

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Torneamento de Ferro Fundido Nodular
Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas
de Metal Duro**

Autor: José Marcelo Teles

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Itajubá, Dezembro de 2007

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Torneamento de Ferro Fundido Nodular
Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas
de Metal Duro**

Autor: José Marcelo Teles

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Curso: Mestrado em Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Projeto e Fabricação

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Itajubá, Dezembro de 2007

M.G. – Brasil

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Mauá –
Bibliotecária Margareth Ribeiro- CRB_6/1700

T269t

Teles, José Marcelo

Torneamento de ferro fundido nodular ferritizado com nóbio
utilizando ferramentas de metal duro / José Marcelo Teles. --
Itajubá,(MG) : [s.n.], 2007.

106 p. : il.

Orientador: Prof. Dr. João Roberto Ferreira.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá.

1. Ferro fundido nodular com nióbio. 2. Insertos de metal
duro. 3. Fluídos de corte. 4. Desgaste. I. Ferreira, João Roberto,
orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

CDU 669.13(043)

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
INSTITUTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**Torneamento de Ferro Fundido Nodular
Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas
de Metal Duro**

Autor: **José Marcelo Teles**

Orientador: **Prof. Dr. João Roberto Ferreira**

Composição da Banca Examinadora:

Prof. Dr. Wisley Falco Sales – PUC-BH

Prof. Dr. Sebastião Carlos da Costa - IEPG/UNIFEI

Prof. Dr. João Roberto Ferreira, Presidente – IEPG/UNIFEI

Itajubá, 19 de Dezembro de 2007

Dedicatória

À minha esposa Therezia Raffoul, pelo incentivo nas horas difíceis, paciência e abdição de horas de lazer.

À Deus que é o mestre de todos os mestres e inspirador de todas as coisas.

Agradecimentos

Ao meu Orientador, Prof. Dr. João Roberto Ferreira pela motivação e orientação. Pela sua capacidade de me fazer superar os desafios e obstáculos em conciliar a turbulência da vida profissional com a permanência em uma vida acadêmica.

À empresa Mahle Componentes de Motores do Brasil SA por permitir a realização dos ensaios em sua planta, em fornecer o material de teste; bem como os funcionários da fundição, pré-usinagem e engenharia pelo fornecimento de informações técnicas e na realização dos ensaios.

À empresa Iscar, da qual faço parte, pelo incentivo e compreensão dando-me a oportunidade de ausentar-me em alguns momentos do desenvolvimento efetivo de minha função para a conclusão deste projeto da minha vida acadêmica.

Aos funcionários do laboratório de metalurgia da UNIFEI pela colaboração na caracterização do material ensaiado.

A todos os colegas, professores e funcionários do Departamento de Engenharia Mecânica da UNIFEI, que direto ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Aos meus pais, que sempre me incentivaram na formação e no desenvolvimento contínuo e são os principais responsáveis por eu ter chegado até aqui.

Resumo

TELES, J. M. (2007), *Torneamento de Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio Utilizando Ferramentas de Metal Duro*, Itajubá, 105 p. Dissertação (Mestrado em Projeto e Fabricação) - Instituto de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Itajubá.

A indústria metal mecânica exige cada vez mais o desenvolvimento dos processos de fabricação atacando vários focos, principalmente na modernização das máquinas operatrizes e na evolução constante das ferramentas de corte. A exigência de novos materiais para matéria prima buscando constantemente melhores qualidades mecânicas sempre caminha no sentido oposto da usinabilidade. O presente trabalho vem contribuir para esta afirmação avaliando a usinabilidade do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio na operação de torneamento com pastilhas de metal duro revestidas. Para isto foi feita uma análise microestrutural do ferro fundido a ser usinado, vida da ferramenta, mecanismos e formas de desgaste, forma do cavaco e influência do fluido de corte no desgaste e na vida da ferramenta. Analisou-se também a influência da sílica (SiO_2) sempre presentes na parede da coquilha e inevitavelmente presentes numa fina camada do diâmetro externo das buchas de ferro fundido a serem usinadas. Os resultados mostraram que a vida mais longa da ferramenta foi obtida empregando-se a ferramenta de metal duro com revestimento de TiCN, Al_2O_3 , TiN. Verificou-se que as pastilhas com aresta reforçada (arredondamento e fase plana) mantiveram uma melhor integridade da aresta de corte. Conclui-se também que o fluido de corte contribui para o aumento da vida da ferramenta.

Palavras-chave

Ferro fundido nodular com nióbio, torneamento, insertos de metal duro, fluidos de corte.

Abstract

TELES, J. M. (2007), *Turning of Ferritic Nodular Cast Iron with Niobium Using Cemented Carbide Tools*, Itajubá, 106 p. Dissertation (Master's degree in Project and Production) - Institute of Mechanical Engineering, Federal University of Itajubá.

The metal mechanics industry demands a constant development of the production processes reaching several focuses mainly on the modernization of the operating machines and the constant evolution of the cutting tools. The demand of new materials for the raw material looking constantly for better mechanical qualities always go in the opposite sense of the machinability. The present work comes to contribute to this statement evaluating the machinability of the ferritic nodular cast iron with niobium in the turning operation with coated cemented carbide. For this, it was made a microstructure analysis of the cast iron to be turned, tool life, the forms and mechanisms of tool wear, chip forms and influence of the cut fluid in the tool wear and tool life. It was also analyzed the influence of the silica (SiO₂) always present in the wall of the iron mold and unavoidably present in a fine layer of the external diameter of the bushing of nodular cast iron to be turned. The results showed that the longest tool life was obtained by using the cemented carbide tool with coating of TiCN, Al₂O₃, TiN. It was verified that the carbides with reinforced edge (rounding and phase glides) maintained a better integrity of the cut edge. It is also concluded that the cut fluid contributes to the increase of the tool life.

Keywords

Nodular cast iron with niobium, turning, carbide tools, cut fluid.

Sumário

SUMÁRIO	I
LISTA DE FIGURAS	IV
LISTA DE TABELAS	VII
SIMBOLOGIA	VIII
SIGLAS	X
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1 - Considerações Iniciais-----	1
1.2 - Motivação do Trabalho-----	3
1.3 - Objetivos -----	3
1.4 - Organização do Trabalho-----	4
CAPÍTULO 2	5
USINAGEM DE FERRO FUNDIDO	5
2.1 - Ferros Fundidos-----	5
2.2 - Tipos de Ferro Fundido-----	6
2.3 - Usinabilidade dos Ferros Fundidos-----	7
2.3.1 - Influência da microestrutura na usinabilidade dos ferros fundidos-----	9
2.3.2 - Velocidade de resfriamento-----	11
2.4 - Ferro Fundido Nodular com Nióbio-----	12
2.5 - Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular-----	14
2.6 - Mecanismo de Formação do Cavaco-----	18
CAPÍTULO 3	21

FUNDAMENTOS DA USINAGEM	21
3.1 - Materiais para Ferramentas de Corte	21
3.1.1 - Aço rápido	24
3.1.2 - Metal duro	26
3.1.2.1 - Classificação do metal duro	27
3.1.2.2 - Processos de revestimento	28
3.1.2.3 - Metal duro revestido	30
3.2 - Tipos de Desgaste das Ferramentas	34
3.3 - Mecanismos Causadores de Desgaste e Avaria em Ferramentas de Metal Duro	37
3.3.1 - Deformação Plástica	37
3.3.2 - Difusão	37
3.3.3 - Adesão	39
3.3.4 - Abrasão	41
3.3.5 - Oxidação	43
3.3.6 - Lascamento e fratura	43
3.4 - Fluidos de Corte	45
3.4.1 - Propriedades do fluido de corte	46
3.4.2 - Classificação do fluido de corte	47
3.4.3 - Contaminantes dos fluidos de corte	49
3.4.4 - Aplicação dos fluidos de corte	50
3.5 - Usinagem a Seco	50
3.6 - Força e Potência de Usinagem	54
3.6.1 - Análise dos fatores que afetam a força de usinagem	56
CAPÍTULO 4	60
PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	60
4.1 - Caracterização do Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio	61
4.2 - Ferramentas de Corte	66
4.3 - Fluidos de Corte	68
4.4 - Equipamentos Utilizados	69
4.5 - Metodologia	71
4.6 - Formas do Cavaco	72
4.7 - Forças e Potência de Corte	72

CAPÍTULO 5	74
RESULTADOS E DISCUSSÕES	74
5.1 - Caracterização do Sistema Tribológico-----	74
5.2 - Força e Potência de corte-----	75
5.3 - Vida das Ferramentas -----	77
5.4 - Análise do Desgaste das Ferramentas – Usinagem com Refrigeração -----	81
5.5 - Análise do Desgaste das Ferramentas – Usinagem sem Refrigeração-----	88
5.6 - Influência do Fluido de Corte no Desgaste das Ferramentas-----	94
5.7 - Análise do Cavaco-----	95
CAPITULO 6	99
CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	99
6.1 - Conclusões-----	99
6.2 - Sugestões para Trabalhos Futuros-----	100
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	101

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Comparação da formação de cavacos entre aços e ferro fundidos (Klocke & Klöpper, 2006). -----	18
Figura 2.2 - Seção da raiz do cavaco do ferro fundido nodular ferrítico (Lucas et al., 2005). -----	19
Figura 3.1 - Materiais empregados para ferramentas de corte (Iscar Ltd., 2001). -----	22
Figura 3.2 - Dureza dos materiais para ferramentas de corte (Trent, 1991). -----	23
Figura 3.3 - Microdureza dos revestimentos (Abele e Dörr, 2002; Balzers, 2007). -----	32
Figura 3.4 - Principais propriedades das coberturas (Iscar Ltd., 2001). -----	34
Figura 3.5 - Alguns tipos de desgaste em ferramentas de usinagem (Norma ISO 3585, 1977). - -----	36
Figura 3.6 - Deformação plástica da aresta de corte (Iscar Ltd., 2001). -----	37
Figura 3.7 - Craterização (Iscar Ltd., 2001). -----	38
Figura 3.8 - Aresta postiça de corte (Iscar Ltd., 2001). -----	40
Figura 3.9 - Desgaste frontal provocado por abrasão (Iscar Ltd., 2001). -----	42
Figura 3.10 - Fratura (Iscar Ltd., 2001). -----	44
Figura 3.11 - Trinca térmica (Iscar Ltd., 2001). -----	44
Figura 4.1 - Ciclo de ferritização do corpo de prova. -----	62
Figura 4.2 - Variação da dureza no corpo de prova de ferro fundido nodular com nióbio. ---	63
Figura 4.3 - Regiões onde se mediram as microdurezas. -----	63
Figura 4.4 - Microestrutura do ferro fundido nodular ferritizado com Nb (ampliação 100x). -----	64
Figura 4.5 - Nióbio diluído na matriz ferrítica (ampliação 500x). -----	65
Figura 4.6 - Corpo de prova. -----	65
Figura 4.7 - Porta ferramenta utilizado no teste. -----	68
Figura 4.8 - Dispositivo de fixação dos porta ferramentas. -----	70
Figura 4.9 - Dispositivo de fixação das camisas. -----	70
Figura 4.10 - Microscópio óptico tridimensional. -----	71

Figura 5.1 - Vida das ferramentas - Usinagem com refrigeração. -----	78
Figura 5.2 - Influência da refrigeração no desgaste dos insertos. -----	79
Figura 5.3 - Geometria das ferramentas de metal duro. -----	80
Figura 5.4 - Superfície de saída - Inseto de metal duro IC8048 (ISO K10). Usinagem com refrigeração (41x). -----	82
Figura 5.5 - Superfície de folga - Inseto de metal duro IC8048 (ISO K10). Usinagem com refrigeração (41x). -----	83
Figura 5.6 - Inseto de metal duro IC8048 (ISO K10). Usinagem com refrigeração (188x). ---- -----	84
Figura 5.7 - Superfície de saída - Inseto de metal duro IC428 (ISO K05). Usinagem com refrigeração (41x). -----	85
Figura 5.8 - Superfície de folga - Inseto de metal duro IC428 (ISO K05). Usinagem com refrigeração (41x). -----	86
Figura 5.9 - Superfície de saída - Inseto de metal duro IC4028 (ISO K10). Usinagem com refrigeração (41x). -----	87
Figura 5.10 - Superfície de folga - Inseto de metal duro IC4028 (ISO K10). Usinagem com refrigeração (41x). -----	88
Figura 5.11 - superfície de saída - Inseto IC8048 (ISO K10). Usinagem sem refrigeração (41x). -----	89
Figura 5.12 - Superfície de folga - Inseto de metal duro IC8048 (ISO K10). Usinagem sem refrigeração (41x). -----	90
Figura 5.13 - Superfície de saída - Inseto de metal duro IC428 (ISO K05). Usinagem sem refrigeração (38x). -----	91
Figura 5.14 - Superfície de folga - Inseto de metal duro IC428 (ISO K05). Usinagem sem refrigeração (41x). -----	92
Figura 5.15 - Superfície de saída - Inseto de metal duro IC4028 (ISO K10). Usinagem sem refrigeração (38x). -----	93
Figura 5.16 - Superfície de folga - Inseto de metal duro IC4028 (ISO K10). Usinagem sem refrigeração (41x). -----	93
Figura 5.17 - Cavaco obtido com inseto IC8048. $V_c = 100\text{m/min}$, $f = 0,4\text{ mm/volta}$, $a_p = 4\text{ mm}$. -----	96
Figura 5.18 - Cavaco obtido com inseto IC428. $V_c = 150\text{m/min}$, $f = 0,4\text{ mm/volta}$, $a_p = 4\text{ mm}$. -----	97

Figura 5.19 - Cavaco obtido com inserto IC4028. $V_c = 150$ m/min, $f = 0,4$ mm/volta, $a_p = 4$ mm. ----- 98

Lista de Tabelas

Tabela 3.1 - Principais elementos de liga dos aços rápidos (Chiaverini, 1986).-----	25
Tabela 3.2 - Características dos revestimentos CVD e PVD (Abele & Dörr, 2002). -----	28
Tabela 3.3 - Geometria da ferramenta para constantes de Kienzle. -----	56
Tabela 4.1 - Composição química do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio (Mahle Catalogue, 2007).-----	61
Tabela 4.2 - Microdureza do material usinado. -----	64
Tabela 4.3 - Pastilhas utilizadas no teste. -----	67
Tabela 4.4 - Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante (Iscar Ltd., 2007). -----	67
Tabela 4.5 - Características do fluido de corte (Fuchs, 1997). -----	69
Tabela 4.6 - Parâmetros de corte utilizados nos ensaios. -----	72
Tabela 5.1 - Força e potência de corte. -----	76

Simbologia

α_0 – Ângulo de folga [graus]

β_0 – Ângulo de cunha [graus]

χ_r – Ângulo de posição [graus]

ε_r – Ângulo de ponta da ferramenta [graus]

γ_0 – Ângulo de saída [graus]

λ_s – Ângulo de inclinação [graus]

r_e – Raio de ponta da ferramenta [mm]

A – Área da seção de corte [mm²]

Al – Alumínio

AlCrN – Nitreto de cromo alumínio

Al₂O₃ – Óxido de alumínio

a_p – Profundidade de corte [mm]

APC – Aresta postíça de corte

C – Carbono

CNC – Comando numérico computadorizado

Co - Cobalto

Cr - Cromo

Cu – Cobre

CBN – Nitreto cúbico de boro

Cr₃C₂ – Carboneto de cromo

CV – Carboneto de vanádio

CVD – Deposição química a vapor

f – avanço [mm/rot]

F_c – Força de corte [N]

Fe – Ferro

Fe_3C – Carboneto de ferro (cementita)
 Fe_3P – Fosfeto de ferro
 H_2 - Hidrogênio
HSS – Aço rápido
HRC – Dureza Rockweel “C” [kgf/mm^2]
HV – Dureza Vickers [kgf/mm^2]
HB – Dureza Brinell [kgf/mm^2]
KB – Largura da cratera [mm]
 K_c – Pressão específica de corte [N/mm^2]
KM – Largura do centro da cratera [mm]
KT – Profundidade da cratera [mm]
L – Comprimento de corte [mm]
Mn – Manganês
Mo – Molibdênio
 MoS_2 – Dissulfeto de molibdênio
MQL – Mínima quantidade de lubrificante
Nb – Nióbio
NbC – Carboneto de nióbio
Ni – Níquel
 P_c – Potência de corte [kW]
PCBN – Nitreto cúbico de boro policristalino
PCD – Diamante policristalino
PVD – Deposição física a vapor
S – Enxofre
Si - Silício
SiC – Carboneto de silício
 SiO_2 – Óxido de silício (sílica)
T – Vida da ferramenta de corte [min]
TaC – Carboneto de tântalo
Ti – Titânio
 TiAlN – Nitreto de titânio alumínio
TiC – Carboneto de titânio
TiCl – Cloreto de titânio
 TiCN – Carbonitreto de titânio

TiN – Nitreto de titânio

V – Vanádio

V_B – Desgaste de flanco

VB_B – Desgaste de flanco médio [mm]

$VB_{Bmáx}$ – Desgaste de flanco máximo [mm]

VB_C – Desgaste de entalhe [mm]

VB_N – Desgaste de entalhe [mm]

V_c – Velocidade de corte [m/min]

W – Tungstênio

WC – carboneto de tungstênio

Y – Ítrio

Siglas

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas

DIN – Deutsches Institut für Normung

IEM – Instituto de Engenharia Mecânica

ISO – International Organization for Standardization

UNIFEI – Universidade Federal de Itajubá

Capítulo 1

INTRODUÇÃO

1.1 – Considerações Iniciais

A grande evolução da indústria automotiva só foi possível devido aos avanços tecnológicos observados na indústria siderúrgica e de materiais, na evolução das máquinas operatrizes e no desenvolvimento dos materiais para ferramentas de corte (substrato e cobertura) possibilitando alto desempenho, boa resistência ao desgaste, mesmo na presença de altas temperaturas. Todo esse avanço é para suprir as exigências impostas por um mercado altamente competitivo, cujo objetivo é a melhoria da produtividade com redução de custo nas operações de usinagem.

Atendendo a exigência das indústrias, muitos materiais para aplicação na engenharia requerem, além de outras propriedades, alta resistência mecânica, alta tenacidade e resistência a corrosão. Estas características são antagônicas a usinabilidade dos materiais. Sendo assim, o desenvolvimento de novas ferramentas de usinagem e novas coberturas precisam superar essas novas exigências do mercado pois, além de usar materiais com pior usinabilidade, os dados de corte são mais agressivos devido a evolução das máquinas operatrizes e a constante busca por ganhos de produtividade, da Silva (2002).

A otimização dos parâmetros de usinagem de acordo com a seleção adequada do inserto tem sido uma das principais alternativas empregadas pela tecnologia atual. Para definir o

melhor inserto deve-se considerar o material que está sendo usinado bem como as características do revestimento e a geometria da ferramenta.

Atualmente devido às necessidades impostas pelos novos motores de combustão, vários tipos de materiais estão sendo desenvolvidos para atender a indústria automotiva. Entre eles o ferro fundido nodular com nióbio. O nióbio forma carbonetos estáveis melhorando a resistência ao desgaste. Além desta propriedade, o nióbio é um microconstituente quase inerte, pois, pouco interfere na densidade do ferro fundido e não modifica a composição das microestruturas (grafita, perlita, etc) do ferro fundido em níveis significantes. Algumas aplicações significantes para este tipo de material se encontram na indústria automotiva na confecção de cabeçote de motores, anéis de pistão e painéis de freio. Encontra-se também na indústria siderúrgica na fabricação de rolos laminadores e moinhos, Nylen (2001).

O processo de fundição pelo qual o ferro fundido nodular com nióbio é obtido também interfere na sua usinabilidade. O material testado foi obtido por fundição centrífuga onde as coquilhas são recobertas internamente por pó de sílica (SiO_2) a fim de assegurar que o tubo centrifugado não fique preso após a fundição. Uma parte da sílica dilui-se na camada periférica do tubo centrifugado gerando uma camada altamente abrasiva, outra parte fica aderida a superfície do tubo centrifugado devido a superfície ser rugosa. Nos testes realizados percebe-se um grande desgaste de entalhe devido a essa característica do material fundido.

Tradicionalmente os fluidos de corte sempre foram utilizados na usinagem dos metais para aumentar a vida das ferramentas, dentre outras funções. Atualmente, devido ao alto custo dos fluidos utilizados na refrigeração/lubrificação em usinagem, aliado as questões ecológicas e também aos cuidados com a saúde do trabalhador, é necessário avaliar a real necessidade de se trabalhar com os fluidos. Até pouco tempo o descarte destes materiais eram feitos no meio ambiente sem restrições. Atualmente, esta prática é dificultada não só pelo rigor das leis como em virtude do padrão de produção com a adoção do “selo verde”.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar o comportamento das ferramentas de metal duro no processo de torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio. Para atingir esse objetivo três insertos distintos foram testados. Diferentes revestimentos, geometrias de quebra cavaco e preparações de aresta de corte foram utilizados seguindo recomendações do catálogo do fabricante. Trabalhou-se também com e sem refrigeração com o propósito de analisar a influência do fluido de corte no desgaste das ferramentas. Os

resultados obtidos poderão ser usados posteriormente para análise da viabilidade de se trabalhar sem fluido de corte.

Finalmente, conhecendo as limitações da máquina analisou-se a potência de corte requerida devido à utilização simultânea de três ferramentas para desbaste.

1.2 – Motivação do Trabalho

Atualmente, a demanda pelos anéis de pistão de ferro fundido nodular com nióbio está aumentando. O aumento da participação desse produto no mix oferecido pela empresa “Mahle Componentes de Motores SA” implicou na busca por novas tecnologias na manufatura do produto. A otimização do processo a fim de obter a mesma produtividade alcançada quando se produz anéis de pistão com ferro fundido nodular comum fez-se necessária para que a empresa mantivesse competitiva e atendesse a demanda sem necessidade de compra de novas máquinas operatrizes.

Esse trabalho vem contribuir para que este objetivo lançado acima possa ser concretizado alterando muito pouco o custo de produção. O uso desse material esta se tornando comum na indústria automotiva. Assim, a otimização do processo de usinagem torna-se obrigatório.

A Mahle é uma empresa com consciência ambiental e possui um sério programa de controle de descartes buscando atender as mais exigentes normas de preservação ambiental. Esse trabalho colabora para uma posterior análise crítica da eliminação do uso de fluido refrigerante no processo de desbaste no torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio já que inevitavelmente esse será o próximo passo a ser dado dentro do processo de usinagem atual.

1.3 – Objetivos

Este trabalho pretende alcançar os seguintes objetivos:

- Analisar o comportamento do desgaste e da vida de três ferramentas de metal duro no processo de torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio.
- Analisar a influência da camada de sílica (SiO_2) presente na superfície do ferro fundido nodular na vida da ferramenta;
- Verificar a influência do fluido de corte no desgaste e na vida da ferramenta.

1.4 – Organização do Trabalho

Este trabalho divide-se em 6 capítulos com os seguintes conteúdos;

O capítulo 1, já apresentado faz uma introdução do trabalho.

O capítulo 2, usinagem de ferro fundido, apresenta a primeira parte da revisão bibliográfica deste trabalho. Informações levantadas junto à literatura dos tipos de ferro fundidos existentes bem como sua usinabilidade. Informações sobre o ferro fundido nodular com nióbio são mostradas neste capítulo.

O capítulo 3, fundamentos de usinagem, apresenta a segunda parte da revisão bibliográfica. Nele é mostrado o embasamento teórico necessário para o uso correto das ferramentas, aplicação de fluidos, forças e potência de corte.

O capítulo 4, procedimento experimental, mostra toda metodologia utilizada nos testes bem como os equipamentos, ferramentas e fluidos utilizados.

O capítulo 5, resultados e discussões, apresenta os resultados obtidos e as evidências necessárias para fazer a conclusão.

Finalmente no capítulo 6, conclusões e sugestões para trabalhos futuros, desenvolve-se o desfecho do trabalho, apresentando as contribuições e sugerindo temas para futuros desenvolvimentos.

Capítulo 2

USINAGEM DE FERRO FUNDIDO

Este capítulo apresentará algumas generalidades sobre ferro fundido, tipos de ferro fundido e a usinabilidade do ferro fundido nodular. Será mostrada a influência do nióbio nas propriedades mecânicas do ferro fundido nodular e uma revisão sobre as ferramentas de corte já utilizadas por outros autores na usinagem deste material.

2.1 Ferros Fundidos

Juntamente com os aços, os ferros fundidos são os materiais mais utilizados pela indústria, sendo aplicado em diversos setores não só devido às suas características inerentes, como também sua imensa versatilidade. Podem apresentar diversas características mecânicas dependendo dos elementos de liga presente ou do tratamento térmico submetido.

Segundo Chiaverini (1990) ferro fundido é a liga ferro-carbono-silício, de teores de carbono geralmente acima de 2,0 %, em quantidade superior à que pode ser retida em solução sólida na austenita, de modo a resultar carbono parcialmente livre, na forma de veios ou lamelas de grafita.

As propriedades mecânicas como resistência, ductilidade e módulo de elasticidade dependem fortemente da estrutura e da distribuição dos constituintes microestruturais, e as propriedades físicas como condutividade térmica e capacidade de amortecimento também são fortemente influenciadas pela microestrutura. Em qualquer ferro fundido, a característica microestrutural de efeito significativo nessas propriedades é a presença de grafita pura.

Dentre as ligas ferro-carbono, os ferros fundidos constituem um grupo de ligas de importância fundamental para a indústria, pois mediante a introdução de elementos de liga e de aplicação de tratamentos térmicos adequados, tornou-se possível o emprego do ferro fundido nodular em aplicações antes exclusivas dos aços (Chiaverini, 1990).

2.2 – Tipos de Ferro Fundido

Têm-se vários tipos de ferro fundido, cada um apresentando características bem distintas. Um estudo detalhado da aplicação, as propriedades mecânicas desejadas são fundamentais para a escolha correta do tipo de ferro fundido a ser empregado. Segue os principais tipos de ferro fundido utilizados hoje pela indústria metal mecânica:

- Ferro Fundido Cinzento: Apresenta como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício. Uma parcela relativamente grande do carbono está no estado livre (grafita lamelar) e outra parcela no estado combinado Fe_3C (cementita).
- Ferro Fundido Branco: Apresenta como elementos de liga fundamentais o carbono e o silício. Devido às condições de fabricação e menor teor de silício, apresenta o carbono quase inteiramente na forma combinada (Fe_3C).
- Ferro Fundido Mesclado: Caracterizado igualmente por uma mescla de proporções variáveis de ferro fundido branco e ferro fundido cinzento.
- Ferro Fundido Maleável: Obtido a partir do ferro fundido branco mediante um tratamento térmico (maleabilização) resultando numa transformação de praticamente todo o ferro combinado (Fe_3C) em grafita na forma de nódulos.

- Ferro Fundido Nodular: Caracterizado por apresentar, devido um tratamento realizado ainda no estado líquido, carbono livre na forma de grafita esferoidal, o que confere ao material característica de boa ductilidade, donde a denominação freqüentemente para esse material de ferro fundido dúctil.
- Ferro Fundido Vermicular: Ferro fundido de comercialização recente. Também chamado de ferro fundido de grafita compactada ou semi-ondular. É um produto com uma terra rara como elemento de liga adicional. A presença de titânio reduz a formação de grafita esferoidal. Este material é intermediário entre o ferro fundido cinzento e ferro fundido nodular. Possui a fundibilidade do ferro fundido cinzento com melhor resistência mecânica e alguma ductibilidade.

2.3 – Usinabilidade dos Ferros Fundidos

A usinabilidade pode ser definida como uma grandeza comparativa e expressa num conjunto de propriedades de usinagem de um material, isto é, o grau de dificuldade de usinar um determinado material (Diniz et al., 2006).

Genericamente, os ferros fundidos são tidos como materiais que apresentam uma boa usinabilidade, principalmente os cinzentos e nodulares de menor dureza e resistência (Boehs et al., 2000). O ferro fundido é um material onde a ocorrência e a distribuição de seus constituintes define sua usinabilidade. Esta não é explicada simplesmente pela composição química, por ensaios de dureza ou de ruptura à tração, destacando-se a microestrutura como sendo um dos principais fatores a influenciar a vida da ferramenta.

Os elementos de liga interferem diretamente na usinabilidade. A determinação da influência dos elementos de liga que compõem os ferros fundidos é bastante difícil, tendo em vista três fatores: a reação entre si desses elementos, seu efeito na microestrutura e a taxa de esfriamento.

O desempenho dos elementos químicos mais comuns sobre a usinabilidade dos ferros fundidos pode ser assim analisado:

- Carbono e Silício: O carbono e o silício são os principais elementos de liga. O carbono determina a quantidade de grafita e o silício é um poderoso elemento grafitizante, ou seja, faz-se a decomposição do carbono combinado (Fe_3C) em ferro e carbono melhorando assim sua usinabilidade.
- Manganês e enxofre: O efeito do enxofre deve ser analisado em conjunto com o teor de manganês no ferro. Quando se forma sulfeto de manganês, o enxofre promove a redução da matriz perlítica. Obtém-se um ganho expressivo na vida da ferramenta quando faz se variar à percentagem de sulfeto de manganês, com teores de enxofre entre 0,02 para 0,12 %. Supõem se que esse aumento seja consequência do efeito lubrificante adicional proporcionado pelos sulfetos de manganês, reduzindo o atrito e consequentemente a temperatura de corte.
- A presença de uma quantidade maior de enxofre se traduz na formação de maior número de sulfetos, que são responsáveis pela ruptura do cavaco em pequenos fragmentos.
- Fósforo: Não apresentam uma ação muito significativa do ponto de vista de tendência grafitizante. O fósforo é um estabilizador de carboneto de ferro. Atua na estrutura do material formando com o ferro e o carbono, carboneto de ferro e fosfeto de ferro, de aparência branca e perfurada, chamada steadita.

A steadita é um constituinte de natureza eutética, compreendendo partículas de fosfeto de ferro (Fe_3P) e carboneto de ferro (Fe_3C). Ocorre em áreas interdendríticas, formando uma segregação, pois essas áreas são as últimas que solidificam. A steadita é dura e quebradiça, influenciando de maneira prejudicial à usinabilidade. Entretanto, esta contribui na resistência ao desgaste e forma uma estrutura que é desejável em algumas aplicações, tal como rolamentos.

Outros elementos também podem ser encontrados tais como: Alumínio, Antimônio, Boro, Cromo, Cobre, Manganês, Molibdênio, Níquel, Telúrio, Estanho, Titânio, Vanádio e Nióbio.

2.3.1- Influência da microestrutura na usinabilidade dos ferros fundidos

A usinabilidade dos ferros fundidos é diretamente afetada pela distribuição e proporção de seus diversos constituintes. A dureza é um bom indicador da microestrutura e também da usinabilidade, porém esta não é uma condição suficiente, pois diferentes microestruturas podem ter diferentes propriedades de usinagem apresentando, contudo a mesma dureza.

A influência dos microconstituintes mais comuns na usinabilidade dos ferros fundidos segundo Silveira (1983), pode ser resumida da seguinte forma:

a) Grafita

A presença de grafita no ferro fundido é de suma importância no estudo da usinabilidade, por ser o elemento que determina as propriedades mecânicas. Porém, a vida da ferramenta depende também da microestrutura que circunda a grafita. Esta é formada pela decomposição do carboneto de ferro:



Esta decomposição depende da velocidade de solidificação e da presença de determinados elementos de liga. Segundo Silveira (2003), a grafita cria descontinuidades na matriz facilitando com isto a ruptura do cavaco.

