Paulo Henrique Campos Bellini

ESTUDO DO DESGASTE NA FURAÇÃO E ROSCAMENTO DE MATERIAIS ENDURECIDOS

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia
de São Carlos, da Universidade de São Paulo,
como parte dos requisitos para obtenção do título
de Mestre em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho.

DEDALUS - Acervo - EESC

31100052123

São Carlos

2005

FOLHA DE JULGAMENTO

Candidato: Engenheiro **PAULO HENRIQUE CAMPOS BELLINI**

Dissertação defendida e julgada em 25-02-2005 perante a Comissão Julgadora:

Prof. Associado **REGINALDO TEIXEIRA COELHO (Orientador)**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Titular **JOÃO FERNANDO GOMES DE OLIVEIRA**
(Escola de Engenharia de São Carlos/USP) APROVADO

Prof. Dr. **JOÃO ROBERTO FERREIRA**
(Universidade Federal de Itajubá/UNIFEI) APROVADO

Prof. Associado **JONAS DE CARVALHO**
Coordenador do Programa de Pós-Graduação em Engenharia
Mecânica

Profª. Titular **MARIA DO CARMO CALIJURI**
Presidente da Comissão de Pós-Graduação

Ao meu pai, Linneu
À minha mãe, Edna de Lourdes
À minha avó, Maria da Conceição (in memoriam)

AGRADECIMENTOS

À Deus, razão de toda a existência, fonte de esperança e amor, por ter me guiado para alcançar mais esta graça.

Aos meus pais, Linneu e Edna, que me apoiaram e incentivaram nos momentos mais difíceis.

Ao professor Reginaldo Teixeira Coelho, pela confiança, excelente orientação, amizade e paciência.

À TITEX por ter fornecido as ferramentas para realização dos ensaios.

À “família” OPF (Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação), João Fernando, Irene, Alexandre, Américo, Carlos Elias, Carlos Magno, Eraldo, João Jorge, Marcelo, Roger, Ronaldo, Vinicius, Daniel, Fábio, Hugo, Arai e Saleti, pelo apoio, convivência e momentos de descontração.

A todos os funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC-USP, pela cooperação direta ou indireta.

RESUMO

BELLINI, P. H. C. (2004). *Estudo do desgaste na furação de materiais endurecidos*. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

As operações de usinagem compreendem uma parcela significativa do universo da manufatura sendo que atualmente algumas tendências bem definidas, como a usinagem de peças já endurecidas, vêm ganhando espaço no campo da fabricação de moldes e matrizes, em especial, mas também na indústria automotiva e de construção de máquinas.

O torneamento e o fresamento de materiais, nesta difícil condição de usinagem, já estão estabelecidos na indústria. Assim, a conversão do processo de produção atual de materiais em estado “mole” para endurecido só será possível com todas as operações de usinagem incluídas.

Devido a isso, a demanda por furação e roscamento de peças endurecidas está em constante crescimento. Essas operações apresentam dificuldades muito maiores do que as de torneamento e fresamento, daí a importância de ferramentas especificamente projetadas para elas. Dessa forma, este trabalho teve como objetivo estudar o processo de desgaste sofrido pelas ferramentas durante a furação e roscamento de aços AISI D2 e AISI H13 com a utilização de diferentes velocidades de corte. As forças de corte e o torque também serão medidos durante o processo para avaliar seus comportamentos com o aumento da velocidade.

Com os resultados obtidos verificou-se que na furação e roscamento de aços endurecidos de baixa usinabilidade, como no caso do aço AISI D2, o desgaste da ferramenta é muito acentuado, podendo tornar o processo inviável economicamente caso não sejam empregadas velocidades de corte extremamente reduzidas. De uma forma geral, a furação e o roscamento do AISI H13 pode ser viável, pois o número de furos/roscas obtidos dentro dos critérios especificados mostrou-se muito superior ao esperado. Os principais mecanismos de desgastes que atuaram nos machos de corte durante o processo de roscamento de ambos os aços (AISI D2 e AISI H13) foram abrasão nas superfícies de folga e adesão nas superfícies de saída de forma acentuada nos três primeiros filetes.

Palavras-chave: furação, roscamento, desgaste, materiais endurecidos.

ABSTRACT

BELLINI, P. H. C. (2004). *Wear study of drilling and tapping in hardened materials*. Master's Thesis – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2004.

The cutting processes compose a huge part of the manufacturing universe and, nowadays, some well-defined trends, like cutting hardened materials, are increasing not only in die molding production but also in automotive and machine industries.

The turning and milling processes of materials, in this difficult condition of cutting, are already applied in the mechanical industries. Therefore, the total conversion of the present production process of regular materials into hardened ones can only be reached when all the cutting processes are included. Because of that, the demands of drilling and tapping hardened materials have increased constantly. These operations require tools specifically designed for them, because they have proven themselves to be much more difficult than the turning and milling processes.

In that way, this work aimed to study the wear process of drills and taps used to machining the AISI D2 and AISI H13 hardened steels with different cutting speeds. The cutting forces and the torque generated were also acquired during the cutting process to evaluate its behavior whit the speed increase.

After analyzing the results, a very aggressive tool wear was confirmed in the drilling and tapping process of hardened steels with bad machinability, like the AISI D2 steel, and this can make the process economically unfeasible if an extremely reduced cutting speed is not used. Generally, the drilling and tapping process of the AISI H13 can become economically viable, because the number of holes/threads achieved in accordance with the specified criteria was superior to the expected ones. In the cutting process of both materials (AISI D2 and H13), the main wear mechanism observed on the taps were abrasion, on the clearance surface, and adhesion, on the rake surface. This was severe for the first three threads of the tap.

Keywords: drilling, tapping, wear, hardened materials.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 - Participação percentual dos processos de usinagem (TÖNSHOF et al., 1994)...	17
Figura 2-2 - Partes de uma broca helicoidal (NBR-6176, e FERRARESI, 1983).....	19
Figura 2-3– Broca de incertos intercambiáveis (SANDVIK COROMANT).....	20
Figura 2-4– Sinais de força com a broca nova e próximo ao fim de vida (ERTUNC, 2001). .	23
Figura 2-5– Influência da velocidade de corte e da taxa de avanço na vida da broca (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).....	24
Figura 2-6 - Efeito da taxa de avanço na usinagem do aço AISI 4340 com 52 HRC (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).....	25
Figura 2-7 - Efeito da dureza do material usinado na vida da broca broca (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).	26
Figura 2-8 – Roscamento interno (FERRARESI, 1984).	27
Figura 2-9– Roscamento externo (FERRARESI, 1984).	28
Figura 2-10- Ilustração de uma seção de roscamento (KOMURA et al., 1990b).	28
Figura 2-11. Geometria de macho de corte com canais retos (OSG, 1999).	29
Figura 2-12– Três tipos básicos de machos sólidos (JOHNSON, 1989).....	31
Figura 2-13- Evolução do sinal representativo do torque no roscamento (FANTIN, 1992)....	33
Figura 2-14– Efeito da dureza sobre o roscamento de aço carbono de baixa liga. (a) furos passantes ¼-28 UNF. (b) furos passantes ½-20 UNF (JOHNSON, 1989).....	35
Figura 2-15 - Principais Áreas de Desgaste (KENDALL, 1989, e JACK, 1987).	37
Figura 2-16 - Craterização provocada pela difusão na interface (SANDVIK, 2000).	39
Figura 2-17 - Desgaste de flanco provocado pela abrasão (SANDVIK, 2000).	40
Figura 2-18 - Desgaste de entalhe provocado pela oxidação (SANDVIK, 2000).....	41
Figura 2-19 - Lascamento da ferramenta de corte (SANDVIK, 2000).	42
Figura 2-20- Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (ISO 3685, 1993).	43
Figura 2-21 - Exemplo de combinação de 3 revestimentos para condições difíceis de usinagem (SANDVIK, 2000).	52
Figura 2-22 – Desempenho de diferentes revestimentos na usinagem a seco (TITEX PLUS, 1999).....	54
Figura 2-23– Quadro de seleção para aços ferramenta (AÇOS FAVORIT).....	58
Figura 2-24– Estágios da formação do cavaco (POULACHON, 1998).....	61
Figura 2-25 -Broca para furação de aços endurecidos (TITEX PLUS, 2001)	63
Figura 2-26- Gráfico de produção de furos x cobertura da broca (TITEX PLUS, 2001)	64
Figura 2-27- Macho de corte com 3 canais	65
Figura 2-28– Produção de roscas x número de canais da ferramenta (TITEX PLUS, 2001)...	65
Figura 3-1– Centro de usinagem vertical Romi modelo Discovery 560.	66
Figura 3-2 – Broca A3269 TFL e suas características geométricas (TITEX PLUS, 2002).	67
Figura 3-3 - Macho de corte código B1278TCN utilizado nos ensaios (TITEX PLUS, 2002).	67
Figura 3-4– Microestrutura do aço AISI D2 atacado com Nital 3%.	69
Figura 3-5– Microestrutura do aço AISI H13 atacado com Nital 3%.	69
Figura 3-6– Detalhe dos diferentes tamanhos de carbonetos presentes na microestrutura do aço AISI D2.	70
Figura 3-7 – Cabecote de roscar auto-reversível CST TAPMATIC RDTIC-50.....	71
Figura 3-8 – Esquema do sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios.	72
Figura 3-9 – Fixação do corpo de prova na mesa da máquina.	76
Figura 3-10 - Dispositivo para prender a chapa de medição sobre o dinamômetro.	77

Figura 3-11– Configuração geral do banco de ensaios montado sobre a mesa da máquina. ...	78
Figura 4-1- Número de furos usinados em função da velocidade de corte para o aço AISI D2.	80
Figura 4-2 - Número de furos usinados em função da velocidade de corte para o aço AISI H13.	81
Figura 4-3– Desgaste de flanco médio em função do número de furos usinados para aço AISI D2.	82
Figura 4-4– Desgaste de flanco médio em função do número de furos usinados para aço AISI H13.	83
Figura 4-5– Condição inicial e finais das brocas usadas nos dois ensaios.	84
Figura 4-6– Vista de topo da broca com lascamento em sua aresta de corte após usinados 30 furos no aço AISI D2.	84
Figura 4-7– Evolução do desgaste da aresta de corte da broca usada no ensaio de furação do aço AISI H13 com $v_c=60\text{m/min}$, $f=0,03\text{ mm/rev}$	85
Figura 4-8– Evolução do desgaste da aresta de corte da broca usada no ensaio de furação do aço H13 com $v_c=25\text{m/min}$, $f=0,03\text{mm/ver}$	85
Figura 4-9 - Força média vertical na furação do aço AISI D2.	86
Figura 4-10 - Força média vertical na furação do aço AISI H13.	87
Figura 4-11– Torque médio na furação do aço AISI D2.	88
Figura 4-12 – Torque médio na furação do aço AISI H13.	88
Figura 4-13- Número de roscas usinadas em função da velocidade de corte para o material AISI D2. (*) macho de corte modelo 782075TCN.	89
Figura 4-14 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=1.5\text{ m/min}$	91
Figura 4-15 – Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=3.0\text{ m/min}$	92
Figura 4-16 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=4.0\text{ m/min}$	93
Figura 4-17 - Desgaste de flanco nos 2º e 3º filetes do macho de corte modelo 782075TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=4.0\text{ m/min}$	94
Figura 4-18 - Número de roscas usinadas em função da velocidade de corte para o material AISI H13. (*) macho de corte modelo 782075TCN.	95
Figura 4-19 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=8.0\text{ m/min}$	96
Figura 4-20 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=12.0\text{ m/min}$	97
Figura 4-21 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo 782075TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=12.0\text{ m/min}$	98
Figura 4-22 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN para o aço AISI D2 - $v_c=1,5\text{m/min}$	99
Figura 4-23 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo para o aço AISI D2 - $v_c=3\text{m/min}$	100
Figura 4-24- Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN para o aço AISI D2 - $v_c=4\text{m/min}$	100
Figura 4-25 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo 782075TCN em aço AISI D2 - $v_c=4\text{m/min}$	101
Figura 4-26 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN em aço AISI H13 - $v_c=3\text{m/min}$	102

Figura 4-27 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN em aço AISI H13 - $v_c=4\text{m/min}$	102
Figura 4-28 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN em aço AISI H13 - $v_c=8\text{m/min}$	103
Figura 4-29 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN em aço AISI H13 - $v_c=12\text{m/min}$	103
Figura 4-30 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo 782075TCN em aço AISI H13 - $v_c=12\text{m/min}$	104
Figura 4-31 – Detalhe da aresta de corte do 2º filete do macho de corte modelo B1278TCN utilizado no roscamento de aço AISI D2 – $v_c=3\text{ m/min}$	105
Figura 4-32 – Perfil de uma rosca usinada em aço AISI D2 com macho de corte modelo B1278TCN – $v_c=3\text{ m/min}$	106
Figura 4-33 – Detalhe da aresta de corte do 2º filete do macho de corte modelo B1278TCN utilizado no roscamento de aço H13 – $v_c=12\text{ m/min}$	107
Figura 4-34 – Regiões da superfície de folga do macho de corte utilizado no roscamento do aço H13 submetido a análise por EDS – ampliação de 500x.	108
Figura 4-35 – Perfil de uma rosca usinada em aço AISI H13 com macho de corte modelo B1278TCN – $v_c=3\text{ m/min}$	109

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 - Participação percentual das arestas cortantes, da aresta transversal de corte e dos atritos no momento total de torção e na força de avanço de uma broca helicoidal (DINIZ et al. 1999, FERRARESI, 1983).....	22
Tabela 2-2 – Características geométricas das ferramentas utilizadas no roscamento de aço carbono de baixa liga e diferentes durezas.	35
Tabela 2-3 - Propriedades dos revestimentos (SCHULZ et al, 2000).	52
Tabela 2-4– Composição química do aço AISI D2 (AÇOS FAVORIT)	59
Tabela 2-5– Composição química do aço AISI H13 (AÇOS FAVORIT)	60
Tabela 3-1 - Características dos machos de corte utilizados nos ensaios.....	68
Tabela 3-2 - Composição química média dos corpos de prova.	68
Tabela 3-3– Matriz de experimentos para furação.	74
Tabela 3-4 – Matriz de experimentos para roscamento.....	75

LISTA DE ABREVIACÕES E SBOLOS

φ - ângulo da aresta transversal da broca

α - ângulo de cunha da broca

γ - ângulo de folga da broca

δ - ângulo de hélice da broca

σ - ângulo de ponta da broca

β - ângulo de saída da broca

β_x - ângulo lateral de cunha da broca

γ_x - ângulo lateral de folga da broca

α_x - ângulo lateral de saída da broca

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

AISI- *American Iron and Steel Institute*

Al_2O_3 - óxido de alumínio

CBN - nitreto cúbico de boro

CVD - deposição química a vapor

EDS - espectroscopia de dispersão de energia

f - avanço (mm/rev)

h_c - espessura do cavaco (mm)

HfN - nitreto de háfnio

ISO - *International Standards of Organization*

KT - profundidade de cratera

MMC - *Metal Matrix Composite*

MQL - mínima quantidade de lubrificante

M_t - momento torsor total

M_{ta} – momento torsor na aresta principal de corte

M_{tb} – momento torsor na aresta transversal e guias

M_{tc} – momento torsor de atrito com o cavaco

NbC - carbeto de nióbio

P_a – força de avanço total

P_{aa} – força de avanço de atrito com o cavaco

P_{ab} – força de avanço na aresta principal de corte

P_{ac} – força de avanço na aresta transversal e guias

PCBN - *Polycrystalline Cubic Boron Nitride*

PCD - *Polycrystalline Diamond*

PNP – passa não passa

PVD – *Physical Vapour Deposition*

r_p – raio da aresta de corte (mm)

TaC - carbeto de tântalo

TiCN - carbonitreto de titânio

TiN - nitreto de titânio

TiAlN - nitreto de titânio alumínio

VB_b - Desgaste de flanco médio

$VB_{bmáx}$ - Desgaste de flanco máximo

VB_N - Desgaste de entalhe

v_c – velocidade de corte (m/min)

WC - carbeto de tungstênio

WC/C - carbeto de tungstênio com carbono

SUMÁRIO

RESUMO.....	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE TABELAS.....	ix
LISTA DE ABREVIACÕES E SÍMBOLOS	x
1 INTRODUÇÃO.....	14
1.1 Objetivos.....	15
1.2 Estrutura do trabalho	16
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Processo de Furação	17
2.1.1 Brocas helicoidais.....	18
2.1.2 Geometria das brocas helicoidais	18
2.1.3 Formação do cavaco na furação	20
2.1.4 Forças de corte na furação	21
2.1.5 Monitoramento das forças de corte	22
2.1.6 Variáveis que afetam a vida da broca	23
2.2 Processo de Roscamento	26
2.2.1 Classificação do processo de roscamento.....	27
2.2.2 Tipos básicos de macho de corte	30
2.2.3 Monitoramento do processo de roscamento	32
2.2.4 Influência da composição e dureza do material no roscamento	34
2.3 Desgaste em Ferramentas de Corte	36
2.3.1 Tipos de desgaste	37
2.3.2 Mecanismos de desgaste.....	37
2.3.3 Vida da ferramenta de corte.....	43
2.4 Materiais e Coberturas para Ferramentas	44
2.4.1 Aço carbono e aço liga	45
2.4.2 Aço Rápido	45
2.4.3 Metal Duro.....	46
2.4.4 Cermet	47
2.4.5 Cerâmicas	48
2.4.6 Materiais ultraduros	49
2.4.7 Revestimentos utilizados nas ferramentas de corte	50
2.5 Usinagem de Aços Ferramenta.....	55
2.5.1 Propriedades e principais usos do aço AISI D2	58
2.5.2 Propriedades e principais usos do aço AISI H13	59
2.5.3 Formação do cavaco e usinabilidade	60
2.5.4 Ferramentas para usinagem de materiais endurecidos	62
3 TRABALHO EXPERIMENTAL.....	66
3.1 Máquina-Ferramenta	66
3.2 Ferramentas	66
3.2.1 Brocas	67
3.2.2 Machos de Corte	67
3.3 Corpos de Prova.....	68
3.4 Cabeçote de roscar auto-reversível	70

3.5	Equipamentos para o monitoramento do processo	71
3.5.1	Dinamômetro e amplificador de carga multicanal	71
3.6	Sistema de aquisição de dados.....	72
3.6.1	Módulo de entrada e saída de sinais	72
3.6.2	Placa de aquisição de dados.....	72
3.6.3	Software de tratamento dos sinais	73
3.7	Equipamentos de Medição e Análise.....	73
3.7.1	Lupa	73
3.7.2	Microscópio óptico	73
3.7.3	Calibre tampão de rosca P.N.P.	73
3.8	Planejamento e Procedimento Experimental.....	73
3.8.1	Planejamento dos Experimentos.....	73
3.8.2	Procedimento Experimental	78
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	80
4.1	Resultados do processo de furação	80
4.1.1	Desgaste das brocas	80
4.1.2	Medição da força vertical e torque	86
4.2	Resultados do processo de roscamento	89
4.2.1	Desgaste dos machos de corte	89
4.2.2	Medição de torque	99
4.2.3	Mecanismos de desgaste das ferramentas e qualidade das roscas usinadas ...	104
5	CONCLUSÕES	110
6	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	112
7	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	113

1 INTRODUÇÃO

As operações de usinagem compreendem uma parcela significativa do universo da manufatura sendo que atualmente algumas tendências bem definidas, como a usinagem de peças já endurecidas, vêm ganhando espaço no campo da fabricação de moldes e matrizes, em especial, mas também na indústria automotiva e de construção de máquinas (MÜLLER & SOTO, 2002).

A usinagem de aço no estado temperado, tanto no desbaste quanto no acabamento, permite uma racionalização do processo, pois provoca a diminuição dos tempos de preparação e diminuição de erros ocasionados pela mudança de referência da peça, além de evitar os problemas de distorções geométricas ocasionadas pelos diversos tratamentos térmicos.

