Processo de Rosqueamento Interno de Ferro Fundido Cinzento, através do Monitoramento do Desgaste**. 2004. 192 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.

REITER, A. E.; BRUNNER, B.; ANTE, M.; RECHBERGER, J. Investigation of several PVD coatings for blind hole tapping in austenitic stainless steel. **Surface & Coatings Technology**. v. 200, n. 18-19, p. 5532-5541, mai. 2006.

SALES, W.F. **Determinação das Características Refrigerantes e Lubrificantes de Fluidos de Corte**. 1999. 176 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.

SAKAMOTO, Y.; TAKAYA, M.; ISHII, Y.; IGARASHI, S. Surface modified tool fabricated by radical nitriding. **Surface and Coatings Technology**. v. 142-144, p. 152-155. jul. 2001.

SANDVIK COROMANT. Novas tecnologias e tendências em furação e rosqueamento. **O Mundo da usinagem**. SANDVIK do Brasil S.A, Divisão Coromant, p. 18-21, 1999.

SANTOS, S. C. **Furação de ferro fundido cinzento com brocas de metal duro integral**. 1999. 122 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

SANTOS, S. C. **Estudo da influência de revestimentos e da aplicação de fluido de corte no desempenho de brocas de aço-rápido e de metal duro integral na usinagem de ferro fundido cinzento**. 2002. 199 f. Tese de Doutorado - Universidade Federal de Uberlândia.

SHAW, M.C., **Metal Cutting Principles**. 3ª ed. Cambridge: Oxford University Press. 594 p. 1984.

SCHÜTZER, K.; DE SOUZA, A. F.; DEONÍSIO, C. C. C. **Introdução do Processo HSC na Indústria Brasileira**. In: 4º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Inovações Tecnológicas na Manufatura para o ano 2000, 1999, Santa Bárbara d'Oeste, SP. Anais do 4º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Inovações Tecnológicas na Manufatura para o Ano 2000. p. 79-98, 1999.

SCHULZ, H. A alta velocidade corta tempos e custos e aumenta a qualidade das indústrias. **Revista Máquinas e Metais**. p. 71-76, fev. 1997.

SCHULZ, H.; EMRICH, A. K.; FINZER, T; DÖRR, J. Quais são e para que servem os revestimentos. **Máquinas e Metais**, p. 38-45, set, 2000.

SKF. **Manual Técnico SKF**. São Paulo: SKF Ferramentas S.A., 261p. 1987.

STEMMER, C. E. **Ferramentas de Corte II: brocas, alargadores, ferramentas de roscas, fresas, brochas, rebolos e abrasivos**. Ed. da UFSC. Florianópolis: 1992, 326p.

STOETERAU, R. L. **Apostila de Tribologia da UFSC**. 2000. 172 p.

ZHANG, B.; YANG, F.; WANG, J. Fundamental aspects in vibration-assisted tapping. **Journal of Materials Processing Technology**. v. 132, n. 1-3, p. 345–352, jan. 2003.

TRENT, E.M.; WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4th Edition, Butterworths – Heinemann. 2000, 446 p.

VIANA, R. **Desempenho de brocas de HSS revestidas na furação de ligas da Al-Si**. 2004. 141 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia.

YUHARA, D. A. Aplicação de revestimento PVD em ferramentas de corte. Disponível em: www.brasimet.com.br. Acesso em: 20 mai. 2005.

ZUM GAHR, K. H. **Microstructure and wear of materials**. 1^a ed. Amsterdam. Elsevier science publishers B.V., 1987, 560 p.

Livros Grátis

(<http://www.livrosgratis.com.br>)

Milhares de Livros para Download:

[Baixar livros de Administração](#)

[Baixar livros de Agronomia](#)

[Baixar livros de Arquitetura](#)

[Baixar livros de Artes](#)

[Baixar livros de Astronomia](#)

[Baixar livros de Biologia Geral](#)

[Baixar livros de Ciência da Computação](#)

[Baixar livros de Ciência da Informação](#)

[Baixar livros de Ciência Política](#)

[Baixar livros de Ciências da Saúde](#)

[Baixar livros de Comunicação](#)

[Baixar livros do Conselho Nacional de Educação - CNE](#)

[Baixar livros de Defesa civil](#)

[Baixar livros de Direito](#)

[Baixar livros de Direitos humanos](#)

[Baixar livros de Economia](#)

[Baixar livros de Economia Doméstica](#)

[Baixar livros de Educação](#)

[Baixar livros de Educação - Trânsito](#)

[Baixar livros de Educação Física](#)

[Baixar livros de Engenharia Aeroespacial](#)

[Baixar livros de Farmácia](#)

[Baixar livros de Filosofia](#)

[Baixar livros de Física](#)

[Baixar livros de Geociências](#)

[Baixar livros de Geografia](#)

[Baixar livros de História](#)

[Baixar livros de Línguas](#)

[Baixar livros de Literatura](#)
[Baixar livros de Literatura de Cordel](#)
[Baixar livros de Literatura Infantil](#)
[Baixar livros de Matemática](#)
[Baixar livros de Medicina](#)
[Baixar livros de Medicina Veterinária](#)
[Baixar livros de Meio Ambiente](#)
[Baixar livros de Meteorologia](#)
[Baixar Monografias e TCC](#)
[Baixar livros Multidisciplinar](#)
[Baixar livros de Música](#)
[Baixar livros de Psicologia](#)
[Baixar livros de Química](#)
[Baixar livros de Saúde Coletiva](#)
[Baixar livros de Serviço Social](#)
[Baixar livros de Sociologia](#)
[Baixar livros de Teologia](#)
[Baixar livros de Trabalho](#)
[Baixar livros de Turismo](#)