Além disso, atua como lubrificante sólido e impede a soldagem do material à ferramenta, reduzindo a formação de aresta postiça de corte. A forma da grafita influi menos do que a proporção da mesma, reduz as forças de corte, principalmente nos ferros fundidos com matriz ferrítica.

Segundo Fuller (1997), na solidificação do eutético estável nos ferros fundidos, a grafita é a fase de mais difícil nucleação, sendo o processo heterogêneo. As partículas que atuam com centros efetivos para a nucleação da grafita nos ferros fundidos cinzentos, nodulares e com grafita compacta, são essencialmente as mesmas, provavelmente com diferente importância relativa no processo para cada um desses materiais. A obtenção de diferentes formas de grafita se verifica na etapa de crescimento.

Para o ferro fundido nodular, materiais com dureza semelhantes, a usinabilidade aumenta com a maior proporção dos nódulos de grafita em aplicações de furação. Para aplicações de torneamento, se o tamanho for muito grande podem reduzir a usinabilidade por causarem cortes descontínuos.

b) Ferrita

Trata-se do ferro no estado alotrópico alfa, contendo traços de carbono. Apresenta uma estrutura de grãos poligonais irregulares.

A matriz ferrítica pode ser obtida no estado bruto de fundição em alguns tipos de ferro. Com dureza entre 100 a 150 HB, é o microconstituente de melhor usinabilidade, excetuando-se apenas os casos em que se encontra fortemente ligado com cromo, silício e alumínio. Com exceção da grafita, a ferrita apresenta mais baixa dureza com relação a outros constituintes do ferro fundido.

c) Perlita

A perlita é um microconstituente comum nos ferros fundidos de média resistência e dureza, com propriedades mecânicas intermediária entre ferrita e a cementita. A matriz perlítica combina muito bem sua boa resistência à ruptura e à abrasão com uma boa usinabilidade. Sua dureza se situa entre 150 e 350 HB. A perlita fina é mais resistente e menos usinável, enquanto que a perlita grossa é menos resistente, com melhor usinabilidade. Nos ferros fundidos, o carbono que combina com a perlita é função da taxa de esfriamento (Silveira, 1983).

d) Steadita

A steadita é um microconstituente de dureza relativamente alta que fica fora da rede cristalina, e com aumento do teor de fósforo, a usinabilidade começa a cair.

e) Cementita

A cementita, carbonetos livres, ou carboneto de ferro (Fe_3C), se caracteriza pela sua elevada dureza, chegando a 800 HB ou mais. Mesmo em proporção muito pequena, reduz acentuadamente a usinabilidade, acentuando o desgaste da ferramenta, principalmente para altas velocidades, por se tratar de um constiuente altamente abrasivo.

f) Austenita

A austenita possui baixa condutibilidade térmica e maior tenacidade. Sua presença implica no aumento da velocidade de corte, ângulos de saídas maiores e cuidados especiais com refrigeração e lubrificação (Santos et al., 2007). A austenita esta presente somente nos ferros fundidos com altos teores de Ni, Cu e Mn. A dureza deste microconstituente é de 120 a 160 HB (Silveira, 1983).

2.3.2 – Velocidade de resfriamento

É muito importante saber o que acontece durante o resfriamento com a estrutura metalográfica do ferro fundido. Para peças de diferentes seções ocorrem diversas velocidades de resfriamento. Seções espessas implicam em velocidades menores e seções finas em velocidades maiores de resfriamento.

Nas regiões onde ocorrem velocidades altas de resfriamento, seções finas ou áreas adjacentes às paredes do molde, não há muito tempo para decomposição da cementita. Dependendo do teor de carbono ou silício podem ocorrer pouca ou nenhuma grafitização. Nestas regiões forma-se ferro fundido branco que se chama de seções coquilhadas.

Para seções de resfriamento lento, dependendo do teor de carbono e silício tem-se grafitização. A estrutura formada é constituída essencialmente de perlita e grafita. Essa estrutura apresenta características de baixa dureza e excelente usinabilidade e uma boa resistência mecânica.

A velocidade de resfriamento influi também na forma de distribuição e tamanho dos veios de grafita. Velocidades altas produzem veios finos com uma distribuição dendrítica. Velocidades menores resultam em uma distribuição de tamanhos normais, podendo até ter veios grosseiros de grafita.

2.4 – Ferro Fundido Nodular com Nióbio

Segundo Chiaverini (1990) a introdução de elementos de liga no ferro fundido nodular é prática que tende a se generalizar, devido à sua influência ser aproximadamente idêntica à que ocorre nos aços.

Quando necessita-se de ferro fundido nodular com uma boa resistência mecânica normalmente utiliza-se das estratégias:

- Aumentar a dureza aumentando a proporção de cementita. Este procedimento aumenta a fragilidade do material ficando susceptível a trincas.
- Aumentar o número de carbonetos, mas isto pode comprometer o equilíbrio da liga grafita/carbonetos.

O nióbio é um dos elementos utilizados para melhorar a resistência das ligas ferrosas aumentando o número de carbonetos. Sua aplicação como elemento de liga no ferro fundido é relativamente novo quando comparado com o uso em aços. O uso de nióbio em aços tem longa tradição, mas restrita a microconstituente (<0,1%). No ferro fundido o nióbio é usado em proporções maiores.

O nióbio quando em solução, possui dentre todos os outros elementos de liga comumente usados (Ti, V, Cr, Al, Ni, etc) o maior efeito na redução da temperatura de transformação da austenita em ferrita.

Tither (2005) afirmou que o nióbio é mais efetivo que o vanádio ou o alumínio para se evitar a formação de tamanhos grãos grosseiros sob altas temperaturas. Este efeito se traduz no fato do nióbio ser mais efetivo com agente para refino de grão. Os aços que apresentam o nióbio como elemento de liga proporcionam tenacidade melhorada e melhores níveis de resistência devido ao refino de grão. O refino do tamanho de grão é o único mecanismo de endurecimento que proporciona uma melhoria nítida e concomitante na tenacidade. Os aços fundidos contendo nióbio proporcionam melhorias importantes nas propriedades de fadiga, principalmente em virtude da redução nas concentrações de tensão. Tither (2005) também afirmou que o nióbio em solução possui um notável efeito de temperabilidade. Dentre todos os elementos microligantes, o nióbio, possui o maior efeito na redução da temperatura de transformação da austenita em ferrita.

Segundo Nylén (2001), algumas aplicações significantes para este tipo de material se encontram na indústria automotiva como na confecção de cabeçote de motores, anéis de pistão e painéis de freio e também na indústria siderúrgica na fabricação de rolos laminadores e moinhos.

O nióbio forma carbonetos (NbC) estáveis e são muito importantes para aplicações onde requer melhorar a resistência ao desgaste. Assim, como nos aços a adição de pequenas quantidades de nióbio influencia na estabilidade da austenita, refinamento de grãos e nas propriedades mecânicas. Carbonetos de nióbio apresentam alta dureza, inclusive a quente. Formam partículas discretas que são precipitadas no ferro líquido e não incorporam no eutético solidificado. Nióbio apresenta baixa solubilidade na austenita e não influencia em níveis significantes a distribuição de carbonetos/grafitas no ferro fundido. Outros elementos de liga como cromo, titânio, zircônio e tântalo geram carbonetos que apresentam propriedades bem diferentes do nióbio como densidade, influência na distribuição dos carbonetos/grafita e solubilidade na austenita, sendo então restritos suas aplicações.

Nylén (2001) citando Shao-nan (1999) mostra que as propriedades mecânicas do ferro fundido melhoram com a adição de nióbio. Esta característica pode ser explicada pelo fato que o nióbio reage com o carbono formando carbonetos reduzindo a quantidade de carbono livre para formação de grafita. Esta explicação é obviamente correta, mas o mecanismo ainda não foi bem explicado. As partículas de NbC possuem várias propriedades que são importantes para o uso final dessa ligas:

- Densidade muito próxima da densidade do ferro fundido;
- Alta dureza mesmo trabalhando a quente;
- Possui uma baixa solubilidade na austenita;
- Nióbio não influencia ou modifica a composição do ferro fundido em níveis significantes.

As características apresentadas acima mostram que o nióbio é um elemento quase inerte no ferro fundido diferente de outros elementos de liga como cromo, titânio, zircônio e tântalo. Os carbonetos formados com esses elementos apresentam propriedades diferentes das propriedades dos carbonetos de nióbio tais como, influência na distribuição carbono/grafita e solubilidade na austenita.

No processo de fundição centrífuga é muito importante a escolha correta do elemento de liga devido a influência da alta força centrífuga no processo. Dependendo da densidade do

elemento ocorrerá uma precipitação na porção externa ou interna do fundido centrifugado. Este processo é conhecido por macro segregação ou sedimentação e está relacionado a densidades diferentes. Devido a densidade do nióbio ser muito próxima do ferro fundido ele se aplica muito bem nestas condições.

2.5- Usinabilidade do Ferro Fundido Nodular

A aplicação do ferro fundido nodular está crescendo mundialmente devido às boas propriedades e versatilidade que este material apresenta. A presença de grafita em sua matriz confere a este material uma boa resistência ao desgaste devido à característica lubrificante, consequentemente o atrito é reduzido. Ainda, o ferro fundido nodular apresenta uma boa resistência ao impacto. Este fato se deve à forma esferoidal da grafita que evita a propagação de trincas. Em comparação ao aço (0,3% de C), o ferro fundido nodular apresenta maior fundibilidade. O ponto de fusão é menor e, portanto, é necessária menos energia para fundir o material, o que conduz a um menor custo do produto. Outra vantagem é que o ferro fundido nodular apresenta maior fluidez no estado líquido e uma menor concentração na solidificação, possibilitando a fabricação de peças mais complexas ou simplesmente uma otimização do sobremetal. O ferro fundido nodular apresenta uma melhor relação resistência/peso. Isto significa que uma peça que é fabricada em ferro fundido nodular pode substituir uma peça que é fabricada em aço, suportando a mesma carga, mas reduzindo seu peso. O ferro fundido nodular também apresenta boa ductilidade e resistência à fadiga, portanto, ele pode ser utilizado quando a peça está sob solicitação dinâmica. São exemplos de peças fabricadas com ferro fundido nodular os virabrequins, anéis de pistões, engrenagens, pinhões, comando de válvulas, cubos de roda, peças que compõe o sistema de suspensão, etc, segundo Torga et al. (2003), Lucas et al. (2005) e Nylén (2001).

Para os ferros fundidos convencionais, as propriedades de usinagem são influenciadas de modo acentuado pela quantidade e a conformação da grafita que, por um lado, reduz a fricção entre a ferramenta e a peça e, por outro, interrompe a continuidade da matriz da microestrutura metálica básica. Geralmente essa interrupção resulta na facilidade de usinagem em comparação com o aço, que não possui grafita na sua composição e, gera cavacos na forma de espirais contínuas, com conseqüente necessidade de maiores forças de usinagem.

A usinabilidade pode ser definida como uma grandeza comparativa e expressa um conjunto de propriedades de usinagem de um material, isto é, o grau de dificuldade de usinar um determinado material. A usinabilidade depende de uma série de condições intrínsecas ao material tais como o estado metalúrgico da peça, da dureza, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material. Mas também de condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez do sistema máquina-ferramenta, operação empregada, corte contínuo ou intermitente, condição de entrada e saída da ferramenta, etc (Diniz et al., 2006).

O ferro fundido nodular ou dúctil caracteriza-se pela sua ductilidade, tenacidade e resistência mecânica. Seu limite de escoamento é mais elevado, comparado com o ferro fundido cinzento, e apesar de mais alta pressão específica de corte e resistência, apresenta boa usinabilidade (Chiaverini, 1990). Segundo Boehs et al. (2000) a grafita presente na micro-estrutura dos ferros fundidos contribui para a boa usinabilidade, tanto pelo fator lubrificação da ferramenta quanto pela descontinuidade que produz na micro-estrutura e, com isto, a ruptura do cavaco em pequenos segmentos, independentemente do processo de usinagem.

A usinabilidade destes materiais, assim como a dos aços, também está fortemente atrelada aos microconstituintes como ferrita, perlita, martensita, austenita, carbeto e densidade de grafita. A composição química também exerce uma grande influência como já citado anteriormente (Boehs et al., 2000).

A estrutura resultante, após o esfriamento da solução, apresenta o carboneto de ferro e grafita em forma esferoidal, devido à presença de pequena quantidade de magnésio ou cério. Essa forma da grafita não interrompe a continuidade da matriz tanto quanto a grafita em lamelas, resultando assim, melhor ductilidade segundo da Silva e Abrão (2006).

Alguns elementos de liga melhoram a usinabilidade (Si, Ni, Al, Cu, S) porque são grafitizantes, outros (Cr, Co, Mn, Mo e W) são prejudiciais, pois, são formadores de carbonetos que são partículas muito duras e abrasivas.

Alguns tratamentos térmicos podem ser realizados a fim de melhorar a usinabilidade do ferro fundido nodular. O recozimento promove a grafitização do material transformando a cementita (Fe_3C) em grafita e austenita. Os elementos resultantes apresentam uma boa usinabilidade (da Silva, 2002).

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

Boehs et al. (2000) usinou ferro fundido nodular de fundição contínua FE50007 com as seguintes pastilhas de metal duro:

- GC3015 (P15/K15) (SNMA 120408) com revestimento de nitreto de titânio;
- GC4015 (K15) (SCMT 120408 UR) com camada interna de óxido de alumínio e camada externa de revestimento de nitreto de titânio;
- GC4025 (P25/K25) (SCMT 120408 UM) com camada interna de carbonitreto de titânio, óxido de alumínio e camada externa de nitreto de titânio.

O ferro fundido nodular FE50007 é considerado um material com dureza e resistência mecânica próximas às dos aços ABNT 1040/1045. Constatou-se que entre os três tipos de metal duro utilizados, o primeiro apresentou nítida superioridade.

No que se refere ao desgaste das ferramentas verificou-se que a partir de um desgaste de flanco V_B de 0,20 mm o desgaste da ferramenta aumenta bruscamente de intensidade. Este fato está associado à perda do revestimento e, portanto, maior solicitação térmica e atrito nas partes da ferramenta onde isto ocorrer (Boehs, et al., 2000).

Da Silva et al. (2002) utilizou insertos de metal duro e cerâmica mista para usinar ferro fundido nodular GGG40. Em seus testes trabalhou com insertos de metal duro na classe ISO K com cobertura aplicada pelo processo CVD. O primeiro inserto com duas camadas de revestimento, uma interna de carbonitreto de titânio (TiCN) e outra externa de óxido de alumínio (inserto QM). O segundo inserto testado apresentava tripla camada, uma interna de TiCN (mais espessa), uma intermediária de Al_2O_3 e a camada externa fina de nitreto de titânio (TiN) (inserto KM). O inserto cerâmico utilizado apresentava uma composição mista de 70% Al_2O_3 mais 30% de TiC. Verificou-se nos seus experimentos que a taxa de desgaste de flanco aumenta com a elevação da velocidade de corte. Inicialmente trabalhou com inserto QM de

metal duro com as seguintes velocidades de corte: 200, 250 e 300 m/min e avanço de 0,1, 0,25 e 0,40 mm/rot. Segundo Diniz et al. (2006), a velocidade de corte seguida pelo avanço e por último, a profundidade de corte são os parâmetros que mais influenciam na vida da ferramenta. Essa afirmação pode ser comprovada pelos resultados apresentados no trabalho de Da Silva et al. (2002). Variando o avanço e mantendo-se constantes a velocidade de corte em 250 m/min e a profundidade de corte em 0,5 mm, verifica-se que usando um avanço a 0,25 mm/rot o inserto de metal duro QM apresenta um desempenho superior ao metal duro KM. Essa situação se reverte quando o avanço excede 0,25 mm/rot, provavelmente devido ao fato de o revestimento de nitreto de titânio apresentar um menor coeficiente de atrito e também a diferença da geometria de quebra cavaco. Para velocidades de corte superior a 250 m/min o inserto de metal duro KM apresenta um desempenho superior ao inserto QM independente do avanço utilizado. O inserto de cerâmica em nenhuma condição apresentou resultado melhor que os insertos de metal duro.

Verificou que os principais mecanismos de desgaste de ferramenta na usinagem de ferro fundido nodular GGG40 foram difusão na superfície de saída e abrasão na superfície de folga. Verificou-se que a ferramenta de cerâmica apresenta maior integridade da aresta cortante, o que implicou num melhor acabamento da superfície usinada.

Ghani et al. (2002) usinou ferro fundido nodular com pastilha de cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) usando a geometria DNGA 150408 T01020 sem refrigeração. As velocidades de corte utilizadas estão na faixa de 364 – 685m/min. Após pequenos intervalos de tempo interrompia-se o teste. Quando o desgaste da pastilha era maior que 0,3 mm descartava-se a aresta de corte e reaplicava o teste. Em todas as condições testadas percebeu-se que a vida da ferramenta foi muito curta. A melhor condição de corte foi para velocidade de corte de 364 m/min. A vida da ferramenta foi de 1,5 min. Para avanço de 0,22 mm/volta e velocidade de corte de 500 m/min a vida da ferramenta foi menor que 1 min. Concluiu-se então que a pastilha de cerâmica mista ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$) não apresenta uma boa performance para usinagem em altas velocidades de corte devido ao fim de vida precoce da ferramenta.

2.6 – Mecanismos de Formação do Cavaco

Sobre o processo de formação de cavaco na usinagem de ferro fundido nodular têm-se algumas particularidades. Em contrapartida a usinagem do aço, ocorrem menores solicitações mecânicas e, respectivamente, menores solicitações térmicas. Porém, estas solicitações são distribuídas em uma pequena zona e oscila com a frequência da segmentação dos cavacos Klocke & Klöpper (2006). A Figura 2.1 apresenta algumas características típicas da formação de cavaco na usinagem do aço e ferro fundido.

O maior consumo de energia na usinagem ocorre nas regiões de deformação. Por isso, os problemas práticos e econômicos relativos ao processo, como taxa de remoção, formação de aresta postiça, desgaste da ferramenta de corte, acabamento superficial, quebra do cavaco, vibrações, comportamento da força de usinagem e temperaturas são diretamente relacionadas com a formação do cavaco. A busca de soluções para esses problemas requer a compreensão do comportamento de fratura do material quando sujeito a elevada quantidade de deformação plástica, da forma como este volume deformado transforma-se em cavaco e, por sua vez, movimenta-se sobre a face da ferramenta de corte, (1991).

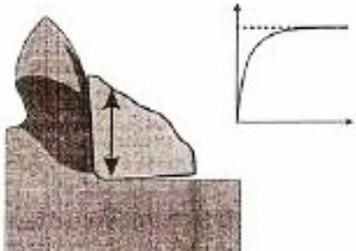
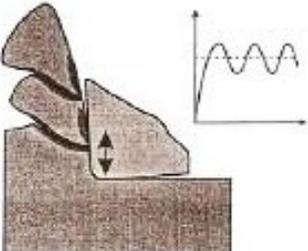
FORMAÇÃO DE CAVACO CONTÍNUOS	FORMAÇÃO DE CAVACOS NÃO-CONTÍNUOS
<p>Típico para materiais dúcteis (aço)</p> <ul style="list-style-type: none"> - Processo de cisalhamento contínuo - Solicitação térmica e mecânica uniforme - Transmissão de força através da zona de cisalhamento e distribuição sobre toda a zona de contato do cavaco 	<p>Típico para ferros fundidos com grafita nodular</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compressões descontínuas e processo de formação de trincas (grafita: defeito interno). - Reduzido, mas com solicitação mecânica oscilante - Pouca transmissão de força através da zona de cisalhamento e, portanto, zona de contato do cavaco pequena
	

Figura 2.1: Comparação da formação de cavacos entre aços e ferro fundidos (Klocke & Klöpper, 2006).

A visualização do processo de formação do cavaco pode ser feita com o auxílio do recurso da filmagem em câmera lenta. Este processo tem um custo relativamente elevado e só permite a visualização das condições de deformação na região externa do cavaco, Trent (1991). Lucas et al. (2005) analisou a formação do cavaco a partir de observações e análises de fotografias das raízes de cavaco obtidas pela interrupção súbita do processo de torneamento do ferro fundido nodular ferrítico, Figura 2.2.

Segundo Lucas et al. (2005), em condições normais de trabalho, a formação do cavaco é um fenômeno periódico onde cada porção de material removido, tem-se alternadamente uma etapa de recalque e uma etapa de deslizamento.

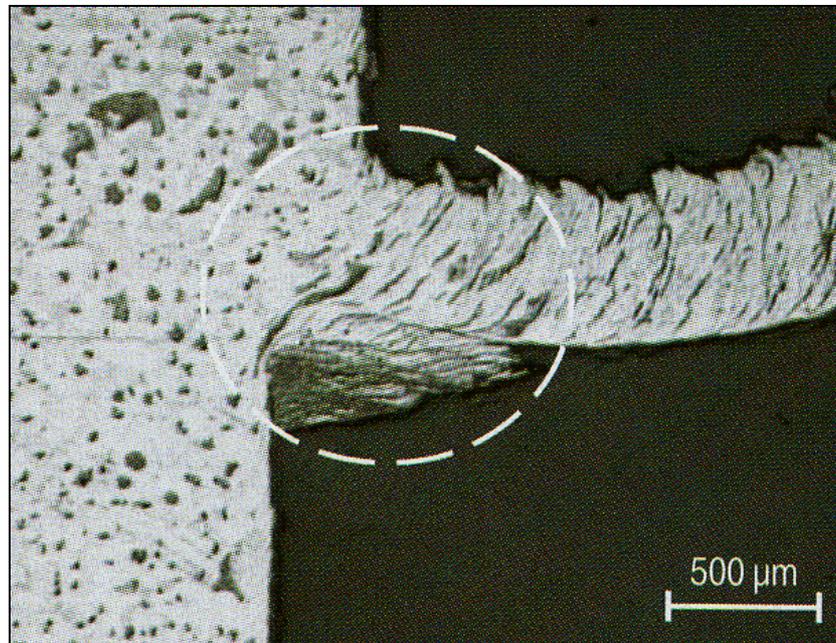


Figura 2.2: Seção da raiz do cavaco do ferro fundido nodular ferrítico (Lucas et al., 2005).

O material utilizado para teste por Lucas et al. (2005) foi o ferro fundido nodular ferrítico, classificado pela norma DIN 1663 como GGG42. Para velocidades de corte menores que 40 m/min percebeu-se que o mecanismo de deformação plástica dominante na interface resulta do movimento de discordâncias e subsequente encruamento. A primeira camada de material que se adere à face da ferramenta é encruada e sua tensão de escoamento elevada. Como a tensão de cisalhamento não é suficiente para romper a ligação com a ferramenta de corte, a deformação prossegue no metal localizado próximo à aresta de corte da ferramenta, até se tornar extremamente encruado. Através do processo cíclico de deposição de camadas

encruadas de material sobre a face da ferramenta, forma-se a aresta postiça de corte conforme Figura 2.2.

Para velocidades de corte de 80 m/min não se percebe mais aresta postiça de corte na interface cavaco-ferramenta, dando lugar à formação de uma zona de fluxo. A zona de fluxo é uma instabilidade termoplástica e o comportamento do material dentro desta zona é uma das principais características da deformação do material a elevadas velocidades de corte.

A Figura 2.2, evidencia a ocorrência de uma grande quantidade de deformação plástica. As grafitas apresentam fortemente alongadas, com orientação paralela à região primária de deformação.

Capítulo 3

FUNDAMENTOS DA USINAGEM

3.1- Materiais para Ferramentas de Corte

O processo de usinagem utiliza como ferramenta um material mais duro que o da peça. É o processo mais comum entre os processos de fabricação existentes. O surgimento de novos materiais e ligas estruturais com excelentes propriedades de resistência mecânica e elevada dureza contribuiu para o aparecimento de materiais de ferramentas mais resistentes para as operações de usinagem permitindo trabalhar com velocidades de corte sempre maiores. Como dureza e tenacidade são duas propriedades antagônicas, pode-se encontrar hoje no mercado alguns materiais para ferramentas como diamante, CBN, cerâmica, cermet, metal duro e aço rápido conforme mostrado na Figura 3.1, com invejáveis características de tenacidade e dureza. Isto foi conseguido graças à produção de ferramentas com diferentes composições químicas, tamanho de grãos finos e total controle do processo de fabricação e tratamento térmico, o que lhes confere um grau de dureza e qualidade excepcional.

O constante surgimento de novas ligas, com propriedades mecânicas e dureza cada vez maior, cria uma demanda contínua por novos materiais de ferramenta, com propriedades à altura dessas ligas.

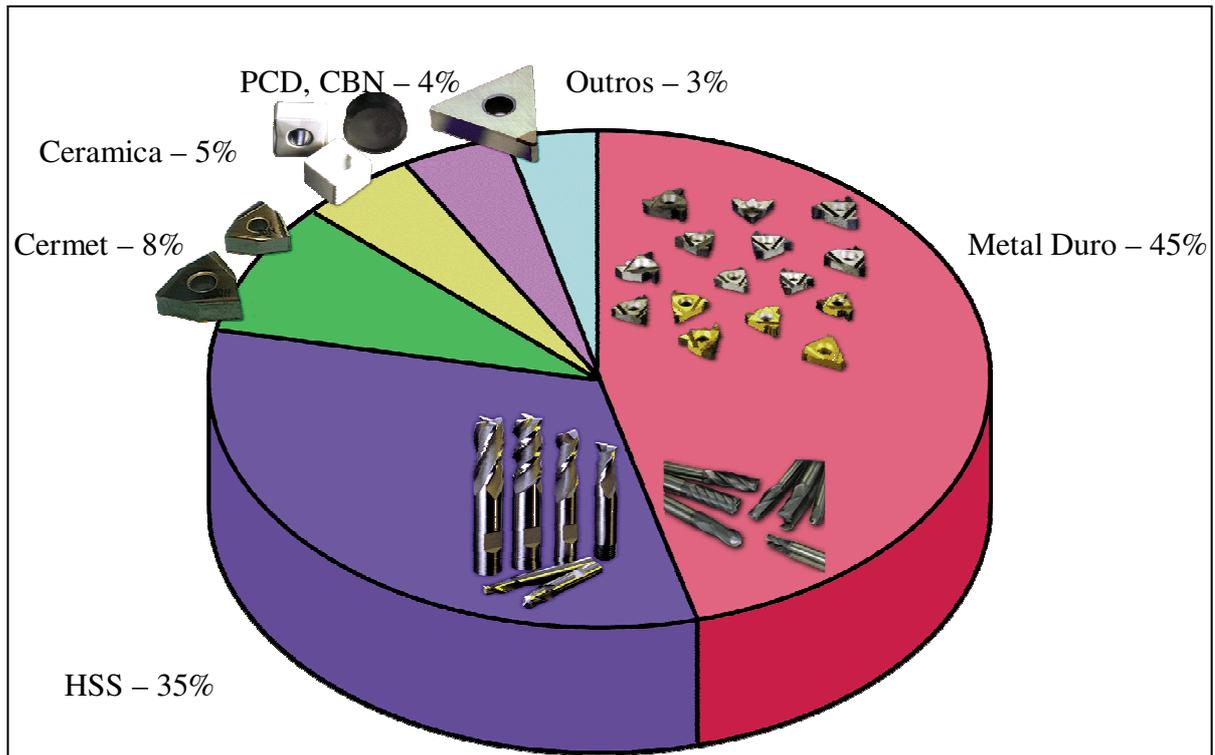


Figura 3.1 – Materiais empregados para ferramentas de corte (Iscar Ltd., 2001).

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

Para resistir à ação dos agentes causadores de desgaste, é necessário obter certas qualidades para a ferramenta de corte, dentre as quais se destacam a resistência às tensões compressivas sob elevada temperatura, tenacidade, estabilidade química e térmica. Atualmente, a busca por ferramentas com maior dureza e maior resistência ao desgaste está ligada à necessidade de velocidades de corte cada vez maiores para atender o aumento de produtividade, Abele & Dörr (2002).

A Figura 3.2 mostra a dureza média dos principais materiais utilizados hoje para ferramentas de usinagem. O diamante é o material mais duro utilizado, mas não se aplica aos materiais ferrosos. Sua composição a base de carbono reage com o ferro. Atualmente o metal duro é o material mais utilizado pelas ferramentas de corte conforme apresentado na Figura 3.1 e sua participação esta aumentando cada vez mais devido aos novos desenvolvimentos em nanotecnologia e os vários tipos de cobertura presentes no mercado. O aço rápido já foi o

material mais utilizado para ferramentas, mas é muito limitado pela baixa velocidade de corte. Atualmente o aço rápido vem sendo substituído pelo metal duro com sucesso e seu uso tende a cair ainda mais.

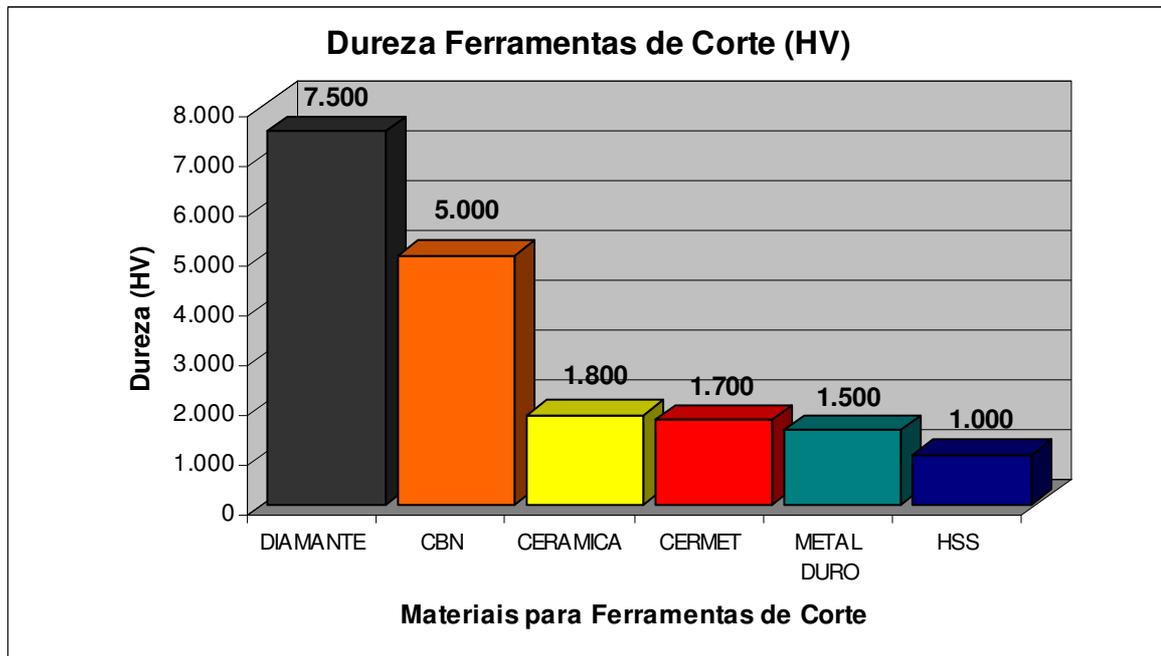


Figura 3.2 – Dureza dos materiais para ferramentas de corte (Trent, 1991).