As pesquisas no campo da usinagem de aços endurecidos representam uma evolução tecnológica e demandam o desenvolvimento de novos materiais para ferramentas de corte e novas geometrias, bem como a caracterização de parâmetros de usinagem. A vantagem competitiva está na possibilidade de racionalização do processo através da minimização da movimentação de materiais, pois, na maioria dos casos, o tratamento térmico pode ser realizado no início da sequência de processos e operações. Neste contexto, os aços para ferramentas de injeção e conformação representam um importante segmento da produção siderúrgica de aços especiais. Estes aços são produzidos e processados para atingir um elevado padrão de qualidade e são utilizados principalmente em matrizes, moldes, ferramentas de corte intermitente e contínuo, ferramentas de conformação de chapas, corte a frio, componentes de máquina, etc. no estado endurecido. Apesar de existirem mais de 100 tipos de aços ferramenta normalizados internacionalmente, procurando atingir as mais diversas aplicações e solicitações, a indústria de ferramentaria trabalha com uma gama reduzida de aços que possuem suas propriedades e desempenho consagrados ao longo do tempo, como por exemplo o aço AISI H13, destinado à fabricação de matrizes para forjamento a quente em prensas, fabricação de moldes para a injeção de plásticos e ferramentas para corte a quente, AISI D2 empregado na fabricação de matrizes e estampos de grande porte, matrizes de extrusão a frio, ferramentas de furação, cunhagem, corte e puncionagem; rolos laminadores de rosca, calibradores, entrepontos para tornos, moldes para cerâmica, etc e AISI M2, um aço rápido que apresenta elevada resistência ao desgaste e boa tenacidade (RAUTER, 1973, MACIEL, 2002). A usinagem desse tipo de material exige das ferramentas elevada resistência mecânica, térmica e ao desgaste para que suportem as altas forças de corte geradas na

usinagem de componentes que se encontram em uma faixa de dureza de 45 a 65 HRC. Isso só se alcança com sucesso utilizando-se ferramentas adequadas a cada aplicação, em particular. (MÜLLER & SOTO, 2002).

O torneamento e o fresamento de materiais, nesta difícil condição de usinagem, já estão estabelecidos na indústria. Assim, a conversão do processo de produção atual de materiais em estado "mole" para endurecido só será possível com todas as operações de usinagem incluídas. Devido a isso, a demanda por furação e roscamento de peças endurecidas está em constante crescimento. Essas operações apresentam dificuldades muito maiores do que as de torneamento e fresamento, daí a importância de ferramentas especificamente projetadas para elas (MÜLLER & SOTO, 2002).

Como já se sabe, as operações de furação e roscamento são normalmente as últimas a serem realizadas no processo produtivo, significando que a peça já está quase pronta e com seu custo quase todo composto. Por isso, as ferramentas a serem utilizadas devem ser muito confiáveis para evitar refugos. Para a furação e roscamento de pequeno diâmetro ($< 20\text{mm}$) em peças endurecidas até 65 HRC, só ferramentas de metal duro podem ser usadas, uma vez que a peça já possui em si dureza da ordem de um aço rápido. A máquina também é fator importantíssimo devendo ter grande rigidez.

Por não ser considerado um processo fácil, a pesquisa na área de usinagem de materiais endurecidos é de fundamental importância para o desenvolvimento de ferramentas modernas, de alto desempenho. Tais ferramentas devem responder ao desafio, acelerando consideravelmente os ciclos de produção, melhorando a qualidade do produto final e, além do mais, e tão importante quanto, reduzindo os custos de produção.

1.1 Objetivos

Através deste trabalho objetiva-se:

- Estudar o desgaste de brocas e machos de corte durante o processo de furação e roscamento de aços ferramentas do tipo AISI D2 e AISI H13, através de imagens das ferramentas, adquiridas em microscópio óptico e microscópio eletrônico de varredura;
- Monitorar as forças de corte e o torque durante os processos de furação e roscamento e investigar seus comportamentos com a variação da velocidade de corte;

- Analisar a qualidade das roscas usinadas através do uso de calibrador tampão PNP e imagens adquiridas em microscópio eletrônico de varredura.

1.2 Estrutura do trabalho

O presente trabalho é dividido em Revisão Bibliográfica, capítulo 2, Trabalho Experimental, capítulo 3, e Resultados e Discussões, capítulo 4. A Revisão Bibliográfica aborda os aspectos mais relevantes relacionados aos processos de furação e roscamento bem como materiais para ferramentas de corte e seus principais recobrimentos. Além disso, são abordados os principais mecanismos de desgaste e a usinagem de aços ferramenta. O Procedimento Experimental destaca máquinas, equipamentos, ferramentas e a metodologia aplicada na realização dos ensaios. E, finalmente, o capítulo referente aos Resultados e Discussões apresenta uma análise dos resultados obtidos.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Processo de Furação

O processo de furação é uma das operações de usinagem mais utilizadas na indústria manufatureira, e já abrangia 33% (Figura 2-1) de todas as operações de corte segundo uma pesquisa realizada por TÖNSHOF et al., em 1994. Atualmente, a maioria das peças de qualquer tipo de indústria, tem pelo menos um furo e, somente uma parte muito pequena dessas peças, já vem com o furo pronto dos processos primários (fundição, forjamento, etc.). Em geral, os furos devem ser criados ou aumentados através do processo de furação (DINIZ et al., 1999).

Figura 2-1 - Participação percentual dos processos de usinagem (TÖNSHOF et al., 1994).

Apesar de sua importância, tal processo passou por uma evolução diferenciada em relação aos processos de torneamento e fresamento. Enquanto as ferramentas empregadas no processo de torneamento e fresamento progrediram rapidamente com a introdução de novos materiais para ferramentas como o metal duro, cerâmica, nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante, possibilitando com isso aumentos significativos de produtividade, decorrentes da elevação da faixa de velocidades de corte, a principal inovação observada no processo de furação ocorria no campo da geometria das brocas, que apesar de permitirem aumento na vida das ferramentas e a obtenção de furos com maior qualidade, não possibilitaram o aumento significativo da velocidade de corte, uma vez que o aço rápido permanecia como principal material para construção de brocas (DINIZ et al., 1999, SANTOS, 2001).

Nos últimos anos, o desenvolvimento tecnológico das máquinas-ferramentas disponibilizou os requisitos necessários de potência, rigidez e capacidade de rotação dos

eixos-árvore para a utilização de materiais como metal duro e cerâmicas para fabricação de brocas (SANTOS, 2001). Com a utilização desses materiais e o desenvolvimento de novas coberturas pôde-se reduzir o tempo de usinagem e melhorar o acabamento dos furos obtidos devido à elevação da faixa de velocidades de corte. Esse salto de desempenho fez com que o processo de furação se recuperasse do atraso tecnológico que se encontrava em relação aos processos de torneamento e fresamento, no que se diz respeito à faixa de velocidade de corte empregada (TÖNSHOF et al., 1994, e SANTOS, 2001). Entretanto, tal processo ainda necessita de bastante desenvolvimento visando atender as novas exigências do mercado como a usinagem de peças endurecidas que está crescendo em importância nas indústrias de construção de moldes, matrizes, automobilística e construção de máquinas em especial.

2.1.1 Brocas helicoidais

As brocas helicoidais são as ferramentas mais importantes entre todas as outras empregadas no processo de furação (TÖNSHOF et al., 1994). Este tipo de ferramenta foi inventado pela “*Moses Twist Drill and Machine Company*” em 1820 e ainda hoje é largamente empregada no processo de produção de furos cilíndricos ou no alargamento de furos pré-existent. As brocas helicoidais devem cumprir alguns requisitos durante o processo de usinagem (TÖNSHOF et al., 1994, e SHAW, 1984):

- As arestas de corte têm que gerar dois cavacos idênticos;
- Os cavacos devem ser conduzidos pelos canais helicoidais para fora do furo;
- As forças necessárias e o torque devem ser transmitidos pelo corpo da ferramenta;
- A ferramenta deve ser guiada inicialmente pela ponta e posteriormente pelas margens do diâmetro externo (guias);
- A energia transformada tem que ser removida em parte pelo corpo da broca.

2.1.2 Geometria das brocas helicoidais

As diversas partes de uma broca helicoidal estão ilustradas na Figura 2-2, cuja nomenclatura será amplamente referenciada neste texto:

Figura 2-2 - Partes de uma broca helicoidal (NBR-6176, e FERRARESI, 1983).

As brocas com insertos intercambiáveis, Figura 2-3, foram desenvolvidas na última metade dos anos 70 proporcionando um grande impulso no processo de furação (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989). O uso de insertos de metal duro tornou possível o aumento da velocidade de corte, elevando a produtividade do processo de furação em comparação aos produzidos por brocas de aço rápido, existentes na época. Houve também uma redução de custos com a utilização de insertos com múltiplas arestas de corte, pois se elimina a necessidade de re-afiação e a troca da ferramenta inteira.

Figura 2-3— Broca de incertos intercambiáveis (SANDVIK COROMANT).

Entretanto, existem algumas limitações no uso deste tipo de broca. O menor diâmetro disponível comercialmente para brocas de incertos intercambiáveis é de 16 mm (5/8 in.) e sua profundidade máxima de usinagem fica em torno de $3 \times D$. Além disso, esse tipo de ferramenta não consegue produzir furos com alta precisão, sendo necessárias operações subseqüentes para melhorar a tolerância e o acabamento superficial (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

2.1.3 Formação do cavaco na furação

Uma das peculiaridades no processo de formação do cavado durante a furação é que este continua em contato com a ferramenta e a peça durante um tempo significativo até ser conduzido para fora do furo através dos canais helicoidais da broca (KRUSHANOV, 2001). Dessa forma, se os cavacos não forem formados de maneira tal que propiciem sua fácil retirada do interior do furo, eles podem causar o entupimento do mesmo, gerando um aumento do momento torsor e a conseqüente quebra da ferramenta. A quebra de uma broca helicoidal dentro de um furo é um problema grave, pois além da perda da ferramenta, a retirada da broca do interior do furo é, em geral, uma tarefa cara e demorada e que, muitas vezes, leva à rejeição da peça (DINIZ et al. 1999). Assim, é fundamental induzir a geração de cavacos que tenham uma forma tal que sejam de fácil remoção do furo. Se o formato do cavaco for em fita, será muito difícil extraí-lo do furo. Cavacos helicoidais ou em lascas são os que mais facilmente podem ser removidos dos furos. A remoção do cavaco pode ainda ser

auxiliada pela utilização de um ciclo de furação intermitente ou “pica-pau” (o que gera tempos passivos extras) e/ou pela injeção de fluido de corte sob pressão diretamente no fundo do furo, através de canais especialmente construídos no interior da broca para tal fim (DINIZ et al. 1999). O tipo específico de cavaco a ser formado depende de vários parâmetros do processo, em particular, a velocidade de corte, o avanço e as propriedades mecânicas e térmicas do material usinado (KRUSHANOV, 2001).

2.1.4 Forças de corte na furação

Durante o processo de furação verificam-se as seguintes resistências à penetração da broca (DINIZ et al. 1999, FERRARESI, 1983):

- resistência devido ao corte do material nas duas arestas principais de corte;
- resistência devido ao corte e esmagamento do material na aresta transversal de corte;
- resistência devido ao atrito das guias com a parede do furo e entre a superfície de saída da broca e o cavaco.

Uma broca helicoidal durante o corte é basicamente submetida a esforços de torção (devido à rotação da broca) e à esforços de compressão devido ao avanço da mesma. Assim, para estimar os esforços de um processo de furação, basta calcular o momento torsor e a força de avanço do processo. É importante notar que, quando as arestas principais da broca não estão igualmente afiadas, o esforço de corte de uma aresta é diferente do esforço da outra aresta, podendo causar uma flexão de torção na ferramenta (DINIZ et al. 1999). Dessa forma, pode-se escrever para o momento torsor e força de avanço da broca, respectivamente (FERRARESI, 1983):

$$M_t = M_{ta} + M_{tb} + M_{tc} \quad \text{Eq. 2-1}$$

$$P_a = P_{aa} + P_{ab} + P_{ac} \quad \text{Eq 2-2}$$

onde os segundos índices a, b e c se referem às arestas principais, à aresta transversal e às guias e atrito com o cavaco, respectivamente.

A participação percentual de cada uma dessas grandezas oscila entre os seguintes valores mostrados na Tabela 2-1:

Tabela 2-1 - Participação percentual das arestas cortantes, da aresta transversal de corte e dos atritos no momento total de torção e na força de avanço de uma broca helicoidal (DINIZ et al. 1999, FERRARESI, 1983).

	Arestas Principais	Arestas Transversais	Atritos
Momento Torsor	77 – 90%	3 – 10%	3-13%
Força de Avanço	39-59%	40-58%	2-5%

Nota-se nos dados acima, a grande participação da aresta transversal de corte nos valores de força de avanço. Isto é devido a alguns fatores como: baixa velocidade de corte e ângulo de saída negativo na região central da broca, baixos valores e até mesmo valores negativos do ângulo efetivo de folga nesta região, esmagamento do cavaco e encruamento do fundo causados pela aresta transversal. Por causa disso, tenta-se evitar este efeito danoso da aresta transversal através de seu chanframento ou da furação com pré-furação (DINIZ et al. 1999).

2.1.5 Monitoramento das forças de corte

O desgaste de uma broca é observado principalmente em dois pontos: na ponta da aresta cortante, próximo ao diâmetro onde a velocidade de corte é máxima; na aresta transversal de corte, sendo então indício de um avanço exagerado (FERRARESI, 1983).

À medida que prossegue o desgaste da broca, o momento torsor e a força de avanço aumentam devido a um maior atrito entre a peça e a ferramenta. Dessa forma, através da aquisição das forças de corte, pode-se conseguir monitorar o processo de desgaste da ferramenta em algumas operações de furação. Geralmente, em comparação com a usinagem do primeiro furo, a força de avanço e o momento torsor, obtidos na usinagem do último furo, antes da re-afiação, podem ser até 50% maiores (JALALI, 1991). A Figura 2-4, ilustra esse fato, mostrando os sinais de força adquiridos no início do processo de furação e próximo ao fim de vida da broca (ERTUNC, 2001).

Figura 2-4— Sinais de força com a broca nova e próximo ao fim de vida (ERTUNC, 2001).

Através da Figura 2-4, também pode-se notar uma mudança no formato do sinal de acordo com o tipo de desgaste sofrido pela broca (ERTUNC, 2001). Esse aumento característico das forças de corte em função do desgaste da broca é utilizado na construção de dispositivos automáticos que desligam a máquina ou efetuam a troca automática da ferramenta para re-afiação antes da sua quebra (FERRARESI, 1983).

2.1.6 Variáveis que afetam a vida da broca

Desconsiderando o material da broca e sua geometria juntamente com a rigidez do sistema empregado no processo de furação, as variáveis que mais afetam a vida da broca são a velocidade de corte, o avanço, a dureza e composição do material a ser furado (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

2.1.6.1 Velocidades de corte e de avanço

A influência da velocidade de corte e do avanço na vida da broca pode ser observada na Figura 2-5 que apresenta os resultados obtidos em um ensaio de furação onde utiliza-se uma

broca de aço rápido com 6,4 mm de diâmetro (ângulo de ponta = 118° , ângulo de hélice = 29° e ângulo de folga = 7°) para produzir furos passantes de 13 mm de profundidade nos aços AISI 4130 e 4340 com 37 HRC de dureza. O fim de vida da broca foi estabelecido com sua quebra ou com um desgaste de flanco superior a 0,38mm, o que ocorrer primeiro (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

Figura 2-5– Influência da velocidade de corte e da taxa de avanço na vida da broca (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

Através da análise do gráfico pode-se perceber que:

- a vida da broca decresce rapidamente à medida que aumenta-se a velocidade de corte;
- a uma dada velocidade de corte, a vida da broca diminui quando o avanço foi aumentada de 0,05 mm/ver. para 0,13 mm/rev.

Entretanto, outros ensaios de furação realizados com aço AISI 4340 agora com 52 HRC de dureza, indicaram tendências diferentes das observadas no experimento anterior. Nesses ensaios foram utilizadas brocas de aço rápido (ângulo de ponta = 118° , ângulo de hélice = 29° e ângulo de folga = 7°) e avanço de 0,013 mm/ver., 0,025 mm/rev. e 0,05 mm/rev. (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

Analisando os gráficos da Figura 2-6, nota-se que a máxima vida da broca foi alcançada com avanço intermediário (0,025 mm/rev.). Para os avanços de 0,013 mm/rev. e 0,05 mm/rev. obteve-se uma menor vida da ferramenta. Apenas com 0,025 mm/rev. de avanço a vida da ferramenta não decresceu progressivamente com o aumento da velocidade de corte. Nota-se

também que para os outros dois valores (0,013 mm/rev. e 0,05 mm/rev.) a vida máxima da broca foi atingida com a velocidade de corte de 9,1 m/min.

O uso de um menor avanço reduz a temperatura e as forças de corte. Entretanto, se o avanço é reduzido pela metade, a área transversal do cavaco que passará pela aresta de corte da broca será metade. Como resultado, o processo de desgaste da ferramenta provavelmente aumentará. Dessa forma, a redução do avanço será vantajosa, se seus benefícios (menor temperatura e menores forças de corte) compensarem a redução da área da seção do cavaco que passará pela aresta de corte da broca. Em processos de furação com alta velocidade de corte, nos quais a temperatura de corte é um fator crítico na vida da broca, reduzir o avanço é vantajoso. Em furações com baixa velocidade de corte, nas quais a temperatura de corte é um fator menos crítico, o cavaco mais longo e o maior atrito entre a aresta de corte, promovido por uma diminuição do avanço, provavelmente contribuirá para uma menor vida da ferramenta (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

Figura 2-6 - Efeito da taxa de avanço na usinagem do aço AISI 4340 com 52 HRC (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

2.1.6.2 Dureza e composição do material usinado

No processo de furação de aços carbono e aços de baixa liga com composições e microestrutura similares, o processo de desgaste da broca pode ser associado à dureza do material da peça (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989). Os gráficos da Figura 2-7

ilustram os resultados obtidos na furação de aços com diferentes durezas. Nesse ensaio, as ferramentas e os parâmetros de usinagem usados foram previamente determinados para fornecer a máxima economia na furação de cada material.

Figura 2-7 - Efeito da dureza do material usinado na vida da broca (AMERICAN SOCIETY FOR METALS, 1989).

Embora os resultados sejam afetados de alguma forma pelo uso de brocas constituídas de diferentes materiais (aço rápido M2 e C-2), a vida da ferramenta (medida pela quantidade de material removido antes do desenvolvimento de um desgaste acentuado na aresta de corte da broca) foi progressivamente diminuindo com o aumento da dureza do material usinado.

Dessa forma, pode-se afirmar que a vida da broca sofre influência direta da dureza da peça a ser usinada. Portanto, os componentes dos aços que afetam a sua dureza como porcentagem de carbono e elementos de ligas influenciarão o processo de desgaste e, conseqüentemente, a vida da ferramenta.

2.2 Processo de Roscamento

Roscamento é um processo mecânico de usinagem destinado à obtenção de filetes, por meio da abertura de um ou vários sulcos helicoidais de passo uniforme, em superfícies cilíndricas ou cônicas de revolução. Para tanto, a peça ou a ferramenta gira e uma delas se desloca simultaneamente segundo uma trajetória retilínea paralela ou inclinada ao eixo de rotação (ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT), 1971, e FERRARESI, 1985). Essa definição, embora clássica, não engloba o processo de produção de roscas por conformação, bastante empregado nas indústrias atualmente.

Entre os processos de usinagem, o roscamento é um dos mais importantes, pois freqüentemente é um dos últimos realizados sobre uma peça, a qual possui um alto valor

agregado, e por isso deve ser confiável para evitar refugos e retrabalhos (SHA et al., 1990, e MÜLLER & SOTO, 1999). Além disso, as rosas são usadas em elementos de fixação, transmissão e transformação de movimento e ainda representam o sistema de fixação mais usado em componentes mecânicos dentro da indústria, sobretudo no setor automotivo (ISHIKAWA et al., 1992, e COELHO, 1994). Uma má escolha de ferramenta, condições de corte críticas ou uma lubrificação inadequada são fatores que levam, na melhor das hipóteses, a um roscamento fora da tolerância, e, na pior, à quebra da ferramenta e ao refugo da peça, além do tempo gasto na remoção de um macho de corte quebrado (SHA et al., 1990, e FANTIN, 1992).