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

Segundo Diniz et al. (2006) e Stemmer (1989), as principais propriedades que um material de ferramenta deve apresentar são:

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

Estas propriedades não estão listadas em ordem de importância, até porque as qualidades necessárias à ferramenta podem variar bastante com a operação de usinagem, com

o material a ser usinado e com os parâmetros de corte. Porém, de um modo geral, pode-se dizer que as mais importantes são a dureza e a tenacidade.

O processo de seleção da ferramenta deve-se considerar os seguintes fatores:

- a) Substrato: É o principal componente estrutural da ferramenta.
- b) Cobertura: Pode ser aplicada uma única camada ou multicamadas. Apresentam as seguintes características: fornecem resistência ao desgaste, lubrificidade, isolamento térmico e resistência ao ataque químico pelo material usinado em temperaturas elevadas.
- c) Geometria da ferramenta: forma da pastilha (quadrada, triangular, etc), ângulos (folga, saída, posição, etc).
- d) Condição da aresta de corte: aresta de corte “viva”, chanfrada ou arredondada (“honning”).

Atualmente tem-se disponível no mercado uma grande quantidade de materiais para ferramentas de corte: Com base nas características químicas, os principais materiais podem ser agrupados da seguinte maneira: aço rápido, aço rápido com cobertura, metal duro, metal duro com cobertura, cerâmica, nitreto cúbico de boro (CBN) e diamante (PCD), Diniz et al. (2006).

3.1.1 – Aço rápido

Desenvolvido por Taylor, no final do século XIX, o aço rápido foi o responsável pelo primeiro grande salto tecnológico na história da usinagem. Os aços rápidos (HSS) levaram esse nome devido ao fato de proporcionarem elevação das velocidades de corte nas operações de usinagem, que antes eram executadas por ferramentas em aço carbono e aço liga. Atualmente os aços rápidos são utilizados principalmente em brocas, fresas de topo, cossinetes para roscas, brochas, etc., já que o aparecimento de novos materiais para ferramentas permitiu a utilização de velocidades de cortes não suportadas pelos aços rápidos.

O aço rápido é um aço de alta liga com microestrutura martensítica com inclusões de carbonetos. Os principais elementos de liga dos aços rápidos e os efeitos resultantes de suas aplicações são mostrados na Tabela 3.1.

Tabela 3.1 – Principais elementos de liga dos aços rápidos (Chiaverini, 1990).

ELEMENTO	COMP. MEDIA (%)	EFEITO
Carbono	0,7 – 1,6	Aumenta a dureza
Tungstênio	18 – 20	Aumenta a resistência ao desgaste; formador de carbonetos.
Molibdênio	3 – 9,5	Aumenta a resistência ao desgaste; formador de carbonetos.
Vanádio	1 – 5	Aumenta a dureza a quente; formador de carbonetos
Nióbio	1 – 5	Aumenta a dureza a quente: formador de carbonetos
Cromo	4 – 4,5	Diminui a oxidação; garante temperabilidade
Cobalto	4 – 12	Aumenta a dureza a quente; evita crescimento de grão.

É importante ressaltar que o molibdênio confere aos aços rápidos as mesmas propriedades conseguidas com o tungstênio, porém, por possuir menor peso atômico, assegura maior tenacidade, a um custo inferior.

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

Segundo Machado (1988) os aços rápidos sinterizados são fabricados pelo processo de metalurgia do pó, que tem a vantagem de possibilitar partículas de carbonetos muito menores e mais dispersas na matriz, além de facultar a incorporação de um número maior de elementos de liga (carbonetos) que o processo de fabricação convencional.

3.1.2 – Metal duro

O metal duro é material para ferramenta feito pela técnica da metalurgia do pó onde são aglomerados partículas duras de carbonetos de materiais refratários em pó como tungstênio, titânio, tântalo e nióbio. Embora os vários grãos de carbeto sejam solúveis um no outro e possam formar um carbeto por eles mesmos, as ferramentas de corte precisam de um metal ligante para fortalecer o material que segura os grãos juntos no corte e evitam a fratura. Tradicionalmente esse elemento é o cobalto. Koelsch (2000) cita o níquel como um outro elemento que pode ser utilizado como ligante conferindo ao metal duro melhores propriedades para cortes a temperaturas mais elevadas principalmente na usinagem sem fluído de corte.

O metal duro é atualmente o principal material para ferramenta de corte, Figura 3.1. Segundo Koelsch (2000), a ascendência do metal duro predominou nos últimos dez anos devido a evolução das classes que podem suportar o calor e a abrasão do corte a altas temperaturas e a usinagem de materiais difíceis de usinar. As ferramentas de corte tornaram-se mais robustas e precisas. Isto foi conseguido principalmente através de quatro avanços tecnológicos: diminuição do tamanho de grão, melhores ligantes, gradientes de concentração de cobalto e a grande evolução dos tipos de revestimento. Estes avanços melhoraram a resistência ao desgaste, a tenacidade e a dureza a quente.

A combinação das propriedades (tamanho de grão, proporção da liga) dos carbonetos estabelece as condições finais da pastilha de metal duro, definindo sua característica e aplicabilidade. Essas propriedades são trabalhadas durante o processo de produção da pastilha e devem ser variadas para que se possa obter o balanço desejado entre dureza e tenacidade.

Segundo Koelsch (2000), historicamente o tamanho das partículas tem variado entre 1 e 10 μm , mas os fabricantes estão encolhendo ainda mais esta dimensão até abaixo do metal duro em microgrão onde as partículas possuem tamanho na ordem de 1 μm . A redução do tamanho do grão torna o metal duro mais denso melhorando a tenacidade à fratura. Sendo assim, estes materiais apresentam maior resistência da aresta de corte. As pastilhas feitas destes materiais podem ter uma geometria altamente positiva sem que ocorra o lascamento da ferramenta. A Iscar Ltd. em seu Instituto de Tecnologia Technion (Haifa, Israel) está concluído experiências com carbeto de cromo (Cr_3C_2) e carbeto de Vanádio (VC) para inibir o

crescimento dos grãos de tamanho de nanômetros e criar uma nova família de ferramentas com nanogrãos.

Para melhorar a tenacidade superficial sem sacrificar a resistência à deformação em outras áreas, os fabricantes de ferramentas de metal duro criaram gradientes de concentração de cobalto. Ajustando a concentração de cobalto na superfície pode-se criar pastilhas tenazes no núcleo e duras na superfície ou duras no núcleo e tenazes na superfície.

3.1.2.1 - Classificação do metal duro

Os metais duros, com ou sem revestimento, são materiais de ferramentas utilizados na usinagem fabricados em várias classes, que foram desenvolvidas para cobrir a ampla faixa de necessidade operacional existente e são regulamentadas pela norma ISO. A norma ISO 513 /2004 classifica os metais duros em 6 grupos, designados pelas letras P, M, K, N, S e H, também designado por um código de cores (respectivamente, azul, amarelo, vermelho, verde, laranja e cinza). A classificação dentro de um grupo ou outro é feita de acordo com a aplicação do metal duro, uma vez que a variedade de composições químicas e processos de fabricação torna difícil a padronização baseada em outras características. Dentro de cada grupo, ainda há uma classificação usando números. A exigência de usinagem para qualquer uma das classes inicia-se no grupo 1 e representa acabamento para torneamento e furação com alta velocidade de corte, baixo avanço e pequena profundidade de corte. À medida que cresce, chegando até os valores de 50 ou 40, representa o grupo de desbaste, sem acabamento, com baixas velocidades de corte, grandes profundidades de corte e altas cargas de cavacos. As exigências para resistência ao desgaste e a tenacidade variam de acordo com o tipo de operação e são grandezas inversas, ou seja, crescem e decrescem, respectivamente, à medida que se muda de grupo. Segue as classes de metal duro com suas principais aplicações:

P: P1 – P50 - Representa a usinagem de materiais ferrosos que produzem cavacos longos, tais como aços fundidos, aços e ferros maleáveis. Possui, em sua composição, elementos como, WC, Co, TiC, TaC e NbC.

M: M01 – M40 - Representa a usinagem de materiais de maiores exigências, tais como aços inoxidáveis austeníticos, materiais resistentes ao calor, aço manganês, ferro fundido ligado, etc. Sua composição é semelhante à classe P.

K: K01 – K40 - Representa a usinagem de materiais ferrosos que produzem cabaços curtos, tais como ferro fundido e aço endurecido. Sua composição é definida somente por WC + Co.

N: N01 – N30 - Representa a usinagem de materiais não ferrosos, tais como alumínio, bronze e latão.

S: S01- S30 - Representa a usinagem de superligas ou ligas resistentes ao calor tais como titânio, inconel, etc.

H: H01 – H30 - Representa a usinagem de materiais endurecidos tais como aço temperado e ferro fundido coquilhado.

3.1.2.2- Processos de revestimento

O objetivo do emprego de revestimentos nas ferramentas de corte é, em primeiro lugar, aumentar a dureza comparativamente à dureza do substrato e, portanto possibilitar uma redução do desgaste abrasivo. Os objetivos adicionais com referência ao substrato são a redução da tendência de aderência, o que resulta em redução do desgaste por aderência e do coeficiente de atrito e, conseqüentemente, em forças e temperaturas de corte mais baixas.

Os revestimentos para ferramentas de corte de metais podem ser realizados pelo processo de Deposição Química a Vapor (CVD, *Chemical Vapour Deposition*) e pelo processo de Deposição Física a Vapor (PVD, *Physical Vapour Deposition*). A Tabela 3.2 mostra as características de cada processo.

Tabela 3.2 – Características dos revestimentos CVD e PVD (Abele & Dörr, 2002).

PROCESSO	CVD – Deposição química de vapor	PVD – Deposição física de vapor
TEMPERATURA	800° - 1100° C	200° - 500° C
COBERTURA	Carbonetos, Nitretos e óxidos	TiN, TiCN e TiAlN
ESPESSURA TOTAL	2 – 20 µm	2 – 7 µm
CARACTERÍSTICAS	Cobertura total	Cobertura orientada
PROPRIEDADES	<ul style="list-style-type: none"> • Maior número de combinações possíveis. • Boa aderência da cobertura 	<ul style="list-style-type: none"> • Aresta de corte viva • Menos tensões entre substrato e cobertura

No processo CVD, ocorre a deposição devido á reação química entre gases, que podem variar conforme o revestimento a aplicar. Para o TiC, usa-se H₂, TiCl e metano. As pastilha são aquecidas a uma temperatura próxima de 1000 °C. Para revestimento com óxido

de alumínio usa-se o cloreto de alumínio e nitrogênio. O processo CVD é bem adaptado e está bem desenvolvido, principalmente para permitir a execução de vários tipos de revestimento usando o mesmo equipamento. O revestimento é feito de forma uniforme e homogênea e a adesão entre o revestimento e o substrato é excelente devido à forte difusão entre o revestimento e o substrato. Entretanto, as desvantagens são a escolha restrita dos materiais de revestimento, produtos de reação ecologicamente suspeitos e a alta temperatura do processo de revestimento de até 1100 °C. Estas altas temperaturas excluem as ferramentas de aço rápido de serem revestidas e pode causar fragilidade mesmo nos casos de substrato de metal duro. Adicionalmente, são geradas tensões internas nominais termicamente induzidas, que podem causar trincas. Isto é superado pelos processos CVD de baixa temperatura apoiados por plasma, os quais podem usar temperaturas de revestimento entre 400 e 600 °C, mas que, por outro lado, não produzem a aderência e qualidade equivalentes do revestimento, Abele e Dörr (2002).

Características do processo CVD:

- Temperatura do processo em torno de 1000 °C;
- Alta adesão ao substrato;
- Alta resistência ao desgaste;
- Induz tensões residuais de tração e trincas (efeitos indesejáveis).

No processo PVD, que é utilizado para revestimento de aços rápidos e metal duro, a temperatura obtida é em torno de 500 °C. O material para revestimento é movido para o substrato do metal a revestir, através de vaporização. Como exemplo, o Ti ionizado com uma barra elétrica ajustada como uma fonte de energia para formar um plasma de vapor juntamente com o nitrogênio.

Ferramentas cobertas pelo processo PVD permitem ter uma aresta de corte mais afiada. Tanto revestimento com camada única quanto de multicamadas são utilizados atualmente, com espessuras que variam de 3 a 7 µm. Como os revestimentos de PVD são utilizados em temperaturas mais baixas (200° a 500°C), o substrato é mais bem protegido contra difusões térmicas ou mecânicas. Entretanto, as desvantagens do processo são uma formação ruim do revestimento nas cavidades e rebaixos, como também o custo elevado do equipamento, Abele e Dörr (2002)

Características do processo PVD:

- Temperatura do processo em torno de 500 °C;

- Incapaz de revestir geometrias complexas;
- Induz tensões residuais de compressão.

Segundo Schulz et al. (2000), os revestimentos também podem ser usados com lubrificante sólido reduzindo o atrito, possibilitando usinagem a seco ou, pelo menos, a usinagem com mínima quantidade de lubrificante (MQL). As camadas lubrificantes possuem como base uma camada de material duro, sobre a qual é depositada uma camada de material macio (por exemplo, dissulfeto de molibdênio, MoS_2) ou uma segunda camada de material duro com propriedades lubrificantes (TiN).

Segundo Mason (2003), revestimentos mais espessos proporcionam resistência ao desgaste, mas há um limite prático para a espessura, devido à tensão, o que faz com que eles percam aderência e descasquem. As máximas espessuras ideais são de cerca de 15 μm para CVD e 6 μm para PVD. Nas aplicações de fresamento e torneamento com corte interrompido o revestimento pelo processo PVD é mais indicado devido a excelente resistência da aresta de corte e melhor tenacidade a fratura. Já para aplicações de torneamento favorecem os revestimentos feitos pelo processo CVD.

3.1.2.3- Metal duro revestido

O metal duro revestido surgiu no final dos anos 60. Foi aplicada numa pastilha de metal duro uma fina camada de carboneto de titânio. Essa fina camada proporcionou uma melhoria considerável no desempenho da pastilha, pois se percebeu maior aceitação de altas velocidades de corte, maior vida útil, maior tolerância às altas temperaturas e, conseqüentemente, maiores avanços.

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

A tecnologia de usinagem a seco dispensa totalmente a necessidade de refrigeração ou, pelo menos, usa-a em quantidade mínima. Contudo, deixam de ser executadas, dessa forma, as funções principais da refrigeração e lubrificação aplicadas no processo de usinagem: lubrificação, dissipação de calor e transporte de cavaco.

Segundo Schulz et al. (2000), as funções que deixam de ser executadas em decorrência da supressão de refrigeração e lubrificação durante a usinagem podem ser ao menos parcialmente substituídas, pela introdução de camadas sobre o substrato das ferramentas. A camada permite que ocorra a separação entre a ferramenta e o cavaco. O coeficiente de atrito que surge na interface recém-criada entre esse par de matérias é muito pequeno e atua no sentido de reduzir as forças decorrentes da fricção. Dessa forma, também se reduz a geração de calor na zona de contato.

Além disso, a camada de revestimento atua isolando termicamente o material de corte. O calor, que agora não é mais eliminado pelo fluido refrigerante, não pode penetrar indiscriminadamente no substrato. Dessa forma, é conveniente que a camada apresente dureza a quente mais alta. Uma melhor resistência ao desgaste a quente é um fator importante na usinagem a seco. Este requisito é satisfeito hoje por uma série de camadas de materiais de grande dureza. A escolha da camada ótima depende muito do material a ser usinado e do processo de usinagem.

Segundo Boehs et al., 2000, na usinagem de ferro fundido o desgaste das ferramentas aumenta abruptamente para desgastes de flanco acima de 0,20 mm. Este fato está associado à perda do revestimento na aresta de corte dessas ferramentas, que traz como consequência uma maior solitação térmica e maior abrasão sobre o substrato.

Segundo Abele & Dörr (2002) e Gey (2006) os seguintes revestimentos são aplicados aos insertos de metal duro:

- Carboneto de titânio (TiC);
- Nitreto de titânio (TiN);
- Óxido de alumínio (Al_2O_3);
- Carbonitreto de titânio (TiCN);
- Nitreto de titânio alumínio (TiAlN);
- Nitreto de cromo alumínio (AlCrN).

A Figura 3.3 apresenta a microdureza Vickers para as principais coberturas. Essa microdureza pode variar dependendo do processo da cobertura, Peyre & Winterholler (1994).

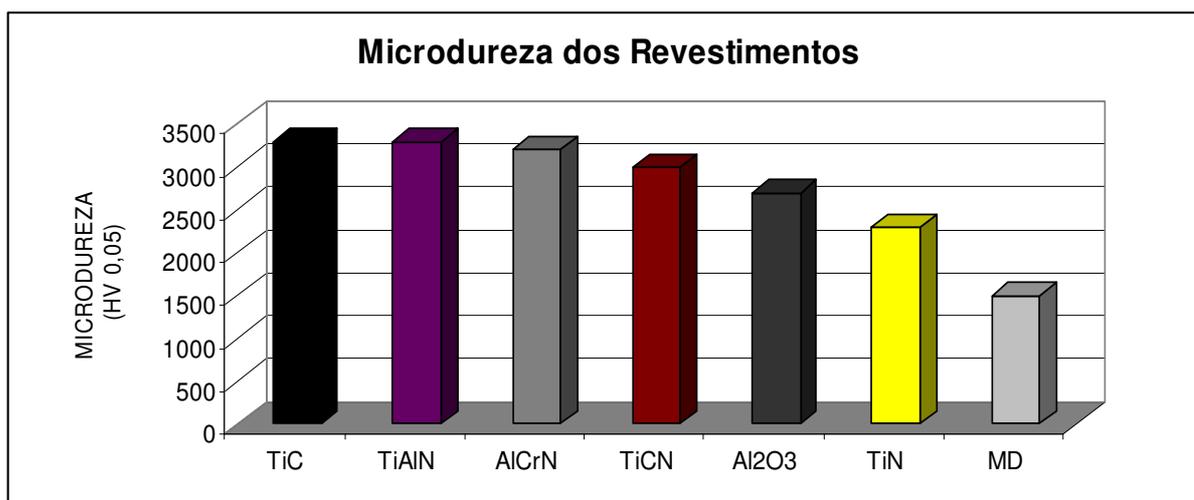


Figura 3.3 – Microdureza dos revestimentos. (Abele e Dörr, 2002; Balzers, 2007).

O TiC e Al₂O₃ possuem alta dureza, favorecem a resistência ao desgaste e são quimicamente inertes, formando uma proteção química contra os agentes ativado termicamente entre a ferramenta e o cavaco. Segundo Schulz et al. (2000), os revestimentos cerâmicos a base de alumínio geralmente são usados apenas em combinação com outros tipos de camadas.

O TiN não é um material tão duro, Figura 3.3, mas favorece a formação de um baixo coeficiente de atrito na face da pastilha, o que resulta em melhoria da resistência ao desgaste por crateras na usinagem de materiais ferrosos, além de possuir uma cor dourada, que propicia alto brilho e acabamento à pastilha permitindo fácil detecção do desgaste da pastilha.

O TiC possui ótimas propriedades de resistência ao ligamento e à deposição, além de boa resistência ao desgaste, podendo portanto ser aplicado próximo à face da pastilha e, em conjunto com uma outra camada de um segundo revestimento, próxima ao topo da superfície, favorece uma resistência adicional ao desgaste. Uma fina camada desse revestimento, embora favoreça o ligamento e a deposição, contém carbono e necessita, portanto, de um outro revestimento para que possa ser utilizada e suportar altas temperaturas, daí a necessidade de combiná-lo com o Al₂O₃.

A utilização de um revestimento TiAlN é vantajoso em usinagem a seco, pois, essa cobertura oferece uma boa resistência a temperaturas elevadas, Schulz et al. (2000). Segundo Gey (2006), a introdução do alumínio na estrutura TiN de superfície cúbico centradas melhorou a resistência a oxidação.

Gey (2006) afirma que outras melhorias na área da resistência á oxidação e propriedades de altas temperaturas podem ser atingidas com o acréscimo de pequenas quantidades de elementos químicos formadores de óxidos como o cromo (Cr), o ítrio (Y) e o silício (Si) ou pelo aumento do teor de alumínio (Al) nas camadas. Esses revestimentos são aplicados principalmente para altas velocidades de corte e para a usinagem de materiais temperados.

A busca por melhoria nas ferramentas e o total domínio das coberturas TiAlN onde melhorias só acontecem pontualmente levou ao desenvolvimento de novas gerações de revestimentos baseados no elementos Al-Cr-N. A grande vantagem desses sistemas e a otimização da resistência ao desgaste abrasivo, da dureza a altas temperaturas e da resistência a oxidação, em comparação com os revestimentos tradicionais de TiAlN. As realizações de testes abrangentes demonstram que, tanta a altas velocidades de corte quanto em condições convencionais, há uma melhoria efetiva da eficiência.

A excelente propriedade de dureza a temperaturas elevadas, assim como a alta resistência à oxidação do AlCrN, comprovam o aumento da eficiência em comparação com os revestimentos tradicionais. Mesmo a baixas velocidades de corte, não provoca fissuras no substrato da ferramenta. Essas fissuras podem causar rápidas quebras de arestas, como ocorre com revestimentos de TiAlN com elevados teores de Al. Para altas velocidades de corte a cobertura AlCrN apresenta excelentes propriedades termofísicas, além do bom comportamento ao desgaste abrasivo segundo Gey (2006).

Para que um revestimento realmente seja eficaz, é necessário a escolha certa do substrato para uma determinada aplicação. Materiais cerâmicos como carboneto de titânio (TiC), óxido de alumínio (Al_2O_3) e nitreto de titânio (TiN), proporcionam uma barreira ao desgaste e ao danos por transferência térmica. Cada um dele tem um desempenho melhor em uma função específica. A figura 3.4 mostra as propriedades dos principais coberturas utilizadas atualmente e suas principais características. Quanto mais espessas elas forem, mais eficaz será a barreira. Mas, há um limite prático para a espessura, devido à tensão, o que faz com que eles percam aderência e descasquem. As máximas espessuras ideais são de cerca de 20 μm para cobertura CVD e 6 μm para cobertura PVD, (Mason, 2003).

A Figura 3.4 apresenta graficamente as principais características para cada as coberturas mais utilizadas atualmente.

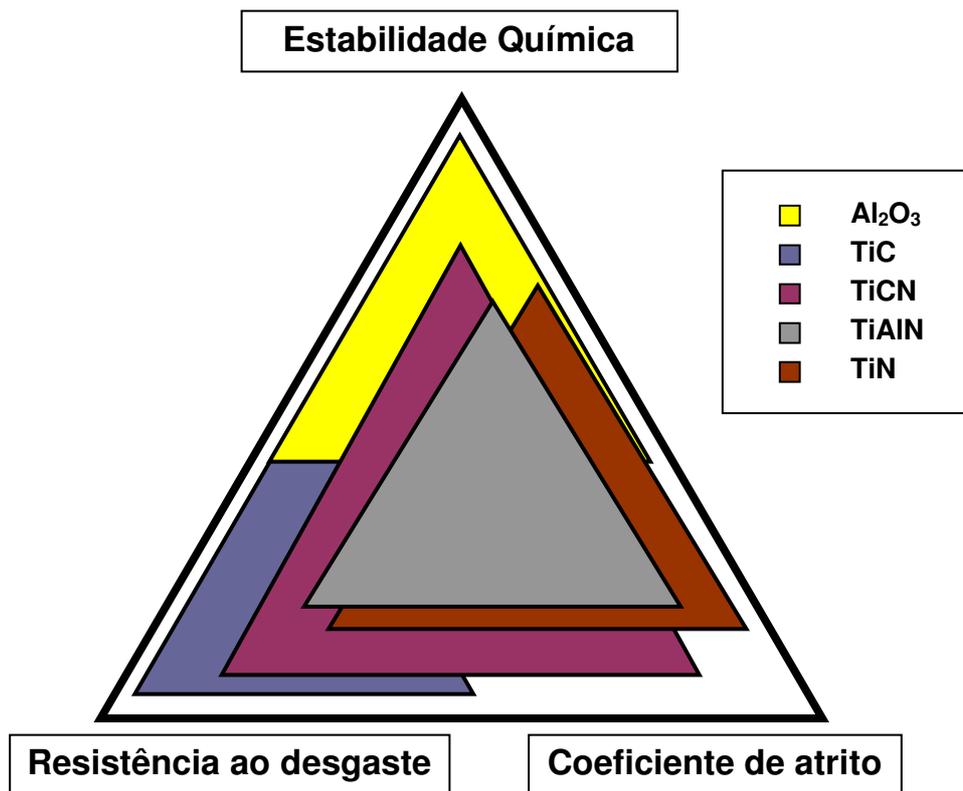


Figura 3.4 – Principais propriedades das coberturas (Iscar Ltd., 2001).

A análise da espessura do revestimento (que em geral varia de 2 a 12 μm no total) permite concluir que para espessuras superiores a essas, produzem um efeito negativo na pastilha. Já camadas muito finas, apesar do substancial aumento da dureza e tenacidade, favorecem a fragilidade e o lascamento. Deve-se, portanto, executar o revestimento para que se obtenham um balanço adequado entre dureza e tenacidade nas propriedades da ferramenta de corte.

3.2 – Tipos de Desgaste das Ferramentas

O estudo dos principais mecanismos de desgaste das ferramentas de corte torna-se necessário para se adequar os parâmetros do processo e reduzir os problemas de parada de máquina para troca da ferramenta. A otimização dos parâmetros de corte melhora a produtividade e previsibilidade do sistema adequando o processo para uso de modelos automatizados.

Segundo Trent (1991), o entendimento da interação entre a ferramenta e o cavaco explica todos os tipos de desgastes normalmente encontrados nas ferramentas de corte. Comete-se um erro ao se considerar que a interação entre o cavaco e a ferramenta de corte durante um processo de usinagem é uma situação totalmente de atrito clássico de Coulomb, no qual forças de fricção tendem a impedir o movimento do cavaco pela superfície de saída da ferramenta. Neste caso, a força normal que age sobre a superfície de saída da ferramenta dividida pela área de contato é muito baixa, comparada com a tensão de escoamento dos materiais em contato. Essa abordagem não pode ser aplicada no caso de usinagem dos metais. Na interface cavaco ferramenta são gerados tensões compressivas elevadas, na ordem de 775 MPa, o que produz uma situação em que duas superfícies estão intimamente ligadas e a área de contato torna-se independente da força normal, (Melo et al., 2005).

Os principais tipos de desgaste e avarias nas ferramentas de corte são:

- Desgaste de cratera;
- Desgaste de flanco;
- Desgaste de entalhe;
- Deformação plástica da aresta de corte;
- Lascamento;
- Trincas – origem térmica ou mecânica
- Quebra.

A norma ISO 3685 de 1993 quantifica os desgastes das ferramentas de corte. A Figura 3.5 mostra os desgastes que devem ser medidos numa ferramenta. Na superfície de saída medem-se os desgastes: profundidade de cratera (KT), largura da cratera (KB) e distância do centro da cratera à aresta de corte (KM). Na superfície de folga mede-se a largura do desgaste de flanco (V_B) que é um valor médio do desgaste na superfície de folga e a largura máxima do desgaste de flanco (V_{Bmax}). Mede-se ainda o valor dos desgastes gerados na superfície de folga pelos entalhes (V_{BN} e V_{BC}).

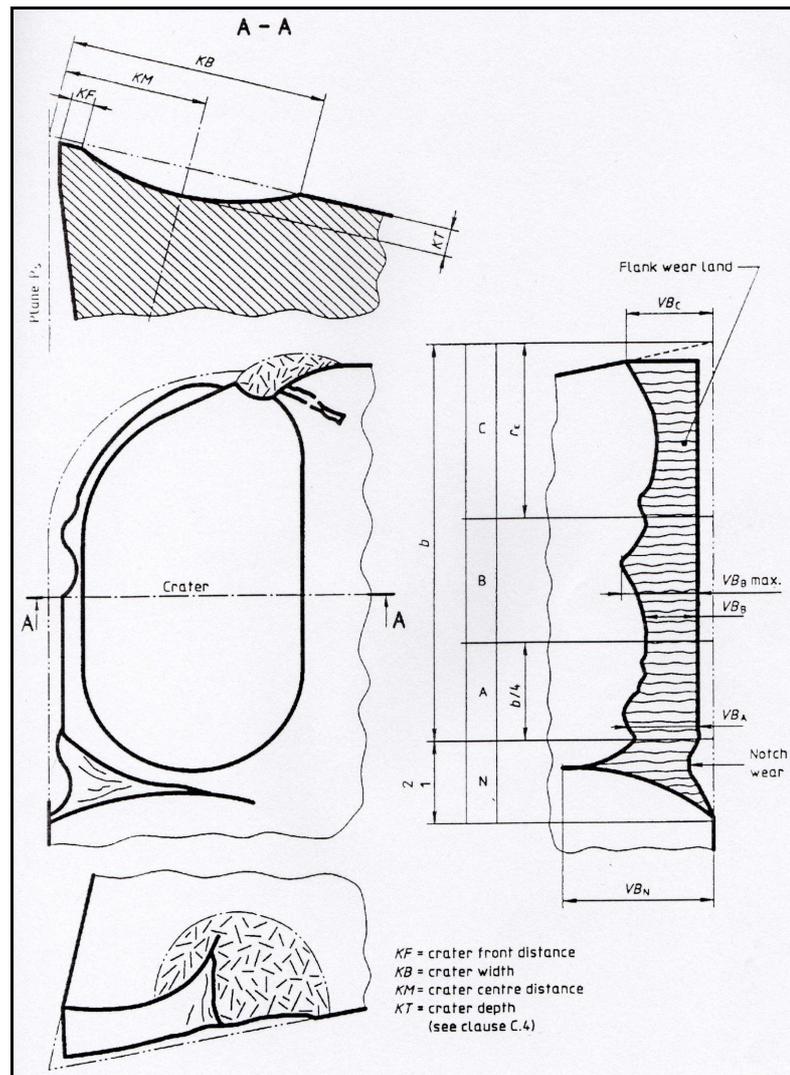


Figura 3.5 – Alguns tipos de desgaste em ferramentas de usinagem (Norma ISO 3585, 1977).

Desde 1907, sabe-se que a temperatura de usinagem tem influência crítica no desgaste e na vida de ferramentas de corte. Em particular, a taxa de formação de crateras é altamente dependente da temperatura na interface cavaco-ferramenta. A evolução do desgaste de cratera é governada pela distribuição de temperatura ao longo da interface. Além disso, a temperatura de usinagem tem influência sobre as forças de corte e, conseqüentemente, sobre a potência consumida durante a operação (Azevedo et al., 2003).

3.3 – Mecanismos Causadores de Desgaste e Avaria em Ferramentas de Metal Duro

3.3.1 – Deformação Plástica

Segundo Melo et al. (2005) e Diniz et al. (2006), este mecanismo acontece geralmente durante a usinagem de materiais de elevada dureza. É causado pela combinação de altas tensões de compressão com altas temperaturas na aresta de corte da ferramenta. Esta combinação causa deformação plástica e promove o colapso da ferramenta, Figura 3.6. Ocorre mais frequentemente em avanços e velocidades de corte elevadas e afeta mais ferramentas de aço rápido do que as de metal duro. No caso do metal duro, a redução do teor de cobalto leva a um aumento da resistência à deformação.

Segundo Melo et al. (2005), algumas vezes a deformação plástica acontece na camada de revestimento na superfície de saída da ferramenta de corte. Se o revestimento na superfície de saída apresentar rugoso é uma evidência da ocorrência da deformação plástica.

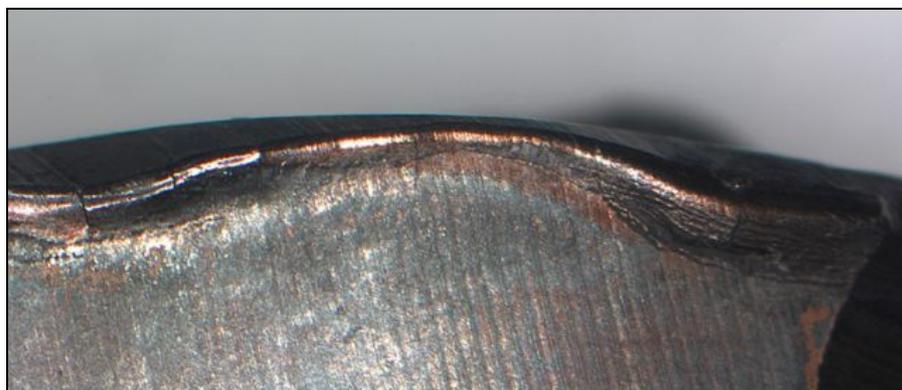


Figura 3.6 – Deformação plástica da aresta de corte (Iscar Ltd., 2001).

3.3.2 – Difusão

Segundo Melo et al. (2005) e Diniz et al. (2006), 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) e do tempo de contato. Em usinagem, as velocidades relativas entre ferramenta-peça ou

ferramenta-cavaco são altas e o tempo de contato entre esses materiais é muito pequeno. Isso praticamente levaria o mecanismo de difusão a ser desprezível, se não fosse a existência de uma zona de aderência na interface cavaco-ferramenta. A saturação dessa zona de aderência poderá funcionar como uma barreira à difusão. Entretanto, essa zona não é estável e se renova periodicamente, garantindo assim, o fluxo difusivo. Esse 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.



Figura 3.7 – Craterização (Iscar Ltd., 2001).

Segundo Diniz et al. (2006), a difusão é responsável principalmente pelo desgaste de cratera em altas velocidades de corte (Figura 3.7). As maiores temperaturas na usinagem estão presentes na superfície de saída na região onde ocorre o contato cavaco-ferramenta.

Segundo Azevedo (2003) o início do desgaste de cratera ao longo da superfície de saída da ferramenta é fortemente dependente da magnitude da temperatura máxima ali ocorrida. O desenvolvimento da cratera também está relacionado com a forma de distribuição de temperatura ao longo da interface cavaco-ferramenta.

Melo et al. (2005) cita os principais fatores que interferem para que aconteça difusão entre o par cavaco-ferramenta:

- Velocidade de corte e avanço: Quanto maior forem, maior será o calor gerado na interface, conseqüentemente maior é a temperatura nesta região. O aumento da temperatura provoca um aumento exponencial nas taxas de difusão.
- Composição da ferramenta de corte: As ferramentas de metal duro constituídas apenas de WC-Co são menos resistentes ao desgaste por difusão do que as

ferramentas compostas por WC+TiC+TaC-Co. Segundo Diniz et al. (2006), os carbonetos complexos de ferro e titânio são muito mais resistentes que o de ferro-tungstênio e por isso evita a craterização da ferramenta.

- Camadas interfaciais: A penetração de oxigênio na região próxima à área de contato cavaco-ferramenta pode reduzir bastante o desgaste difusivo, por promover a produção de camadas de óxidos.
- Padrão do fluxo de cavaco: O padrão do fluxo diz respeito ao modo pelo qual o material do cavaco flui sobre a superfície de saída da ferramenta de corte. A saturação da zona de aderência pode funcionar como uma barreira à difusão. A taxa de desgaste é aumentada quando se tem uma situação em que um rápido fluxo de metal próximo à superfície da ferramenta varre para fora da zona de fluxo os átomos difundidos.

3.3.3 – Adesão

Este mecanismo de desgaste surge principalmente quando a velocidade de corte e avanço são relativamente baixos, de tal modo que a temperatura não é alta o suficiente para provocar difusão ou deformação plástica na ferramenta de corte, (Melo et al., 2005).

Isto não significa que este mecanismo não está presente quando se usina em condições mais severas. Quando o fluxo de material sobre a superfície de saída ou de folga da ferramenta é menos laminar e mais intermitente provoca o arrancamento de grãos, fragmentos destes ou grupos de grãos da ferramenta de corte.

Quando se trabalha a baixas velocidades de corte ocorre irregularidade no fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta, favorecendo a formação e aparecimento da aresta postiça de corte (APC) (Figura 3.8). Se a APC for instável, ocorrem descontinuidades no contato cavaco/ferramenta. Sob essas condições, fragmentos microscópicos são arrancados da superfície da ferramenta e arrastados junto ao fluxo de material adjacente à interface, removendo pequenos fragmentos de partículas das ferramentas, devido à existência de tensões de tração que são impostas pelas irregularidades do fluxo. É comum o aparecimento desse tipo de desgaste em máquinas de baixa rigidez, durante a usinagem de peças delgadas, pois favorecem a ocorrência de vibração, cujo efeito também promove

irregularidades de fluxo de material (Trent, 1991). Quando comparado com metal duro, o HSS é mais resistente à ação desse tipo de desgaste.

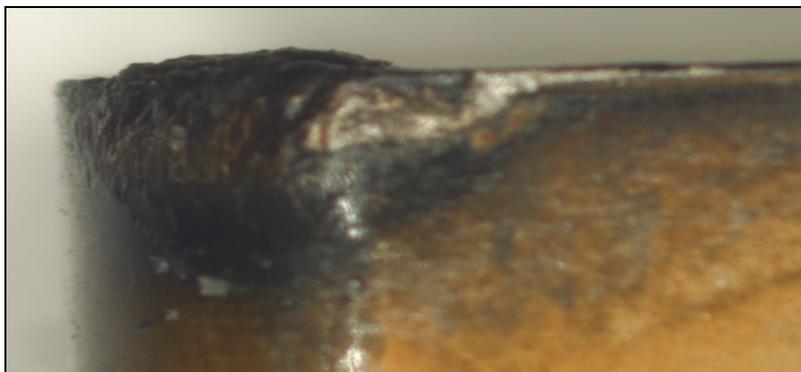


Figura 3.8 – Aresta postiça de corte (Iscar Ltd., 2001).

Quando a aresta postiça de corte está fortemente ligada à ferramenta e é completamente quebrada, fragmentos relativamente grandes da aresta de corte da ferramenta podem ser arrancados por adesão. Este fato é principalmente importante na usinagem do ferro fundido nodular, em que a aresta postiça de corte persiste sobre a superfície da ferramenta de corte em velocidades e avanços relativamente altos, Melo et al. (2005) citando Trent e Wright (2000).

Numa situação de desgaste por adesão, os grãos ou fragmentos de carbetos são quebrados e/ou arrancados devido às tensões de tração imposta pelo fluxo irregular de metal. As superfícies desgastadas por adesão são rugosas, diferente das desgastadas por difusão, nas quais o processo ocorre em âmbito atômico.

Os principais parâmetros que influenciam o desgaste por adesão segundo Melo et al. (2005), citando Trent são:

- Condições de corte: Qualquer variável que torne irregular o fluxo de material em torno da aresta de corte favorece o mecanismo de desgaste por adesão. O fluxo irregular pode ser causado por interrupção do corte, profundidade de corte irregular, vibração, falta de rigidez, baixos valores de velocidade de corte e avanço, etc.
- Composição da ferramenta: Ferramentas de metal duro WC-Co são recomendadas devido à mais alta resistência dos grãos de WC e a mais alta resistência de suas ligações com o cobalto.

- Tamanho dos grãos de carbetos: Fortemente influenciada pela granulometria do metal duro. À medida que a granulometria aumenta maior o desgaste devido ao mecanismo por adesão.

Trent (1991) chama este mecanismo de “attrition” e aborda-o de uma forma diferente. O material da peça aderido à superfície de saída ao se desprender provoca a remoção de fragmentos microscópicos da ferramenta acelerando seu desgaste. Através deste fenômeno, as partículas da ferramenta que são removidas pela continuidade do movimento de escorregamento entre as duas superfícies, segue aderidas ao fluxo do cavaco ou peça. Como elas são bastante duras, ao atritarem com regiões da ferramenta mais a frente, desgastam-nas por abrasão.

3.3.4 – Abrasão

Esse tipo de mecanismo de desgaste envolve a perda de material por microsulcamento ou microlascamento, causados por partículas de elevada dureza relativa. Estas partículas podem estar contidas no material da peça ou podem, principalmente, ser partículas da própria ferramenta de corte, que são arrancadas por aderência e arrastamento, por exemplo. As ferramentas de aço rápido são mais suscetíveis a esse tipo de desgaste, principalmente na usinagem de ferros fundidos. Para metal duro e cermet, as partículas duras dos carbonetos são arrancadas das ferramentas, surgindo um mecanismo acelerado de desgaste. Para inibir a ação desse mecanismo é necessário uma classe de metal duro com baixo percentual de cobalto e com uma granulometria mais fina (Trent, 1991).

Este tipo de mecanismo torna-se importante principalmente na usinagem de alguns materiais que contêm altas concentrações de inclusões não metálicas duras, como carbonetos, óxidos e silicatos, que possuem uma forte capacidade de abrasão, mesmo em temperaturas elevadas. Na usinagem estas partículas podem danificar as superfícies da ferramenta de corte causando crateras na superfície de saída e entalhes na superfície de folga. Estas partículas agem no sentido de arrancar grãos ou conglomerados inteiro de carbonetos da ferramenta de metal duro, que também passam a fazer papel de partículas abrasivas (Melo et al., 2005).

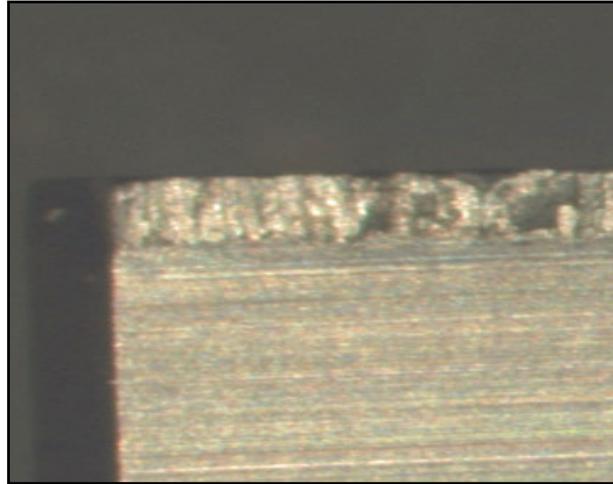


Figura 3.9 – Desgaste frontal provocado por abrasão (Iscar Ltd., 2001).

Os principais fatores que influenciam no desgaste por abrasão são:

- Condição de corte: aumentando os parâmetros de corte, diminui a dureza dos componentes da ferramenta favorecendo o aumento do desgaste devido a este mecanismo;
- Tipos de partículas abrasivas presentes no material usinado: Partículas mais duras provocam maiores desgastes nas ferramentas.
- Tamanho e concentração dessas partículas: Quanto maior a partícula abrasiva, maior a sua capacidade de arrancar grãos de carbeto maiores ou conglomerados desses.

Hutchings (1992) e Tylczak et al (2006) apresentam a teoria para explicar este sistema tribológico. Quando duas superfícies deslizam uma sobre a outra, uma delas ou ambas sofrem desgaste. Este tipo de desgaste é usualmente modelado pelas equações de Archard. O modelo de Archard parte do princípio que o contato entre corpos ocorre onde as asperezas se tocam e que a área total de contato é a soma das áreas individuais de contato entre as asperezas. Esta área é praticamente proporcional à carga aplicada e pode ser admitido que para a maioria dos contatos entre metais a deformação das asperezas é plástica.

O Equação 3.1, equação de Archard, é comumente usada para modelar o desgaste por deslizamento.

$$Q = \frac{K * W}{H} \quad [\text{mm}^3/\text{m}] \quad (3.1)$$

Onde:

Q = Volume desgastado do material mais mole por unidade de distância percorrida

K = Coeficiente adimensional de desgaste ($0 < K < 1$)

W = Carga normal em [N]

H = Dureza do corpo mais mole [N/m^2]

A quantidade de material removido devido às asperezas depende do coeficiente de desgaste, K , que é um número adimensional sempre menor que 1. Este coeficiente indica a severidade do desgaste. Segundo Hutchings (1992) e Tylczack et al (2006) o desgaste é proporcional a constante K . Entretanto K , não é uma característica dos materiais e sim do sistema tribológico. A princípio cada sistema tem que ser investigados para determinação dessa constante. A abrasão depende da forma do grão abrasivo, profundidade da penetração, da carga aplicada e da dureza dos materiais envolvidos.

3.3.5 – Oxidação

Esse tipo de desgaste ocorre mesmo em condições normais de corte, devido ao aquecimento da ferramenta junto à aresta cortante favorecer a formação de um película de óxido. Nas periferias da área de corte do cavaco com a superfície de saída da ferramenta de corte não ocorre aderência. Com isso, essas regiões ficam susceptíveis a reações químicas com a atmosfera. As camadas de óxidos (geralmente porosas) formadas nessas regiões são removidas pelo fluxo de cavaco, o que faz surgir desgaste de entalhes nas regiões afetadas e pode levar a ferramenta de corte ao colapso (Melo et al., 2005).

Um fator importante no controle da oxidação em ferramentas de metal duro é a concentração de oxigênio no ambiente de corte. Observa-se que o aumento da concentração desse gás provoca um conseqüente aumento da taxa de oxidação.

3.3.6 – Lascamento e fratura

Lascamentos e Fratura, (Figura 3.10) são avarias que as ferramentas de corte estão sujeitas. A deterioração da ferramenta de corte acontece precocemente antes da ferramenta ter sofrido um desgaste significativo. É raro uma aresta de corte sofrer lascamento ou fratura em uma operação de corte contínuo sendo mais comum este tipo de avaria em pastilhas de fresamento.

Fatores como dureza, tenacidade à fratura, geometria do metal duro e condições de corte utilizadas são importantes na prevenção deste tipo de desgaste. Ferramentas negativas possuem aresta de corte mais reforçada e pode atenuar este problema. Outra forma de reforçar a aresta de corte é chanfrá-la ou fazer um arredondamento da aresta.

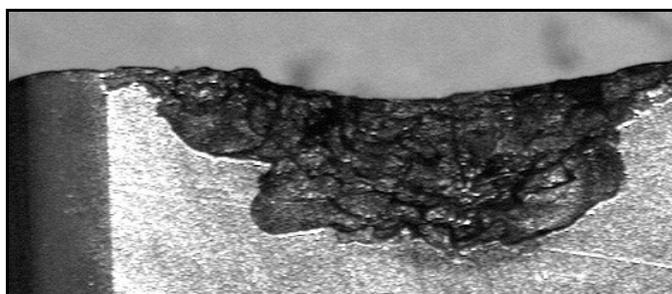


Figura 3.10 – Fratura (Iscar Ltd., 2001).

Trincas térmicas acontecem em ferramentas de metal duro em situações de corte interrompido, caso comum em fresamento. A evidência que uma ferramenta sofreu fadiga térmica é o surgimento de diversas trincas transversais a sua aresta de corte (Figura 3.11). O acesso irregular de fluido na ferramenta também pode acarretar trincas térmicas.

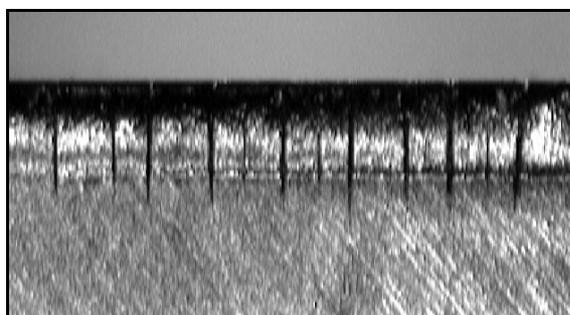


Figura 3.11 – Trinca térmica (Iscar Ltd., 2001).

Melo et al. (2005) citando Trent (1991) afirma que essas trincas são provocadas pela alternância de expansão e contração das camadas superficiais da ferramenta quando ela é aquecida e resfriada durante o processo de usinagem. Ferraresi (1977) explica essa afirmação de forma mais detalhada. A camada superficial do inserto se dilata devido a temperatura bastante alta. Porém as camadas subseqüentes, a temperaturas inferiores, terão uma dilatação bem menor. Como conseqüência, tais camadas impedirão o processamento de uma dilatação muito maior na camada superficial originando assim na camada superficial tensões de compressão e a determinada distância da superfície de contato, tensões de tração. O processo inverso acontece quando a ferramenta não esta efetivamente trabalhando. Essa variação de

tensões repete-se com a variação de temperatura proveniente do corte interrompido ou do acesso irregular do fluido de corte.

3.4 – Fluidos de Corte

Atualmente, percebe-se uma tendência mundial em produzir peças cada vez mais sofisticadas, com elevado grau de tolerância geométrica, dimensional e acabamento superficial, com baixo custo e sem poluir o meio ambiente. A crescente conscientização em torno da defesa do meio ambiente traz fortes cobranças às indústrias, que se vêem obrigadas a utilizar adequadamente os recursos naturais consumidos em seus processos de manufatura. Dessa maneira, é necessário investir em sistemas ambientalmente corretos e no tratamento, reciclagem e reutilização dos seus resíduos. No processo de usinagem dos metais, a utilização de fluidos de corte resulta em problemas que vão desde efeitos nocivos no ambiente de trabalho até a agressão do meio ambiente. Fatores importantes para resolver alguns problemas passam pela refrigeração das máquinas, climatização do ambiente de forma auxiliar no controle da temperatura do fluido de corte e do ambiente de trabalho, melhor gerenciamento desse fluido, uso dos fluidos de corte não agressivos sob condições de refrigeração/lubrificação e mesmo a escolha pela usinagem a seco.

Até há pouco tempo, os fluidos de corte eram descartados no meio ambiente sem restrições. Atualmente, esta prática é dificultada não apenas pelo rigor das leis e da fiscalização, como em virtude do padrão de produção com a adoção do “selo verde”, que indica se os processos utilizados para a produção de uma determinada peça não prejudica o meio ambiente (Pereira et al., 2005). Outros fatores importantes e que precisam ser levados em consideração são os custos operacionais da produção e a preservação da saúde do ser humano (Machado e Diniz, 2000).

A função principal do fluido de corte é fazer com que, tanto a ferramenta como as peças que está sendo usinada não se aqueçam demasiadamente. Para isto, o fluido de corte pode ter dois tipos diferentes de ações: a ação lubrificante que, ao diminuir o atrito entre a ferramenta/peça e ferramenta/cavaco, minimiza a transformação de calor: e a ação refrigerante que remove o calor já transformado. Como funções secundárias podem citar

segundo vários autores, Diniz et al. (2006), Ferraresi (1977), Pereira et al. (2005), Machado & Diniz (2000), entre vários outros:

- Prevenção contra a soldagem cavaco/ferramenta: Esta é uma função de lubrificação e é bastante necessária quando o material que está sendo cortado tem tendência à formação de aresta postiça de corte, com no caso de usinagem de alumínio. Também quando as condições de usinagem propiciam esta formação (baixas temperaturas de corte). Nakagawa (2000) afirma que o filme lubrificante formado entre a aresta de corte e o cavaco previne a aderência (mecanismo de desgaste).
- Retirada do cavaco da região de corte: Em algumas operações de usinagem, como furação e fresamento de alojamentos, um meio bastante eficiente de retirar o cavaco da região de corte é via fluxo de fluido de corte. Para que isto ocorra o fluxo deve ser de alta pressão, e o cavaco formado deve ser pequeno;
- Proteção contra corrosão;
- Redução da dilatação e deformação causadas pelo aquecimento do material;
- Evitar danos a estrutura superficial do material;
- Reduzir custos operacionais com o consumo de energia, ferramentas e retrabalhos.

3.4.1 – Propriedades do fluido de corte

Nem todas as funções citadas são exigidas do fluido em toda a operação. Devido a isto, a seleção do fluido de corte apropriado depende do tipo de serviço a ser executado.

Para um fluido de corte satisfatório, as propriedades exigidas são (Diniz et al., 2005; Momper, 2000, Nakagawa, 2000):

- Alta capacidade de absorção de calor;
- Capacidade de molhar eficientemente o metal, de modo que o resfriamento possa ser eficaz;
- Boas propriedades anti-fricção;
- Boas propriedades anti-soldante;
- Estabilidade durante seu uso e também no armazenamento;
- Ausência de odores desagradáveis;
- Não causar dano à pele humana e nenhum outro risco à saúde;

- Isenção da tendência de manchar ou corroer a peça trabalhada e a máquina ferramenta;
- Capacidade de proteger a peça e a máquina dos defeitos da corrosão pela umidade atmosférica, ou por outras causas possíveis;
- Isenção da tendência a originar precipitados sólidos que possam depositar substâncias semelhantes a gomas nas guias, ou obstruir os tubos de circulação do fluido de corte;
- Viscosidade adequada: a viscosidade deve ser suficientemente baixa de modo a permitir uma fácil circulação do fluido e também favorecer a decantação rápida dos cavacos e contaminantes em geral. Por outro lado, existem operações de usinagem onde são exigidas altas viscosidades, para permitir a aderência do fluido de corte nas arestas da ferramenta de corte;
- Não devem apresentar tendência à formação de fumaça;
- Transparência de modo que a peça possa ser observada claramente durante as operações de usinagem.

3.4.2 – Classificação dos fluídos de corte

Existem diversas formas de classificar os fluídos de corte e não há uma padronização única estabelecida entre as empresas fabricantes. A classificação mais difundida é feita da seguinte maneira segundo Machado & Diniz (2000):

- Ar: Pouco utilizado, aplica-se principalmente na usinagem de ferro fundido cinzento.
- Água: Primeiro fluido a ser utilizado. Foi substituído por óleos integrais e óleo emulsionáveis devido a sua alta taxa de evaporação, deficiência em lubrificar e também provocar corrosão em materiais ferrosos.
- Emulsões: São uma solução de água com partículas de óleo solúvel dispersas em seu interior.
- Óleos: Em operações na qual o calor gerado pelo atrito é muito grande, recomenda-se o uso de óleo puro que são divididos em minerais, graxos, compostos, de extrema pressão e óleos de uso múltiplo.

O uso dos fluídos à base de água requer cuidados especiais. Por apresentarem densidade baixa, se comparados aos fluídos à base de óleo, acabam por se dispersar muito, caso sejam usados com bocais convencionais. Para compensar essa dispersão, são necessárias grandes quantidades de fluídos e, portanto, a adoção de máquinas de grande porte, enormes reservatórios de fluído, unidades de refrigeração e bombas de alta potência.

Os óleos integrais apresentam como vantagens a propriedade lubrificante inclusive dos componentes de máquina. Mas, como desvantagens, destacam-se o acelerado processo de deteriorização, custos, riscos de incêndio, ineficiência lubrificante a altas velocidades de corte, baixo poder de refrigeração, formação de fumos, ataque à saúde do operador e altos custos de recuperação para reutilização. Porém eles são empregados como aditivos nos fluídos minerais, objetivando melhorar as propriedades lubrificantes, (Machado & Diniz, 2000; Pereira et al., 2005).

Os fluídos solúveis dividem-se em emulsões e soluções. São formados pela mistura de óleos minerais solúveis em água e aditivos com propriedades anti-solda, anticorrosão, antioxidação e extrema pressão. As soluções têm fluído sintético formado a partir de materiais inorgânicos dissolvidos em água com a presença de aminas, nitrato de sódio, fósforo, boratos, cloro, glicóis e germicidas, (Machado & Diniz, 2000; Pereira et al., 2005).

Já as emulsões segundo Machado & Diniz (2000), têm acrescentadas em suas fórmulas compostos bactericidas. Além delas, há os fluídos semi-sintéticos, aos quais, além de água, são adicionados emulsificadores e agentes umectantes biocidas que também estão presentes nas emulsões. As emulsões apresentam maiores vantagens operacionais em comparação com os óleos integrais: têm menor custo operacional, além de atender um número maior de exigências normalmente encontradas em processos de usinagem. Elas são compostas por óleos solúveis adicionados à água em proporções que variam de 1/5 a 1/100, dependendo dos requisitos operacionais, por emulgadores, que estabilizam a mistura, por aditivos com propriedades anticorrosivas, antidesgastes e de extrema pressão, além dos biocidas, que combatem a ação dos agentes naturais, como bactérias, microorganismos e fungos.

Segundo Santos et al. (2007), o descarte das emulsões é menos oneroso que o das soluções, podendo ser reaproveitada após separação da água. A separação do óleo e água para que seja feito o descarte poder ser físico, químico ou uma combinação dos dois. A seleção destes depende do estado de contaminação das emulsões, da sua composição, das condições

locais, da legislação do meio ambiente na região e do custo. Nos processos químicos, são adicionados ácidos para quebrar as emulsões pela degradação dos emulgadores. Nos físico-químicos, a reação química é reforçada pelo aquecimento da emulsão. No físico é feita a filtragem separando o óleo da água. Outro processo físico é a quebra térmica através de evaporação. O óleo permanece presente por apresentar ponto de ebulição elevado.

Machado & Diniz (2000) e Pereira et al. (2005) afirmam que os fluídos de corte semi-sintéticos, que também são formadores de emulsões, caracterizam-se por apresentar de 5 a 50% de óleo minerais em suas composições, aditivos químicos miscíveis em água e biocidas que aumentam a vida útil do fluído e reduzem os riscos à saúde dos operadores.

As soluções sintéticas são formuladas à base de sais orgânicos e inorgânicos, aditivos de lubrificação e inibidores de corrosão, tais como nitrito de sódio, fosfato, boratos e aminas. Assim como os fluídos semi-sintéticos, apresentam grande resistência ao ataque de bactérias têm, portanto, vida mais longa. São comumente aplicados em processos de retificação de materiais ferrosos e não ferrosos. Os fluídos sintéticos mais complexos são para uso geral, com boas propriedades lubrificante e refrigerante.

3.4.3 – Contaminantes dos fluídos de corte

Pereira et al. (2005) afirma que há dois tipos de contaminantes dos fluídos de corte: os artificiais (cavacos, lubrificantes de máquinas e corpos estranhos) e os naturais (bactérias, microorganismos e fungos). As bactérias presentes no meio ambiente atacam constantemente os fluídos de corte. É importante ter ciência dos tipos e quantidades de bactérias presentes nos fluídos para o seu controle permanente.

As bactérias contaminantes são aeróbicas e anaeróbicas podem trazer inúmeros problemas à emulsão, como corrosão, redução do PH, esgotamento dos aditivos, formação de camada sobrenadante e , conseqüentemente, quebra das emulsões e das soluções e irritação na pele dos operadores. As bactérias aeróbicas consomem o oxigênio dos fluídos de corte e as anaeróbicas são responsáveis pelo mau cheiro.

3.4.4 – Aplicação dos fluídos de corte

Ferramentas com menor resistência ao desgaste, como o aço rápido exige utilização de um fluído de corte. Isto porque o calor gerado durante o corte aumenta muito a temperatura da superfície da ferramenta, reduzindo muito a sua resistência mecânica, deixando-a muito susceptível á deformação plástica e ao colapso.

Outra aplicação essencial do fluído de cortes é nas operações onde o acabamento superficial e as tolerâncias dimensionais são críticas. Nesses casos, o fluído lubrificante garante o bom acabamento da superfície e o fluído refrigerante garante as tolerâncias dimensionais.

As aplicações de corte contínuo com ferramentas de metal duro são realizadas com a aplicação de algum fluído de corte. Neste caso, o fluído pode garantir uma economia considerável no processo, por permitir efetivamente o aumento da vida da ferramenta. Na usinagem do ferro fundido cinzento, o ganho que se tem na vida da ferramenta utilizando fluído refrigerante é inexpressivo sendo aconselhável não utilizá-lo segundo Machado & Diniz (2000).

3.5 – Usinagem a Seco

Como já citado anteriormente, as principais funções do fluído de corte, em operações de usinagem, são a redução da geração de calor através da diminuição do atrito entre a ferramenta e o cavaco, minimizando assim os esforços de corte, como também a retirada do calor da peça e da ferramenta. Em algumas operações de usinagem, o fluído de corte também tem a função de transportar o cavaco para fora da região de corte.

As funções dos fluídos de corte não estão disponíveis em operações de usinagem a seco. Isto significa que existe maior atrito entre a ferramenta e a peça e entre o cavaco e a ferramenta, como também maior dificuldade de expulsão dos cavacos. A ferramenta é submetida a uma maior carga térmica, o que pode resultar em níveis mais altos de desgaste por adesão, abrasão, difusão e oxidação e, portanto, a redução de sua vida. O efeito da redução da refrigeração pode acarretar um aquecimento adicional na máquina e,

conseqüentemente, problemas com a precisão. A peça ao receber maior quantidade de calor dilata-se dificultando a obtenção de tolerâncias apertadas e também pode ter sua camada superficial metalurgicamente afetada pelo calor (Diniz et al., 2005). A ausência do auxílio na expulsão dos cavacos é bastante problemática no caso de operações de furação, podendo causar problemas com a ferramenta e também danos à superfície do furo.

Segundo Fleischer et al. (2004), dois fatores podem estimular o uso da usinagem a seco: potencial de economia devido aos custos com fluídos refrigerantes e o encurtamento da cadeia do processo em função das operações mais limpas. Atualmente exige-se cada vez mais taxas elevadas de remoção de cavacos em menos tempo. As principais causas do desgaste para as ferramentas que trabalham nesta condição são as cargas térmicas as que estão expostos os materiais de corte. Sendo assim, trabalhar a seco contribui para uma vida maior da ferramenta.

Dentre os principais materiais utilizados pela indústria mecânica, o ferro fundido cinzento foi o primeiro a ser usinado a seco em operações de torneamento, mas hoje em dia também se pode usinar a seco materiais mais duros (Momper, 2000).

Para um processo eficiente de usinagem a seco o material da ferramenta selecionado para uma operação é tão importante quanto à geometria da ferramenta escolhida. A dureza em altas temperaturas e a resistência ao desgaste do metal duro, cermets, cerâmicas, CBN e PCD fazem esses materiais eminentemente satisfatórios para o uso em operações de usinagem a seco.