2.2.1 Classificação do processo de roscamento

O processo de roscamento pode ser interno ou externo. Roscamento interno é executado em superfícies internas ou cônicas de revolução. Enquanto o externo é executado em superfícies externas cilíndricas ou cônicas de revolução (ABNT, 1971, e FERRARESI, 1985). O processo de roscamento interno pode ser realizado com: ferramenta de perfil único; ferramenta de perfil múltiplo; macho de corte; e fresa (Figura 2-8).

Figura 2-8 – Roscamento interno (FERRARESI, 1984).

O roscamento externo é realizado com: ferramenta de perfil único; ferramenta de perfil múltiplo; cossinete; jogo de pentes; fresa de perfil múltiplo; e fresa de perfil único (Figura 2-9). As rosas podem ser retificadas para melhorar a precisão e o acabamento superficial, embora aumente o custo consideravelmente (KALPAKJIAN, 1991).

Figura 2-9– Roscamento externo (FERRARESI, 1984).

2.2.1.1 Roscamento interno com macho de corte

O corte de uma rosca interna por meio de uma ferramenta de ponta múltipla é conhecido como roscamento interno, e a ferramenta é chamada de macho. Um furo de diâmetro menor que o diâmetro da rosca já deve existir, fabricado pela furação/alargamento ou pela fundição. A operação com macho de corte envolve o corte e a remoção de material, conforme ilustra um modelo de uma seção de roscamento interno na Figura 2-10.

Figura 2-10- Ilustração de uma seção de roscamento (KOMURA et al., 1990b).

As principais características do roscamento interno com macho são (SHA et al., 1990):

- É um processo altamente transiente. O ciclo completo é realizado em poucos segundos e pode ser dividido em: corte e retorno. No início, os dentes executam o corte e o número de arestas em ação aumenta continuamente, praticamente não havendo um período estável;
- Operações anteriores, tais como furação e alargamento, têm forte influência sobre o processo de roscamento. Existem muitas incertezas associadas com as operações de roscamento interno com macho, isto é, variação da dimensão do furo, desalinhamento do macho com o furo (DU et al., 1995), erro síncrono entre os movimentos rotacional do macho e o avanço, etc;

Um macho tem normalmente vários canais e sua ponta é cônica ou chanfrada (Figura 2-11). A ação de corte é realizada primeiramente pelas arestas da região cônica e pelos canais. Assim, o desgaste ocorre principalmente nesta região. Similar a outros tipos de arestas, o desgaste desenvolve-se sobre as superfícies de saída e de folga, dependendo do material da peça e das condições de corte.

Figura 2-11. Geometria de macho de corte com canais retos (OSG, 1999).

Os machos de corte são ferramentas relativamente frágeis e operam sob condições muito severas por causa do forte atrito envolvido e a dificuldade de remoção de cavaco. Segundo WEINGAERTNER et al. (1997), a principal exigência do roscamento interno é a aplicação de fluido de corte para transportar melhor os cavacos e quebrá-los adequadamente.

As velocidades exigidas e a rápida reversão da rotação podem ser implementadas em máquinas menores através de mandril flutuante. Velocidades mais altas são possíveis em

máquinas CNC com eixo-árvore sincronizado. Os movimentos de rotação e de avanço se correspondem durante todo o tempo, e o macho deve ser fixado em um suporte rígido. Nesse caso, esse sincronismo é definido pelo comando da máquina, normalmente girando no máximo em torno de 3000 rpm. As velocidades mais elevadas podem ser obtidas com uma unidade de roscamento auto-reversível de alta velocidade (MÜLLER & SOTO, 1999), conhecido também como cabeçote de roscar auto-reversível. A reversão é executada por este dispositivo, não havendo necessidade de reversão do sentido de rotação do eixo árvore da máquina CNC, através de um sistema composto de engrenagens cônicas.

2.2.2 Tipos básicos de macho de corte

Os machos de corte são produzidos com canais retos, helicoidais ou com ponta helicoidal. A existência desses canais deve-se por três razões: proporcionar arestas de corte, proporcionar folga para a saída dos cavacos e conduzir fluido para as seções de corte do macho. Muitos possuem quatro canais, mas para o roscamento de metais que produzem cavacos moles e fibrosos ou para facilidade de remoção do cavaco no roscamento de furo profundo, três ou até dois canais podem ser usados (JOHNSON, 1989).

Os machos de canais retos (Figura 2-12(a)) são mais comumente utilizados, pois realizam satisfatoriamente a usinagem da rosca sob várias condições e são mais facilmente fabricados e afiados do que machos com canais helicoidais (JOHNSON, 1989). Sua utilização é recomendada para furo cego ou passante em materiais que produzem cavacos curtos ou quebradiços, pois os mesmos ficam retidos nos canais, necessitando uma maior atenção do usuário (OSG FERRAMENTAS).

Figura 2-12– Três tipos básicos de machos sólidos (JOHNSON, 1989).

Os machos com ponta helicoidal (Figura 2-12(b)) possuem canais retos acrescentados por canais angulares de sentido esquerdo próximos à ponta. O propósito da ponta em espiral é empurrar os cavacos à frente do macho quando este está em ação de corte. São mais adequados para furos passantes. As arestas de corte angulares geraram o corte nas pontas em espiral com uma ação de cisalhamento, produzindo um acabamento fino nas roscas (JOHNSON, 1989).

Os machos com canais helicoidais (Figura 2-12(c)) podem ter canais com sentido direito ou esquerdo; os canais com sentido direito são os mais comuns. A espiral produz uma ação de levantamento que força os cavacos ao longo do canal. A espiral dos canais pode ser regular (cerca de 25 a 35°) ou rápida (cerca de 50 a 65°); uma espiral rápida acelera a remoção do cavaco. São também usados com vantagem no roscamento de furos com rasgos de chaveta ou outras interrupções. As arestas de corte encontram a interrupção progressivamente, assim o corte é mais suave e fica menos sujeito a choques. Sua utilização é indicada para furo cego, pelo fato do cavaco sair no sentido contrário ao avanço da ferramenta, tirando-o da região de corte. A ação de cisalhamento resultante do ângulo da aresta de corte nos machos com canais helicoidais produz um melhor acabamento da rosca em metais de difícil usinagem (JOHNSON, 1989).

2.2.3 Monitoramento do processo de roscamento

O sensoriamento do desgaste da ferramenta pode ser direto, onde o desgaste é medido, e indireto, onde se mede um parâmetro relacionado com o desgaste (MICHELETTI et al., 1976, e DAN & MATHEW, 1990). Tais parâmetros também podem estar relacionados com a dimensão e funcionalidade da peça. As medições indiretas são, via de regra, baseadas no monitoramento das forças de usinagem, nas vibrações mecânicas do sistema, na emissão acústica, na potência ativa ou ainda através da medição de algum outro parâmetro do processo (KLUFT, 1997). Devido às características do processo de roscamento interno, o desgaste de um macho de corte é relativamente difícil de monitorar comparado com os desgastes das ferramentas de torneamento e fresamento (SHA et al., 1990). Por esta razão poucos trabalhos de pesquisa tem sido dedicados ao monitoramento dos processos de roscamento (SHA et al., 1990, e DU et al., 1995).

O torque necessário para gerar uma rosca interna é um parâmetro fundamental nesse processo porque depende de fatores tais como: material da peça, tipo do macho, porcentagem de rosca, lubrificante, etc. Toda alteração na geometria da ferramenta e na velocidade são manifestadas em mudanças no torque (AGAPIOU, 1994). SHA et al. (1990) afirma que o torque no roscamento interno com macho está diretamente relacionado com o desgaste do macho. Monitorado em tempo real, o torque aumenta no corte à medida que mais dentes entram em ação, enquanto no retorno o torque diminui com a liberação das arestas. Os principais fatores que afetam os sinais de torque incluem a condição de desgaste do macho e a variação na dimensão dos furos usinados no processo anterior. Quando um macho começa a se desgastar, especialmente na forma de desgaste de flanco, o nível dos sinais de torque aumenta.

FANTIN (1992) destacou que o sinal representativo do torque na operação de roscamento se compõe de diferentes fases (Figura 2-13). Apenas duas são exploradas no processamento de dados: a fase 1 para os valores médio e máximo do sinal; e a fase 2 para o valor máximo do pico de reversão.

Figura 2-13- Evolução do sinal representativo do torque no roscamento (FANTIN, 1992).

A exploração da fase 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. Na fase 2, o valor máximo do pico de reversão informa sobre a qualidade do furo realizado. Este pico é representativo do torque de atrito quando do retorno do macho (FANTIN, 1992).

Muitos pesquisadores (HERNANDEZ & NICHOLS, 1986, HERNANDEZ & SHIRAKI, 1987, WAKABAYASHI & OGURA, 1990, HONG et al., 1995, e HEWSON & GEROW, 1996) utilizaram o torque no processo de roscamento interno com macho para avaliar o desempenho de fluidos de corte. Isto porque o roscamento é uma operação realizada com múltiplas arestas e é considerada como uma das mais difíceis operações na remoção de metal. A vida da ferramenta é um importante parâmetro associado à qualidade dos óleos de corte (HEWSON & GEROW, 1996). Na análise teórica do torque no roscamento, fatores que contribuem para este são o coeficiente de atrito e a tensão necessária para romper um material usinado sobre a superfície de saída da aresta de corte de um macho. A redução de tais fatores é apontada como função dos fluidos de corte. Entretanto, a contribuição teórica do coeficiente de atrito para o torque no roscamento é pequena em comparação àquela encontrada no valor medido. Acredita-se que os fluidos de corte influenciam o processo de corte de uma maneira

global, e não apenas pela redução do atrito sobre a superfície de saída (WAKABAYSHI & OGURA, 1990).

2.2.4 Influencia da composição e dureza do material no roscamento

Um metal é raramente selecionado por sua usinabilidade apenas. Entretanto, uma mudança de material pode aumentar a produtividade e diminuir o custo sem sacrificar as propriedades requeridas. Invariavelmente, o roscamento de tipos de fácil usinagem resulta em roscas mais precisas e de melhor acabamento com altas taxas de produção e custo inferior do que o roscamento de aços endurecidos de difícil usinagem (JOHNSON, 1989).

A Figura 2-14 ilustra o efeito da dureza do material da peça sobre o roscamento de chapas de aços carbono de baixa liga com 32 mm de espessura. Neste ensaio foram usinadas roscas passantes, com machos de aço rápido M10, de $\frac{1}{4}$ -28 UNF e $\frac{1}{2}$ -20 UNF cujas características geométricas se encontram na Tabela 2-2 (JOHNSON, 1989). Pela Figura 2-14 percebe-se que tanto para o caso (a) como para o (b), a velocidade de corte utilizada para realizar o roscamento a uma dureza de 52 HRC foi cerca de 30 vezes menor em relação a empregada no aço de dureza 15 HRC. Já, no roscamento a uma dureza de 47 HRC verifica-se uma velocidade de corte inferior cerca de 6 vezes em relação a adotada para o aço de 15 HRC (JOHNSON, 1989).

Figura 2-14— Efeito da dureza sobre o roscamento de aço carbono de baixa liga. (a) furos passantes 1/4-28 UNF. (b) furos passantes 1/2-20 UNF (JOHNSON, 1989).

Tabela 2-2 – Características geométricas das ferramentas utilizadas no roscamento de aço carbono de baixa liga e diferentes durezas.

Características das Ferramentas	1/4-28 UNF		1/2-20 UNF	
	15 HRC	47 - 52 HRC	15 HRC	47 - 52 HRC
Ângulo de hélice (graus)	0	0	0	0
Ângulo de entrada (graus)	30	42	30	42
Número de canais	4	4	3	3
Material da ferramenta	Aço ferramenta M10			

Sob as condições deste ensaio, a vida do macho de corte aumentou com um aumento no diâmetro do furo tomando-se como referência o volume de metal removido, mas reduziu em relação ao número de furos por afiação. Tomando-se como base o volume de material removido pode-se afirmar que o desempenho do roscamento para furos com diâmetro de 12,7 mm (1/2 in.) foi ligeiramente maior que para o roscamento com diâmetro de 6,35 mm (1/4 in.) na usinagem do aço com dureza de 52 HRC. Entretanto, se comparado o custo de ambos os processos em relação ao número de furos roscados, conclui-se que para o diâmetro de 6,35 mm (1/4 in.) o custo é levemente menor quando se trabalha com aços de 52 e 47 HRC.

Com os dados apresentados acima, percebe-se que a composição e a dureza do material a ser roscado influenciam de forma significativa a vida útil do macho de corte. Portanto, quando o projeto realmente exige o uso de peças confeccionadas com materiais que apresentam dureza elevada, escolher os parâmetros de corte e as características da ferramenta de forma adequada é de fundamental importância para se produzir roscas de qualidade a um menor custo.

2.3 *Desgaste em Ferramentas de Corte*

Materiais metálicos possuem irregularidades em sua superfície, na forma de picos e vales. Na interface entre dois materiais metálicos, minúsculas áreas de contato são criadas. Quando existe movimento entre eles ocorre perda de material de ambas as superfícies, normalmente na de menor dureza a perda é mais pronunciada. Na usinagem dos metais a ação de corte provoca atrito do cavaco e da peça contra a ferramenta aumentando, assim, a temperatura na interface, o que acelera os processos físicos e químicos associados à perda de material, conduzindo ao desgaste da ferramenta. Com o desgaste, a geometria da aresta de corte tende a se modificar. Esta modificação de geometria terá influência na força de corte, na potência consumida, no acabamento superficial obtido, na exatidão dimensional e na estabilidade dinâmica do processo com o possível aparecimento de trepidação (*chatter*).

Para uma ferramenta de corte, a perda de material é indesejável e deve ser minimizada, portanto é conveniente conhecer como se processa o desgaste, a fim de controlá-lo. Como no processo de usinagem existe uma geração intensa de calor, a temperatura tem grande importância no desgaste da ferramenta. A temperatura do material da ferramenta na zona onde ocorre o desgaste é determinada pela diferença entre a taxa de energia térmica gerada e a taxa de energia térmica dissipada. A dissipação de energia térmica é uma função das propriedades termo-condutivas do material da ferramenta e do material da peça (KENDALL, 1989). O desenvolvimento e a seleção básica de materiais de ferramenta são baseados na sua habilidade de manter a dureza, tenacidade e estabilidade química a altas temperaturas. Mesmo as melhores ferramentas podem ter suas propriedades modificadas com o aumento da temperatura.

2.3.1 Tipos de desgaste

Durante a usinagem dos metais a ação do corte muda à forma e, portanto, a geometria original da ferramenta de corte. Verifica-se um desgaste progressivo tanto na superfície de folga quanto na superfície de saída da ferramenta. A Figura 2-15 apresenta alguns dos principais tipos de desgaste, seus nomes e formas (JACK, 1987).

Figura 2-15 - Principais Áreas de Desgaste (KENDALL, 1989, e JACK, 1987).

Pelo menos três formas de desgaste podem ser identificadas na Figura 2-15:

- Desgaste de cratera (área A);
- Desgaste de flanco (área B);
- Desgaste de entalhe (áreas C e D).

Além destes, há também o desgaste em forma de pente, mais comum em processos de corte interrompido e a deformação plástica. Antes que um desses desgastes atinja grandes proporções, de maneira a colocar a estabilidade do processo de corte em risco, a ferramenta deverá ser re-afiada ou substituída. Tais desgastes se desenvolvem através de vários mecanismos de desgaste.

2.3.2 Mecanismos de desgaste

Os mecanismos de desgaste resultam de processos físicos e químicos durante a operação de usinagem. A literatura apresenta variações na classificação dos mecanismos de desgaste, porém, grande parte dos trabalhos existente, considera pelo menos seis mecanismos diferentes

(PALMAI, 1987, FERRARESI, 1984, TRENT, 1991, e MACHADO, 1993). A seguir, será definido cada um desses mecanismos ou formas.

2.3.2.1 *Desgaste por difusão*

Este mecanismo envolve a transferência de átomos de um material para outro e é fortemente dependente da temperatura e da solubilidade dos elementos envolvidos na zona de fluxo (zona de cisalhamento secundário). Em usinagem, as velocidades relativas entre a ferramenta e peça ou entre cavaco e ferramenta são altas e o tempo de contato entre estes materiais é muito pequeno. Isso praticamente levaria o mecanismo de difusão a ser desprezível, se não fosse a existência de uma zona de aderência (zona morta ou zona de fluxo) na interface cavaco-ferramenta (TRENT, 1991). Este mecanismo de desgaste poderá atuar tanto na superfície de saída como na superfície de folga, e a taxa de desgaste irá aumentar com o aumento da velocidade de corte e do avanço. No microscópio, as áreas desgastadas por difusão têm uma aparência lisa (TRENT, 1991, e MACHADO, 1993). Segundo (TRENT, 1991, e DINIZ et al., 1999) a difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera (Figura 2-16) em altas velocidades de corte, pois é na superfície de saída da ferramenta que se tem as condições necessárias para a difusão, isto é, alta temperatura, devido às altas velocidades e à zona de aderência, e tempo de contato cavaco-ferramenta, devido à velocidade de saída do cavaco ser zero na zona de aderência.

Um exemplo típico de mecanismo por difusão é aquele que acontece na ferramenta de diamante quando se usinam ligas ferrosas. A partir de temperaturas não muito altas (em torno de 600°C), devido à alta afinidade entre o carbono do diamante e o ferro do cavaco, o processo de difusão é grandemente incentivado.

Figura 2-16 - Craterização provocada pela difusão na interface (SANDVIK, 2000).

2.3.2.2 Desgaste por aderência e arrastamento - “attrition”

Este mecanismo ocorre, geralmente, a baixas velocidades de corte, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. O fenômeno da aderência está presente na formação da aresta postiça de corte, mas pode-se ter desgaste por aderência mesmo sem a formação da aresta postiça. Sob estas condições, fragmentos microscópicos (na forma de grãos) são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface (EZUGWU, 1999, e MACHADO, 1999). No microscópio, as áreas desgastadas por “attrition” possuem uma aparência áspera (TRENT, 1991, e MACHADO, 1999).

A utilização adequada do fluido de corte (principalmente com efeito lubrificante) e o recobrimento da ferramenta com materiais de baixo coeficiente de atrito como o nitreto de titânio (TiN) possui uma grande influência na diminuição deste tipo de desgaste (DINIZ et al., 1999).

2.3.2.3 Desgaste abrasivo

O desgaste abrasivo envolve a perda de material por microsulcamento ou microcorte causado por partículas de elevada dureza relativa e pela temperatura de corte, que reduz a dureza da ferramenta (TRENT, 1991, e MACHADO, 1993). Estas partículas podem estar contidas no material da peça (carbonetos e carbonitretos), ou podem, principalmente, ser partículas da própria ferramenta que são arrancadas por “attrition”, por exemplo. Este mecanismo de desgaste é muito importante na usinagem com ferramentas de aço rápido,

ferramentas revestidas, cerâmicas puras e cerâmicas mistas. A capacidade do material da ferramenta de resistir a este mecanismo de desgaste está ligada à sua dureza a alta temperatura e ao ponto de fusão da mesma. Com o aumento da temperatura a dureza do material da ferramenta tende a diminuir, e isto acontece quando aumenta-se a velocidade de corte e o avanço. Conseqüentemente a temperatura da aresta de corte aumenta, podendo este efeito ser atenuado pelo uso de uma ferramenta com alta condutibilidade térmica. Essa perda de dureza proporciona o arrancamento de material da ferramenta pelas partículas duras presentes no material que esta sendo usinado. Tanto o desgaste de flanco quanto o desgaste de cratera podem ser gerados pela abrasão, porém ela se faz mais proeminente no desgaste de flanco (Figura 2-17), já que a superfície de folga atrita com um elemento rígido que é a peça, enquanto que a superfície de saída atrita com um elemento flexível que é o cavaco (DINIZ et al., 1999).

Figura 2-17 - Desgaste de flanco provocado pela abrasão (SANDVIK, 2000).