Segundo Scandiffio (2000) os substratos das ferramentas de metal duro para corte a seco deve ser produzido por um pó de metal duro ultrafino, com tamanho de grão menor que 0,3 microns e com alta resistência ao calor. Possibilitando assim, a obtenção de arestas de corte mais afiadas, o que gera menos calor se comparado com as ferramentas de metal duro tradicionais. Estes pós de metal duro ultrafinos têm uma resistência aproximadamente de 60% a 70% maior que os pós normais de metal duro, com tamanho de grão de aproximadamente 2,5 microns. Diniz et al. (2006) afirma que devido ao maior fator de empacotamento que grãos muito pequenos propiciam à medida que se diminui o tamanho de grão do metal duro aumenta-se a dureza, resistência ao desgaste e tenacidade do material. Também a condutividade térmica do metal duro diminui quando se diminui seu tamanho de grão, o que faz com que uma menor porcentagem do calor gerado no processo flua pela ferramenta.

Devido às dificuldades de se usinar totalmente sem refrigeração, uma alternativa é a técnica de mínima quantidade de lubrificação - MQL. Neste caso uma quantidade mínima de fluido é dirigida por um jato de ar ao ponto em que está sendo executada a usinagem. O volume de fluido pode variar em função do volume de cavacos e do processo de usinagem. A mínima quantidade de fluido de corte deve ser suficiente para reduzir o atrito da ferramenta e ainda evitar a aderência dos materiais. As utilizações do método de mínima quantidade de lubrificante e a usinagem a seco representam alternativas para o uso convencional de fluido refrigerante, mas só é possível atingir uma substituição completa das tarefas (refrigerar, lubrificar, transportar, limpar e conservar) desse produto em casos isolados. Geralmente há necessidades de adaptação das ferramentas e dos processos em operações com os sistemas MQL e na usinagem a seco. É necessário observar eventuais deformações das peças, o que exige uma supervisão da qualidade. A escolha do agente de lubrificação é extremamente importante (Walter, 2005, Pereira et al., 2005).

Quando são feitas comparações dos custos na alteração do processo para MQL e para usinagem a seco, os seguintes fatores destacam-se como responsáveis por elevar os custos:

- Valor das ferramentas;
- Consumo de fluido refrigerante na lubrificação por MQL;
- Adaptação do processo;
- Ar comprimido para lubrificação por MQL;
- Alterações construtivas para o transporte do cavaco;
- Técnicas de controle e medição;
- Despesas com treinamentos.

Segundo Schmidt et al. (2004), a implantação da usinagem a seco ou MQL requer a colaboração de uma ampla rede, com a inclusão de especialistas em ferramentas, em revestimento de ferramentas, em lubrificantes e sistemas de lubrificação de mínima quantidade, em máquinas operatrizes e sistemas de exaustão. A participação dos especialistas é essencial devido aos problemas enfrentados na implantação:

- Vedação para eixo árvore na usinagem a seco, no qual é tratado a contaminação das máquinas na usinagem a seco.
- Contaminação do ar com poeiras e partículas resultantes do processo, dentro e fora da área de trabalho da máquina.
- Resistência da ferramenta a maior quantidade de calor inerente ao processo.

- Necessidade de ferramentas com coberturas que funcionam como lubrificantes sólidos.

Na lubrificação de mínima quantidade, a alimentação espontânea e constante do agente de lubrificação sobre a aresta de corte deve estar assegurado desde o “o primeiro cavaco”. A lubrificação é não pulsante e definida de acordo com as rotações. Não pode ocorrer a formação de gotas e o gotejamento posterior no fim do processo, para evitar as falhas da máquina causadas por sujeiras.

A configuração da passagem do lubrificante através da ferramenta é, de certa forma, crítica na alimentação interna de lubrificação de mínima quantidade. Os canais de passagem devem ser configurados de forma a não ocorrer a “separação da mistura” da névoa. A alimentação externa com névoa de lubrificante exige a verificação regular da limpeza dos ejetores, o alinhamento dos mesmos sobre a aresta de corte da ferramenta e a forma de borrifamento.

A exaustão e a limpeza do ar são outros problemas. A disposição do sistema axaustor na área de trabalho da máquina, eventualmente nas proximidades das ferramentas, e a adaptação do sistema de filtragem de poeiras e óleo contidos no ar, são importantes para evitar as falhas nas máquinas em virtude de acúmulos de cavacos e poeiras e nos equipamentos de filtragem.

A motivação das empresas é decisiva para o sucesso da aplicação da usinagem a seco. Em projetos com esta tecnologia, foram alcançados os seguintes benefícios:

- Redução dos custos com descarte e manutenção de fluído refrigerante;
- Redução dos gastos com a limpeza da área da máquina e das peças;
- Locais de trabalho mais limpos e operadores mais satisfeitos;
- Fabricação com proteção do meio ambiente e promoção de tecnologia de preservação.
- Utilização de materiais de corte e de processos de alta produtividade (Schmidt et al., 2004).

Atualmente a Alemanha é o país com maior conhecimento na usinagem a seco. De acordo com Schmidt et al. (2004), muitas empresas alemãs já desenvolveram o processo de usinagem a seco ganhando produtividade e qualidade das peças produzidas. As principais aplicações com usinagem a seco são fresamento de canais de engrenagens – Daimler-Crysler,

usinagem de alumínio substituindo ferramentas de diamante policristalino por ferramentas de metal duro com granulometria de metal duro finíssima e superfície de saída polida. Na área de construção de máquinas há muitas aplicações na usinagem a seco. A Index fabrica peças para sua própria produção. São peças torneadas e furadas, principalmente de aços beneficiados. Outras empresas alemãs trabalham com centros de usinagem e tornos automáticos com excelentes resultados.

3.6 – Força e Potência de Usinagem

O conhecimento das forças que atuam na aresta cortante é necessário para a determinação da potência de corte e é um parâmetro indicativo da usinabilidade do material e também utilizado para controle do processo.

A força de usinagem é um dos fatores que devem ser levados em consideração para análise do desgaste das ferramentas, sendo que determinadas condições de corte pode ser responsável diretamente pelo colapso da ferramenta por deformação plástica da aresta cortante.

Como é difícil conhecer a direção e sentido das forças de usinagem não se trabalha com a força de usinagem propriamente, mas com suas componentes segundo diversas direções conhecidas. Estas componentes são descritas como mostradas na Equação 3.1.

$$\vec{F}_u = \vec{F}_c + \vec{F}_f + \vec{F}_p \quad (3.2)$$

onde:

F_u = Força de usinagem

F_c = Força de corte na direção de corte

F_f = Força de avanço na direção do avanço

F_p = Força passiva que é a projeção de F_u sobre a perpendicular ao plano de trabalho.

Normalmente a força de corte é maior em relação as demais componentes da força de usinagem. Numa consideração inicial simplificada a força de corte pode ser expressa pela Equação 3.3, segundo Ferraresi (1977), Stemmer (1989) e Diniz et al. (2006).

$$F_c = k_c * A \quad (3.3)$$

Onde:

k_c = pressão específica de corte [N/mm²]

A = área da seção de corte [mm²]. $A = a_p * f$

Stemmer (1989) cita uma fórmula bastante simples proposta por Kienzle para cálculo da força de usinagem, Equação 3.4. Ferraresi (1977) mostra que a formulação de Kienzle é a que mais aproxima da realidade.

$$k_c = k_{c1.1} * h^{1-mc} \quad \text{ou seja,} \quad F_c = k_{c1.1} * b * h^{1-mc} \quad (3.4)$$

Onde:

h = espessura do cavaco = $f * \text{sen}(\kappa)$

b = largura de corte

$k_{c1.1}$ = pressão específica de corte para um cavaco de $A = b * h = 1 \times 1 \text{ mm}^2$

Os valores de $k_{c1.1}$ e $1-mc$ são tabelados para cada tipo de material ensaiados por Kienzle. As condições do ensaio foram as seguintes para todos os materiais ensaiados (Diniz et al., 2005):

- Velocidade de corte variando de 90 a 125 m/min
- Espessura de corte variando de 0,1 a 1,4 mm (extrapolação permissível até $h=0,05 \text{ mm}$ e $h=2,5 \text{ mm}$)
- Ferramenta de metal duro sem fluído de corte

A Tabela 3.3 apresenta a geometria que a ferramenta deve ter para que sejam obtidas empiricamente as constantes de Kienzle.

Tabela 3.3 – Geometria da ferramenta para constantes de Kienzle (Diniz et al., 2006)

Geometria da ferramenta	α_o	X_r	γ_o	λ_s	ϵ_r	K	$a_p(\text{mm})$
Usinagem em aço	5	79	6	-4	90	45	1
Usinagem em fofo	5	83	2	-4	90	45	1

Correção devido ao ângulo de saída (γ_0): Segundo Stemmer (1989) a força de corte calculada pelas equações de Kienzle deve ser corrigida diminuindo o valor de F_c de 1 a 2% para o aumento de 1° no valor de γ . Para ferro fundido Kienzle utilizou $\gamma = 2^\circ$.

Stemmer (1989) e Diniz et al. (2006) citam a Equação 3.5 para cálculo da potência de corte consumida no gume da ferramenta.

$$P_c = \frac{F_c * V_c}{60.000} \text{ [kW]} \quad (3.5)$$

Onde:

F_c = Força de corte [N]

V_c = Velocidade de corte [m/min]

3.6.1 – Análise dos fatores que afetam a força de usinagem

As principais variáveis do processo de usinagem que afetam a força de usinagem são:

- Material da peça;
- Material da ferramenta;
- Velocidade de corte;
- Avanço e a profundidade de corte
- Geometria da ferramenta;
- Uso de fluido de corte.

a) Material da peça

Segundo Trent (1991) a força de usinagem pode ser considerada dependente de dois fatores principais:

- Área dos planos de cisalhamento primário e secundário;
- Resistência ao cisalhamento do material da peça no plano do cisalhamento primário e secundário.

As principais propriedades mecânicas do material da peça que afetam a força de usinagem são:

- Dureza e resistência mecânica: em geral, quanto maior a dureza e resistência mecânica maior a sua resistência ao cisalhamento e portanto maior a força de usinagem.
- Ductilidade: materiais de alta ductilidade tendem a formar cavacos longos, aumentando a área de contato cavaco-ferramenta, resultando no aumento da força de corte. Para ferros fundidos o cavaco é curto resultando forças de corte menores.
- Tenacidade: Materiais com alta tenacidade apresentam maior resistência à propagação de trincas, aumentando a resistência ao cisalhamento no plano de cisalhamento primário e no plano de cisalhamento secundário, apresentando assim maior tendência a formação de cavacos contínuos e longos. O resultado destes fatores é o aumento da força de usinagem na maioria dos casos. Para o ferro fundido esses fatores não contribuem para aumento da força de corte.

b) Material da ferramenta

A força de usinagem depende da afinidade química entre o material da ferramenta e o material da peça. Quando houver afinidade química entre o material da peça e a ferramenta, a tendência é a formação de uma zona de aderência com ligações fortes resultando em altas forças de usinagem. Quando houver tendência a reduzir o atrito na interface, com no uso de certos revestimentos de ferramentas, tem-se uma redução da força de usinagem.

c) Velocidade de corte

O aumento da velocidade de corte normalmente tende a contribuir para reduzir a força de usinagem pela redução da resistência ao cisalhamento do material, devido ao calor gerado durante o corte. Entretanto, sob velocidade de corte mais elevadas, a força de corte tende se estabilizar em um valor praticamente contante (Trent, 1991).

Sob velocidades de corte usualmente utilizadas (sem APC), os valores da pressão específica de corte, K_s , tendem a diminuir levemente com a velocidade de corte, devido a diminuição da deformação e da dureza do cavaco, e também da redução do coeficiente de atrito que o aumento de V_c proporciona. Enquanto, na faixa de velocidade de trabalho com ferramentas de metal duro (acima de 150 m/min), a redução de K_s , com V_c é pouco acentuada. Neste caso, pode-se dizer que a potência de corte deverá ser proporcional à velocidade de corte, pois a força de corte seria pouco influenciada por esta variável, segundo Diniz et al. (2006).

d) Avanço e profundidade de corte

Os aumentos do avanço e da profundidade de corte implicam no aumento da área dos planos de cisalhamento, portanto, se espera um aumento na força de usinagem. Mas, o aumento do avanço implica na diminuição do grau de recalque resultando na diminuição do K_s . O aumento da profundidade de corte praticamente não altera o valor de K_s , (Ferraresi, 1977).

e) Geometria da ferramenta

De uma forma geral, considerando as demais condições de corte constantes, modificações nos ângulos da ferramenta resultam em variações na força de usinagem descritas abaixo:

- Ângulo de saída (γ_0): o aumento do ângulo de saída resulta em maior facilidade de fluxo do cavaco, portanto, menor deverá ser a força de usinagem. Kienzle sugere um aumento ou diminuição de 1 a 2% da força de corte para cada aumento ou diminuição de 1° do ângulo de saída respectivamente (Ferraresi, 1977).
- Ângulo de folga (α_0): quando o ângulo de folga da ferramenta é reduzido, aumenta o atrito com a peça e, portanto, a força de usinagem aumenta. Com o aumento do desgaste de flanco durante a usinagem o ângulo de folga é reduzido e conseqüentemente, a área de contato entre a peça e a ferramenta aumenta e, portanto, resulta em aumento da força de usinagem.
- Ângulo de ponta (ϵ_r): quanto maior o ângulo de ponta ϵ_r , maior será a área de contato cavaco-ferramenta, espera-se um incremento na força de usinagem. Entretanto, o desgaste da ponta deverá ser menor, podendo contrabalancear este efeito. Além disso, o risco de falhas prematuras é maior quando o ângulo de ponta é muito pequeno.
- Ângulo de posição (χ_r): o aumento do ângulo de posição χ_r , tende a reduzir ligeiramente a força de usinagem. Quando $\chi_r = 90^\circ$, considerando a ponta da ferramenta sem arredondamento, a componente da força de usinagem, denominada força passiva (F_p), tende para zero, pois, a área na direção normal a esta força é nula. Tem-se nesse caso o corte ortogonal, cuja força resultante é menor que no corte oblíquo.

f) Uso de fluídos de corte

O efeito do fluído de corte na força de usinagem depende de sua ação no corte ser predominantemente lubrificante ou refrigerante. Quando sua ação for lubrificante, diminuindo

o coeficiente de atrito, se reduz a força de usinagem. Por outro lado, se a ação do fluido for refrigerante a força de usinagem poderá aumentar, devido ao aumento da resistência ao cisalhamento do material da peça em relação ao corte a seco. Entretanto, temperaturas elevadas favorecem o desgaste da ferramenta por difusão, que poderia ser reduzido com o uso do fluido de corte. Segundo Trent (1991), a aplicação do fluido de corte é incapaz de prevenir altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta devido ao fato de que esta não pode ter acesso à zona de fluxo, onde considerável quantidade de calor é gerada. Entretanto, a ação refrigerante pode reduzir o volume de material da ferramenta que possa sofrer danos por superaquecimento excessivo, onde o uso de um lubrificante eficiente pode atuar reduzindo à área de contato nas vizinhanças da zona de aderência.

Capítulo 4

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentado o desenvolvimento experimental deste trabalho. Todos os testes foram realizados na fábrica de anéis de pistão Mahle Componentes de Motores do Brasil SA unidade Itajubá, onde foram executados ensaios com ferro fundido nodular ferritizado com nióbio. Três insertos de metal duro do fabricante israelense Iscar Ltd. de classes distintas foram utilizados para teste. As figuras para análise do desgaste do inserto foram realizadas no laboratório de medidas especiais na planta da Mahle. A caracterização do material testado foi feito no laboratório metalográfico da Universidade Federal de Itajubá. Ao longo do capítulo é apresentado todos os equipamentos e instrumentos utilizados bem como a caracterização dos insertos utilizados nos ensaios.

O objetivo principal deste trabalho é avaliar os tipos e formas de desgaste que ocorrem na ferramenta de metal duro na usinagem do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio e avaliar a melhor cobertura, tipos de quebra cavaco e preparação da aresta de corte. A potência de corte também foi avaliada devido à necessidade de se trabalhar simultaneamente com três ferramentas. Não houve preocupação com acabamento superficial já que o produto sofre outras operações posteriores.

4.1 – Caracterização do Ferro Fundido Nodular Ferritizado com Nióbio

Para a correta interpretação dos resultados é necessário que o material a ser usinado seja bem caracterizado. Composição química, tamanho dos nódulos de grafita e homogeneidade dos carbonetos de nióbio diluídos na matriz ferrítica são características que precisam ser bem definidas. A tabela 4.1 apresenta a composição química do material testado. O conhecimento do percentual de cada elemento é importante para o conhecimento prévio de suas propriedades almejadas e sua usinabilidade.

Tabela 4.1 – Composição química do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio (Mahle Catalogue – 2007).

C, %	Si, %	Mn, %	P, %	S, %	Ni, %	Mb, %	Mg, %	Nb, %
3,50 a	2,40 a	0,20 a	0,15	0,03	0,70	0,30	0,02 a	0,40 a
4,10	2,90	0,80	max	max	max	max	0,07	0,60

O material é obtido por fundição centrífuga com coquilha pré-aquecida a 300°C. A coquilha é totalmente revestida com sílica (SiO₂) a fim de evitar que a peça fundida fique aderida às paredes da coquilha facilitando a remoção do tubo centrifugado. Devido as paredes com espessura constante, o resfriamento inicialmente é forçado borrifando água na coquilha. Este processo forma na periferia uma pequena seção coquilhada devido ao baixo tempo para decomposição da cementita. Os tubos fundidos retirados ainda incandescentes continuam o processo de resfriamento ao ar livre. O material obtido é um ferro fundido constituído de matriz perlítica com grafita esferoidal. A fim de melhorar a usinabilidade faz-se um tratamento térmico do material chamado de recozimento que tem por finalidade gerar uma estrutura totalmente ferritizada e homogênea sem perlita ou cementita. O recozimento decompõe a cementita produzindo ferrita mais grafita esferoidal.

Para fazer o recozimento colocam-se as peças no forno e usando a máxima potência fornecida pelo equipamento eleva-se a temperatura até 980 °C ±30 °C. Mantém-se nessa temperatura por cinco horas. O resfriamento de 980 °C para 720 °C acontece de uma forma lenta. Mantém-se constante a temperatura de 720 °C por 2 horas. O resfriamento de 720 °C para 50 °C acontece bruscamente trocando a campânula do forno. A partir de 50 °C o resfriamento é feito a temperatura ambiente. O ciclo completo é de 22 horas conforme mostrado na Figura 4.1.

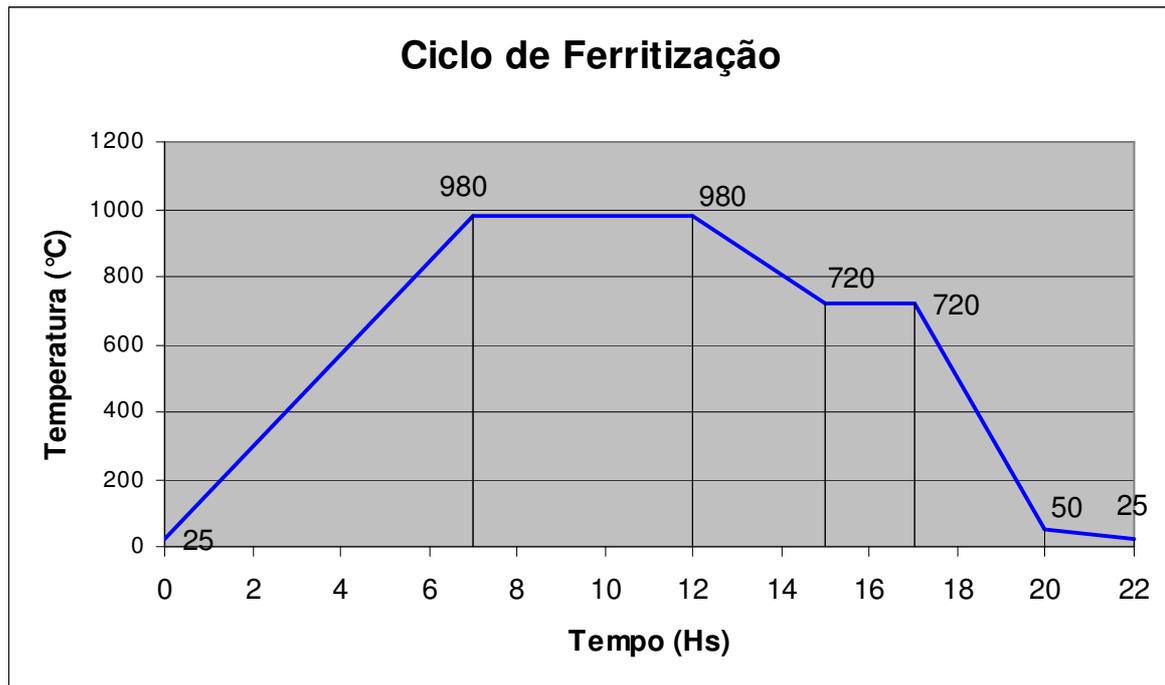


Figura 4.1 – Ciclo de ferritização do corpo de prova.

Após o tratamento térmico foram feitas análises de dureza de um dos corpos de prova com o objetivo de se avaliar possíveis alterações ao longo do diâmetro. A superfície da amostra onde se mediu a dureza foi lixada com lixas entre 100 e 400 “mesh”. Utilizou-se para medir a dureza um durômetro carga tempo Otto Walpert-Werk (Ludwigshafen a.rh.) tipo Testor HT1a. Utilizou-se uma esfera de diâmetro 1/16” , pré carga de 10 kgf e carga de 100 kgf. As medidas de dureza foram realizadas com espaçamento de 1 mm da extremidade para o centro da amostra num total de 10 posições. A variação da dureza do material ao longo da profundidade é mostrada na Figura 4.2.

Observando a Figura 4.2 percebe-se que o que a dureza praticamente não se alterou ao longo da profundidade. Fez-se também uma análise da estrutura micrográfica desse material. A superfície foi polida com lixas 220, 320, 400 e 600 mesh, com rotação de 90° a cada etapa de lixamento. Em seguida fez-se o polimento final com alumina. Para análise das microestruturas e fotografias foi utilizado o microscópio metalográfico do laboratório de materiais da UNIFEI do fabricante Carlzeiss Jena (Jenavert).

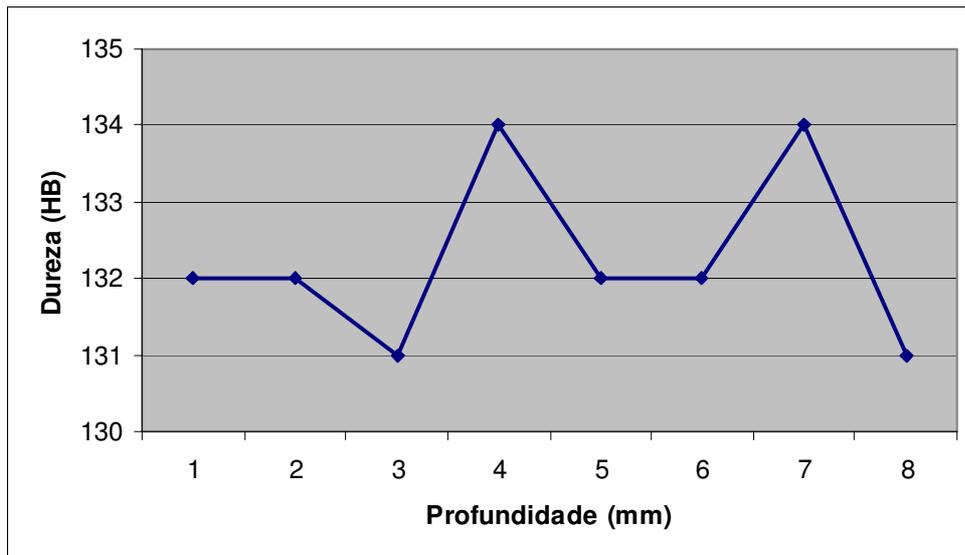


Figura 4.2 – Variação da dureza no corpo de prova de ferro fundido nodular com nióbio.

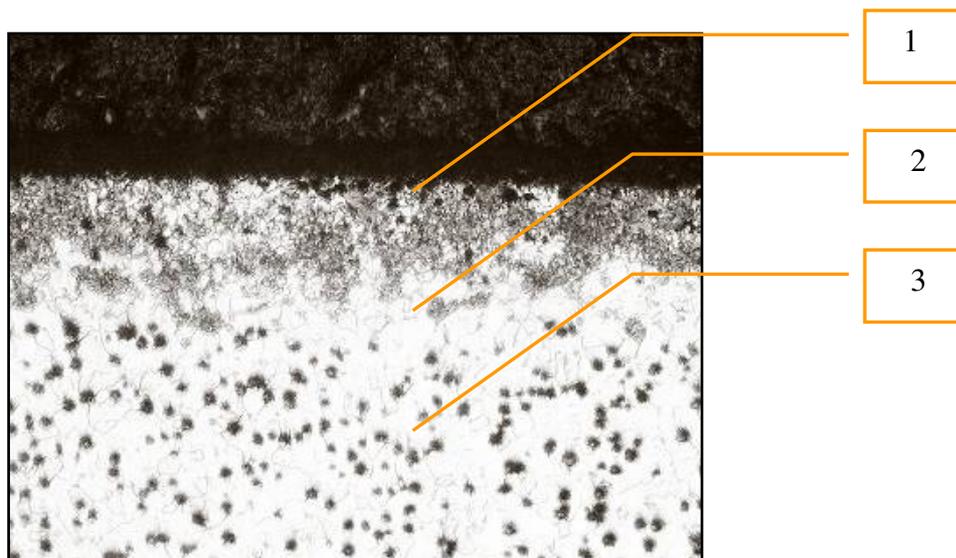


Figura 4.3 – Regiões onde se mediram as microdurezas.

Como a macrodureza na superfície e no núcleo praticamente não se alterou, mediu-se então a micro-dureza a fim de verificar se realmente mantinha o mesmo comportamento. Utilizou-se um instrumento portátil para ensaio e determinação de dureza conforme norma DIN50133 sendo este medidor ótico de dureza do fabricante WERKSTOFFPRUFMASCHINEN GmbH LEIPSIG – padrão Vickers – modelo HMO 10U. A tabela 4.2 apresenta as medidas de microdureza para o corpo de prova testado. As microdurezas foram medidas nas regiões mostradas na Figura 4.3.

Tabela 4.2 – Microdureza do material usinado.

Interface (camada coquilhada) [1]	146 HV ₅
Região sem nódulos de grafita [2]	145 HV ₅
Ferrita(núcleo) [3]	145 HV ₅

A Figura 4.4 mostra que a grafita no ferro fundido nodular apresenta-se na forma esferoidal, forma essa que não interrompe a continuidade da matriz tanto quanto a grafita em veio, resultando em melhoria de ductilidade e tenacidade (CHIAVERINI,1990).

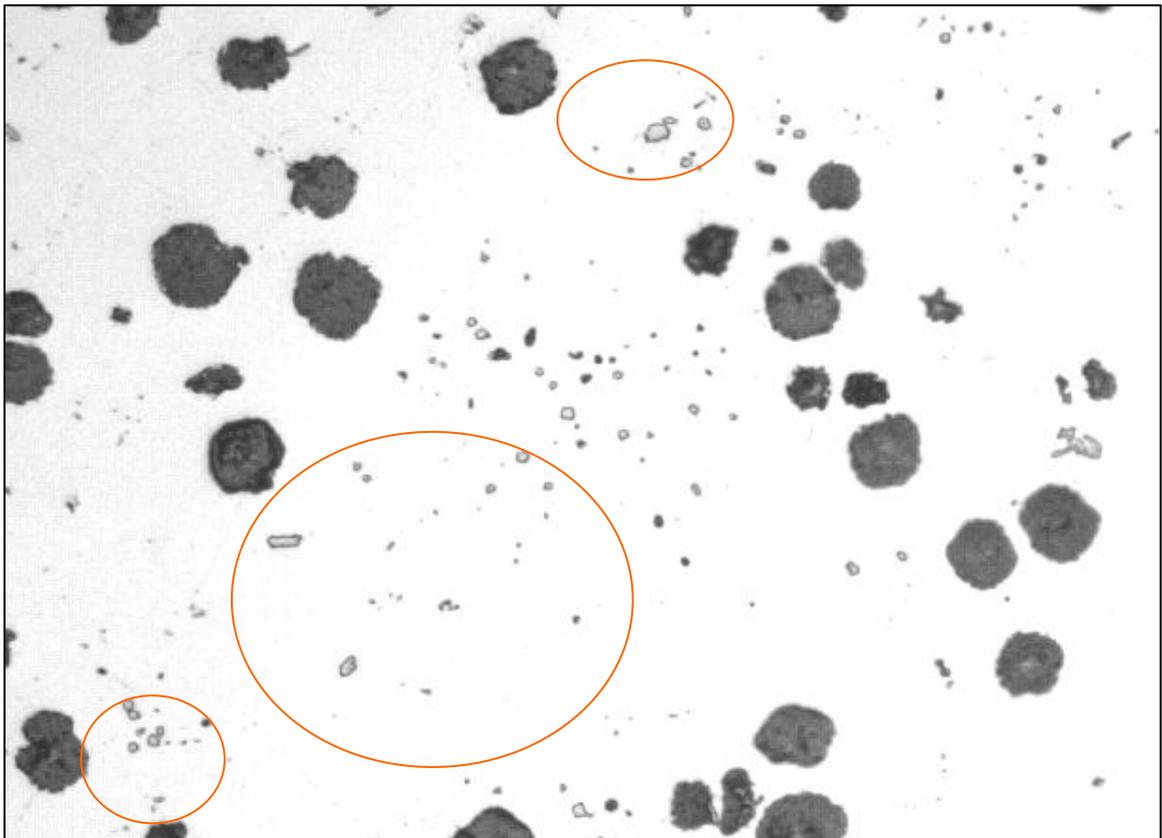


Figura 4.4 – Microestrutura do ferro fundido nodular ferritizado com Nb (ampliação 100x).

Utilizando o processo de dispersão dos raios X (EDX) identificam-se os carbonetos de nióbio diluídos na matriz ferrítica como sendo os pontos claros mostrados dentro dos círculos na Figura 4.4. Esses mesmos pontos podem ser observados na Figura 4.5 numa ampliação maior.

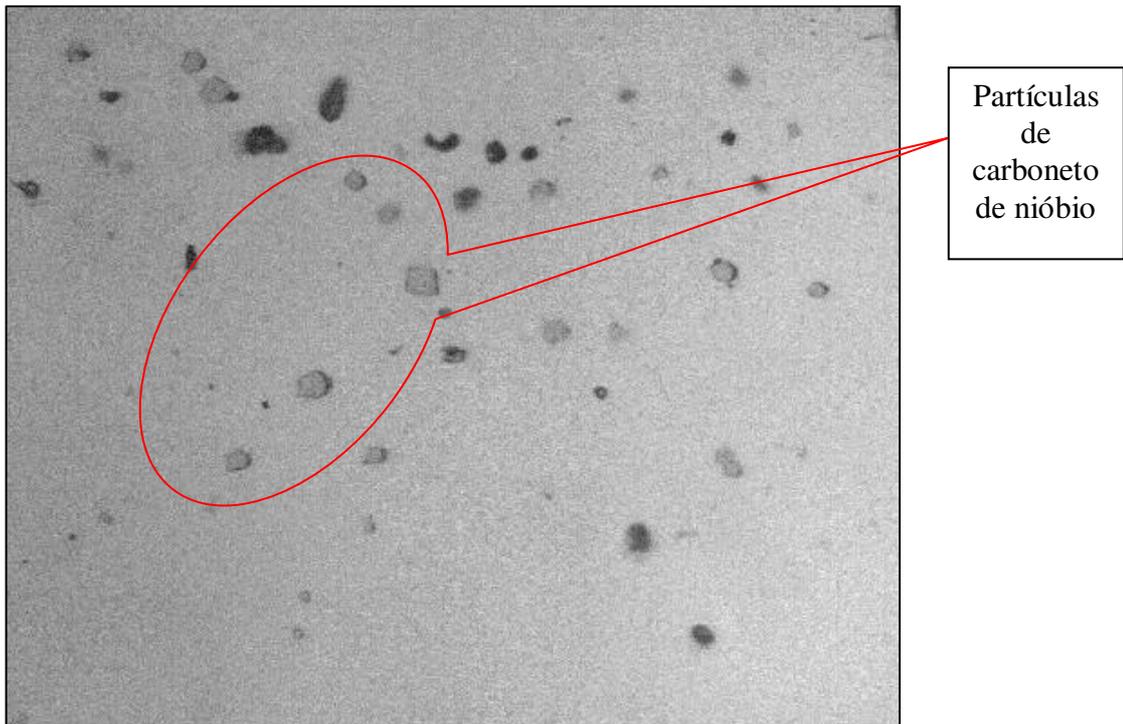


Figura 4.5 – Nióbio diluído na matriz ferrítica (ampliação 500x).

O ferro fundido nodular ferritizado com nióbio é fundido por fundição centrífuga na forma de tubos. Em seguida os tubos são escovados para eliminação da sílica que fica aderida a parede externa. Logo após, os tubos são cortados em buchas conforme Figura 4.6. As dimensões dos corpos de prova são: diâmetro externo de 110 mm, diâmetro interno de 95 mm e comprimento de 200 mm. Mesmo sendo escovados, a camada externa dos corpos de prova apresenta partículas de sílica diluídas na camada periférica. A sílica da parede da coquilha mistura metal fundido quando corrido do cadinho para a coquilha criando um casca altamente abrasiva.

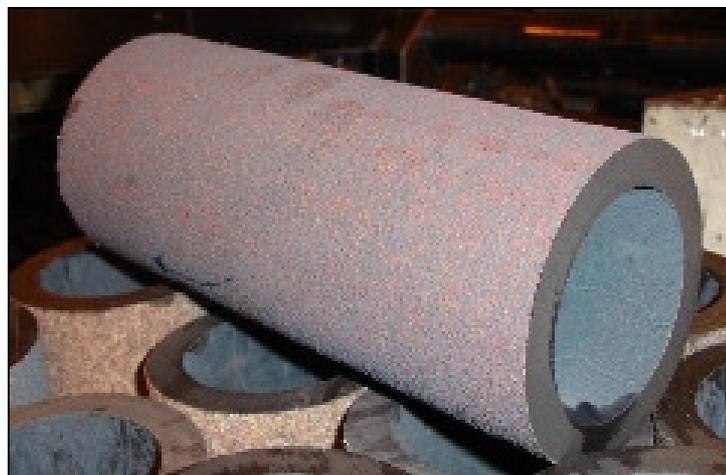


Figura 4.6 – Corpo de prova.

4.2 – Ferramentas de corte

As ferramentas de corte, suportes e pastilhas, utilizadas nos ensaios foram fornecidas pelo fabricante israelense Iscar Ltd. Para a usinagem do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio utilizou-se pastilhas de metal duro com coberturas e quebra cavacos distintos conforme mostrado na Tabela 4.3. Os testes foram realizados com e sem refrigeração a fim de analisar a influencia de fluído refrigerante na vida da ferramenta e nas formas de desgaste atuantes na usinagem.

Teste 01: Utilizou-se pastilha com geometria ISO SNMG 120408 com quebra cavaco TF na classe IC8048 (ISO P10-K10) com cobertura tripla aplicadas pelo processo de deposição química a vapor (CVD – Chemical vapour deposition): uma camada interna de carboneto de titânio (TiC), uma intermediária de nitreto de titânio (TiN) e uma externa de óxido de alumínio (Al_2O_3). A pastilha apresenta um pequeno arredondamento da aresta com raio aproximado de 10 μm e superfície de saída com ângulo de 13°.

Teste 02: Utilizou-se pastilha ISO SNMG 120408 com quebra cavaco standard na classe IC428 (ISO P05, K05 e H05) com dupla cobertura depositada por CVD: uma camada interna de carboneto de Titânio (TiC) e óxido de alumínio (Al_2O_3) na camada externa. A pastilha apresenta aresta reforçada devido ao arredondamento com raio aproximado de 10 μm , fase plana na superfície de saída de 0,4 mm e ângulo de saída de 11°. A classe dessa ferramenta é mais dura e apresenta aresta mais robusta quando comparado com o inserto IC8048.

Teste 03: Utilizou-se pastilha ISO SNMA 120416 sem quebra cavaco na classe IC4028 (ISO K10) com tripla cobertura depositada pelo processo CVD: uma camada interna de carbonitreto de titânio (TiCN), uma intermediária de óxido de alumínio (Al_2O_3) e uma camada externa de nitreto de titânio (TiN). A pastilha não possui quebra cavaco e apresenta arredondamento da aresta com raio de 30-40 μm . Dos três insertos testados o inserto IC4028 apresenta a aresta mais reforçada devido ao ângulo nulo de saída e ao maior arredondamento da aresta.

Os parâmetros de corte sugeridos pelo fabricante para a usinagem de ferro fundido nodular são apresentados na Tabela 4.4. A definição do valor a ser utilizado dependerá da composição química e tratamento térmico a que foi submetido o corpo de prova, rigidez da fixação do corpo de prova e do porta ferramenta.

Tabela 4.3 – Pastilhas utilizadas no teste.

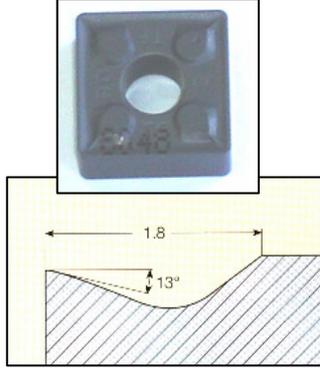
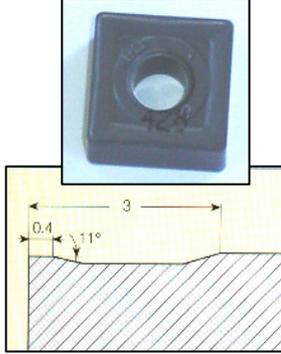
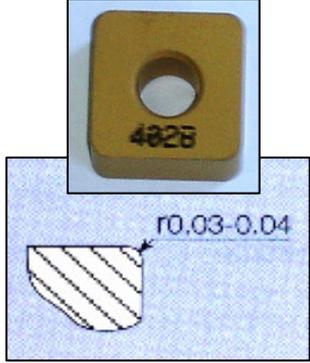
			
	SNMG 120408-TF IC8048 (Teste 01)	SNMG 120408 IC428 (Teste 02)	SNMA 120416K IC4028 (Teste 03)
Classe ISSO	K10	K05	K10
Quebra cavaco	TF – Aresta com arredondamento	Standard – Aresta com arredondamento e fase plana	Sem quebra cavaco. Aresta com arredondamento.
Cobertura	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃) Nitreto de Titânio (TiN) Carboneto de Titânio (TiC)	Óxido de Alumínio (Al ₂ O ₃) Carboneto de Titânio (TiC)	Nitreto de titânio (TiN) Óxido de alumínio (Al ₂ O ₃) Carbonitreto de titânio (TiCN)

Tabela 4.4 – Parâmetros de corte recomendados pelo fabricante (Iscar Ltd., 2007).

	SNMG 120408-TF C8048 (Teste 01)	SNMG 120408 C428 (Teste 02)	SNMA 120416K IC4028 (Teste 03)
Velocidade de corte (m/min)	120 – 160	140 – 250	140 – 250
Avanço (mm/volta)	Max. 0,50	Max. 0,50	Max. 0,50
Prof. de corte (mm)	1,0 – 4,0	1,0 – 5,0	1,0 – 5,0

As buchas de ferro fundido não foram desbastadas previamente. Devido à superfície irregular do corpo de prova fundido, o sobremetal usinado foi de 6 a 8 mm no diâmetro.

O porta-ferramenta utilizado nos testes é mostrado na Figura 4.7. O código ISO é PSSNR 2525M-12 e os ângulos principais estão listados abaixo.

Ângulo de posição principal: $X_r = 45^\circ$

Ângulo de ponta: $E_r = 90^\circ$

Ângulo de inclinação: $\gamma_s = -5,5^\circ$

Ângulo de folga: $\alpha_0 = -5,5^\circ$

Ângulo de cunha: $\beta_0 = 90^\circ$

Ângulo de saída: $\gamma_0 = -5,5^\circ$

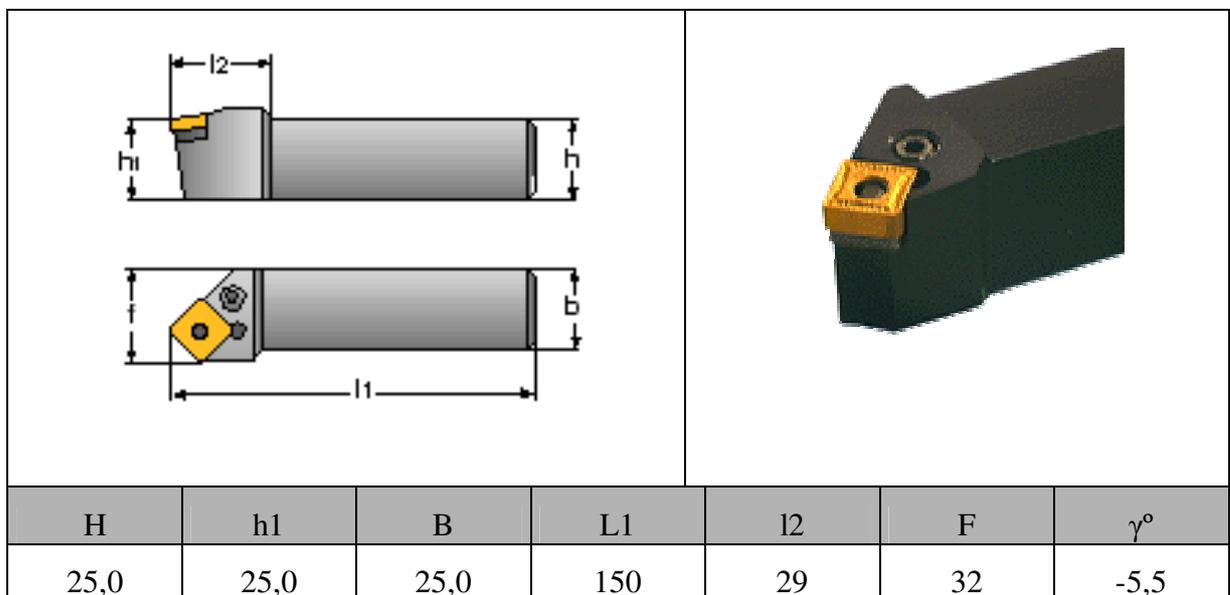


Figura 4.7 – Porta ferramenta utilizado no teste.

4.3 – Fluídos de Corte

Todos os testes foram realizados com fluído de corte de nome comercial Plantocool MH 2002 fornecido pela Fuchs. Segundo o fabricante, este óleo pertence a uma nova geração de fluídos de corte solúveis isentos de óleo mineral, possuindo em sua formulação aditivos especiais com excelentes propriedades lubrificantes. Este produto é aplicado em operações severas de usinagem. Devido à preocupação com o meio ambiente este produto após

separação da fase oleosa e de um tratamento biológico, o efluente conterá somente substâncias inofensivas, pois não se utiliza nitrito, biocidas fenólicos ou a base de cloro, cianeto ou metais pesados, butilglicol, enxofre, fósforo, nem aditivos a base de chumbo, bário ou zinco. O refrigerante foi aplicado numa diluição de 6% em água.

Segue na Tabela 4.5 algumas características do produto. Os valores apresentados são para solução feita com água de torneira com PH próximo a 7.

Tabela 4.5 – Características do fluido de corte (Catálogo Fuchs, 1997).

TESTES	MÉTODOS	CARACTERÍSTICA
Densidade a 20°C	ASTM D1298	1,0 g/cm ³
PH da emulsão a 3% em água	MR 125	9,3
Aspecto da emulsão, 3% em água (15 h min.)	MR 079	Leitosa
Teste de corrosão BOSH, GG25, a 3%	DIN 51 360-2	Sem corrosão
Estabilidade da emulsão a 10% (mín 15 h)	MR 015	Estável
Estabilidade do produto a 40/4°C (min 15 h)	MR 017	Estável
Fator de refração	MR 044	1,0

4.4 – Equipamentos Utilizados

Os testes foram realizados num torno mecânico do fabricante Romi dedicado com potência de 30CV equipado com comando numérico computadorizado (CNC). Algumas alterações foram feitas pela Mahle Máquinas a fim de adaptar a máquina para as necessidades de produção.

Tentando eliminar o gargalo na operação e aumentar a produtividade, fez-se um dispositivo para fixação de três portas ferramentas conforme Figura 4.8 a fim de diminuir o tempo de usinagem de cada bucha. Dessa maneira, cada suporte usina aproximadamente 65 mm. Com um relógio comparador alinha-se os três suportes a fim de garantir o mesmo diâmetro da peça usinada.

Inicialmente, a ferramenta em avanço rápido aproxima-se da peça e em seguida em avanço lento (0,15 mm/volta) mergulha até o diâmetro final. Então inicia-se o torneamento

logitudinal com avanço de 0,4 mm/volta. Nas duas operações é mantida a mesma velocidade de corte do torneamento logitudinal.

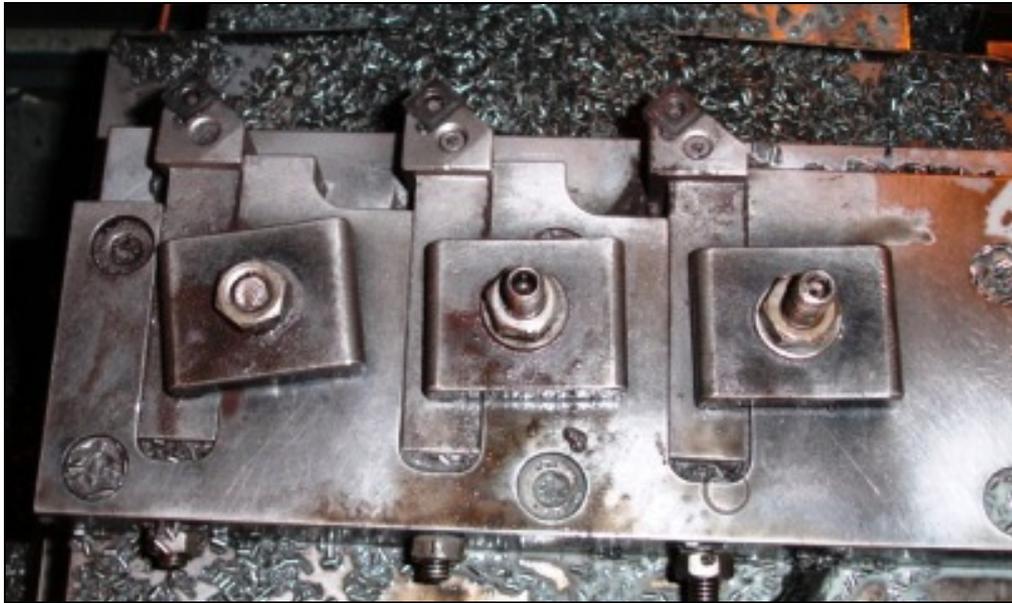


Figura 4.8 – Dispositivo de fixação dos porta ferramentas.

A fixação das buchas é feita mecanicamente por castanhas expansivas conforme figura 4.9. São três castanhas na extremidade direita e três na extremidade esquerda da árvore. O contraponto não auxilia na fixação, sua função é garantir uma maior rigidez para o sistema. O Refrigerante é jorrado em abundância na forma de chuveirinho ao longo de todo o corpo de prova.



Figura 4.9 – Dispositivo de fixação das camisas.

O desgaste de flanco foi medido num microscópio ótico tridimensional de medidas (Figura 4.10), e o diâmetro torneado foi medido por um micrômetro Mitutoyo analógico.



Figura 4.10 – Microscópio ótico tridimensional.

4.5 – Metodologia

Na usinagem das buchas de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio a rugosidade não é uma variável crítica, pois a aplicação é de desbaste e a tolerância dimensional é aberta ($\varnothing_{\text{Nominal}}^{+0,5}$ mm). Dessa forma, a rugosidade não foi considerada na análise de fim de vida da ferramenta. Estabeleceu-se para critério de troca o desgaste de entalhe máximo de 1 mm. No raio da ponta de corte percebe-se um desgaste pequeno, pois nesse ponto onde a profundidade de corte na peça é máxima, o corpo de prova está livre de impurezas (sílica, inclusões) e com uma dureza baixa. A carepa apresenta características de usinagem diferentes do restante do material devido à sílica diluída na camada periférica do corpo de prova gerando nas pastilhas um desgaste excessivo. Devido ao tratamento térmico a que é submetido os corpos de prova, toda camada coquilhada que se forma após a fundição é decomposta em ferrita e grafita.

Os parâmetros de corte usados para teste são apresentados na Tabela 4.6. Os parâmetros foram definidos de acordo com as características dos insertos e a composição química do corpo de prova. Os insertos IC8048, IC428 e IC4028 foram testados visando avaliar a quantidade de peças produzidas, a influência do refrigerante na vida da ferramenta e nos mecanismos de desgaste dos insertos, as forças de corte e a potência necessária.

Tabela 4.6 – Parâmetros de corte utilizados nos ensaios.

	SNMG 120408-TF C8048 (Ensaio 01)	SNMG 120408 C428 (Ensaio 02)	SNMA 120408K IC4028 (Ensaio 03)
Velocidade de corte (m/min)	100	150	150
Avanço (mm/volta)	0,4	0,4	0,4
Profundidade de corte (mm)	4	4	4

4.6 - Formas do Cavaco

A análise do cavaco pode apresentar muitas características inerentes a usinagem. Cavacos curtos são característicos de materiais frágeis enquanto cavacos longos para materiais tenazes. A análise visual da cor do cavaco é um indicativo do fim de vida da ferramenta. A rugosidade maior ou menor na parte de traz do cavaco mostra se este foi gerado por uma ferramenta mais ou menos positiva. Amostras de cavacos produzidas durante a realização dos testes de vida da ferramenta foram coletadas para posteriores análises e classificação.

4.7 – Forças e Potência de Corte

A avaliação das forças que agem na superfície de corte e na ferramenta são importantes para conhecer previamente a potência requerida e a ferramenta adequada para a operação a fim de prevenir vibrações garantindo a robustez necessária para a operação.

O cálculo da força e potência de corte para cada inserto testado foram feitos utilizando um software do fabricante Iscar e outro do fabricante Kenametal. Teoricamente, a força e a potência de corte foram calculadas de acordo com as equações de Kienzle apresentadas no capítulo 3.

Capítulo 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo será caracterizado o sistema tribológico e apresentado os resultados e as discussões sobre o comportamento das ferramentas de metal duro no que tange a classe de metal duro, o revestimento da ferramenta. Será mostrado um breve relato sobre a preparação da aresta de corte no torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio. Os ensaios foram realizados a seco e com refrigeração a fim de avaliar a influência dessa variável na vida útil e na forma de desgaste das ferramentas. Os seguintes critérios foram avaliados: Vida da ferramenta, formas e mecanismos de desgaste, formas do cavaco e influência da refrigeração na vida da ferramenta.

5.1 – Caracterização do Sistema Tribológico

A caracterização do sistema tribológico para usinagem de buchas de ferro fundido nodular com nióbio se faz necessária para contribuir no entendimento do desgaste dos insertos de metal duro testados. O desgaste devido à abrasão ocorrido nas ferramentas de corte depende dos tipos, tamanhos e concentrações das partículas duras da peça a ser usinada e de pequenos fragmentos removidos da própria ferramenta. Os parâmetros de corte também exercem influência nestes resultados.

A operação avaliada é de torneamento utilizando insertos de metal duro da classe ISO K10 (C+WC). Para o inserto IC8048 utilizou-se os seguintes parâmetros de corte: Velocidade de corte de 100 m/min, avanço de 0,4 mm/volta e profundidade de corte de 4 mm. Para os insertos IC428 e IC4028 a velocidade de corte foi de 150 m/min, avanço de 0,4 mm/volta e profundidade de corte de 4 mm.

O inserto IC8048 apresenta tripla cobertura sendo a inferior de carboneto de titânio (TiC), camada intermediária de nitreto de titânio (TiN) e camada superior de óxido de alumínio (Al_2O_3). O inserto IC428 apresenta dupla cobertura sendo a inferior de carboneto de titânio (TiC) e a superior de óxido de alumínio (Al_2O_3). O inserto IC4028 com tripla camada de cobertura sendo a inferior de carbonitreto de titânio (TiCN), a intermediária de óxido de alumínio (Al_2O_3) e a superior de nitreto de titânio (TiC). As durezas dessas coberturas são:

- Carboneto de titânio – 3300 HV
- Nitreto de titânio – 2300 HV
- Carbonitreto de titânio – 3000 HV
- Óxido de alumínio – 2700 HV

A peça usinada é de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio. O nióbio forma carbonetos diluídos em toda matriz ferrítica com dureza de 2400 HV e tamanho variando de 10 a 20 μm . A camada externa das buchas de ferro fundido apresenta numa profundidade aproximada de 0,5 mm impurezas de sílica proveniente das coquilhas. A dureza da sílica é de aproximadamente 850 HV segundo Samuels (2006).

5.2 – Força e Potência de Corte

O conhecimento das forças que atuam na aresta de corte é necessário para determinação da potência de corte e é um parâmetro indicativo da usinabilidade do material e também utilizado para controle do processo. A força de usinagem exerce influência sobre os mecanismos e processos de desgaste, sendo que sob determinadas condições de corte pode ser responsável diretamente pelo colapso da ferramenta.

A força de corte e a potência requerida foram calculadas teoricamente de acordo com o modelo de Kienzle apresentado no capítulo 3 e também utilizando software dos fabricantes Iscar Ltd. e Kennametal Inc., conforme mostrado na Tabela 5.1.

Tabela 5.1: Força e potência de corte.

	IC8048			IC428			IC4028		
	Kienzle	Iscar	Kenametal	Kienzle	Iscar	Kenametal	Kienzle	Iscar	Kenametal
Força de corte (N)	2.295	2.385	1.704	2.370	2.466	1.704	2.784	2.909	1.704
Potência (kW)	3,8	3,8	3,6	5,9	5,9	5,3	6,9	7,0	5,3

É usual o uso de insertos negativos sem quebra cavacos com raio de arredondamento ou chanfro na aresta de corte para garantir maior robustez na usinagem de ferro fundido. Os ângulos negativos de saída e de inclinação aumentam os esforços de corte podendo ocasionar vibrações indesejáveis na ferramenta ou mesmo impossibilitar o corte se a máquina não possuir potência suficiente.

Analisando a tabela 5.1 percebe-se que a potência de corte cresce respectivamente para os insertos IC8048, IC428 e IC4028. Sendo assim, pode-se observar que quanto menor o ângulo de saída maior a potência exigida. Arestas de corte mais robustas também exigem maiores potências de usinagem. Estas constatações estão de acordo com a literatura (Diniz et al., 2006, Ferraresi, 1977 e Trent, 1991).

Neste trabalho os ensaios foram realizados utilizando três ferramentas operando simultaneamente visando reduzir o tempo de usinagem do corpo de prova. Os valores apresentados na Tabela 5.1 são para usinagem com uma única ferramenta. O motor da máquina possui 30 CV (23 kW) de potência. A usinagem com o inserto IC4028 utilizou quase toda potência disponível na máquina. Analisando os números da Tabela 5.1 percebe-se que o cálculo preliminar da potência requerida é necessário quando se esta buscando otimizar o processo de usinagem. Por uma diferença pequena quase não foi possível realizar os ensaios com o inserto IC4028.

5.3 – Vida das Ferramentas

Os ensaios foram realizados em uma operação de torneamento de desbaste, sendo assim, a rugosidade da peça usinada não foi considerada. Nos ensaios a máxima variação dimensional permitida no diâmetro foi de +0,5 mm. Devido ao pequeno desgaste observado no raio do inserto, em nenhum caso analisado percebeu-se variação maior que o limite máximo estabelecido para o diâmetro do corpo de prova.

Nos ensaios realizados com refrigeração foi utilizado como critério para fim de vida da ferramenta um desgaste de entalhe (VB_N) máximo de 1 mm. Nos ensaios sem refrigeração usinou-se a mesma quantidade de peças dos ensaios com refrigeração não considerando o limite máximo de desgaste. O objetivo foi comparar para um mesmo comprimento usinado o desgaste da ferramenta e a influência do fluido de corte no desgaste da ferramenta.

Segundo Diniz et al. (2006), dentre os parâmetros de corte que mais influenciam o desgaste das ferramentas, tem-se a velocidade de corte seguida do avanço e por último, a profundidade de corte. Estes resultados foram comprovados por da Silva (2002), em seu trabalho sobre usinagem de ferro fundido nodular.

Nos testes realizados nesse trabalho os parâmetros de corte permaneceram constantes, pois, a máquina usada é dedicada, sendo limitado variações na rotação. Dessa forma optou-se por trabalhar com parâmetros de corte próximo aos valores fornecidos pelo fabricante da ferramenta, analisando a quantidade de peças produzidas por aresta para cada tipo de inserto. Não alterou-se o avanço para não comprometer a produtividade do setor. Dessa forma não se dedicou atenção para a influência das principais variáveis de corte na vida da ferramenta.

A Figura 5.1 mostra para cada inserto a vida da ferramenta na usinagem com refrigeração usando o critério de fim de vida definido anteriormente (max. $VB_n = 1,0$ mm). Considerou-se o comprimento linear de avanço total usinado. Esse total foi obtido somando os comprimentos de avanço usinados em cada corpo de prova.

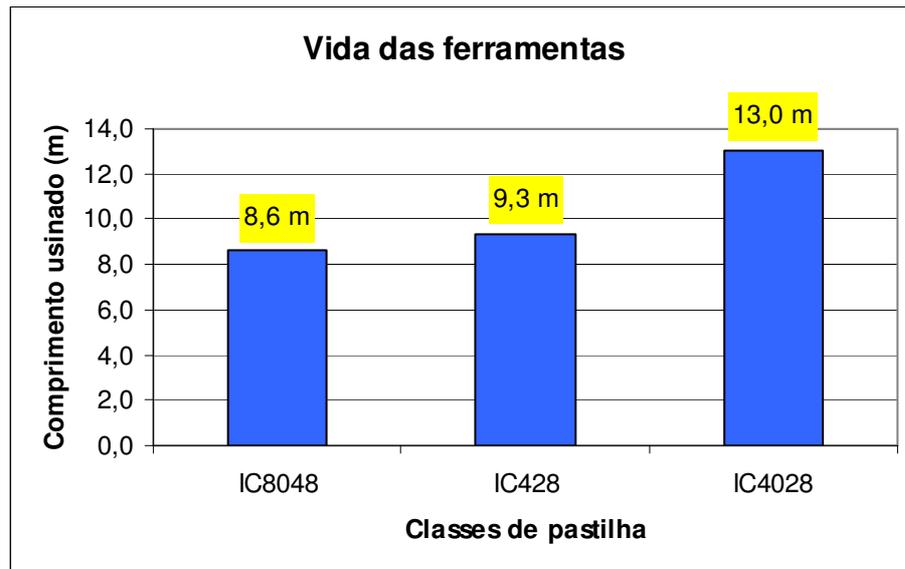


Figura 5.1 – Vida das ferramentas - Usinagem com refrigeração.

O inserto IC8048 da classe ISO K10 apresenta tripla camada de cobertura (TiC, TiN e Al_2O_3) e o inserto IC428 da classe ISO K05 apresenta dupla camada de cobertura (TiC e Al_2O_3). Em ambos a última camada é óxido de alumínio. Segundo Diniz et al. (2006) e Graham (1994), esta cobertura apresenta um excelente desempenho na usinagem de ferro fundido. Ela minimiza problemas como desgaste de cratera e de flanco, pois, é um excelente isolante térmico e apresenta uma boa resistência à oxidação. Enquanto que a ferramenta IC4028 da classe ISO K10 com cobertura (TiCN, Al_2O_3 e TiN) a camada de revestimento superior não é a mais indicada para torneamento de ferro fundido.

Estas propriedades não foram suficientes para garantir um bom desempenho dos insertos IC8048 e IC428. A Figura 5.2 mostra que o inserto IC4028 apresentou resultado melhor que os insertos com óxido de alumínio em sua camada exterior. O número sobre as colunas mostra o comprimento de avanço que cada ferramenta torneou. O mesmo comprimento foi torneado com e sem refrigeração a fim de verificar a diferença no desgaste da ferramenta.

Segundo Teeter (1994) esse comportamento pode ser atribuído a presença do revestimento externo de nitrato de titânio (TiN) na pastilha que garante um menor coeficiente de atrito, e às diferenças na geometria do quebra cavaco e da preparação da aresta de corte. Este mesmo comportamento foi retratado por da Silva (2002), na usinagem de ferro fundido nodular.

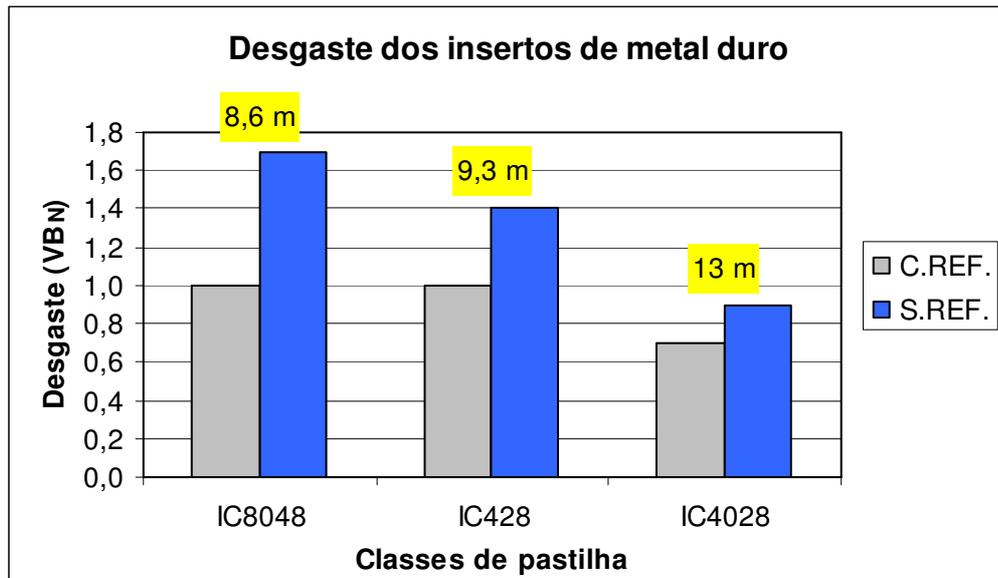


Figura 5.2 – Influência da refrigeração no desgaste dos insertos

Segundo Rech (2006), atualmente a usinagem demanda grandes aperfeiçoamentos no projeto de ferramentas de corte a exemplo de novos substratos e novas coberturas. Outra variável que tem uma importância relevante na confiabilidade e desempenho da ferramenta são os procedimentos de manufatura, especialmente a microgeometria (rugosidade, preparação da aresta de corte, etc). Arredondamento de aresta, chanfro e uma pequena fase plana na superfície de saída reforçando a aresta de corte são preparações usuais utilizadas atualmente por todos os fabricantes de ferramentas.