2.3.2.4 Oxidação

Altas temperaturas e a presença de ar e água, contida nos fluidos de corte, geram oxidação para a maioria dos metais. O tungstênio e o cobalto, durante o corte, formam filmes de óxidos porosos sobre a ferramenta, que são facilmente levados embora pelo 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. O desgaste gerado pela oxidação se forma especialmente nas extremidades do contato cavaco-ferramenta devido ao acesso do ar nesta região, sendo esta

uma possível explicação para o surgimento do desgaste de entalhe (DINIZ et al., 1999), conforme pode ser visto na Figura 2-18.

Figura 2-18 - Desgaste de entalhe provocado pela oxidação (SANDVIK, 2000).

2.3.2.5 *Fratura*

A vida irregular da ferramenta é freqüentemente causada pela fratura antes de seu desgaste estar avançado. É raro ocorrer fratura enquanto a aresta de corte da ferramenta está em ação contínua de corte sobre a peça. Mais freqüentemente a ferramenta fratura no início do corte. O corte interrompido e as operações tais como fresamento são particularmente severos, podendo envolver fratura devido à fadiga mecânica. A profundidade de usinagem inadequada contribui para o surgimento da fratura. A fratura pode ser iniciada também pela deformação da ferramenta, seguida pela formação de trinca e, finalmente, a fratura mecânica surge no estágio final da falha da ferramenta (Figura 2-19) (TRENT, 1984).

Figura 2-19 - Lascamento da ferramenta de corte (SANDVIK, 2000).

Este caso enfatiza a importância do diagnóstico correto, visto que a ação para se prevenir a falha incluiria o uso de um carboneto com maior dureza e menor tenacidade, para prevenir a deformação plástica inicial. A prevenção da fratura não se resolve apenas com a troca do tipo de carboneto, mais freqüentemente envolve a geometria da ferramenta e as condições de corte. A fratura é comum em ferramentas de metal duro (TRENT, 1984).

2.3.2.6 *Fadiga*

A Fadiga ocorre principalmente no corte interrompido, como no fresamento, onde várias trincas pequenas podem ser observadas na ferramenta. Estas trincas são causadas pela alternância da expansão e da contração das camadas superficiais da ferramenta, quando estão aquecidas durante o corte e refrigeradas pela condução para dentro do corpo da ferramenta durante os intervalos entre os cortes. As trincas são normalmente iniciadas na posição mais quente sobre a superfície de saída, a alguma distância da aresta, então se propaga através da aresta e desce no flanco. Dentes de fresa de carboneto freqüentemente mostram várias trincas após o uso, mas elas parecem fazer relativamente pouca diferença à vida da ferramenta na maioria dos casos. Se as trincas tornarem-se muito numerosas, elas podem se juntar e causar quebras de pequenos fragmentos da aresta de corte. Elas podem agir também como elevadores de tensão através da qual a fratura pode ser iniciada de outras causas. É comum em ferramentas de metal duro (TRENT, 1984).

2.3.3 Vida da ferramenta de corte

O tempo em que uma ferramenta de corte trabalha efetivamente antes de ser re-afiada, ou substituída, é denominado de “vida da ferramenta de corte”, T (minutos). Um critério deve ser usado então para determinar o fim de vida da ferramenta, de maneira a manter o processo produtivo dentro de condições econômicas adequadas (TRENT, 1991).

Para isso, a ISO (*International Standards Organisation*) sugeriu um padrão para o teste de vida da ferramenta. A Figura 2-20 mostra alguns dos parâmetros utilizados pela norma ISO 3685 (1993) para quantificar esses desgastes. Os principais desgastes são:

- Profundidade de cratera (K_T);
- Desgaste de flanco médio (VB_B);
- Desgaste de flanco máximo (VB_{Bmax});
- Desgaste de entalhe (VB_N).

Figura 2-20- Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte (ISO 3685, 1993).

O critério recomendado pela ISO 3685 (1993) para ferramentas de aço rápido, metal duro e cerâmicas é:

Desgaste de flanco médio, $VB_B = 0,3 \text{ mm}$;

Desgaste de flanco máximo, $VB_{Bmax} = 0,6 \text{ mm}$;

Profundidade da cratera, $KT = 0,06 + 0,3f$ onde f é avanço em mm/rev;

Falha catastrófica.

Quando o desgaste de entalhe predomina, como no caso da usinagem de ligas de Ni com metal duro ou cerâmicas, a norma recomenda usar um valor de $VB_N = 1,0$ mm como critério também. Desta maneira, quando qualquer um dos limites for ultrapassado, recomenda-se a re-afiação, ou substituição, da aresta de corte.

É importante salientar que estes valores sugeridos pela ISO 3685 são para testes de vida de ferramentas, e industrialmente esses parâmetros podem assumir valores diferentes, pois eles dependem de vários fatores tais como: rigidez da máquina-ferramenta, precisão requerida na peça, etc., que são diferentes para os diversos processos de fabricação. Uma maneira prática muito utilizada industrialmente é permanecer usando a aresta de corte até que as peças produzidas saiam das especificações de tolerância e/ou acabamento de projeto.

2.4 Materiais e Coberturas para Ferramentas

O desenvolvimento das ferramentas de corte no último século se deve, em grande parte, à introdução de novos materiais, tanto para ferramentas quanto para peças, assim como às novas tecnologias empregadas na fabricação e transformação dos mesmos. Existe um amplo espectro de materiais para ferramenta, os quais possuem diversas propriedades, porém as três mais importantes são: estabilidade química e física altas temperaturas, resistência ao desgaste abrasivo, e resistência a fratura frágil (SHAW, 1986). Contudo, nos materiais para ferramentas conhecidos, até o presente momento, não se observou essas três propriedades reunidas com a intensidade desejada (SHAW, 1986). Como dureza e tenacidade são duas propriedades opostas (em uma análise superficial, alta dureza significa baixa tenacidade e vice-versa), o balanço destas propriedades nos materiais para ferramentas de corte se tornou um desafio para os fabricantes. Por isso, hoje se pode encontrar no mercado um grande número de ferramentas com invejáveis características de tenacidade e dureza, o que foi conseguido devido à utilização de diferentes composições químicas, tamanhos de grãos finos e total controle dos processos de fabricação e tratamento térmico. (MACHADO & DA SILVA, 1999).

Os principais materiais empregados em ferramentas de corte, em ordem cronológica do aparecimento desde o início do século, foram: o aço carbono, o aço rápido, o metal duro (ou carbeto), o cermet, a cerâmica, o PCBN (*Polycrystalline Cubic Boron Nitride*) e o PCD

(*Polycrystalline Diamond*). Os dois últimos apareceram comercialmente, praticamente juntos por volta de 1975 (MACHADO & DA SILVA, 1999).

2.4.1 *Aço carbono e aço liga*

Na primeira parte do século passado os aços carbono e os aços de baixa e média liga eram os únicos materiais de ferramenta disponíveis. Antes de 1870 todas as ferramentas empregadas em torneamento eram forjadas (o material era aquecido em forjas a carvão e martelado até a forma desejada) a partir de aço carbono, de composição aproximada de 1% de carbono, 0,2% de manganês e o restante de ferro. Este aço podia ser usado para a usinagem de aço em baixas velocidades de corte (aproximadamente 4,8 m/min). Este material também requer um resfriamento rápido em água para endurecer, o que frequentemente resulta em trincas causadas pelo resfriamento (TRENT, 1984).

Em 1870 Robert Mushet introduziu um aço na Inglaterra tendo composição aproximada de 2% de carbono, 1,6% de manganês, 5,5% de tungstênio, e 0,4% de cromo. Este material era endurecido ao ar e capaz de manter sua dureza em temperaturas mais altas, possibilitando o emprego de maiores velocidades de corte, em torno de 7,8 m/min. Foram feitas modificações na composição deste aço (principalmente a substituição do manganês por cromo) e foi usado como ferramenta de torner até o começo do século XX. (SHAW, 1986).

A maior deficiência destes aços era a perda de dureza quando submetidos a temperaturas superiores à de revenimento (de 300° a 600° C), levando a aresta de corte a um desempenho insatisfatório.

2.4.2 *Aço Rápido*

O primeiro grande impulso causado nos materiais de ferramentas aconteceu na virada do último século, quando Taylor e White desenvolveram os primeiros aços rápidos, contendo aproximadamente 0,67% de carbono, 18,91% de tungstênio, 5,47% de cromo, 0,11% de manganês e 0,29% de vanádio e apropriado tratamento térmico. Seu surgimento revolucionou a prática de usinagem na época, proporcionando uma melhora de desempenho e conseqüentemente um aumento de produtividade. Exatamente por isso, estes aços levaram este nome. (MACHADO & DA SILVA, 1999).

O aço rápido é um material tenaz, de elevada resistência ao desgaste e elevada dureza a quente (se comparado com os aços carbono usados para ferramentas), podendo ser

utilizados até temperaturas de corte da ordem de 600° C. (DINIZ et al., 1999). A estrutura metalográfica do aço rápido no estado temperado é martensítica básica com carbonetos incrustados. A estrutura básica confere ao material a sua dureza a quente, a qual é tanto maior quanto mais elementos de liga são dissolvidos durante o tratamento térmico e permanecem dissolvidos depois. O tipo e o número de carbonetos duros que se formam são responsáveis pela resistência à abrasão. A tenacidade do aço rápido depende dos elementos de liga e do grau de dissolubilidade destes. Em geral os aços rápidos resistentes à abrasão são pouco tenazes e vice-versa. Outra característica do aço rápido é sua dureza em temperatura ambiente (DINIZ et al., 1999).

2.4.3 Metal Duro

O segundo grande impulso na área dos materiais para ferramentas de corte aconteceu com o aparecimento do metal duro. As primeiras ferramentas de metal duro bem sucedidas foram trazidas para os Estados Unidos da Alemanha em 1938. Essas ferramentas consistiam de partículas de carbeto de tungstênio (WC) bem finas, sinterizadas junto com o ligante de cobalto. (SHAW, 1986). A dureza em altas temperaturas e a tenacidade (ou capacidade de resistência ao choque), são propriedades que se exigem de qualquer material utilizado em ferramentas de usinagem e que encontram um compromisso muito bom no metal duro, isto é, pode se ter metais duros de elevada tenacidade, como também pode-se conseguir metais duros com alta resistência ao desgaste ou dureza a quente. Outras características que são normalmente controladas, pois afetam a capacidade de corte do metal duro, são a porosidade e a microestrutura (DINIZ et al., 1999).

A *International Standards of Organization* (ISO) criou uma classificação para o metal duro. Uma classe destinada principalmente à usinagem de ferro fundido cinzento, metais não ferrosos e metais abrasivos como fibra de vidro e grafite que produzem cavacos curtos (ISO tipo K) e outra para usinagem de metais ferrosos que produzem cavacos longos (ISO tipo P). A classe K consiste de cristais de carbeto de tungstênio (WC) com normalmente 3 a 12% de cobalto como ligante enquanto a classe P, que também utiliza o cobalto como ligante, tem parte do WC substituído por carbeto de titânio (TiC), carbeto de tântalo (TaC) ou carbeto de nióbio (NbC), todos com diferentes graus de perda de resistência mecânica, resistência ao desgaste abrasivo, ao impacto e a corrosão (oxidação). Além dessas duas classes existem uma terceira a M que é uma categoria intermediária para ferro fundido dúctil e aços duros.

Outros fatores além dos já citados que influem na seleção da classe do metal duro a ser utilizada em uma determinada aplicação são: (DINIZ et al., 1999).

- severidade da operação de usinagem: operações com grandes avanços e profundidade de corte (desbaste) ou cortes interrompidos criam tensões elevadas na ferramenta, exigindo-se o emprego de classes com maior tenacidade (maior teor de cobalto).

- velocidade de corte: à medida que a velocidade de corte cresce e a peça já sofreu uma operação anterior que retirou excentricidade, casca endurecida, etc. (operações de acabamento) aumenta a adequação da utilização de classes com maior resistência ao calor e à abrasão (menos cobalto e mais carbeto).

O metal duro é fabricado por um processo de metalurgia do pó consistindo em uma sequência de passos que devem ser cuidadosamente controlados para a obtenção de um produto final com as propriedades, microestrutura e desempenho desejado. O desempenho das ferramentas de metal duro é fortemente dependente da composição e da microestrutura, e suas propriedades dependem não somente do tipo e quantidade de carvão mas também do tamanho de grão do carvão e da quantidade de metal ligante. Outro fato importante é que a ductilidade do metal duro é baixa na temperatura ambiente, existindo uma pequena diferença entre sua resistência ao escoamento e a resistência à ruptura. Em altas temperaturas entretanto, a ductilidade aumenta. (SANTHANAM et al., 1989).

Existem no mercado disponíveis pastilhas de metal duro revestidas, que surgiram antes das ferramentas de aço rápido revestidas, porém quase na mesma época. Elas podem ter revestimentos de camadas simples (ex. TiC), dupla (ex. TiC-Al₂O₃) ou tripla (ex. TiC-Ti(C,N)). Estas ferramentas apresentam excelentes características de resistência ao desgaste, com um núcleo bastante tenaz, suportando altas velocidades de corte em usinagem de aços-liga, ferros fundidos, superligas e aços inoxidáveis. (MACHADO & DA SILVA, 1999). A espessura do revestimento depende da operação que se pretende realizar, pois influência na vida e no desgaste da ferramenta (SASAKI et al., 1982).

2.4.4 Cermet

O cermet é um material intermediário entre o metal duro e a cerâmica. Surgiu na metade da década de 50, mas só foi amplamente usado na década de 80 (TAKATSU, 1990). É construído, essencialmente, de um componente cerâmico com outro metálico. O componente cerâmico do cermet proporciona alta dureza a quente e resistência a oxidação, enquanto o

componente metálico acentua a resistência ao choque térmico e a ductilidade (GRUSS, 1989). As cerâmicas mais comuns são o TiC e o TiN tendo o níquel (Ni) (um metal) como elemento de liga. Pode ocorrer também a presença de outros elementos, tais como Al, Co, Mo ou compostos de Mo₂C, TaC, NbC, WC, AlN, TaN e outros (MACHADO & DA SILVA, 1999).

As classes de cermet mais recentes junto com projetos inovadores de insertos tem expandido grandemente o campo de aplicação destas ferramentas de corte. De um modo geral o cermet possui algumas vantagens em relação aos outros materiais de ferramentas dentro de condições de corte mais suaves, das quais pode-se destacar: resistência superior ao desgaste abrasivo e de adesão e possibilidade de trabalho em altas velocidades de corte (MCGRAW et al., 1997). Hoje são ferramentas com grandes aplicações.

2.4.5 Cerâmicas

O material cerâmico é citado na literatura como ferramenta de usinagem desde a década de 50, quando as primeiras ferramentas foram utilizadas, mas só passaram a ser um material com uma porcentagem não desprezível do mercado de ferramentas de corte na década de 80, depois dos desenvolvimentos conseguidos no campo das propriedades da cerâmica (DINIZ et al., 1999). O material cerâmico possui algumas propriedades que são muito interessantes para uma ferramenta de corte, tais como: dureza a quente e a frio, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química (evitando a difusão, o que é muito importante quando se usina em altas velocidades e temperaturas). Algumas propriedades destes materiais, porém, fazem com que sua utilização na usinagem não seja tão fácil, que são: baixa condutividade térmica, o que, logicamente, dificulta a transferência de calor e faz com que a região próxima do contato cavaco-ferramenta e peça-ferramenta atinja temperaturas muito altas e, principalmente, baixa tenacidade, o que facilita o trincamento e a quebra da ferramenta. Esta baixa tenacidade foi a principal razão que fez com que o material cerâmico não fizesse parte do mercado de ferramentas de corte há mais tempo. Nos últimos anos, grande esforço tem sido feito no sentido de aumentar a tenacidade deste material e bons resultados tem sido obtidos (DINIZ et al., 1999).

As ferramentas cerâmicas podem ser classificadas da seguinte maneira:

- **à base de óxido de alumínio (Al₂O₃ – alumina):** podem ser puras ou com adições. As cerâmicas puras são ferramentas constituídas basicamente de finos grãos de Al₂O₃ sinterizados. É comum adicionar MgO para inibir o crescimento de grão. Outros

constituintes, tais como óxido de cromo, titânio e níquel são às vezes adicionados para aumentar a resistência mecânica. Estas ferramentas possuem um alto valor de dureza, resistência ao desgaste e excelente estabilidade química, mas deixam a desejar na tenacidade. São geralmente usadas no desbaste e acabamento de materiais fundidos, aços tratados superficialmente ou totalmente temperados (MACHADO & DA SILVA, 1999). Uma outra recente introdução no mercado, já nos anos 80, que teve grande receptividade, são as ferramentas cerâmicas também a base de Al_2O_3 reforçadas com carbetto de silício (SiC) (“whiskers”). As propriedades desse grupo de materiais são consideradas excepcionais, com aplicação na usinagem dos aços duros, aços inoxidáveis e principalmente nas ligas de níquel (superligas) (MACHADO & DA SILVA, 1999).

- **à base de nitreto de silício (Si_3N_4):** são cristais de Si_3N_4 com uma fase intergranular de SiO_2 que são sinterizados na presença da alumina (sialon) e/ou óxido de ítrio (Y_2O_3) e manganês (MgO) (DINIZ et al., 1999). Com esses materiais tem-se conseguido bons resultados na usinagem das ligas de níquel e ferros fundidos. As cerâmicas a base de nitreto de silício mantém a mesma resistência ao desgaste que a das brancas (Al_2O_3), com uma tenacidade superior. Isto faz com que a aplicação destes materiais chegue ao fresamento, o que pouco tempo atrás era inadmissível para as cerâmicas. (MACHADO & DA SILVA, 1999).

2.4.6 Materiais ultraduros

Como ultraduros são considerados os policristalinos: diamante sintético PCD (*Polycrystalline Diamond*) e o PCBN (*Polycrystalline Cubic Boron Nitride*). Tanto o PCD e o PCBN podem ser encontrados apenas como uma camada de 0,5 a 1,0 mm, que revestem geralmente o metal duro WC + Co, ou então ferramentas totalmente sólidas (MACHADO & DA SILVA, 1999).

O PCD normalmente é usado na usinagem de materiais não-metálicos muito abrasivos (ex. grafite, plásticos, e plásticos reforçados com fibra de vidro) e não-ferrosos (ex. alumínio, cobre e suas ligas e *Metal Matrix Composite* (MMC)). (KALISH, 1983). Sua principal desvantagem está no fato de não usinar materiais ferrosos, como o aço. Devido às altas temperaturas geradas no processo de usinagem ocorre a difusão do carbono do diamante para o aço, além da grafitização. Em simples situação de desgaste abrasivo, o PCD é significativamente mais resistente ao desgaste que outros materiais de ferramenta de corte. O

PCD é aproximadamente 10 vezes mais resistente que o PCBN e 100 vezes mais resistente que o metal duro (HEATH, 1989).

A composição química dos diversos PCDs encontrados no mercado praticamente não varia, mas suas propriedades variam com o tamanho das partículas de diamante do material, que variam de 2 a 25 μm de diâmetro. A medida que o tamanho do grão cresce a resistência ao desgaste aumenta, com conseqüente queda da tenacidade (DINIZ et al., 1999).

Com relação ao PCBN, sua principal aplicação reflete sua habilidade de manter a dureza em alta temperatura e sua relativa baixa solubilidade em ferro, de tal modo que ele é a ferramenta mais adequada para corte de ligas de materiais ferrosos endurecidos (principalmente aços e ferro fundido) e algumas superligas à base de cobalto e níquel (LIN et al., 1995).

Os produtos de PCBN podem ser caracterizados pela quantidade de CBN e as segundas fases, as quais podem ser um metal (liga Ni-Co), um carbeto (TiC ou WC) ou uma cerâmica (TiN, AlB_2/AlN) cujas proporções podem variar de aproximadamente 5 a 70%. Diferentemente do PCD, o PCBN apresenta um grande número de diferentes formulações. Cada fabricante usa diferentes materiais de segunda fase, distribuição do tamanho de partículas e concentração de grãos de CBN. Portanto não é fácil generalizar sobre propriedades mecânicas, técnicas de fabricação, e desempenho de usinagem das várias classes. Entretanto, duas amplas categorias de aplicação podem ser definidas (HEATH, 1989 e DINIZ et al., 1999):

-usinagem de desbaste: de materiais ferrosos endurecidos, particularmente ferros fundidos endurecidos com uma faixa de dureza de 45 à 65 HRC, e com profundidade de corte entre 0,5mm e 8,0 mm.