Rech (2006) concluiu em sua revisão bibliográfica que o raio da aresta em uma ferramenta de corte afeta a formação do cavaco. Ele também altera mais a força de avanço do que a força de corte, e afeta muito a área de contato ferramenta-cavaco alterando a forma do cavaco. Esse fenômeno parece levar a pequenas variações nos campos térmicos e importantes variações nas tensões mecânicas ao redor das arestas, especialmente na camada de revestimento. Algumas preparações de aresta de corte mostram que é possível obter melhorias expressivas na resistência ao desgaste nas aplicações de desbaste.

Analisando-se a preparação de aresta das ferramentas testadas (Figura 5.3), observa-se que o inserto IC4028 apresenta a aresta mais resistente que os demais insertos. O arredondamento da aresta apresenta um raio maior reduzindo a fragilidade. A ausência de ângulo de saída colabora para melhorar a robustez da aresta. O inserto IC4028 também apresenta maior raio de ponta ($r_e = 1,6 \text{ mm}$) em comparação com outros insertos ($r_e = 0,8 \text{ mm}$). Raios de ponta maiores implicam em maior área de dissipação de calor e

consequentemente maior vida da ferramenta apesar de aumentar também as forças de corte aumentando a tendência de vibração.

Na análise dos resultados desse trabalho pode-se perceber que o maior raio de ponta do inserto IC4028 não foi uma variável a ser considerada pois, o desgaste no raio da ponta foi pequeno comparado com o desgaste de entalhe das ferramentas.

O ângulo de 11° na superfície de saída do inserto IC428 deixa a aresta mais frágil que o inserto IC4028. Esta fragilidade é parcialmente corrigida pela fase plana de 0,4 mm. O raio de arredondamento da aresta de corte de $10\ \mu\text{m}$ colabora para melhorar a resistência a lascamentos garantindo uma maior robustez da aresta.

O inserto IC8048 apresenta a aresta mais frágil quando comparado com os demais insertos testados. Sua aresta apresenta um arredondamento com raio aproximado de $10\ \mu\text{m}$ e não apresenta fase plana. Devido a essas características geométricas é a ferramenta que menos exige potência da máquina mas, a vida fica comprometida quando comparado com os demais insertos testados.

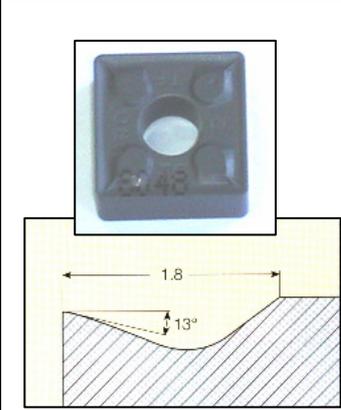
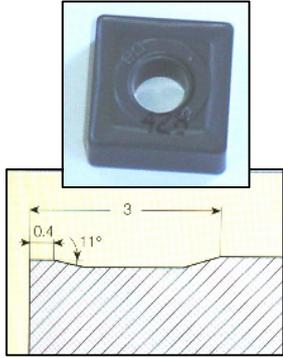
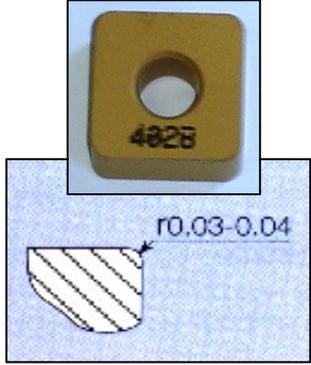
			
	SNMG 120408-TF IC8048 (Teste 01)	SNMG 120408 IC428 (Teste 02)	SNMA 120416K IC4028 (Teste 03)
Preparação da aresta	- Aresta arredondada, raio aproximado de $10\ \mu\text{m}$	- Aresta arredondada, raio aproximado de $10\ \mu\text{m}$ - Fase plana	- Aresta arredondada, raio aproximado de $40\ \mu\text{m}$

Figura 5.3 – Geometria das ferramentas de metal duro.

Analisando-se a vida das ferramentas percebe-se que os melhores resultados foram obtidos respectivamente com as ferramentas de aresta mais resistente. Pode-se então salientar que essa variável foi muito importante no desempenho da ferramenta. O inserto IC8048 e IC4028 são ambos de metal duro ISO K10 e apresentaram resultados bem distintos. Logo, pode-se afirmar que a preparação da aresta foi tão importante quanto a cobertura no desempenho da ferramenta na usinagem de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio.

5.4 – Análise do Desgaste das Ferramentas – Usinagem com Refrigeração

Nas aplicações de desbaste o uso de fluído de corte pode aumentar a vida da ferramenta e remover da área de trabalho o grande volume de cavaco gerado durante a usinagem. Devido ao poder lubrificante dos óleos, pode-se reduzir a geração de calor gerado pelo atrito entre cavaco-ferramenta e ferramenta-peça garantindo assim uma maior vida para a ferramenta. Vários tipos de fluídos de corte podem ser utilizados. A seleção correta depende de analisar alguns fatores tais como, material da peça, material da ferramenta e a severidade e tipo da operação de usinagem, (Trent, 1991).

Para análise conclusiva dos mecanismos de desgaste presentes nas ferramentas ensaiadas seria necessário que as ferramentas fossem analisadas no microscópio eletrônico de varredura. Neste trabalho a análise foi feita utilizando apenas microscopia ótica.

As Figuras 5.4 a 5.10 mostram as regiões onde aconteceram os maiores desgaste para os insertos testados na usinagem do ferro fundido nodular com nióbio. As nomenclaturas adotadas estão de acordo com a norma ISO 3685 (1993).

As Figuras 5.4 e 5.5 apresentam respectivamente a superfície de saída e superfície principal de folga do inserto IC8048 trabalhando com refrigeração à velocidade de corte constante de 100 m/min, avanço 0,40 mm/volta e profundidade de corte de 4 mm.

A geometria do quebra cavaco apresenta ângulo efetivo de saída maior para o inserto IC8048 em relação aos demais insertos testados (IC428 e IC4028). Isto faz com que a potência de usinagem requerida neste caso seja menor. Essa característica implica em

menores forças de corte e menores temperatura, sendo uma característica desejável para a usinagem. Observando a superfície de saída excetuando o ponto limite entre o cavaco e a aresta de corte percebe-se um aspecto brilhante sem riscos aparentes. Nesta região o pequeno desgaste de cratera formado foi provavelmente devido ao mecanismos de difusão. A figura 5.5 mostra no raio da ferramenta uma pequena aresta postiça. Logo o mecanismo de desgaste de adesão também contribuirá para acelerar o desgaste da ferramenta.



Figura 5.4 – Superfície de saída - Inserto de metal duro IC8048 (ISO K10).

Usinagem com refrigeração (41X).

Lucas et al. (2005) mostra em seu trabalho que na usinagem de ferro fundido nodular GGG42 para velocidades de até 80 m/min têm se formação de aresta postiça. A extensão da aresta postiça é de aproximadamente 0,5 mm sobre a face da ferramenta e atinge uma altura máxima de 0,25 mm. Nos ensaios realizados nesse trabalho pode-se perceber a aderência de material na superfície de saída principalmente no raio da ponta da ferramenta.

O material testado, ferro fundido nodular ferritizado com nióbio, apresenta entre outros carbonetos o carboneto de nióbio e sílica na camada externa. Esses materiais provocaram um grande desgaste de entalhe ($VB_N=1,0$ mm) conforme observado nas Figuras 5.4 e 5.5.

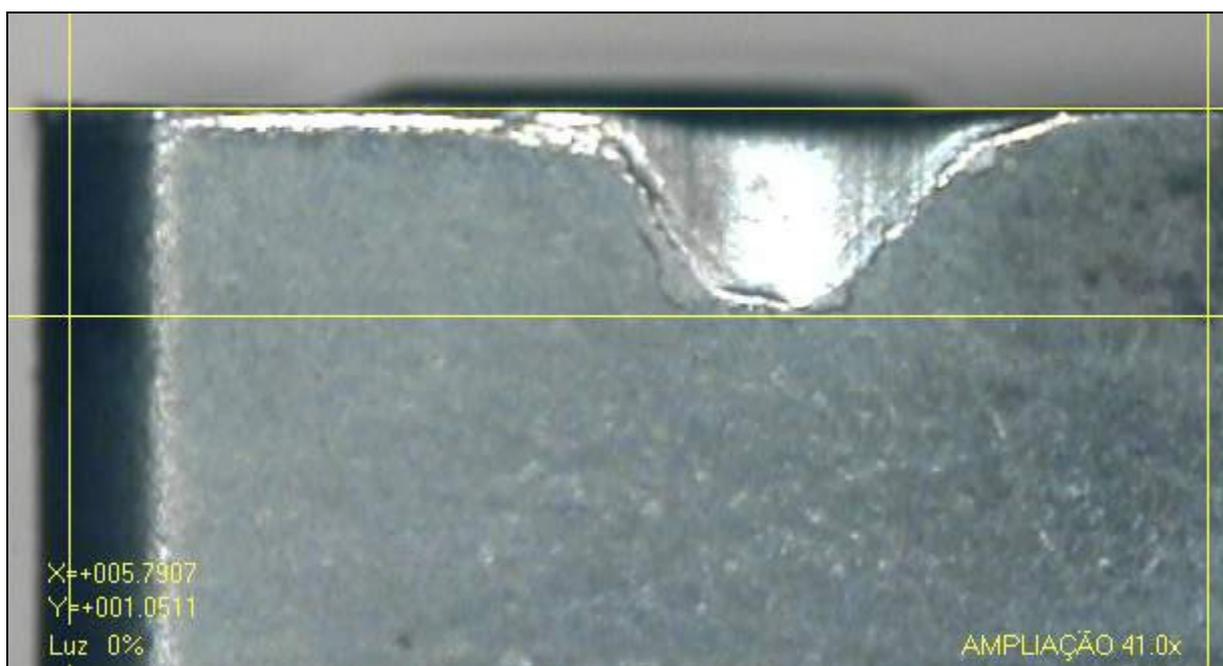


Figura 5.5 – Superfície de folga - Inseto de metal duro IC8048 (ISO K10).
Usinagem com refrigeração (41X).

Para o inserto IC8048 o desgaste de flanco é muito pequeno. Quando medido com uma lupa graduada verifica-se que VB_B é aproximadamente 0,15 mm. Neste caso o principal mecanismo de desgaste que está agindo no desgaste de flanco pode ser abrasão devido aos carbonetos de nióbio diluídos na matriz ferrítica. Machado et al. (2000) afirma que o mecanismo de desgaste por abrasão torna-se importante principalmente na usinagem de alguns materiais que contêm altas concentrações de inclusões não metálicas duras, como carbetos, óxidos e silicatos, que possuem uma forte capacidade de abrasão.

Analisando a Figura 5.6 pode-se concluir que o principal mecanismo de desgaste que está contribuindo para o desgaste de entalhe no inserto IC8048 é a abrasão. A superfície com riscos na vertical evidencia a atuação do mecanismo de desgaste de abrasão. Os carbonetos de nióbio e a sílica que são altamente abrasivos contribuem para atuação desse mecanismo. Percebe-se também lascamentos na superfície de folga que podem ser provocados pelos carbonetos de nióbio diluídos na matriz ferrítica ou pela sílica.

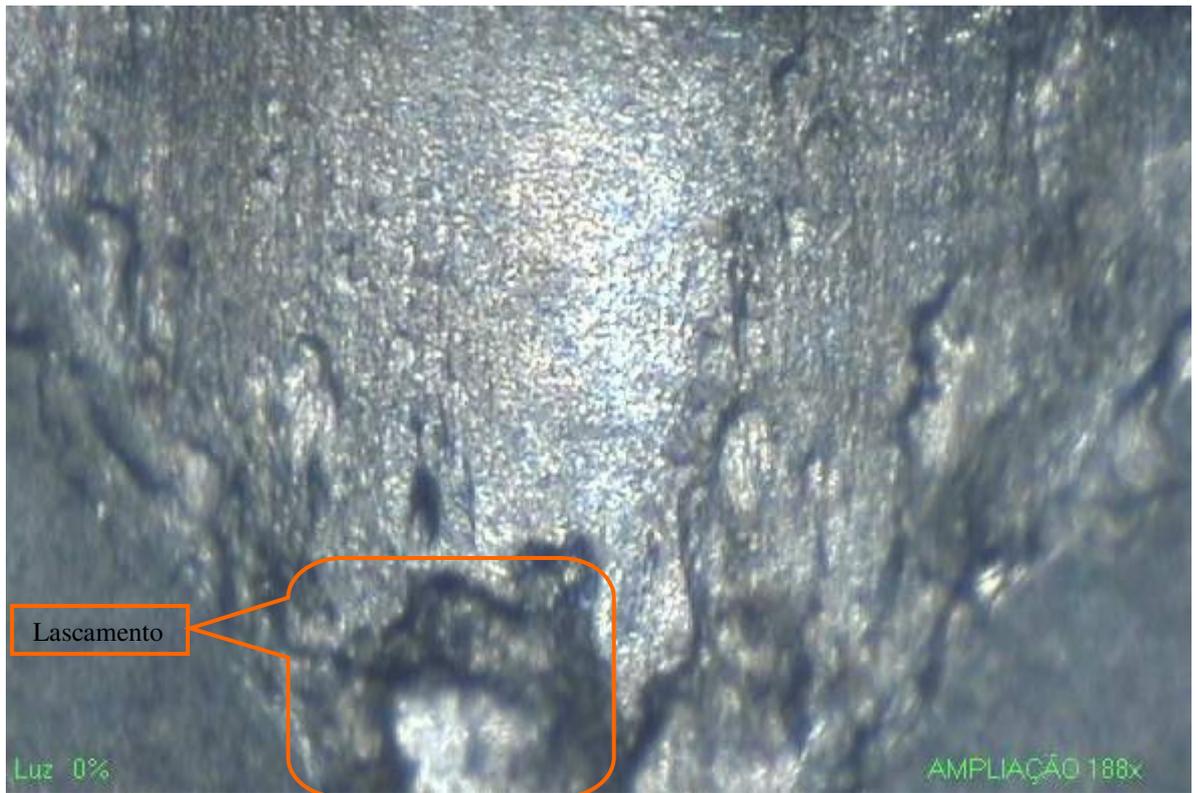


Figura 5.6 – Inserto de metal duro IC8048 (ISO K10).
Usinagem com refrigeração (188X).

As Figuras 5.7 e 5.8 mostram respectivamente a superfície de saída e superfície principal de folga do inserto IC428 trabalhando refrigerado com os seguintes dados de corte: $V_c = 150$ m/min, $f = 0,40$ mm/volta e $a_p = 4$ mm. Este inserto apresenta uma aresta de corte mais robusta que o inserto IC8048 devido a fase plana presente, além do arredondamento de aresta.

Os grãos de carbonetos de nióbio diluídos na matriz ferrítica provocam lascamentos na superfície de saída, conforme mostrado na Figura 5.7. A fase plana reforçando a aresta implica numa maior força de corte acentuando ainda mais o mecanismo de abrasão provocado pelos carbonetos.



Figura 5.7 – Superfície de saída - Inserto de metal duro IC428 (ISO K05).
Usinagem com refrigeração (41X).

Analisando-se a Figura 5.8, observa-se que na região do raio de ponta o desgaste foi muito pequeno quando comparado com o desgaste na região do diâmetro externo do corpo de prova. Novamente percebe-se que o desgaste de entalhe ($VB_N=1,0$ mm) foi muito maior que o desgaste de flanco (VB_B). Mesmo fenômeno observado para a pastilha IC8048. No raio da pastilha pode-se perceber maior aderência de material. O mesmo mecanismo deve estar ocorrendo em toda a aresta de corte.

Os mesmos mecanismos de desgaste que atuaram no inserto IC8048 na superfície de saída e de folga devem estar presentes neste inserto. A superfície mais rugosa pode evidenciar que a abrasão é o principal mecanismo atuante no desgaste de entalhe. A sílica presente na superfície externa do corpo de prova novamente é a responsável por esse desgaste proeminente.

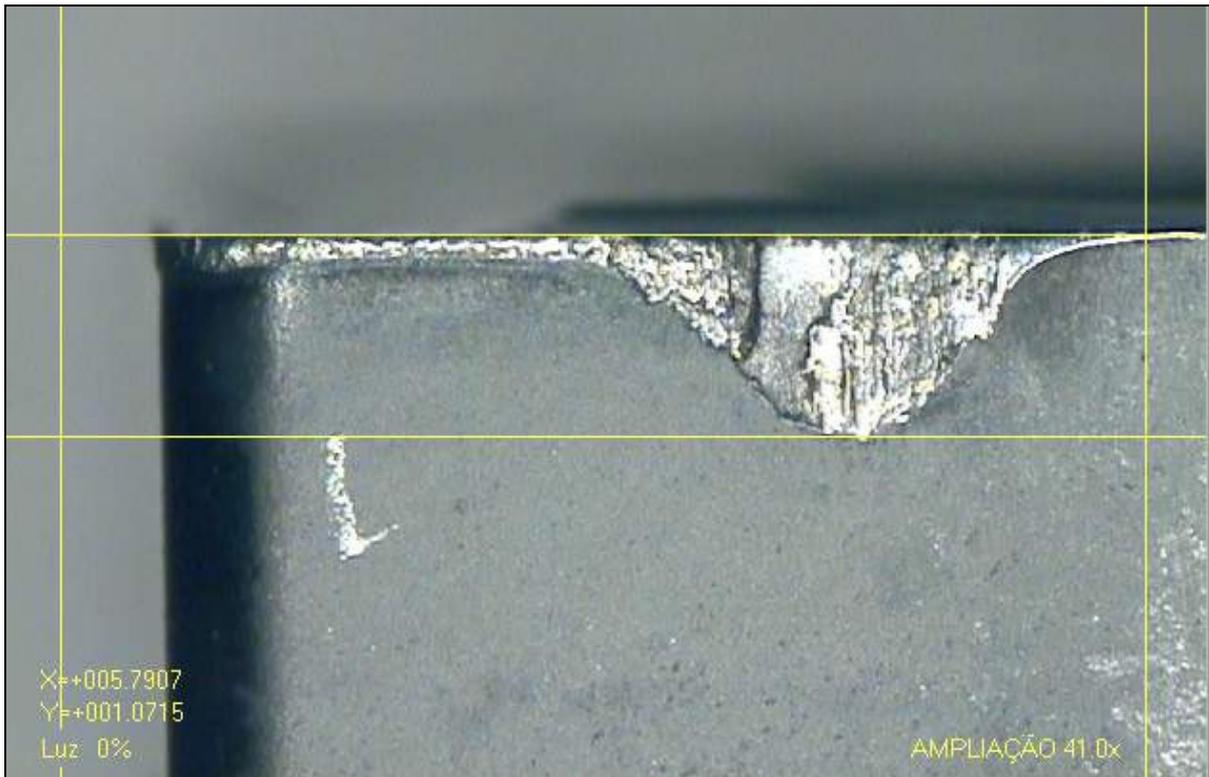


Figura 5.8 – Superfície de folga - Inserto de metal duro IC428 (ISO K05).
Usinagem com refrigeração (41X).

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram respectivamente a superfície de saída e principal de folga do inserto IC4028 trabalhando com refrigeração, $V_c = 150$ m/min, $f = 0,40$ mm/volta e $a_p = 4$ mm. Para este inserto percebe-se que o desgaste continua sendo mais acentuado na região onde usina o diâmetro externo do corpo de prova. A ausência de quebra cavaco e o maior arredondamento da aresta de corte contribui para maiores esforços de corte e consequentemente maiores temperaturas na região de corte. A cobertura externa de nitreto de titânio (TiN) garante um menor coeficiente de atrito para a saída de cavacos. A cobertura de óxido de alumínio logo abaixo assegura uma maior integridade térmica do substrato, aliada a uma preparação de aresta mais robusta e maior ângulo de cunha. Estas características garantem ao inserto IC4028 o melhor resultado para usinagem do ferro fundido nodular com nióbio. Na superfície de saída pode-se perceber pequenas crateras que provavelmente iniciou após ocorrência de pequenos lascamentos provocados pelos escorregamentos na superfície de saída dos carbonetos de nióbio diluídos no ferro fundido nodular.



Figura 5.9 – Superfície de saída - Inseto de metal duro IC4028 (ISO K10).

Usinagem com refrigeração (41X).

A Figura 5.10 mostra na superfície de folga uma região rugosa onde a abrasão pode ser o principal responsável pelo desgaste. Na região da aresta de corte onde se usina o diâmetro externo do corpo de prova a aparência lisa com sulcos na vertical dão indícios da ação de carbonetos e da sílica (SiO_2) presentes na periferia do corpo de prova provocando no inserto desgaste de entalhe. O mecanismo de abrasão deve ser o principal responsável pelo desgaste de entalhe.

Devido aos maiores esforços de cortes a que está sujeito o inserto IC4028, não foi possível usinar até o fim de vida pré estabelecido ($\text{max. VB}_N = 1,0 \text{ mm}$). Em duas tentativas anteriores a ferramenta quebrou. Dessa forma, conseguiu-se um bom resultado com este inserto mesmo sem atingir o critério de fim de vida estabelecido.

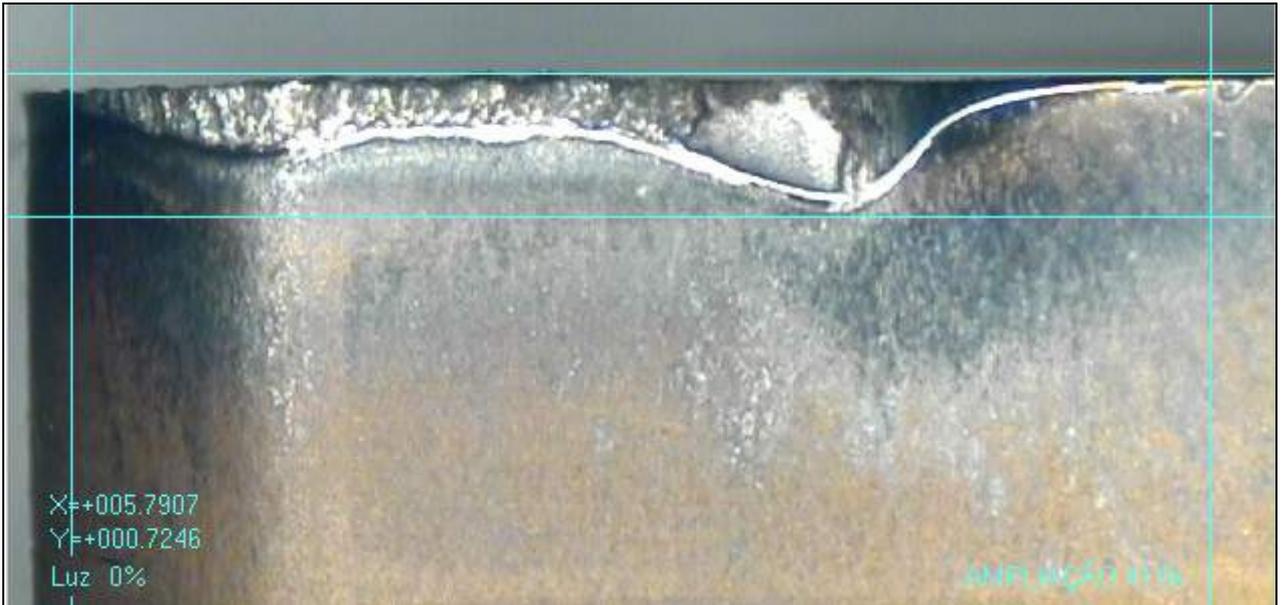


Figura 5.10 – Superfície de folga - Inseto de metal duro IC4028 (ISO K10).
Usinagem com refrigeração (41X).

5.5 – Análise do Desgaste das Ferramentas – Usinagem sem Refrigeração

A proteção ao meio ambiente assume cada vez maior importância nas técnicas de fabricação. Assim, os óleos de corte (refrigerante e/ou lubrificante) tendem a ser consumidos em casos estritamente necessários. Dentro das tendências atuais de controle cada vez mais rigorosos para garantir a produção sem causar danos ao meio ambiente, redução de custos operacionais e preservação da saúde do ser humano, o desenvolvimento de usinagem à seco se faz necessário.

Nos testes realizados nesse trabalho a tolerância dimensional não é uma variável crítica, pois, o objetivo é analisar o comportamento das ferramentas na aplicação de desbaste. O cavaco formado se apresenta na forma de pequenas vírgulas e em pó. As partículas menores são sugadas por um exaustor e as maiores arrastados por uma esteira magnética. Neste caso é interessante analisar o comportamento das mesmas ferramentas na usinagem sem refrigeração, pois, problemas dimensionais e de escoamento de cavaco inexistem.

A fim de comparar o desgaste da ferramenta trabalhando a seco e com refrigeração os testes realizados sem refrigeração não considerou o critério de fim de vida (max. $VB_N = 1,0$ mm). Foi usinado respectivamente as mesmas quantidades de peças usinadas com refrigeração e comparado o incremento no desgaste da ferramenta.

As Figuras 5.11 e 5.12 apresenta a superfície de saída e a superfície principal de folga do inserto IC8048 após usinagem sem refrigeração nas seguintes condições de corte: $V_c = 100$ m/min, $f = 0,4$ mm/volta e $a_p = 4$ mm.



Figura 5.11 – Superfície de saída - Inserto IC8048 (ISO K10).
Usinagem sem refrigeração (41X).

As mesmas conclusões sobre desgaste citadas para o inserto IC8048 trabalhando com refrigeração são aplicadas para o inserto IC8048 (Figura 5.12). Observa-se que para usinar a mesma quantidade de peças o desgaste de entalhe foi 0,7 mm maior, alcançando $VB_N = 1,7$ mm. Logo conclui-se que para o inserto IC8048 o refrigerante contribui de forma expressiva na redução do desgaste e na melhora da vida da ferramenta.

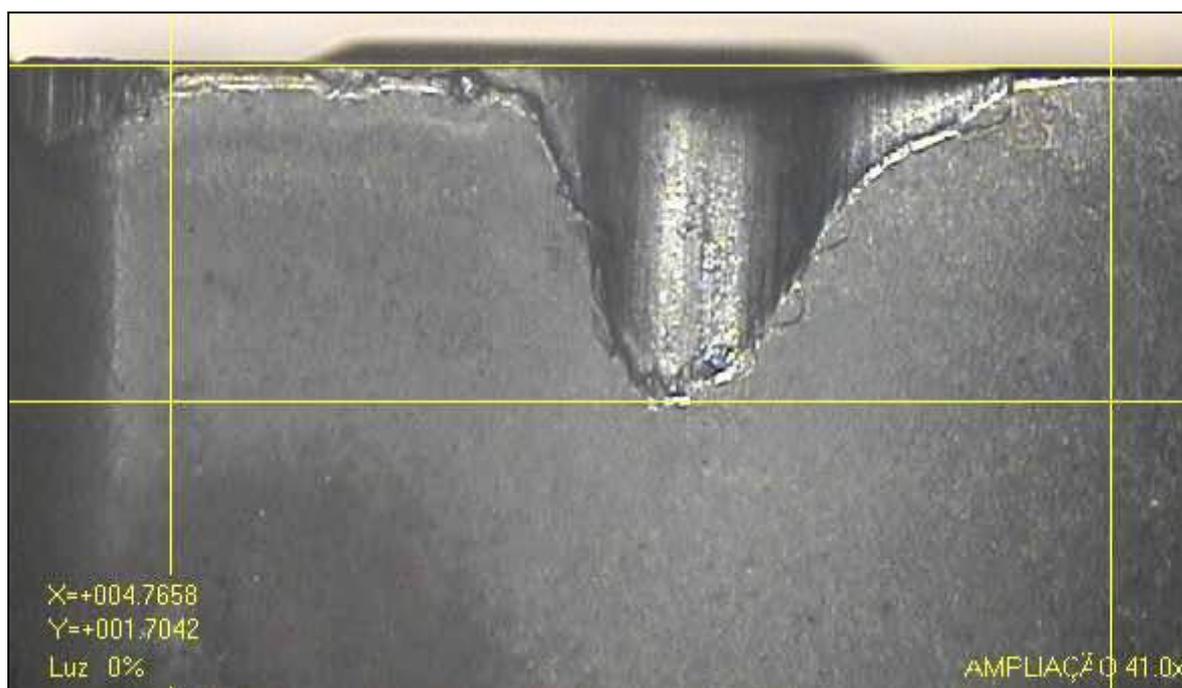


Figura 5.12 – Superfície de folga - Inserto de metal duro IC8048 (ISO K10).
Usinagem sem refrigeração (41X).

As Figuras 5.13 e 5.14 apresentam a superfície de saída e a superfície principal de folga do inserto IC428 após usinagem sem refrigeração com os seguintes dados de corte: $V_c = 150$ m/min, $f = 0,40$ mm/volta e $a_p = 4$ mm. As mesmas conclusões sobre desgaste citadas para o inserto IC428 trabalhando com refrigeração são aplicadas nesse caso. A falta de óleo refrigerante contribui para maior desgaste nas superfícies de saída e principal de folga. As lascas ficaram mais evidentes na usinagem sem refrigeração. A falta de refrigerante deve ter contribuído para aumentar a aderência do cavaco na superfície de saída.

Segundo Machado et al. (2005) quando se realiza um corte com uma ferramenta que apresenta aresta postiça, essa aresta é continuamente renovada. Quando a aresta postiça se desprende do inserto, grãos inteiros ou fragmentos destes são levados com o fluxo de cavaco. O autor afirma que esse fato é importante, principalmente na usinagem de ferro fundido cinzento, em que a aresta postiça de corte persiste sobre a superfície da ferramenta de corte em velocidades e avanços relativamente altos. A análise da Figura 5.13 sugere que a afirmação acima se aplica para a usinagem de ferro fundido nodular ferritizado com nióbio.

A ausência de fluido de corte aumentando o atrito cavaco/ferramenta somado com a fase plana na superfície de saída resultam em maiores forças de corte na superfície de saída do inserto IC428. Os lascamentos observados na Figura 5.13 evidenciam a ação de possíveis

inclusões no ferro fundido nodular ferritizado com nióbio. Essas inclusões são os carbonetos de nióbio diluídos em toda matriz ferrítica e a sílica (SiO_2) presente em toda camada periférica do corpo de prova. A ferramenta IC428 (ISO K05) pertence à uma classe mais dura de metal duro quando comparado com os demais inserts ensaiados. A maior fragilidade contribui para aparecimento de lascamentos na superfície de saída e superfície de folga (Figura 5.14).



Figura 5.13 – Superfície de saída - Inseto de metal duro IC428 (ISO K05).

Usinagem sem refrigeração (38X).

A Figura 5.14 apresenta na região do desgaste de entalhe uma região brilhante com riscos na vertical que pode caracterizar desgaste por abrasão e alguns lascamentos provocados pelos carbonetos de nióbio que são mais duros que a sílica presente na camada periférica do corpo de prova. Para a ferramenta IC428 a evidência de aderência na superfície de saída é maior quando comparado com a ferramenta IC8048. As características geométricas do quebra cavaco onde o ângulo efetivo de saída é menor para o inserto IC428 e as características da aresta de corte apresentando uma fase plana para reforço da aresta de corte contribui para que esse fenômeno aconteça.

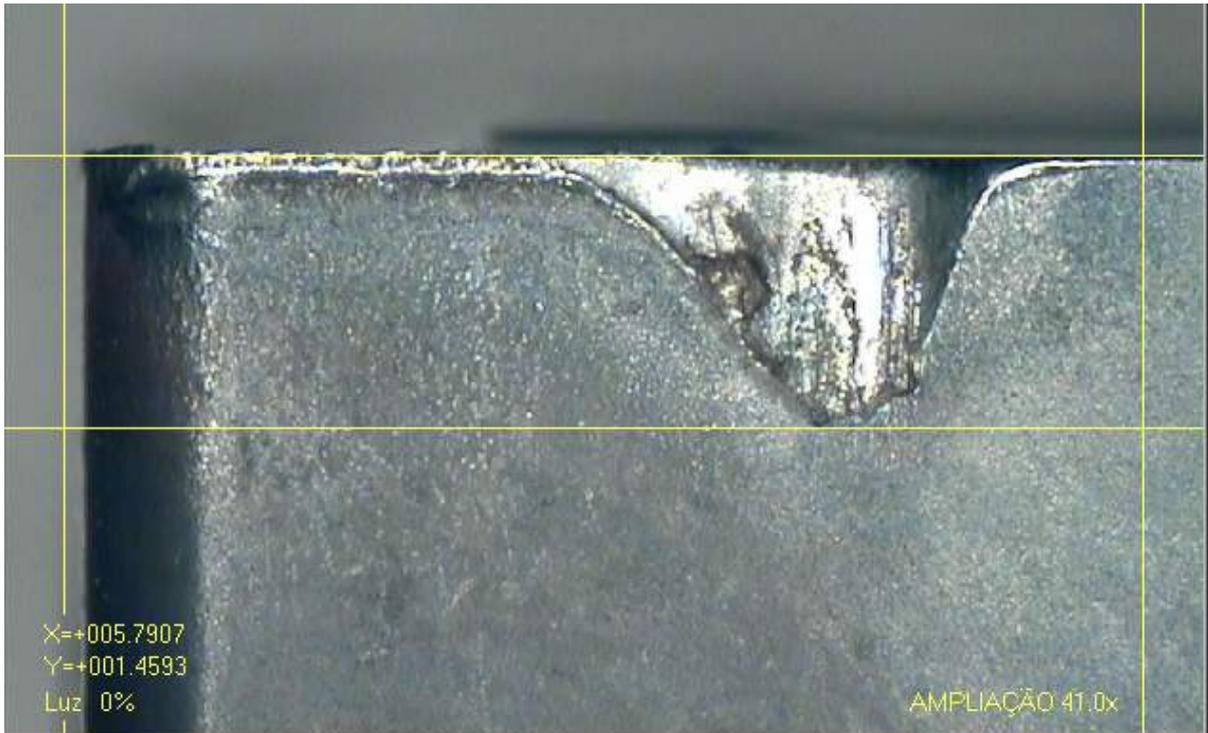


Figura 5.14 – Superfície de folga - Inserto de metal duro IC428 (ISO K05).

Usinagem sem refrigeração (41X).

As Figuras 5.15 e 5.16 apresentam respectivamente a superfície de saída e a superfície principal de folga do inserto IC4028 trabalhando com os seguintes dados de corte: $V_c=150$ m/min, $f=0,4$ mm/volta e $a_p= 4$ mm. A ausência de quebra cavaco faz com que essa ferramenta exija maior potência da máquina quando comparado com as demais ferramentas testadas. Percebe-se nitidamente que a ausência de refrigeração gerou uma região toda craterizada na superfície de saída da ferramenta que esteve em contato com o cavaco (Figura 5.15). Esse desgaste é provocado principalmente pelos carbonetos de nióbio diluídos em toda matriz ferrítica.

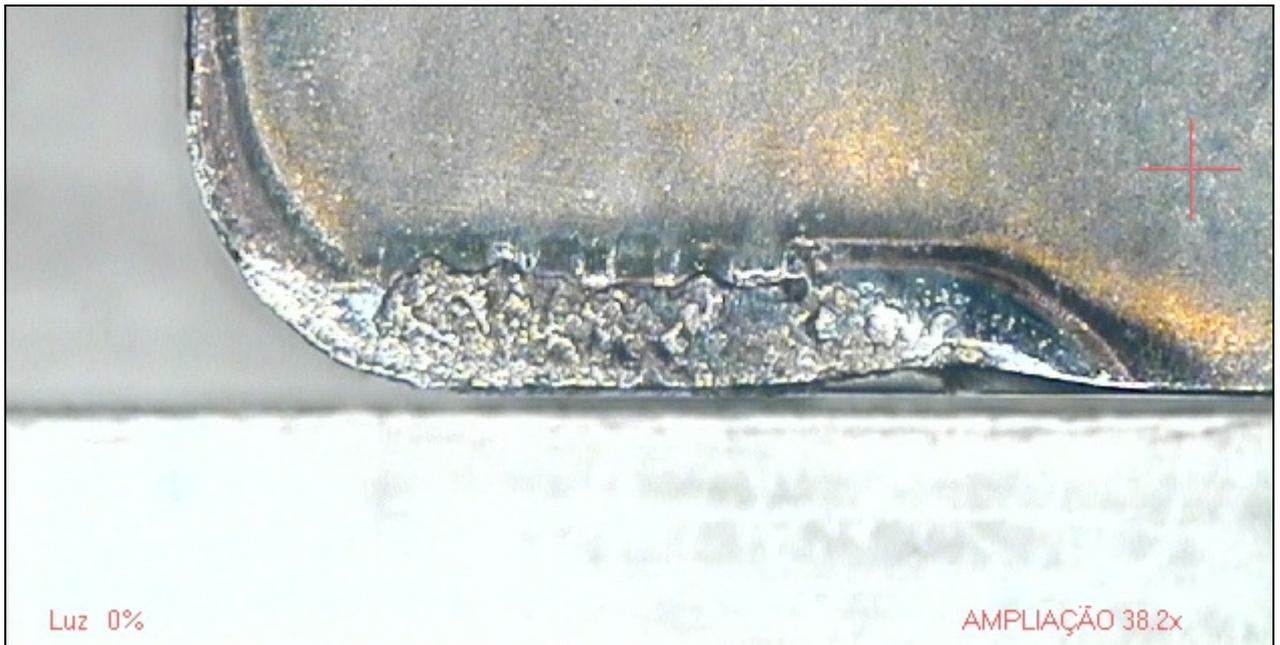


Figura 5.15 – Superfície de saída - Inseto de metal duro IC4028 (ISO K10).
Usinagem sem refrigeração (38X).

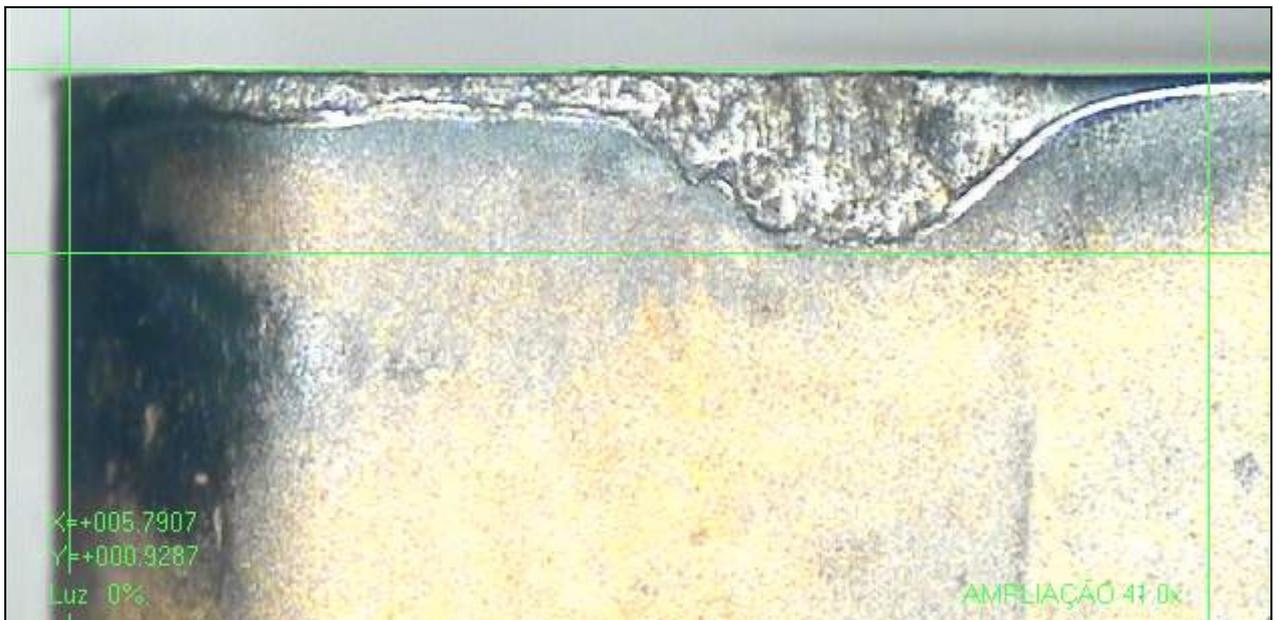


Figura 5.16 – Superfície de folga - Inseto de metal duro IC4028 (ISO K10).
Usinagem sem refrigeração (41X).

Também neste caso a região do inserto onde se usina o diâmetro máximo da camisa (profundidade de corte máxima) apresentou desgaste maior (Figura 5.16). Mesmo fenômeno observado nos testes realizados com os insertos IC8048 e IC428. Novamente percebe-se um pequeno desgaste de flanco que deve ser formado por abrasão e adesão devido principalmente

aos carbonetos de nióbio. O desgaste de entalhe pronunciado observado deve-se a abrasividade da sílica (SiO_2) presente em toda camada periférica do corpo de prova.

5.6 – Influência do Fluido de Corte no Desgaste das Ferramentas

Na usinagem do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio a presença do fluido na usinagem contribui de forma significativa para o aumento da vida da ferramenta. O desgaste de flanco (VB_B) para os três insertos testados foi pouco alterado quando se trabalhou com ou sem fluido. Já o desgaste de entalhe (VB_N) e a superfície de saída apresentaram resultados distintos trabalhando com ou sem refrigeração.

O desgaste de entalhe (VB_N) sofreu grande influência do uso do fluido de corte. A usinagem a seco provocou um maior desgaste de entalhe para as três ferramentas testadas torneando a mesma quantidade de peças com e sem refrigeração, mas a diferença percentual foi diferente para cada uma:

- IC8048 – Desgaste de entalhe 70% maior usinando sem refrigeração;
- IC428 – Desgaste de entalhe 40% maior usinando sem refrigeração;
- IC4028 – Desgaste de entalhe 28% maior usinando sem refrigeração.

A ausência do fluido aumenta o atrito entre a peça e a ferramenta aumentando também a temperatura na região usinada. O fluido lubrifica e refrigera toda a região de corte principalmente a região periférica do corpo de prova contribuindo para o melhor desempenho das ferramentas amenizando o efeito abrasivo da sílica (SiO_2) presente na camada periférica. A maior diferença no desgaste foi observada no inserto IC8048 devido a maior tenacidade (classe ISO K10) e a aresta menos robusta. O inserto IC428 a diferença foi menos proeminente. A classe ISO K05 desse inserto é mais dura e a aresta de corte mais robusta contribuindo para seu melhor desempenho. O inserto IC4028 com sua combinação de cobertura multicamadas sendo a cobertura superior de nitreto de titânio (menor coeficiente de atrito), aresta mais robusta e raio de ponta maior mostrou ser a melhor opção para usinagem do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio. O substrato tenaz desse inserto minimizou os problemas de lascamentos observados no inserto IC428. A maior robustez da aresta com a

combinação de coberturas mostrada no capítulo 3 contribui para que o desempenho dessa ferramenta fosse totalmente diferente do inserto IC8048 apesar de serem da mesma classe ISO K10.

Analisando a superfície de saída percebe-se novamente a maior integridade superficial do inserto quando se trabalha com fluído. Para o inserto IC8048 essa diferença não foi expressiva devido ao maior ângulo de saída contribuindo para menor esforço de corte. Para o inserto IC428 a ausência de fluído evidenciou a ação abrasiva dos carbonetos de nióbio diluídos na matriz ferrítica do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio. Esse mesmo fenômeno pode ser observado no inserto IC4028. A maior lubricidade do inserto IC4028 não foi suficiente para evitar a ação dos carbonetos de nióbio. Esse inserto apresenta ângulo de saída negativo sendo o inserto que mais exige potência da máquina e maior atrito entre o cavaco e a ferramenta contribuindo de forma expressiva para o fenômeno observado.

5.7 – Análise do Cavaco

Na usinagem as variáveis relativas ao processo, como taxa de remoção, formação de aresta postiça, desgaste da ferramenta de corte, acabamento superficial, quebra do cavaco, vibrações, penetração do fluído de corte, comportamento da força de usinagem e temperaturas são diretamente relacionadas a formação do cavaco. A busca de soluções para esses problemas requer a compreensão do comportamento de fratura do material quando sujeito a elevada quantidade de deformação plástica, da forma como este volume deformado transforma-se em cavaco e, por sua vez, movimenta-se sobre a face da ferramenta de corte (Trent, 1991; Diniz et al., 2006).

Diniz et al. (2006) citando Wright (1979), afirma que quanto menor o ângulo de saída da ferramenta, maior o comprimento de contato cavaco superfície de saída da ferramenta e, com isso, maior a zona de aderência. Quanto maior a zona de aderência, maiores a temperatura de corte e a força de usinagem.

Segundo Ferraresi (1977), o aumento da capacidade de quebra do cavaco, para materiais não demasiadamente tenazes, pode ser obtido com o aumento da deformação do cavaco no plano de cisalhamento. Para isto, as seguintes alterações podem ser feitas:

- Diminuição do ângulo de saída e/ou de inclinação da ferramenta;

- Aumento da espessura de corte;
- Diminuição da velocidade de corte.

Materiais frágeis como o ferro fundido tende a formar cavacos na forma de pequenas partículas, cavaco parcialmente contínuo. Esta característica é devido a pouca deformação plástica quando submetidos à tensão de cisalhamento. Na usinagem do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio o cavaco formado é contínuo. O tratamento térmico a que é submetido o corpo de prova faz com que o material fique com baixa dureza melhorando seu coeficiente de deformação plástica.

A Figura 5.17 mostra o cavaco do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio usinado com o inserto IC8048. Analisando a superfície de saída desse inserto, Figuras 5.4 e 5.11, percebe-se que o cavaco quebrou antes de tocar no quebra-cavaco devido à fragilidade intrínseca do material. Como o inserto IC8048 apresenta o maior ângulo de saída, o cavaco formado sobre menos deformação. Observando-se a Figura 5.17 não se percebe as ondulações características quando o cavaco sofre grandes deformações.



Figura 5.17 – Cavaco obtido com inserto IC8048. $V_c=100$ m/min, $f=0,4$ mm/volta, $a_p= 4$ mm.



Figura 5.18 – Cavaco obtido com inserto IC428. $V_c=150$ m/min, $f=0,4$ mm/volta, $a_p=4$ mm.

Observando-se a superfície de saída do inserto IC428 (Figuras 5.7 e 5.13), percebe-se novamente que o cavaco quebrou antes de tocar o quebra cavacos. Isto aconteceu devido a fragilidade do material usinado. O inserto IC428 apresenta uma fase plana na superfície de saída para reforço da aresta conforme mostrado na figura 5.3. Esta fase plana implica num ângulo de saída menor para este inserto quando comparado com o inserto IC8048. O menor ângulo de saída faz com que os cavacos formados sejam menores que os cavacos formados na usinagem com o inserto IC8048. O aumento da velocidade de corte deveria provocar efeito contrário, ou seja, diminuir a capacidade de quebra do cavaco. Como isso não aconteceu, essa variável pouco interferiu na geometria do cavaco.

A Figura 5.19 mostra o cavaco do ferro fundido nodular com nióbio usinado com o inserto IC4028. Conforme a Figura 5.3, o inserto IC4028 apresenta o maior raio de arredondamento de aresta e ângulo efetivo de saída negativo. Essa característica implica numa maior deformação do cavaco. A Figura 5.19 mostra a parte de trás do cavaco rugosa evidenciando a maior deformação do cavaco. Devido ao menor coeficiente de atrito da superfície de saída propiciado pela cobertura de TiN percebe-se que o cavaco gerado pelo inserto IC4028 é maior que os cavaco gerado pelo inserto IC428.



Figura 5.19 – Cavaco obtido com inserto IC4028. $V_c=150$ m/min, $f=0,4$ mm/volta, $a_p=4$ mm.

Este capítulo apresentou os principais tipos de desgaste a que estão sujeitos os insertos de metal duro ao usinar ferro fundido nodular ferritizado com nióbio e os principais mecanismos responsáveis por estes desgastes. Pôde-se perceber a influência do fluido de corte na vida da ferramenta independente da classe do metal duro ou do tipo de revestimento. Finalmente analisou-se o cavaco gerado nos ensaios e as forças de cortes inerentes ao processo.

Capítulo 6

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

6.1 – Conclusões

Analisando os resultados apresentados neste trabalho sobre o torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio, pode-se concluir que:

- A ferramenta de metal duro IC4028 com tripla cobertura (TiCN, Al₂O₃ e TiN) apresentou o melhor desempenho em termos de desgaste e vida da ferramenta.
- Observou-se para os três insertos testados um pequeno desgaste de flanco e um grande desgaste de entalhe. Observou-se também maior aderência de material no raio da ponta da ferramenta.
- Em todos os insertos de metal duro ensaiados observou-se lascamentos na superfície de saída e superfície de folga, sendo esta avaria mais expressiva na região onde usina-se o diâmetro máximo do corpo de prova.
- Os principais mecanismos de desgaste devem ser abrasão, adesão e aderência.
- Devido à alta abrasividade da sílica (SiO₂) presente na camada externa do corpo de prova percebeu-se um grande desgaste de entalhe em todos os insertos de metal duro ensaiados.
- Os carbonetos de nióbio diluídos na matriz ferrítica provocaram desgaste de cratera e lascamentos em todos os insertos testados. Essa constatação foi mais evidente no inserto IC4028 devido ao maior ângulo de saída do cavaco.

- A vida da ferramenta foi reduzida no torneamento sem fluido de corte. A queda da vida da ferramenta foi maior para as ferramentas com aresta de corte menos robusta.
- A cobertura de óxido de alumínio na camada superior dos insertos IC8048 e IC428 indicada para ferro fundido não garantiu o bom desempenho no torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio. O baixo coeficiente de atrito do revestimento TiN do inserto IC4028 foi mais eficiente nesta aplicação.
- A preparação da aresta de corte deixando-a mais robusta contribui para melhorar a vida da ferramenta. Dentre as ferramentas ensaiadas o inserto IC8048 possui a aresta menos robusta e apresentou o maior desgaste.
- A forma do cavaco no torneamento do ferro fundido nodular ferritizado com nióbio apresentou-se em pequenas vírgulas, mesmo quando trabalhou-se com ferramenta sem quebra cavaco.

6.2 – Sugestões para Trabalhos Futuros

- Eliminar num primeiro passe a camada contaminada com sílica (SiO_2) e reaplicar os testes no ferro fundido nodular ferritizado com nióbio.
- Utilizando um mesmo inserto com a mesma cobertura avaliar a influência da preparação da aresta de corte.
- Testar novos materiais para ferramentas de corte como metal duro em micro grão com cobertura TiAlN, principalmente no torneamento sem refrigeração.
- Testar insertos com coberturas a base de cromo (AlCrN).
- Aplicação de ferramentas cerâmicas com maiores velocidades de corte.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABELE, E.; DÖRR, J. (2002)**, “Ferramentas de corte protegidas contra a defasagem tecnológica”, *Máquina e Metais*, pp. 38-53, Ago.
- ÁVILA, R.F.; GODOY, G.C.; ABRÃO, A.M. (2005)**, “Investigação da cinética de desgaste em ferramentas de metal duro revestidas”, *Máquinas e Metais*, pp. 292-309, Abr.
- AZEVEDO, G.M., ANDRADE, A.C. de, ABRÃO, A.M. (2003)**, “Análise da temperatura durante torneamento de aço temperado”, *Máquinas e Metais*, pp. 100-111, Dez.
- BALZERS**, “Oerlikon Balzers services – Revestimento Balinit®”, Disponível em: <www.oerlikon.com/balzers/br>. Acesso em: 14 nov. 2007.
- BOEHS, L.; AGUIAR, C. G.; FERREIRA, J.C. (2000)**, “A Usinagem do ferro fundido nodular de fundição contínua”, *Máquinas e Metais*, pp.58-72, Jul.
- CATÁLOGO FUCHS**. “Informações Técnicas: Plantocool MH2002”, Brasil, 1997.
- CHIAVERINI, V.** “Aços e ferros fundidos”. 6ª ed., São Paulo: Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 1990. 576 pgs.
- CORRÊA, D.C.; SALES, W.F.; SANTOS, S.C.; PALMA, E.S. (2004)**, “Machinability of bimetallic bearings using cemented carbide tools: evaluation of the wear mechanisms”, *Journal of Materials Processing Technology*, 17 pgs, Jul.

- DINIZ, A.S.; MARCONDES, F.C.; COPPINI, N.L.** “Tecnologia da usinagem dos materiais”. 5ª ed, São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2006. 255 pgs.
- DINIZ, A.E.; OLIVEIRA, A.J. de (2004)**, “Uma comparação do processo sem fluido e com fluido em abundância utilizando pastilhas alisadoras”, *Máquinas e Metais*, pp. 94-109, Ago.
- FERRARESI, D.** “Fundamentos da usinagem dos materiais”, São Paulo: Ed Edgard Blucher Ltda., 1977, 751 pgs.
- FLEISCHER, J.; SCHMIDT, J.; DYCK M. (2004)**, “Dry times come”, *Werkstatt und Betrieb*, Vol 137, Nº 5, pp. 49-52, May.
- FULLER, A.G. (1997)**, “Propriedades físicas e mecânicas de ferros fundidos com grafita compacta”, *Metalurgia & Materiais*, pp. 136-146, Mar.
- FULLER, A.G.; BIERRENBACH, A.; SANTOS, S. (1997)**, “Propriedades físicas e mecânicas de ferros fundidos com grafita compacta (2ª parte)”, *Metalurgia & Materiais*, pp. 201-205, Abr.
- GEY, C. (2006)**, “Novos revestimentos dão origem a ferramentas mais eficientes”, *Máquinas e Metais*”, pp. 52-67, Jun.
- GHANI, A.K.; CHOUDHURY, I.A.; HUSNI, (2002)**, “Study of tool life, surface roughness and vibration in machining nodular cast iron with ceramic tool”, *Journal of Materials Processing Technology*, vol. 127, pp. 17-22, Sep.
- GRAHAM, D.E. (1994)**, “Revestimento de Al₂O₃ para ferramentas de carbetto cementado”, *Máquinas e Metais*, pp. 22-35, Out.
- HUTCHINGS, I.M.** “Tribology, Friction and Wear of Engineering Materials”, Londres: Butterworth-Heinemann, 1992, 280 pgs.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION**, “Specification for tool life testing with single point turning tools”. Norma ISO 3585, 1993.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION, “Classification and application of hard cutting materials for metal removal with defined cutting edges - Designation of the main groups and groups of application”. Norma ISO 513, 2004.

ISCAR LTD. (2001), “Conceitos básicos de usinagem”.

ISCAR LTD., “Turning Tools”, Catálogo de torneamento, Israel, 2007.

KATBI, K. (1996), “Um guia básico, para facilitar o processo de seleção de pastilhas de usinagem”, *Máquinas e Metais*, pp. 42-50, Mar.

KLOCKE, F.; KLÖPPER, C. (2006), “Característica da usinagem do ferro fundido nodular austemperado”, *Máquinas e Metais*, pp.148-165, Jul.

KO, W.M.; KWON, W.T.; KIM, Y.W. (2004), “Development of Al₂O₃-SiC composite tool for machining application”, *Ceramics International*, Elsevier Ltd., 10 pgs, Oct.

KOELSCH, J.R. (2000), “Ferramentas de carbetto ... o estado da arte”, *Máquinas e Metais*, pp. 186-201, Ago.

LUCAS, E.O.; WEINGAERTNER, W.L.; BERNARDINI, P.A.N. (2005), “Como o cavaco se forma no torneamento do fofa nodular ferrítico”, *Máquinas e Metais*, pp. 152-163, Out.

MACHADO, A.R. (1988), “A evolução dos materiais para ferramentas de corte”, *Máquinas e Metais*, pp. 92-96, Jan.-Fev.

MACHADO, A.R.; DINIZ, A.E. (2000), “Vantagens e desvantagens do uso (ou não) de fluidos de corte”, *Máquinas e Metais*, pp. 134-151, Dez.

MAHLE CATALOGUE – MATERIALS PISTON RINGS, São Paulo, 2007, 60 pgs.

MARWANGA, R.O.; VOIGT, R.C.; COHEN, P.C. (2003), “A influência da morfologia da grafita e da microestrutura da matriz na formação do cavaco”, *Fundição & Serviço*, pp. 26-50, Out.

- MASON, F. (2003)**, “Os conceitos que guiam a indústria no desenvolvimento de pastilhas indexáveis”, *Máquinas e Metais*, pp. 134-143, Dez.
- MELO, A.C.A.; FRANCO, S.D.; MACHADO, A.R. (2005)**, “Desgastes e avarias em ferramentas de metal duro”, *Máquinas e Metais*, pp. 118-155, Dez.
- MOMPER, F.J. (2000)**, “Usinagem a seco e de materiais endurecidos”, *Máquinas e Metais*, pp. 30-43, Ago.
- NAKAGAWA, H. (2000)**, “Mínima quantidade de lubrificação não agride o meio ambiente”, *Máquinas e Metais*, pp.40-49, Ago.
- NYLÉN, T. (2001)**, “Niobium in cast iron”, *International Symposium on Niobium 2001*, Disponível em: <
http://www.cbmm.com.br/portug/sources/techlib/science_techno/table_content/sub_5/images/pdfs/056.pdf >. Acesso em 16 nov.2007.
- OPLÄNDER, M.L. (2003)**, “Parâmetros de influência na usinagem do ferro fundido com grafita vermicular”, *Máquinas e Metais*, pp. 78-96, Fev.
- PEREIRA, C.; CORREA, S.J.; PIVATO, C. (2005)**, “Como se apresentam e para que servem os lubrificantes e refrigerantes”, *Máquinas e Metais*, pp. 352-361, Abr.
- PEYRE, J.; VINTERHOLLER, O. (1994)**, “Revestidas por CVD ou PVD, as ferramentas têm vida melhor”, *Máquinas e Metais*, pp. 68-79, Set.
- PEYRE, J.P.; DUCHATEAU, D. (1995)**, “As perspectivas são de uma grande evolução dos revestimento PVD e CVD”, *Máquinas e Metais*, pp. 42-50, Abr.
- PRENGEL, H.G.; JINDAL, P.C; WENDT, K.H.;SANTHANAM, A.T.; HEGDE, P.L; PENICH, R.M. (2000)**, “A new class of high performance PVD coating for carbide cutting tools”, *Surface & Coatings Technology*, v.139, pp. 25-34, Sep.
- RECH, J. (2006)**, “Questões relativas à preparação de aresta de corte”, *Máquinas e Metais*, pp. 28-55, Mai.

- SCANDIFFIO, I.**, “Uma Contribuição ao estudo do corte a seco e ao corte com mínima quantidade de lubrificante em torneamento de aço”. 2000. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- SCHMIDT, J.; DYCK, M. (2004)**, “A indústria pode ter acesso ao desenvolvimento aprimorado”, *Máquinas e Metais*, pp. 34-43, Mai.
- SCHULZ, H.; EMRICH, A.K.; FINZER, T.; DÖRR, J. (2000)**, “Quais são e para que servem os revestimentos”, *Máquinas e Metais*, pp. 38-45, Set.
- SALES, W.F.; DINIZ, A.E.; MACHADO, A.R. (2001)**. “Application of cutting fluids in machining process”, *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences*, Rio de Janeiro, v.23, nº2, 20 pgs.
- SAMUELS, L.E.** “Polished wear”, BLAU P. J. ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology, 5rd. USA: ASM International, 2006. Volume 18, pp 191-198.
- SANTOS, S.C.; SALES, W.F.** “Aspectos tribológicos da usinagem dos materiais”. 1^a ed., São Paulo: Artliber Editora Ltda., 2007. 248 pgs.
- SILVA, J.G. da, ABRÃO, A.M. (2006)**, “Comportamento da cerâmica e do metal duro revestido no torneamento do fofo nodular”, *Máquinas e Metais*, pp. 38-49, Jul.
- SILVA, J.G. da**, “A utilização de ferramentas de metal duro revestido e cerâmica no torneamento do ferro fundido nodular”. 2002. 89 pgs. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG.
- SILVEIRA, J.** “Influência de fatores metalúrgicos na usinabilidade de ferros fundidos FE6002, FE4212, FC25”. 1983. Dissertação de Mestrado – UNICAMP – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP.
- STEMMER, C. E.** “Ferramentas de corte”. 2 ed., Florianópolis: ed. UFSC, 1989. 295 pgs.
- TABORGA, A.R.M.; TABORGA, J.D.M.; WEINGAERTNER, W.L. (2003)**, “Análise da rugosidade obtida na retificação de ferro fundido nodular utilizando rebolos de SiC e

Al₂O₃, 2º COBEF – Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, 18 a 21 de maio de 2003, Uberlândia – MG.

TYLCZAK, J. H.; OREGON, A. “Abrasive wear”, BLAU P. J. ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology, 5rd. USA: ASM International, 2006. Volume 18, pp184-190.

TEETER, F.J. (1994), “As ferramentas revestidas com TiN trazem muitos benefícios”, *Máquinas e Metais*, pp. 16-24, Jul.

TITHER, G. (2005), “A adição de nióbio em aços fundidos e forjados”, *Fundição & Serviço*, pp. 68-95, Jul.

TOMITA, K. (1999). “O atual estágio da HSM e dos materiais de ferramentas de corte”, *Máquinas e Metais*, pp. 20-39, Out.

TRENT, E.M. “Metal Cutting”. 3rd. Edition, Butterwordths, London, 1991, 273 pgs.

VAN VLACK, L.H. “Princípios de Ciência e Tecnologia dos Materiais”, 5ª Edição, Rio de Janeiro, Editora Campus, 1984.

WALTER, A. (2005), “Refrigerantes usados com eficiência”, *Máquinas e Metais*, pp. 62-71, Set.