-usinagem de acabamento: de componentes endurecidos, tipicamente aços ferramentas ou ferros fundidos endurecidos superficialmente. Com profundidade de corte abaixo de 0,5 mm, tipicamente 0,2 mm.

2.4.7 Revestimentos utilizados nas ferramentas de corte

A aplicação em escala industrial de revestimentos começou na década de 60 em metal duro, através do processo CVD (deposição química a vapor). Esta aplicação não podia ser realizada em aço rápido, pois esta técnica requer temperatura da ordem de 1000°C, acima da

temperatura de revenimento dos aços. Somente com o desenvolvimento do processo PVD (deposição física a vapor), que usa temperaturas em torno de 500°C, foi possível fabricar ferramentas de aço rápido revestidas. Tal temperatura não compromete o tratamento térmico desse material (MACHADO & DA SILVA, 1999; DINIZ et al., 1999; YUHARA, 2000).

Os revestimentos separam a ferramenta do material da peça durante a usinagem e oferecem a possibilidade de substituir o fluido refrigerante. 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 a redução do atrito para diminuir a quantidade de calor dissipada pela ferramenta, proteção térmica, proteção contra a difusão e resistência a altas temperaturas. (TÖNSHOFF et al., 1997).

Em resumo, o máximo benefício do revestimento será atingido pela combinação de uma alta adesão aliada a uma alta dureza do revestimento, uma ótima acomodação da expansão térmica entre o revestimento e o substrato, a presença de uma interface dúctil entre o revestimento e o substrato e a presença de uma favorável tensão residual compressiva no substrato para resistir a propagação de trincas (MILLS, 1996).

Os revestimentos usados em ferramentas de usinagem podem ser classificados como endurecedores ou lubrificantes, de acordo com suas propriedades. As camadas dos chamados macios enquadram-se no segundo tipo. Um aspecto negativo relacionado à utilização de ferramentas revestidas é a necessidade da aplicação de um novo revestimento após a reafiação da ferramenta (SCHULZ et al., 2000).

2.4.7.1 *Revestimentos endurecedores*

Os revestimentos do tipo endurecedores se destacam por sua alta dureza, freqüentemente superior a 2500 HV. Além do reduzido desgaste por abrasão, essas camadas proporcionam pequena adesão aos cavacos. Isto, por sua vez, leva à redução da abrasão por adesão, coeficiente de atrito minimizado e menores forças de corte.

Os contínuos desenvolvimentos nesta área mostram que revestimentos ainda melhores, particularmente aqueles à base de titânio, têm sido obtidos pela otimização de sua composição química. Algumas possibilidades podem ser vistas na Tabela 2-3 .

Tabela 2-3 - Propriedades dos revestimentos (SCHULZ et al, 2000).

Tipo	Espessura típica (μm)	Microdureza (HV) 0,05	Resistência à oxidação ($^{\circ}\text{C}$)	Coefficiente de atrito
TiN	1 a 5	2.100 a 2.600	Até 450	0,40
TiCN	1 a 5	2.800 a 3.200	Até 350	0,25 a 0,40
TiAlN	1 a 5	2.600 a 3.000	Até 700	0,30 a 0,40

Embora outros materiais possam também ser usados para este fim (ex. carboneto e nitreto de háfnio) os revestimentos endurecedores mais utilizados são o carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3), nitreto de titânio (TiN), carbonitreto de titânio (TiCN), nitreto de titânio alumínio (TiAlN), CBN e PCD. Geralmente a primeira camada, logo acima do núcleo é o carboneto de titânio ou o carbonitreto de titânio, que algumas vezes é a única camada de cobertura. As pastilhas com duas camadas de cobertura têm, em geral, uma camada de óxido de alumínio ou de nitreto de titânio por cima da camada de TiC. As pastilhas com três camadas (Figura 2-21) tem, em geral, uma camada de TiN recobrindo uma camada intermediária de Al_2O_3 que, por sua vez, recobre uma camada de TiC ou TiCN que está por cima do núcleo de metal duro. (DINIZ et al.,1999).

Figura 2-21 - Exemplo de combinação de 3 revestimentos para condições difíceis de usinagem (SANDVIK, 2000).

As principais características de cada uma dessas camadas são:

- **carboneto de titânio (TiC):** possui excelente resistência ao desgaste por abrasão, além de funcionar como elemento que promove a adesão das camadas de cobertura com o

metal duro do núcleo, já que o óxido de alumínio (camada que normalmente está por cima da TiC) não possui alta afinidade físico-química com o metal duro a fim de conseguir uma forte adesão com o núcleo. Por isso, em geral, ou é a única camada de cobertura, ou é a camada que está por debaixo das demais. Outras características importantes deste material: baixa tendência de soldagem com o material da peça, dificultando o desgaste por adesão e a formação de aresta postiça de corte e baixo coeficiente de dilatação térmica. (DINIZ et al., 1999).

- **nitreto de titânio (TiN):** foi a primeira camada disponível comercialmente e por muitos anos a única, portanto não é surpreendente o fato de encontrar um grande número de empresas utilizando-se desse revestimento. O TiN tem um grande espectro de utilização devido ao fato de possuir um bom balanço entre propriedades como: dureza, tenacidade, aderência (sobre o metal duro), estabilidade química (mais estável que o TiC), estabilidade térmica e reduzido coeficiente de atrito. Este compromisso de propriedades, porém não é ideal para todas as aplicações e isto abriu o campo para a implementação de outras camadas como o TiCN e TiAlN. (DINIZ et al., 1999 e YUHARA, 2000).

- **carbonitreto de titânio (TiCN):** o TiN forma uma camada de estrutura simples, ou seja, mono-camada. Já o TiCN normalmente possui uma estrutura mais complexa. Com o objetivo de conciliar uma boa aderência com uma alta dureza superficial, a relação entre os teores de C e N é variada de uma forma crescente durante o processo de revestimento. As principais vantagens do TiCN são sua elevada dureza, quando comparado ao TiN e ainda o seu baixíssimo coeficiente de atrito. Para aplicações especiais, tais como em usinagem de aços de alta liga, TiCN freqüentemente mostra vantagens em comparação com TiN e TiAlN (YUHARA, 2000).

- **óxido de alumínio (Al_2O_3):** Os revestimentos cerâmicos à base de óxido de alumínio (Al_2O_3) geralmente são usados apenas em combinação com outros tipos de camadas. Isto vale igualmente para os revestimentos de materiais duros como, por exemplo, camadas de diamante policristalino (PCD) e nitreto cúbico de boro (CBN) (SCHULZ et al., 2000). O revestimento de Al_2O_3 garante a estabilidade térmica necessária em temperaturas elevadas devido ao fato de ser um material cerâmico refratário e também possui alta resistência ao desgaste por abrasão, além de alta resistência a ataques químicos e à oxidação. É a principal responsável pela baixa tendência de formação de desgaste de cratera das ferramentas de metal duro recoberto. Por outro lado apresenta pequena resistência a choques térmicos e mecânicos.

- **nitreto de titânio alumínio (TiAlN)**: o revestimento de TiAlN representa um importante papel no desenvolvimento dos revestimento aplicados pelo processo PVD. O TiAlN é um desenvolvimento evolucionário do largamente utilizado revestimento de TiN.(PRENGEL, 1997). Um aumento considerável na vida útil da ferramenta de corte tem sido obtido com o revestimento de TiAlN, sendo sua principal vantagem a característica de formar um filme protetivo extremamente denso e com alta adesão de Al_2O_3 em sua superfície quando é aquecida, aumentando a resistência a difusão e oxidação do material do revestimento na peça. A segunda grande vantagem desse revestimento em usinagem é a sua baixa condutividade térmica. Assim, maior quantidade de calor é dissipado pelo cavaco, permitindo que se utilizem velocidades de corte mais altas, já que a carga térmica no substrato é menor. (YUHARA, 2000). Seu alto desempenho na usinagem a seco em comparação com os revestimentos TiN e TiCN é confirmado no exemplo da Figura 2-22, na qual é apresentada uma aplicação de furação sobre um aço SAE 1045 a 60 m/min, avanço de 0,2 mm/rev. e profundidade do furo passante de 20 mm. A vida da ferramenta relativa, neste exemplo, proporcionada pelo revestimento de TiAlN é quase duas vezes a do TiCN e cinco a do TiN.

Figura 2-22 – Desempenho de diferentes revestimentos na usinagem a seco (TITEX PLUS, 1999).

2.4.7.2 *Revestimentos lubrificantes*

Os revestimentos do tipo lubrificantes possuem como base uma camada de material duro, sobre a qual é depositada uma camada de material macio (por exemplo, bissulfeto de molibdênio – MoS₂) ou uma segunda camada de material duro com propriedades lubrificantes (por exemplo, carbetto de tungstênio com carbono – WC/C).

A estrutura molecular do MoS₂ consiste de planos individuais puramente de molibdênio ou puramente de enxofre. A clivagem ocorre entre os planos de enxofre vizinhos, pois a resistência da ligação entre eles é relativamente baixa. Para cristais simples de MoS₂ ao ar, o coeficiente de atrito de clivagem das faces sobre aço é cerca de 0,1, ao passo que para as arestas do cristal sobre o aço este valor aumenta para 0,26 (PURQUERIO & GAMBARINI, 1978).

O WC/C possui dureza de aproximadamente 1000 HV e tensão interna em torno de – 1GPa. Investigações com microscópios eletrônicos mostraram que o WC/C consiste de uma matriz de carbono amorfo, o qual é poroso com grãos nanocristalino de WC (10-20 nm). Em testes de escorregamento a seco, ou seja, pino sobre disco, os revestimentos de WC/C exibem valores muito baixos de desgaste sobre a superfície revestida e sobre a superfície oposta não revestida, mesmo após um tempo de teste considerável. A razão para esta pequena quantidade de desgaste é o baixo coeficiente de atrito e o amolecimento da superfície durante o escorregamento devido a sua microestrutura lamelar. Esta estrutura lamelar, consistindo de fases alternadas rica em carbono e rica em WC, é criada durante a deposição do revestimento (DERFLINGER et al., 1999).

Tanto MoS₂ como o WC/C combinam baixos valores de coeficiente de atrito ($\mu=0,2$) com alta dureza, sendo usados parcialmente combinados (revestimentos constituídos de várias camadas) com camadas de material duro, ou endurecedor. Em ambos os casos o objetivo é reduzir o atrito, melhorando o fluxo de cavaco e possibilitando usinagem a seco, ou pelo menos, a usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL), além de reduzir a força de corte (DERFLINGER et al., 1999; SCHULZ et al., 2000).

2.5 *Usinagem de Aços Ferramenta*

Com o nome genérico de aços para ferramentas e matrizes, ou simplesmente aços ferramenta, são designados os materiais ferrosos utilizados na confecção do ferramental de

que se serve a indústria, para a fabricação manual ou em máquinas ferramentas, de toda sorte de utilidades. Trata-se de aços dos quais é exigida a mais alta qualidade, obtidos geralmente em fornos elétricos, através de técnicas as mais apuradas, e sob rigoroso controle de qualidade. (RAUTER, 1974)

Os aços ferramenta são classificados de acordo com suas características metalúrgicas principais ou de acordo com seu nicho de aplicação. A classificação da "*American Iron and Steel Institute*", AISI, é a mais utilizada pela indústria de ferramenta e tem se mostrado útil para a seleção de aços ferramenta. As principais famílias de aços ferramenta da classificação SAE-AISI e suas características são apresentadas abaixo sendo que a Figura 2-23 mostra um diagrama contendo aplicabilidade e propriedades mecânicas.

Aços ferramenta temperáveis em água - Série W

Estes aços são essencialmente aços carbono e encontram-se entre os aços ferramenta de menor custo do mercado sendo que precisam ser temperados em água para atingir a dureza necessária. Por sua baixa temperabilidade, apenas em ferramentas de pequeno porte é possível conseguir o endurecimento total da seção transversal. Em peças maiores, a superfície endurece na têmpera, mas o núcleo se mantém com baixa dureza.

Aços ferramenta resistentes ao choque - Série S

Os aços resistentes ao choque são aços ligados, entre os quais a quantidade de liga pode variar amplamente, o que resulta em uma ampla variação de temperabilidade. Todos os aços da série S são projetados para que exijam o máximo de tenacidade. Os aços tipo S1 e S5 são os mais utilizados.

Aços ferramenta para trabalho a frio temperáveis em óleo - Série O

A temperabilidade destes aços é muito maior do que os da família W, devido ao maior teor de elementos de liga, portanto, estes aços podem ser temperados em óleo o que resulta em um menor perigo de surgimento de trincas e modificações dimensionais. O aço O1 é de longe o mais utilizado desta família.

Aços ferramenta para trabalho a frio - Série D

Os aços desta família são aqueles que contém elevada quantidade de carbono e cromo como elementos de liga, sendo também conhecidos como aços ledeburíticos. Dentre estes aços, os mais populares são os D2 e D6. Estes aços são caracterizados por uma elevada

temperabilidade e por atingirem uma alta dureza após o beneficiamento, na faixa de 58 – 64 HRC. Pertencem a família dos aços ditos indeformáveis no tratamento térmico, entretanto, tanto trabalhos experimentais quanto a prática de tratamento térmico mostram que estes aços são passíveis de deformação no tratamento térmico.

Por sua estrutura de carbonetos eutéticos, aliada a dureza após têmpera e revenimento, estes aços possuem elevada resistência ao desgaste. Em contrapartida, a série D apresenta baixa resistência a esforços bruscos, o que restringe bastante o seu uso em ferramental submetido a cargas súbitas. Embora indicados tipicamente para ferramentas de trabalho a frio, os aços D permitem aquecimento em serviço até cerca de 450 a 480° C, ainda com boa dureza de revenimento. (RAUTER, 1974, e WILSON, 1975)

Aços ferramenta para trabalho a quente – Série H

Os aços ferramenta para trabalho a quente são amplamente utilizados para a fabricação de matrizes e moldes. A principal família destes aços são os ligados principalmente ao cromo, com adições de Mo e V em menores quantidades, que constituem a família de aços H. O mais popular destes aços é o AISI H13. Este aço é utilizado em uma faixa ampla de dureza, entre 45-55 HRC, a qual deve ser especificada em função das condições de aplicação da ferramenta.

Aços ferramenta para moldes – Série P

Estes aços são utilizados na confecção de moldes para injeção de polímeros. O aço mais tradicional deste segmento é o aço AISI P20. Neste caso, o material vem pré-beneficiado da usina em uma faixa de dureza entre 28-32 HRC. Em casos especiais, o aço P20 pode ser beneficiado para durezas superiores.

O cromo e níquel são os principais elementos de liga destes aços. Com baixíssimos teores de carbono, usualmente entre 0,07 e 0,10%, estes aços ferríticos caracterizam-se por sua dureza excepcionalmente baixa, na condição de recozidos, permitindo a usinagem ou prensagem da forma desejada, seguida de cementação e têmpera convencionais. (RAUTER, 1974)

Aços rápido ao molibdênio - Série M

Os aços rápido ao molibdênio, dentre os quais se destaca o aço AISI M2, são aços de elevada resistência dureza, resistência ao desgaste e boa tenacidade. São beneficiados para

durezas superiores a 62 HRC. Particularmente o aço M2 é beneficiado para uma faixa entre 64 – 65 HRC.

Figura 2-23– Quadro de seleção para aços ferramenta (AÇOS FAVORIT)

2.5.1 Propriedades e principais usos do aço AISI D2

O alto teor de carbono e de cromo dos aços da série D proporcionam uma alta dureza de têmpera, alta resistência ao desgaste e boa resistência ao amolecimento pelo calor. A grande temperabilidade propiciada pelo alto teor de cromo, por sua vez, permite baixa velocidade de resfriamento na têmpera, tornando estes aços “indeformáveis”, para fins práticos. O AISI D2 é o mais tenaz, e apresenta melhor usinabilidade do que o D3, que lhe segue na série (RAUTER, 1974, e KRAUSS, 1990).

Tabela 2-4– Composição química do aço AISI D2 (AÇOS FAVORIT)

Nomenclatura	C	Mn	P (máx)	S (máx)	Si	Cr	Mo	V (máx)
SAE-AISI D2	1,40 - 1,60%	0,15 - 0,60%	0,03%	0,03%	0,15 - 0,60%	11,00- 13,00%	0,70 - 1,20%	1,10%

A composição química média dos aços AISI D2 é apresentada na Tabela 2-4. Usa-se esse tipo de aço sempre que se queira elevada resistência ao desgaste e à compressão, em trabalhos que envolvam grandes lotes de peças e tolerâncias dimensionais apertadas. Alguns exemplos incluem matrizes de corte, de furação, de estampagem, de extrusão a frio, de dobramento, para cunhagem, para corte a frio e a quente, buchas, alargadores, laminadores, moldes para cerâmicos, etc (RAUTER, 1974)

O alto teor de molibdênio (Mo) confere a este aço uma boa resistência ao amolecimento pelo calor. Em função da composição química, este aço apresenta um ótimo balanceamento entre a resistência ao desgaste e a tenacidade apresentado uma faixa de dureza de 55-65 HRC (KRAUSS, 1990).

Os aços da série D exigem uma têmpera muito cuidadosa. Por seu alto teor de carbono e de cromo e elevada temperatura de têmpera, eles são particularmente sujeitos ao fenômeno de retenção da austenita, o que diminui a sua dureza, e ainda traz sérios inconvenientes para a estabilidade dimensional futura desse material. Além disso, eles são fortemente descarbonetados, quando aquecidos em atmosfera não controlada. (RAUTER, 1974)

2.5.2 *Propriedades e principais usos do aço AISI H13*

O AISI H13 é um aço para trabalho a quente, ao cromo, contendo ainda vanádio, silício e molibdênio. Tal como os aços que o precedem, H11 e H12, foi especialmente pesquisado para a fundição sob pressão de ligas de alumínio, e outras. Resiste bem à formação de fissuras em peças sujeitas a choques térmicos ou aquecimentos e resfriamentos intermitentes. Possui grande temperabilidade, grande resistência ao amolecimento pelo calor, excelente tenacidade, boa resistência à abrasão e ótima usinabilidade. (RAUTER, 1974)

Tabela 2-5– Composição química do aço AISI H13 (AÇOS FAVORIT)

Nomenclatura	C	Mn	P (máx)	S (máx)	Si	Cr	Mo	V
SAE-AISI H13	0,32 – 0,45%	0,20 - 0,50%	0,03%	0,03%	0,80 – 1,20%	4,75 – 5,50%	1,10 - 1,75%	0,80 – 1,20%

A composição química média do AISI H13 é mostrada na Tabela 2-5. Este tipo de aço é destinado à fabricação de matrizes para forjamento a quente em prensas, fabricação de moldes para a injeção de plásticos e ferramentas para corte a quente, matrizes para a fundição de ligas de alumínio, chumbo, estanho ou zinco, ferramentas para a extrusão de ligas leves, etc. Tem emprego ainda, por seu elevado limite de escoamento com boa ductilidade, como material para peças de máquinas, sendo um dos chamados “*ultra-high-strength-steels*” (aços de resistência ultra-elevada) (RAUTER, 1974, e KRAUSS, 1990).

Devido a sua grande temperabilidade, o H13 pode ser temperado em meio pouco drástico, e não apresenta por isso grandes modificações dimensionais após tempera e revenido.

2.5.3 Formação do cavaco e usinabilidade

O mecanismo de formação do cavaco na usinagem envolve uma taxa de deformação muito alta, temperatura elevada e fluxo plástico não linear de matéria, principalmente em materiais endurecidos. Este fluxo plástico gera tensões locais na ferramenta de corte, uma distribuição de temperatura na interface ferramenta-cavaco e determina as condições do material da peça após o cavaco ter sido removido. Estes valores locais determinam as forças globais na estrutura da máquina ferramenta, que por sua vez finalizam a dinâmica e deformações do equipamento. Posteriormente este processo determina a taxa de vários fenômenos físicos que dirigem o desgaste da ferramenta como as reações químicas, o desgaste abrasivo e a difusão. Ele também determina quantitativamente a potência que deve ser gerada para efetivamente remover o material e, portanto, influencia na quantidade de calor desenvolvido pelos vários acionamentos do sistema. Este aquecimento resulta em deformação termo-induzida na estrutura da máquina que compromete a precisão de usinagem (DAVIES, 1999).

2.5.3.1 A geração do cavaco

No corte ortogonal com ângulo de saída negativo (como é o caso típico encontrado na usinagem de aços endurecidos) e aresta de corte suficientemente larga, a distribuição de tensões pode ser considerada como bidimensional. O máximo valor de tensão está na zona próxima ao raio da aresta (r_p) caindo bruscamente na superfície da peça antes do chanfro da ferramenta. Os baixos valores de tensões de compressão junto à superfície da peça, acoplados com altos valores de tensão de cisalhamento induzem a formação de uma trinca que irá crescer no ponto da superfície onde o valor crítico de tensão de cisalhamento foi alcançado. A propagação da trinca é em direção da aresta de corte até o momento em que as tensões mudam para um valor que permita a deformação plástica. Estas condições se aplicam na usinagem do aço endurecido e os estágios sucessivos da formação do cavaco são apresentados na Figura 2-24 e descritos a seguir. (POLACHON, 1998)

Figura 2-24— Estágios da formação do cavaco (POULACHON, 1998)

Primeiro Estágio

Devido à pressão realizada pela ferramenta no volume da peça que dela se aproxima o valor crítico da tensão de cisalhamento é atingida e a trinca nucleia-se abruptamente, propagando-se em direção à aresta de corte. O comprimento da trinca é relativamente importante e pode ser comparado com a espessura do cavaco não deformado.

Segundo Estágio

Como resultado da ocorrência da trinca surgida no primeiro estágio, o volume de cavaco localizado na região AA' BB' (Figura 2-24) situado entre a trinca e a aresta chanfrada é ejetado praticamente sem nenhuma deformação. A distância AA' diminui progressivamente à medida que ocorre a movimentação relativa entre a peça e a ferramenta o que provoca a diminuição da espessura do cavaco (h_c). A velocidade do cavaco sobre a superfície de saída e a transição da trinca (ponto A') é tão grande que será gerado um importante aumento de temperatura. O rápido resfriamento da região aquecida pelo atrito ferramenta-cavaco pode gerar martensita sob a forma de camada branca ao redor do segmento de cavaco formado. Além disso, uma camada branca similar existe na superfície gerada, em função de um intenso e severo atrito com a superfície de folga e do elevado valor da força de avanço.

Terceiro Estágio

A largura da distância AA' torna-se tão pequena que a velocidade de ejeção e a deformação plástica do cavaco são muito altas. O aumento de temperatura tem um efeito significativo, com as duas camadas brancas anteriores juntando-se para formar a segunda parte do cavaco segmentado, o qual corresponde à terça parte em volume. Aqui a espessura do cavaco é muito pequena e o seu resfriamento ocorre extremamente rápido de tal forma que a transformação nesta zona é adiabática.

Quarto Estágio

O segmento do cavaco está formado e praticamente preenche o espaço livre que existia entre a trinca e a face interna do cavaco em função da alta deformação plástica. A distribuição de tensão compressiva, a qual tinha diminuído no estágio 2 e 3, torna-se novamente importante, viabilizando a formação de uma nova trinca e a repetição periódica do fenômeno.

2.5.4 Ferramentas para usinagem de materiais endurecidos

2.5.4.1 Furação

Por serem expostas a altas cargas térmicas no processo de remoção de metal, durante a furação de materiais endurecidos, as brocas devem ter um alto nível de resistência ao calor, sendo, ao mesmo tempo, extremamente tenazes (MULLER & SOTO, 2001). As brocas empregadas para furação de materiais que se encontram na faixa de dureza de 45 –65 HRC são construídas com metal duro com grãos ultrafinos, pois além de manter a aresta de corte

mais tempo afiada, alia uma alta resistência ao desgaste com alta rigidez e excelente tenacidade. A característica principal destas brocas é a aplicação de uma geometria com grandes ângulos de saída e de folga (Figura 2-25), considerando as condições particulares da usinagem de materiais endurecidos, cujo maior problema é a enorme força de corte na aresta principal. As dimensões do núcleo da broca (alma) também são otimizadas (MULLER & SOTO, 2001).

Para aumentar seu desempenho, este tipo de ferramenta geralmente recebe uma cobertura de TiAlN (ou simplesmente TINAL™) ou TiN. Estas coberturas são altamente resistentes à temperatura, prolongando a vida da ferramenta mesmo sob condições de corte extremas. Além disso, as propriedades térmicas dessas coberturas isolam e protegem a aresta de corte do calor e tensão térmica e, assim, do desgaste prematuro.

Figura 2-25 -Broca para furação de aços endurecidos (TITEX PLUS, 2001)

Ambas coberturas apresentam um bom desempenho na furação de aços de alta dureza como ilustrado no gráfico da Figura 2-26 que compara o número de furos produzidos por brocas de geometrias idênticas e coberturas distintas na usinagem do aço 55NiCrMoV6 com 58 HRC de dureza. Foram usinados furos cegos de 13 mm de profundidade e 5,1 mm de diâmetro aplicando-se lubrificação abundante com óleo solúvel. Nota-se que não houve uma diferença significativa entre o desempenho das coberturas (TiN e TINAL™) na usinagem desse tipo de material.

Figura 2-26- Gráfico de produção de furos x cobertura da broca (TITEX PLUS, 2001)

2.5.4.2 Roscamento

As condições de corte e dureza da peça são cruciais para a escolha do macho correto. Materiais até aproximadamente 55 HRC produzem cavacos longos. Nestes casos aplica-se o macho com três canais (Figura 2-27), já que essa ferramenta tem espaço suficiente para o escoamento de cavacos mesmo em furos cegos roscados até $1,5 \times D$ de profundidade do furo (MULLER & SOTO, 2001). Esse tipo de ferramenta de corte se qualifica também por uma construção estável e um aumento na seção transversal do núcleo.

O macho de cinco canais é recomendado para a usinagem de materiais de cavacos curtos entre 55-65 HRC. O grande número de canais diminui a espessura do cavaco e reduz a tensão da ferramenta durante o processo de corte, além de aumentar sua vida útil. Ambos os machos são construídos com ângulos de entrada negativos e, conseqüentemente, arestas de corte muito estáveis.

No roscamento com machos ocorrem, em geral, baixas temperaturas, pois são utilizadas velocidades de corte reduzidas. As ferramentas têm grande tendência ao desgaste devido aos carbonetos característicos dos materiais endurecidos. Para aumentar a vida dos mesmos,

aplica-se cobertura multicamada TiCN (carbonitreto de titânio) que é extremamente dura (aprox. 3000 HV) e muito estável.

Figura 2-27- Macho de corte com 3 canais

Através do gráfico apresentado na Figura 2-28 nota-se que o macho de corte com 3 canais apresentou um melhor desempenho, em comparação com o macho de 5 canais, no processo de roscamento do aço 55NiCrMoV6 com 55 HRC de dureza comprovando o que havia sido dito anteriormente.

Figura 2-28– Produção de roscas x número de canais da ferramenta (TITEX PLUS, 2001)

3 TRABALHO EXPERIMENTAL

Este capítulo trata da investigação experimental do desgaste de brocas helicoidais e machos de corte, ambos de metal duro e revestidos, aplicados em operações de furação e roscamento interno de aços endurecidos. Nos ensaios, medem-se as forças de corte e o torque em ambas as operações e analisam-se os aspectos das roscas usinadas quanto à sua qualidade bem como o desgaste sofrido pelas ferramentas.

3.1 Máquina-Ferramenta

A máquina-ferramenta utilizada nos ensaios foi o centro de usinagem vertical ROMI, Discovery 560 (Figura 3-1). Possui três eixos (X, Y e Z), com curso máximo de 560mm, 406mm, 508mm, respectivamente, motor do eixo árvore com 7,5 kW, máxima rotação de 7.500 rpm e CNC Sinumerik 810D.

Figura 3-1– Centro de usinagem vertical Romi modelo Discovery 560.

3.2 Ferramentas

Como os ensaios envolviam operações de furação e roscamento foram utilizadas brocas helicoidais para a usinagem dos furos e machos de corte para o processo de roscamento interno.

3.2.1 Brocas

Para a usinagem dos pré-furos foram utilizadas brocas helicoidais inteiriças de metal duro da classe K30 F recobertas com TiNAl. As brocas possuem 8,60mm de diâmetro, ângulo de ponta de 140° (DIN 6537 K) e haste padrão conforme DIN 6535 HA. Esse tipo de ferramenta, código do fabricante A3269TFL, é recomendado para materiais com dureza entre 55-65 HRC. A Figura 3-2 mostra a broca utilizada e algumas de suas dimensões em milímetros.

Figura 3-2 – Broca A3269 TFL e suas características geométricas (TITEX PLUS, 2002).

3.2.2 Machos de Corte

Foram usados nos ensaios de roscamento interno 2 tipos de machos de corte os quais se distinguem pelo formato do chanfro (tipo C ou D). Ambos são machos métricos M10 de metal duro inteiriço da classe K20 com recobrimento de TiCN. Essas ferramentas apresentam cinco canais retos, haste reforçada conforme norma DIN 371 e passo de 1,5mm.

A Tabela 3-1 mostra as principais características dimensionais e geométricas de cada um dos machos e a Figura 3-3 mostra o aspecto geral dos mesmos.

Figura 3-3 - Macho de corte código B1278TCN utilizado nos ensaios (TITEX PLUS, 2002).

Tabela 3-1 - Características dos machos de corte utilizados nos ensaios

Características	Machos Métricos M10	
Código do fabricante	B1278 TCN	782075 TCN
Material	Metal Duro	Metal Duro
Revestimento	TiCN	TiCN
Tipo de Chanfro (DIN 2197)	C (2 a 3 filetes de rosca)	D (3,5 a 5 filetes de rosca)
Ângulo de chanfro ou entrada	15°	8°

3.3 Corpos de Prova

Dentre os aços ferramentas disponíveis no mercado, escolheu-se dois dos mais usados na fabricação de moldes e matrizes, são eles: AISI H13 e AISI D2 no formato de chapas de dimensões 305 x 210 x 15mm. Essas chapas de ambos os materiais foram tratadas termicamente através de têmpera e revenimento resultando em uma faixa de dureza de 45-55 HRC para o AISI H13 e de 55-65 HRC para o AISI D2.

A Tabela 3-2 mostra as faixas admissíveis dos elementos químicos para cada um dos materiais.

Tabela 3-2 - Composição química média dos corpos de prova.

Aços (% peso)	C%	Cr%	V%	Mo%	Mn%	Si%	P%	S%
AISI H13	0,32 - 0,45	4,75- 5,50	0,80- 1,20	1,10- 1,75	0,20- 0,50	0,80- 1,20	0,03	0,03
AISI D2	1,40- 1,60	11,0- 13,00	1,10	0,70- 1,20	0,15- 0,60	0,15- 0,60	0,03	0,03

O tratamento térmico foi realizado em uma empresa especializada, JSC Indústria e Comércio de Máquinas e Serviços Ltda. Uma chapa adicional de cada material (chapa de medição), com dimensões 223 x 116 x 15mm foi fixada sobre o dinamômetro, na mesa da máquina, para avaliação periódica de forças e torque.

Segundo DINIZ et al. (1999), a influência dos elementos de liga na composição de um aço 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. O enxofre também é utilizado nos aços para melhorar a usinabilidade. Uma vez que o aço AISI D2 apresenta uma porcentagem alta de elemento

formador de carboneto, no caso o elemento cromo, e uma porcentagem menor de enxofre, se comparado ao aço AISI H13, pode-se concluir que tal aço possui um usinabilidade ruim.

Tanto na microestrutura do aço AISI D2 (Figura 3-4) quanto na microestrutura do aço AISI H13 (Figura 3-5) estão presentes agulhas de martensita, evidenciando que a estrutura típica da matriz é martensita revenida.

Figura 3-4– Microestrutura do aço AISI D2 atacado com Nital 3%.

Figura 3-5– Microestrutura do aço AISI H13 atacado com Nital 3%.

A microestrutura observada no aço ferramenta H13 apresenta um caráter uniforme com a presença de pequenos carbonetos, os quais são praticamente imperceptíveis mesmo com a utilização de uma lente especial para aumento de 1000 vezes. Já na microestrutura do aço D2 (Figura 3-6) pode-se notar carbonetos de três ordens de grandeza diferentes.

Figura 3-6– Detalhe dos diferentes tamanhos de carbonetos presentes na microestrutura do aço AISI D2.

Como uma das principais características do aço H13 é sua resistência ao choque térmico, sua composição química apresenta uma menor porcentagem de carbono e elementos de liga se comparado ao aço D2. Daí, a existência de carbonetos menores e em menor quantidade. Já o aço D2 deve apresentar alta resistência ao desgaste e, portanto, é composto por uma maior porcentagem de carbono e elementos de liga. Conseqüentemente, tanto o tamanho como a quantidade de carbonetos existentes é maior.

3.4 *Cabeçote de roscar auto-reversível*

Nos ensaios de roscamento foi utilizado o cabeçote de roscar auto-reversível CST TAPMATIC RDTIC-50 que pode trabalhar até uma rotação de 2500 rpm com machos de corte até M12. A vantagem de se utilizar este tipo de cabeçote é que ele torna o processo muito rápido ao mudar a direção de rotação da ferramenta “instantaneamente”. Dessa forma, o macho opera na velocidade programada por todo o ciclo de corte não havendo redução na

velocidade da máquina devido a reversão do eixo-árvore. O cabeçote e alguns de seus componentes principais estão mostrados na Figura 3-7.

Figura 3-7 – Cabeçote de rosca auto-reversível CST TAPMATIC RDTIC-50.

3.5 Equipamentos para o monitoramento do processo

3.5.1 Dinamômetro e amplificador de carga multicanal

Para medir as forças de corte e o torque durante os ensaios foi utilizado o dinamômetro KISTLER 9272 (). Entre suas características, destacam-se grande rigidez, e conseqüentemente alta frequência natural, e alta resolução, que habilita a medição da menor de todas as cargas dinâmicas em forças e torques grandes.

Conectado ao dinamômetro 9272 utilizou-se o amplificador de carga multicanal modelo 5019 da Kistler que permite a ajustagem de alguns parâmetros 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.

3.6 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados monitora as forças de corte e o torque gerados durante os processo de furação e roscamento com o intuito de investigar a propagação do desgaste nas arestas de corte das ferramentas. A Figura 3-8 mostra o esquema do sistema de aquisição montado para realizar os ensaios.

Figura 3-8 – Esquema do sistema de aquisição de dados utilizado nos ensaios.

3.6.1 Módulo de entrada e saída de sinais

Para receber os sinais provenientes do amplificador de carga multicanal e enviá-los para a placa de aquisição de dados foi utilizado um módulo de entrada e saída de sinais modelo BNC-12 da *National Instruments*.

3.6.2 Placa de aquisição de dados

No sistema de monitoramento foi utilizada uma placa de aquisição de dados modelo PCI-MIO-16E-4 fabricada pela *National Instruments* com taxa máxima de aquisição de 250.000 pontos/seg.

3.6.3 Software de tratamento dos sinais

Foi utilizado o software *Labview 5.1* da *National Instruments* para desenvolver uma ferramenta virtual capaz de adquirir e gravar os sinais de força e torque.

3.7 Equipamentos de Medição e Análise

3.7.1 Lupa

A lupa Zeiss, modelo Stemi 2000-C com sistema de medição na lente ocular e resolução de 0,45 μm foi utilizada para medir os desgastes sofridos pelas ferramentas de corte.

3.7.2 Microscópio óptico

O microscópio óptico da *Zeiss AxioTech* equipado com câmera digital colorida *AxioCam MRM* com resolução de 1030 x 1030 pixels, foi utilizado para adquirir as imagens dos desgastes sofridos pelas ferramentas.

3.7.3 Calibre tampão de rosca P.N.P.

Um calibre tampão de rosca P.N.P. M10 x 1,25 – 6H da Neomatic foi usado para a aferição da qualidade das roscas produzidas.

3.8 Planejamento e Procedimento Experimental

3.8.1 Planejamento dos Experimentos

3.8.1.1 Experimentos de Furação

Nos ensaios de furação foram empregadas três velocidades de corte distintas para avaliar o desgaste sofrido pela broca durante a usinagem do aço ferramenta AISI D2. O critério para a escolha dessas velocidades de corte foi adotar a indicada no catálogo do fabricante, um valor acima e um abaixo.

Na usinagem dos corpos de prova constituídos de AISI H13, como um menor desgaste das ferramentas era esperado, optou-se por analisar quatro níveis distintos de velocidade de corte com valores sempre maiores, ou iguais, ao indicado pelo fabricante.

Todos os ensaios foram realizados com lubrificação abundante de óleo integral, cuja viscosidade a 40°C é 18,0 cSt. O valor do avanço foi selecionada a partir da velocidade de corte recomendada pelo catálogo do fabricante e manteve-se constante para as demais velocidades utilizadas nos ensaios para não influenciar no processo de desgaste da ferramenta.

A Tabela 3-3 fornece um resumo dos parâmetros utilizados em cada ensaio e a ordem de execução dos mesmos para os aços AISI D2 e AISI H13.

Tabela 3-3– Matriz de experimentos para furação.

Nº do teste	Velocidade de corte (m/min)	Avanço (mm/rev)	Modelo de broca Cobertura	Material usinado
1	15	0,03	A3269TFL	AISI D2
2	25	0,03	A3269TFL	AISI D2
3	30	0,03	A3269TFL	AISI D2
4	25	0,03	A3269TFL	AISI H13
5	30	0,03	A3269TFL	AISI H13
6	45	0,03	A3269TFL	AISI H13
7	60	0,03	A3269TFL	AISI H13

3.8.1.2 Experimentos de Roscamento

Os furos obtidos nos ensaios de furação foram utilizados na realização dos ensaios de roscamento. Da mesma forma que nos ensaios de furação, foi analisado a influência da velocidade de corte e do material usinado no desgaste sofrido pelos machos de corte.

O parâmetro velocidade de corte foi experimentado em três níveis diferentes na usinagem dos aços ferramenta AISI D2 e em quatro níveis diferentes nos ensaios dos aços AISI H13. Em ambos ensaios, utilizou-se como fluido de corte óleo integral, cuja viscosidade a 40°C é 18,0 cSt.

O critério de escolha das velocidades de corte adotadas nos ensaios de roscamento do AISI D2 foi o valor indicado pelo catálogo do fabricante da ferramenta, um valor acima e um abaixo.

Devido a um menor desgaste apresentado pelas ferramentas na usinagem do aço AISI H13, a velocidade de corte no roscamento desse material foi experimentada em quatro níveis diferentes, com valor sempre maior ou igual à velocidade indicada pelo fabricante da ferramenta. Nos ensaios de ambos materiais, a velocidade de corte mais elevada foi re-

utilizada em um ensaio posterior para comparar os desgastes entre os machos modelo B1278 TCN (chanfro tipo C) e 782075 TCN (chanfro tipo D).

O valor de avanço empregado em todos os ensaios corresponde ao passo da rosca, 1,5mm/rev. Na Tabela 3-4 encontram-se os parâmetros utilizados nos ensaios de roscamento dos aços AISI D2 e AISI H13.

Tabela 3-4 – Matriz de experimentos para roscamento.

Nº do teste	Velocidade de corte (m/min)	Velocidade de avanço (mm/min)	Modelo de macho Cobertura	Material usinado
1	1,5	69,47	B1278TCN	AISI D2
2	3,0	138,94	B1278TCN	AISI D2
3	4,0	185,25	B1278TCN	AISI D2
4 Réplica	4,0	185,25	782075TCN	AISI D2
6	3,0	138,94	B1278TCN	AISI H13
7	4,0	185,25	B1278TCN	AISI H13
8	8,0	370,51	B1278TCN	AISI H13
9	12,0	555,77	B1278TCN	AISI H13
10 Réplica	12,0	555,77	782075TCN	AISI H13

3.8.1.3 Variáveis dependentes a serem analisadas

Neste trabalho serão analisadas as seguintes variáveis dependentes:

- desgaste de flanco das brocas e dos machos de corte através de sua medição no microscópio óptico. Os mecanismos de desgastes, para os machos de corte, serão analisados por meio de fotos feitas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV);
- qualidade das roscas usinadas. As roscas foram aferidas com um calibrador tampão do tipo P.N.P. 6H. Fotos feitas por Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) das superfícies usinadas também foram utilizadas nos estudos;
- Sinais de força e torque provenientes do dinamômetro Kistler 9272.

3.8.1.4 Montagem do banco de ensaios

Os corpos de prova, em formato de chapas, foram fixados na mesa da máquina através de parafusos e calços metálicos de acordo com o esquema apresentado na Figura 3-9.

Figura 3-9 – Fixação do corpo de prova na mesa da máquina.

Do outro lado da mesa do centro de usinagem foi fixado o dinamômetro, através de parafusos, em uma base metálica apoiada em coxins para impedir que ruídos elétricos provenientes da máquina influenciassem os sinais de força e torque adquiridos durante os processos de furação e roscamento. Sobre o dinamômetro, foi fixado um dispositivo (Figura 3-10) projetado para prender a chapa de medição através de parafusos laterais. A chapa de medição é constituída do mesmo material do corpo de provas que está sendo usinado, mas possui dimensões menores que este.

Figura 3-10 - Dispositivo para prender a chapa de medição sobre o dinamômetro.

A Figura 3-11 mostra a configuração geral do banco de ensaios montado sobre a mesa da máquina.

Figura 3-11– Configuração geral do banco de ensaios montado sobre a mesa da máquina.

3.8.2 Procedimento Experimental

Os ensaios se iniciaram com a operação de furação seguindo a ordem apresentada na Tabela 3-3. Fixada a broca no cone ISO40, primeiramente era usinado um furo na chapa de medição sobre o dinamômetro, monitorando-se os valores de força de corte e torque durante este procedimento. Em seguida, passava-se a uma seqüência de 5 ou 10 furos, dependendo do desgaste apresentado pela ferramenta na usinagem do corpo de prova sobre a mesa da máquina. Na seqüência, retirava-se a ferramenta com o cone ISO40 para a medição e registro do desgaste na lupa e microscópio óptico respectivamente. Terminado o processo de medição de desgaste, a ferramenta era recolocada na máquina na mesma posição axial anterior e iniciava-se outro ciclo de usinagem.

Esses passos eram seguidos até ser atingido o fim de vida da ferramenta caracterizado por um desgaste de flanco igual ou superior a 0,30 mm (de acordo com norma ISO 3685) na aresta de corte da broca. Caso esse valor de desgaste não fosse atingido, um limite de 97 furos foi pré-estabelecido devido à quantidade de material disponível no laboratório para corpos de prova.

Terminado os ensaios de furação em ambos materiais, iniciou-se a usinagem das roscas com os machos de corte. Os mesmos procedimentos de medição de força, torque e desgaste da ferramenta aplicados no processo de furação foram utilizados nos ensaios de roscamento.

O critério utilizado para a aprovação da qualidade das roscas usinadas e, conseqüentemente, constitui-se no critério de fim de vida dos machos de corte nos ensaios foi o calibre tampão de rosca P.N.P. M10 x 1,25 – 6H da Neomatic passar totalmente na extremidade P. (passa) e passar no máximo abaixo de um filete de rosca completo na extremidade N.P. (não passa). Novamente foi pré-estabelecido um limite máximo de 97 furos a serem roscados caso o fim de vida da ferramenta não fosse atingido.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Resultados do processo de furação

4.1.1 Desgaste das brocas

Durante o processo de furação, em função da péssima usinabilidade do aço AISI D2, as brocas apresentaram desgaste excessivo e lascamento das arestas de corte. Tais fatores acarretaram na fragilização da ferramenta e, em alguns casos, na sua posterior quebra. O número de furos usinados em função da velocidade de corte do material AISI D2 pode ser visualizado no gráfico abaixo (Figura 4-1).

Figura 4-1- Número de furos usinados em função da velocidade de corte para o aço AISI D2.

Por outro lado o aço AISI H13 apresentou uma quantidade significativamente maior de furos usinados, isso pode ser explicado devido a melhor usinabilidade desse material, pois apresenta uma maior quantidade de elementos grafitizantes, os carbonetos presentes na microestrutura (Figura 3-5) são bem distribuídos e de tamanho menor, a dureza também é menor comparado com o D2. Todos esses fatores fazem com que o H13 tenha uma melhor usinabilidade. O número de furos usinados em função da velocidade de corte para o AISI H13 é apresentado no gráfico da Figura 4-2.

Figura 4-2 - Número de furos usinados em função da velocidade de corte para o aço AISI H13.

O gráfico da Figura 4-3 mostra os valores de desgaste de flanco da broca em função do comprimento usinado para os corpos de prova constituídos de AISI D2. Observou-se, inicialmente, a perda do recobrimento da ferramenta, o que gerou um aumento no desgaste de flanco. Isso pode ser notado pelo aumento na inclinação da curva a partir dos 500mm usinados na velocidade de corte 15m/min e a 75mm usinados na velocidade de corte 30m/min.

Figura 4-3– Desgaste de flanco médio em função do número de furos usinados para aço AISI D2.

A Figura 4-4 mostra os valores de desgaste de flanco em função do comprimento usinado para o material AISI H13. Os desgastes sofridos pelas brocas, para as velocidades de corte de 25m/min e 30m/min, apresentaram uma evolução sem variações significativas diferentemente do comportamento observado para o material AISI D2 para as mesmas velocidades.

Figura 4-4– Desgaste de flanco médio em função do número de furos usinados para aço AISI H13.

Os desgastes para as velocidades de corte de 25m/min, 30m/min e 45m/min evoluíram de forma lenta até os 100mm usinados. Por outro lado, usinando na velocidade de 60m/min o desgaste sofrido pela ferramenta apresentou um crescimento mais rápido, aproximando-se muito da curva de desgaste do material AISI D2 para a velocidade de corte de 15m/min.

A Figura 4-5 mostra a condição inicial de uma broca utilizada nos ensaios sendo que ao seu lado estão ilustradas as condições finais das arestas de corte de brocas que apresentaram uma evolução de desgaste semelhante na usinagem de ambos materiais. As brocas usinaram a mesma quantidade de furos (43 furos), sendo que no material AISI H13 foi usada uma velocidade de corte quatro vezes maior ($v_c=60\text{m/min}$) em relação à empregada no AISI D2 ($v_c=15\text{m/min}$). A broca utilizada na furação do aço H13 apresentou um forte desgaste de flanco com eventuais lascamentos da aresta de corte enquanto que a broca empregada na usinagem do aço D2 mostrou um desgaste de entalhe com lascamento da aresta principal de corte.

Figura 4-5– Condição inicial e finais das brocas usadas nos dois ensaios.

De maneira geral nos ensaios do material AISI D2, as brocas inicialmente apresentaram uma perda da camada de cobertura, ocasionando o crescimento mais acentuado do desgaste. Durante os ensaios ocorreram pequenos lascamentos na aresta de corte. Posteriormente, os lascamentos foram maiores e concentrados nas extremidades próximas ao diâmetro, o que levou à ruptura da ferramenta nos casos onde se prosseguiu com a usinagem do material. A ocorrência de lascamentos próximas ao diâmetro da broca pode ser explicada devido a maior velocidade de corte que esta região está sujeita, além de uma aresta mais frágil neste ponto, devido à hélice da broca. Desta forma, a aresta frágil com ângulo de cunha muito baixo, aliados a altas velocidades tornam esta parte da ferramenta mais susceptível ao desgaste.

A Figura 4-6 mostra em detalhe um lascamento na aresta de corte de uma broca após usinados 30 furos no aço AISI D2 com velocidade de corte de 30m/min e avanço de $0,030\text{mm/rev.}$

Figura 4-6– Vista de topo da broca com lascamento em sua aresta de corte após usinados 30 furos no aço AISI D2.

Os ensaios com o material AISI H13 mostram que a perda do recobrimento da broca só ocorreu na condição onde foi utilizada velocidade de corte de 60m/min (Figura 4-7). Para velocidades menores que esta os desgastes evoluíram sem grandes alterações. Entretanto, observou-se a ocorrência de eventuais lascamentos na região central da aresta de corte da broca como pode ser visto na Figura 4-8.

Figura 4-7– Evolução do desgaste da aresta de corte da broca usada no ensaio de furação do aço AISI H13 com $v_c = 60\text{m/min}$, $f = 0,03\text{ mm/rev}$.

Figura 4-8– Evolução do desgaste da aresta de corte da broca usada no ensaio de furação do aço H13 com $v_c = 25\text{m/min}$, $f = 0,03\text{mm/ver}$.

4.1.2 Medição da força vertical e torque

Nas Figuras 4-9 e 4-10 são apresentados os gráficos de força vertical média para os dois tipos de aços ensaiados nas diferentes velocidades de corte.

Figura 4-9 - Força média vertical na furação do aço AISI D2.

Figura 4-10 - Força média vertical na furação do aço AISI H13.

Através da análise dos gráficos de desgaste (Figuras 4-3 e 4-4) e os gráficos da força vertical média (Figuras 4-9 e 4-10) fica claro que o crescimento da força vertical está diretamente relacionado com o aumento do desgaste sofrido pela ferramenta o que comprova os resultados obtidos por JALALI, 1991 e ERTUNC, 200. No gráfico da Figura 4-9 existem alguns pontos onde pode ser observada uma redução no valor da força vertical média com o aumento do desgaste da broca. Isso pode ter ocorrido devido à existência de regiões mais moles ao longo da superfície do corpo de prova, ou os lascamentos tornaram a aresta de corte mais afiada, em alguns poucos furos, até que o desgaste do substrato novamente tornasse a aresta “cega”.

As Figuras 4-11 e 4-12 apresentam o torque médio gerado nos ensaios de furação dos aços AISI D2 e AISI H13 respectivamente.

Figura 4-11– Torque médio na furação do aço AISI D2.

Figura 4-12 – Torque médio na furação do aço AISI H13.

Analisando os gráficos, percebe-se que na usinagem de ambos materiais, o torque médio quase não se altera, ou tende a diminuir com o aumento da velocidade de corte. De uma maneira geral, existe um consenso entre os diversos pesquisadores de que as forças na usinagem tendem a diminuir com o aumento da velocidade de corte, pois existe uma maior geração de calor o que facilita o cisalhamento do material (FERRARESI, 1983, JALALI, 1991, ERTUNC, 2001, DINIZ, 1999). Isso ficou bem melhor caracterizado na furação do H13 onde as velocidades utilizadas foram maiores. Para o caso do D2 a faixa de velocidades usada não foi muito extensa, o que não demonstrou claramente este efeito.

4.2 Resultados do processo de roscamento

4.2.1 Desgaste dos machos de corte

Durante o processo de roscamento do aço AISI D2, todos os modelos de macho de corte apresentaram desgaste excessivo e lascamento das arestas de corte apresentando resultados similares com os obtidos durante o processo de furação deste mesmo material. O número de furos roscados dentro da tolerância do calibrador passa-não-passa em função da velocidade de corte pode ser visualizado no gráfico da Figura 4-13.

Figura 4-13- Número de roscas usinadas em função da velocidade de corte para o material AISI D2. (*) macho de corte modelo 782075TCN.

Após a primeira usinagem, a análise dos machos de corte modelo B1278TCN através da lupa evidenciou um desgaste predominante nos três primeiros filetes, em especial no segundo

e terceiro. Esse fato já era esperado, uma vez que esses filetes situam-se na região cônica da ferramenta e, portanto, são responsáveis pela maior parte do esforço de corte no processo de roscamento.

A partir dessa constatação, o desgaste foi sempre medido nos segundos e terceiros filetes de cada uma das cinco arestas de corte da ferramenta. Para quantificar o desgaste sofrido em cada filete foi feita uma média dos valores obtidos em cada aresta de corte.

Os gráficos abaixo mostram o comportamento do desgaste médio nos segundos e terceiros filetes em função do número de furos roscados em diferentes velocidades de corte (Figuras 4-14, 4-15, 4-16 e 4-17). As imagens das regiões desgastadas das ferramentas não mostram necessariamente os filetes de uma mesma aresta de corte, uma vez que procurou-se mostrar os desgastes mais severos.

Desgaste do macho de corte B1278TCN na usinagem do material AISI D2
($v_c=1,5$ m/min)

Figura 4-14 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo B1278TCN em função do número de rosas usinadas – $v_c=1,5$ m/min.

Desgaste do macho de corte B1278TCN na usinagem do material AISI D2
($v_c = 3.0$ m/min)

Figura 4-15 – Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=3.0$ m/min.

Desgaste do macho de corte B1278TCN na usinagem do material AISI D2
($v_c=4,0\text{m/min}$)

Figura 4-16 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=4,0\text{ m/min}$.

Figura 4-17 - Desgaste de flanco nos 2º e 3º filetes do macho de corte modelo 782075TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=4,0\text{ m/min}$.

Com o monitoramento da ferramenta feito com a medição do desgaste de flanco através das imagens adquiridas no microscópio, nota-se que o desgaste tende a aumentar consideravelmente com a perda do recobrimento do macho de corte, alterando a inclinação da curva de desgaste.

A análise dos perfis de curvas obtidos na usinagem do aço AISI D2 permite depreender que, de uma forma geral, nas diversas condições de corte ensaiadas, o recobrimento da ferramenta foi perdido já no roscamento do primeiro furo, para o ensaio com $v_c=3,0\text{ m/min}$, ou no máximo, do segundo furo, no caso dos ensaios com velocidades superiores. O número limitado de roscas usinadas no ensaio com $v_c=1,5\text{ m/min}$ não permitem a análise adequada do comportamento do desgaste, em termos estatísticos.

O macho de corte modelo 782075TCN mostrou-se mais suscetível ao desgaste, uma vez que este esteve presente em um número maior de filetes, no caso nos cinco primeiros. Os valores médios de desgaste obtidos para esse modelo de ferramenta, nos segundo e terceiro filetes, apresentaram-se mais severos se comparados com os valores observados no macho de corte modelo B1278TCN.

É interessante notar que houve uma pequena redução do desgaste com o aumento da velocidade de corte. Isso pode ser explicado devido a variações na qualidade da cobertura do macho de corte, ou do substrato do metal duro causando sua perda prematura nos ensaios onde foram empregadas velocidades de corte de 1,5 m/min. e 3,0 m/min. Como não foi possível nenhuma réplica dos experimentos não há como comprovar este ocorrido através de ferramentas estatísticas.

Durante os ensaios de roscamento do aço AISI H13, os valores de desgaste apresentados pelos machos de corte foram mínimos. Diante desse fato, para efeito de comparação foi necessário fixar um número máximo de 97 furos a serem roscados utilizando as velocidades de corte de 3,0, 4,0 e 8,0 m/min. e 55 furos para as velocidades de corte de 12 m/min. O número de furos roscados dentro da tolerância do calibrador passa-não-passa em função da velocidade de corte pode ser visualizado no gráfico abaixo da Figura 4-18

Figura 4-18 - Número de roscas usinadas em função da velocidade de corte para o material AISI H13. (*) macho de corte modelo 782075TCN.

No roscamento com velocidades de corte iguais a 3,0 m/min e 4,0 m/min não houve desgaste visível nas ferramentas de corte. Para que pudesse ser evidenciado o início do processo de desgaste teriam que ser roscados muito mais furos que os possíveis nas chapas previamente tratadas. Novamente, serão apresentados, nos gráficos das Figuras 4-19, 4-20 e 4-21, o desgaste médio nos segundos e terceiros filetes em função do número de furos roscados, para as velocidades de corte de 8,0 e 12,0 m/min.

Figura 4-19 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=8,0\text{ m/min}$.

Figura 4-20 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo B1278TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=12,0\text{ m/min}$.

Figura 4-21 - Desgaste de flanco no 2º e 3º filetes do macho de corte modelo 782075TCN em função do número de roscas usinadas - $v_c=12,0\text{ m/min}$.

A análise dos perfis das curvas de desgaste e das imagens das regiões desgastadas obtidas nas diversas condições de corte durante o roscamento do aço AISI H13 evidenciam que o processo de perda do recobrimento da ferramenta teve início no final do ensaio, no caso onde foi utilizada velocidade de corte de 12 m/min. Para os demais casos, nos quais foram empregadas velocidades inferiores a 12 m/min não se pôde evidenciar a perda do recobrimento da ferramenta e o desgaste teve uma evolução bastante reduzida.

De uma maneira geral, os resultados ratificam o fato de que o aumento da velocidade de corte propicia a aceleração do processo de desgaste da ferramenta.

Novamente o macho de corte modelo 782075TCN apresentou desgaste nos cinco primeiros filetes, sendo que, os valores médios obtidos para o segundo e terceiro filetes são

menores do que os valores médios medidos no macho de corte modelo B1279TCN sob as mesmas condições de corte.

4.2.2 Medição de torque

Os valores pontuais de torque adquiridos em função do número de furos roscados na usinagem do material AISI D2 podem ser conferidos nos gráficos das Figuras 4-22 a 4-25. Os valores apresentados correspondem às médias dos momentos torsores durante o ciclo de corte.

Figura 4-22 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN para o aço AISI D2 - $v_c=1,5\text{m/min}$.

Figura 4-23 – Torque médio em função do número de furos rosçados com macho de corte modelo para o aço AISI D2 - $v_c=3\text{m/min}$.

Figura 4-24- Torque médio em função do número de furos rosçados com macho de corte modelo B1278TCN para o aço AISI D2 - $v_c=4\text{m/min}$.

Figura 4-25 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo 782075TCN em aço AISI D2 - $v_c=4$ m/min.

O número reduzido de roscas obtidas na usinagem do aço AISI D2 prejudicou a análise dos resultados, entretanto, pode-se observar uma tendência de crescimento do valor médio do torque com o aumento do número de roscas usinadas nas condições de $v_c=1.5$ m/min e $v_c=3$ m/min, devido ao aumento progressivo do desgaste.

Em seguida, são apresentados, nos gráficos das Figuras 4-29 a 4-33, os valores médios de torque adquiridos em função do número de furos roscados no aço AISI H13. Nota-se que a faixa de valores de torque obtidos está entre 12 e 17 N.m.

Figura 4-26 – Torque médio em função do número de furos rosçados com macho de corte modelo B1278TCN em aço AISI H13 - $vc=3\text{m/min}$.

Figura 4-27 – Torque médio em função do número de furos rosçados com macho de corte modelo B1278TCN em aço AISI H13 - $vc=4\text{m/min}$.

Figura 4-28 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN em aço AISI H13 - $vc=8\text{m/min}$.

Figura 4-29 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo B1278TCN em aço AISI H13 - $vc=12\text{m/min}$.

Figura 4-30 – Torque médio em função do número de furos roscados com macho de corte modelo 782075TCN em aço AISI H13 - $vc=12\text{m/min}$.

De uma forma geral, em todos os ensaios com aço AISI H13, os valores de torque durante a usinagem aumentaram com o número de furos roscados, em razão do aumento progressivo do desgaste da ferramenta. O macho de corte modelo 782075TCN apresentou valores médios de torque bastante parecidos aos do modelo B1278TCN, apesar deste último ter sofrido um desgaste ligeiramente maior.

A partir dos resultados apresentados verifica-se também que o aumento da velocidade de corte não altera significativamente os valores de torque. Provavelmente isto ocorre devido ao fato do recobrimento da ferramenta ter permanecido praticamente intacto durante todo o processo de roscamento.

4.2.3 Mecanismos de desgaste das ferramentas e qualidade das roscas usinadas

A identificação dos mecanismos e tipos de desgaste que atuaram sobre os machos de corte foi efetuada com base em fotografias feitas em microscópio eletrônico de varredura, as quais revelaram detalhes do desgaste sofrido pelas ferramentas.

As Figuras 4-31 (a) e (b) mostram uma visão geral da aresta de corte desgastada do segundo filete de um macho de corte modelo B1278TCN utilizado no roscamento de aço AISI D2 com velocidade de corte de 3,0 m/min, onde pode-se observar que o desgaste ocorreu ao longo do flanco da ferramenta entre a superfície de folga e a superfície de saída.

Com a ampliação desta região nota-se sinais de adesão e abrasão na aresta principal de corte e ao longo da superfície de folga (Figuras 4-31(c) e (d)). O desgaste abrasivo, bastante atuante na superfície de folga, provavelmente foi causado pelas partículas duras do material usinado, os carbonetos de cromo, de vanádio e de molibdênio.

Figura 4-31 – Detalhe da aresta de corte do 2º filete do macho de corte modelo B1278TCN utilizado no roscamento de aço AISI D2 – $vc=3$ m/min.

Apesar do desgaste excessivo das ferramentas de corte, a análise dos perfis das roscas usinadas em aço AISI D2 evidenciou roscas com boa precisão e bom acabamento superficial (Figuras 4-32(a), (b) e (c)).

(a) – 50x.

(b) – 100x.

(c) – 250x.

Figura 4-32 – Perfil de uma rosca usinada em aço AISI D2 com macho de corte modelo B1278TCN – $v_c=3$ m/min.

Acredita-se que o baixo coeficiente de atrito do revestimento de TiCN (YUHARA, 2000) proporcionou uma qualidade superficial satisfatória das roscas usinadas, mesmo em condições tão adversas de roscamento.

Pode-se notar que o acabamento superficial resultante do processo de roscamento (diâmetro maior da rosca) é comparável ao acabamento resultante do processo de furação

(diâmetro menor). As rebarbas presentes nos perfis são oriundas do processo de corte, por disco abrasivo, dos corpos de prova.

Em seguida, Figuras 4-33 são apresentadas as fotografias feitas com o microscópio eletrônico de varredura para o 2º filete do macho de corte utilizado no roscamento do aço AISI H13 com velocidade de corte de 12 m/min. Pode-se constatar que, assim como na usinagem do aço AISI D2, o desgaste ocorreu ao longo do flanco da ferramenta (Figuras 4-33(a) e (b)). Observam-se também indícios de abrasão e adesão na superfície de folga bem como adesão na superfície de saída da ferramenta (Figuras 4-33(c) e (d)).

Figura 4-33 – Detalhe da aresta de corte do 2º filete do macho de corte modelo B1278TCN utilizado no roscamento de aço H13 – $v_c=12$ m/min.

Para comprovar a ocorrência de adesão do material da peça na superfície de folga da ferramenta, foi realizada uma análise por EDS (Espectroscopia de Dispersão de Energia) nas regiões 1 e 2 mostradas na Figura 4-34.

Figura 4-34 – Regiões da superfície de folga do macho de corte utilizado no roscamento do aço H13 submetido a análise por EDS – ampliação de 500x.

A análise por EDS identificou uma alta concentração de cromo na região 1 e uma alta concentração de tungstênio na região 2.

Uma vez que o material da ferramenta e seu respectivo recobrimento, TiCN, não apresentam o elemento cromo em altas quantidades, pode-se deduzir que a quantidade encontrada é proveniente do cromo presente na composição química do aço AISI H13. Portanto, pode-se afirmar com certeza que houve uma adesão do material da peça na ferramenta na região 1. Já o elemento tungstênio não está presente em grandes quantidades nem no material de recobrimento da ferramenta, nem na composição química do aço H13, ou seja, a alta concentração encontrada é proveniente do substrato do macho de corte. Dessa forma, pode-se concluir que a ferramenta perdeu o recobrimento na região 2.

As imagens dos perfis de roscas usinadas em aço AISI H13 evidenciaram um acabamento superficial de baixa qualidade (Figuras 4-35(a), (b) e (c)). Na Figura 4-35(c) são

observadas microtrincas de comprimento da ordem de 50 μm , as quais podem atuar como concentradores de tensão em peças com perfis delgados.

Figura 4-35 – Perfil de uma rosca usinada em aço AISI H13 com macho de corte modelo B1278TCN – $v_{c_0}=3$ m/min.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados apresentados e das discussões desenvolvidas ao longo deste trabalho, pode-se chegar às seguintes conclusões para o processo de furação:

- Na furação de aços endurecidos de baixa usinabilidade, como no caso do aço AISI D2, o desgaste da ferramenta é muito acentuado, podendo tornar o processo inviável economicamente caso não sejam empregadas velocidades de corte extremamente reduzidas (com 15 m/min, por exemplo, foram possíveis 43 furos);
- Os mecanismos de desgaste predominantes nos processos de furação do aço AISI H13 foram abrasão na superfície de folga e adesão na superfície de saída, enquanto que na usinagem do aço AISI D2 notou-se um desgaste de entalhe com lascamento nas extremidades próximas ao diâmetro da aresta principal de corte da broca;
- Durante o processo de furação de ambos materiais, o torque não apresentou variações significativas para baixas velocidades de corte, o que pode ser explicado pela baixa geração de calor durante o processo de corte;
- De uma forma geral, a furação em aços AISI H13 pode ser viável, pois o número de furos obtidos dentro dos critérios especificados mostrou-se muito superior ao esperado. Foram possíveis 97 furos com desgaste de flanco da ordem de 0,23mm na melhor condição ensaiada.

Com relação ao processo de roscamento nos materiais AISI D2 e H13 pode-se tirar as seguintes conclusões com os resultados aqui apresentados:

- Os mecanismos de desgastes que atuaram nos machos de corte durante o processo de roscamento de ambos os aços (AISI D2 e AISI H13) foram abrasão nas superfícies de folga e adesão nas superfícies de saída de forma acentuada nos três primeiros filetes.
- As roscas usinadas em aço AISI D2 apresentaram um bom acabamento tanto de forma quanto superficial;
- Nas condições de usinagem testadas no aço AISI H13 os machos de corte foram pouco afetados pelo desgaste, principalmente nas velocidades de 3,0 e 4,0 m/min, recomendadas pelo catálogo do fabricante;

- A usinagem de roscas em aço AISI H13 produziu roscas com uma série de microtrincas ao longo dos flancos dos filetes. Esse fato pode prejudicar aplicações onde o mecanismo de fadiga esteja presente, como seria o caso de moldes e matrizes;
- No processo de roscamento de ambos os aços constatou-se um aumento do torque com o progresso do desgaste sofrido pelos machos de corte. Para o roscamento do aço AISI H13, pode-se dizer que valores seguros de torque estão em torno de 17 N.m, pois não houve quebras das ferramentas e a qualidade das roscas obtidas foi boa;
- Durante o processo de roscamento em aço AISI H13, o macho de corte modelo B1278TCN apresentou-se mais suscetível ao desgaste que o 782075TCN.

6 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Como sugestões para futuros trabalhos, podem-se destacar as seguintes:

- Realizar medições de temperaturas durante o processo de furação e roscamento, de modo a avaliar seus efeitos sobre o desgaste das ferramentas e das coberturas;
- Testar outros sensores, como o de emissão acústica, para verificar a viabilidade de aplicação como indicativo de desgaste de flanco;
- Estudar a influência da velocidade de avanço no processo de furação de aços endurecidos;
- Estudar a influência dos elementos geométricos das brocas e machos de corte sobre o desempenho do processo de furação e roscamento de materiais endurecidos;
- Comparar aplicação de fluido de corte com MQL para os processos de furação e roscamento do aço AISI H13;
- Testar velocidades de corte menores no processo de furação e roscamento do aço AISI D2, monitorando temperatura e torque com o intuito de avaliar o desgaste das ferramentas;
- Estudar a influência das operações anteriores ao processo de roscamento, como furação e alargamento, na qualidade das roscas usinadas.

7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AÇOS FAVORIT – Aços ferramenta – Catálogo de produtos.
www.favorit.com.br/produtos/ferramenta.

AGAPIOU, J.S. (1994). 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.

AMERICAN SOCIETY FOR METALS (1989). Metals Handbook 9. ed. Ohio: Metals Park. V. 16, p. 212-238.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1971), NBR-6176 – *Brocas Helicoidais*

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (1971), NBR 6175 – *Processos Mecânicos de Usinagem*. Rio de Janeiro.

BAYER, A.M.; BECHERER, B.A. (1989). High-speed tool steels. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metals handbook*. 9.ed. Metals Park, Ohio, USA. v.16 - Machining, p.51-59.

CHIAVERINI, V. (1981). *Aços e ferros fundidos*, Associação Brasília de Metais, São Paulo.

COELHO, R.T. (1994). *The machinability of aluminium-based SiC reinforced metal matrix composite (MMC) alloy with emphasis on hole production*, Birmingham, England. 328p. Ph.D. Thesis - School of Manufacturing and Mechanical Engineering, University of Birmingham.

DAN, L.; MATHEW, J. (1990). Tool wear and failure monitoring techniques for turning - a review. *International Journal of Machine Tools Manufacture Design, Research and Application*, v.30, n.4, p.579-598.

DAVIES, M. A., BURNS, T. J., SCHMITZ, T. L. High Speed Machining Processes: Dynamics on multiple scales. In: PROCEEDINGS DYNAMICS AND CONTROL OF MECHANICAL PROCESSING, November, 1999. Technical University of Budapest Department Of Applied Mechanics Hungary,
www.mm.bme.hu/cost_p4_wg2/ws99/paper01.pdf.

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

DINIZ, A.E.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L. (1999). *Tecnologia da usinagem dos materiais*. São Paulo, MM editora, 242p.

DU, R.; ELBESTAWI, M.A.; WU, S.M. (1995). Automated monitoring of manufacturing processes, part 2: applications. *Journal of Engineering for Industry – Transactions of the ASME*, v.117, n.2, p.133-141, May.

ERTUNC, H. M.; LOPARO, K. A. OCAK, H. (2001) Tool wear condition monitoring in drilling operations using hidden Markov models (HMMs). *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, v.41, p. 1363-1384.

EZUGWU, E. O.; WANG, Z. M.; OKEKE, C. I. (1999). Tool life and surface integrity when machining Inconel 718 with PVD and CVD coated tools. *Tribology Transactions*, v.42, n.2, p.353-360.

FANTIN, J.P. (1992). Ensaio com machos: em busca de bons resultados na usinagem. *Máquinas e Metais*, n.320, p.58-60, set.

FERRARESI, D. (1983). Processo de furação (apostila).

FERRARESI, D. (1985). *Fundamentos da usinagem dos metais*. 5.ed. v.1, São Paulo, Editora Edgard Blücher Ltda., 751p.

GRUSS, W. W. (1989). Cermets. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metals Handbook*. 9. ed. Metal Park, Ohio. v.16, p.90-104.

HEATH, P. J. (1989). Ultrahard tool materials. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metals Handbook*. 9. Ed. Metals Park, Ohio, v.16, p.105-117.

HERNANDEZ, P.M.; NICHOLS, D.R. (1986). An internal standard method for the falex no. 8 tap torque tester. *Journal of the American Society of Lubrication Engineering*, v.42, n.10, p.608-613, Oct.

HERNANDEZ, P.M.; SHIRAKI, H. (1987). Comparison of aqueous extreme-pressure cutting fluids on the no. 8 tap torque tester and other cutting methods. *Journal of the American Society of Lubrication Engineering*, v.43, n.6, p.451-458, June.

HEWSON, W.D.; GEROW, G.K. (1996). Development of new metal cutting oils with quantifiable performance characteristics. *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineering*, v.52, n.1, p.31-38, Jan.

HONG, H.; RIGA, A.T.; CAHOON, J.M. (1995). Evaluation of overbased sulfonates as extreme pressure additives in metalworking fluids - part II: lithium and potassium overbased sulfonates. *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineering*, v.51, n.2, p.147-150, Feb.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (1993). ISO 3685 - *Tool life testing with single-point turning tools*.

ISHIKAWA, K.; HORI, R.; UNNO, N. (1992). Development of high precision tightening methods of plastic parts for office automation appliances by means of tapping screws. In: JAPAN - USA SYMPOSIUM ON FLEXIBLE AUTOMATION, San Francisco, CA, USA, 1992. *Proceedings*. New York, NY, USA, American Society of Mechanical Engineers, v.2, p.925-932.

JACK, D. H. (1987). Hard materials for metal cutting. *Metals and Materials*, v.3, p.516-520, Sept.

JALALI, S. A.; KOLARIK, W. J. (1991) Tool life and machinability modes for drilling steels. *International Journal of Machine Tools Manufacturing*, v.31, n.3, p. 273-282.

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

KALISH, H. S. (1983). Status report: cutting tool materials. *Metal Progress*, v. 124, n. 6, p. 21-27, Nov.

KALPAKJIAN, S. (1991). *Manufacturing processes for engineering materials*. 2.ed. Addison – Wesley Publishing Company, p.544-549.

- KENDALL, L. A. (1989). Tool wear and tool life. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metal Handbook*. 9. ed. Metals Park, Ohio. v.16, p. 37-48.
- KLUFT, W. (1997). Monitorando a ferramenta e visualizando o processo de corte, melhora-se a produção. *Máquinas e Metais*, n.378, p.20-49, jul.
- KRAUSS, G. (1990) *Steels: Heat treatment and processing principles*. 2.ed., ASM International, p.497.
- KRUZHANOV, V.; ZEITZ V Investigation of chip formation during high speed drilling. In: SCHULZ, H. *Scientific fundamental of HSC*. Munich: Carl Hanser Verlag, 2001. p. 22-31.
- LÉON, P. (1997). High speed milling for engineers. In: *Anais do 2º Seminário Internacional de Alta Tecnologia - Usinagem com altíssima velocidade de corte e alta precisão*, Universidade Metodista de Piracicaba, Unimep, Santa Bárbara d'Oeste, SP, jul.
- LIN, Z.; CHEN, D. Y. (1995). A study of cutting with CBN tool. *Journal of Materials Processing Technology*, v.49, n. 1-2, p. 149-164, Feb.
- MACHADO, A.R.; DA SILVA, M.B (1999). *Usinagem dos metais*, apostila, 4ª versão, Uberlândia, Minas Gerais, Editora da Universidade Federal de Uberlândia - EDUFU, 172p.
- MACIEL, J. C. (2002) – O aço ferramenta e suas propriedades. *O Mundo da Usinagem*, 3ª ed., p.35-37.
- McGRAW, C.; WILSHIRE, B. (1997) – Applications and advancements in cermet cutting tools. *Machining Technology*, v.8, n.4, p. 1-5.
- MICHELETTI, G.F.; KOENIG, W.; VICTOR, H.R. (1976). In process tool wear sensors for cutting operations. *Annals of the CIRP*, v.25/2, p.483-496.
- MILLS, B (1996). Recent development in cutting tool materials, *Journal of materials processing technology*, v.56, p. 16-23.
- MÜLLER, P.; SOTO, M. (1999). Usinagem sem refrigeração de furos e roscas. In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DE ALTA VELOCIDADE, 4., Santa Bárbara d'Oeste, São

Paulo, Brasil, 1999. *Anais*. Santa Bárbara d'Oeste, São Paulo, Brasil, Universidade Metodista de Piracicaba, p.127-133.

MÜLLER, P.; SOTO, M. (2002). Ferramentas para usinagem de peças endurecidas. *O Mundo da Usinagem*, 3ª ed., p.28-29

OSG (1999). Catálogo de ferramentas, v.1, OSG ferramentas de precisão Ltda., São Paulo.

PALMAI, Z. (1987). Cutting temperature in intermittent cutting. *International journal of machine tools manufacture*, v.27, n. 2, p. 261-274.

PRENGEL, H.G., SANTHANAM, A. T. (1997) Advanced PVD coatings on carbide and cermet cutting tools. *Surface and Coatings Technology*, v.94-95, p.597-602.

POULACHON, G., MOISAN, A. (1998) A contribution to the study of the cutting mechanisms during high speed cutting of hardened steel. *Annals Of the CIRP*. V.47/1, p. 73-76.

PURQUERIO, B.M.; GAMBARINI, J.R. (1978). *Elementos de Tribologia*. v.1, apostila, EESC – USP, São Carlos, São Paulo, 144p.

RAUTER, R. O. (1974) – Aços ferramentas, Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos Editora S. A., 254p.

SANDVIK COROMANT (1997) Ferramentas rotativas, catálogo técnico.

SANDVIK COROMANT (2000). Steel Turning. Sandvik Coromant.

SANTHANAM, A.T.; TIERNEY, P. (1989). Cemented carbides. In: AMERICAN SOCIETY FOR METALS. *Metals handbook*. 9.ed. Metals Park, Ohio, USA. v.16 - Machining, p.71-89.

SANTOS, S.C.; SILVA, M. B. (2001) O processo de furação diante das tendências de evolução dos processos de usinagem. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO (COBEF), 1., Curitiba, 2001. *Anais*. Curitiba, CD ROM.

SASAKI, K.; TAKATSU, S.; SHIBUJI, K.; FUKAWA. (1982). *Development and cutting performance of CVD coated cemented carbides for milling*. R&HM, p.157-160, Dec.

SCHULZ, H.; EMRICH, A.K.; FINZER, T.; DÖRR, J. (2000). Quais são e para que servem os revestimentos. *Máquinas e Metais*, n.416, p. 38-45, set.

SHA, J.; NI, J.; WU, S.M. (1990). Development of a tap wear monitoring scheme. In: PROCEEDINGS OF MANUFACTURING INTERNATIONAL '90. PART 4: ADVANCES IN MATERIALS AND AUTOMATION, Atlanta, GA, USA, 1990. *Proceedings*. New York, NY, USA, American Society of Mechanical Engineers (ASME), p.137-142.

SHAW, M.C. (1984). *Metal cutting principles*, New York, USA, Oxford Science Publications, 594p.

TAKATSU, S. (1990). Recent development in hard cutting tool materials. *High Temperature Materials and Processes*, v.9, n. 2-4, p. 175-193.

TITEX PLUS (1999). *Environmetally friendly metal cutting: dry machining and minimum mist lubrication*. Titex Specialist Lectures, Titex Plus Precision Cutting Tools.

TITEX PLUS (2001). *Hard machinig – the complete range for drilling, milling and tapping*. Titex Specialist Lectures, Titex Plus Precision Cutting Tools.

TITEX PLUS (2002) Tec-Titex Eletronic Catalog

TÖNSHOFF, H. K., MOHLFELD, A. (1997). PVD-coatings for wear in dry cutting operations. *Surface and coatings technology*, v.93, p. 88-92.

TÖNSHOF, H. K.; SPINTING, W.; KÖNING, W., NEISES, A., (1994), Machining of holes, developments in drilling technology, *Annals os the CIRP*, vol. 43, p. 551-561.

TRENT, E.M. (1991). *Metal cutting*, 3.ed. London, England, Butterworths, 273p.

WAKABAYASHI, T.; OGURA, S. (1990). Evaluation of cutting fluids by consumption energy in tapping test. *Journal of the Society of Tribologists and Lubrication Engineering*, v.46, n.11, p.715-720, Nov.

WAYNE, S. F.; BULJAN, S. T. (1990). Wear of ceramic cutting tools in Ni-based superalloy machining. *Tribology Transactions*, v.33, n.4, p.618-626.

WEINGAERTNER, W.L.; DA SILVA, H.R.; TIKAL, F.; VOLLMER, C. (1997). Dependendo do cabeçote, pode-se rosquear ferro GGG 40 a mais de 100 m/min. *Máquinas e Metais*, n.383, p.132-138, dez.

WILSON, R. (1975). *Metallurgy and heat treatment of tool steels*. McGraw Hill, p.378

WRIGHT, P. K., BIAGCHI, A. (1981) Wear mechanisms that dominates tool-life in machining, *Journal applied metal working*, ASM, v.1 4, p. 15-23.

YUHARA, D.A. (2000). Aplicação de revestimentos PVD em ferramentas de corte. In: USINAGEM 2000 FEIRA E CONGRESSO, 1., São Paulo, São Paulo, Brasil, 2000. *Anais*. 13p.