UNESP

Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá

Guaratinguetá
2006

"Análise Comparativa de Ferramentas Cerâmicas na Usinagem de Ferros Fundidos e Aços Endurecidos"

ERNESTO PEDRO MALERE

322

unesp

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

ERNESTO PEDRO MALÈRE

ANÁLISE COMPARATIVA DE FERRAMENTAS CERÂMICAS NA USINAGEM DE FERROS FUNDIDOS E AÇOS ENDURECIDOS

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
FACULDADE DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE PROJETOS E MATERIAIS
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

CARO LEITOR NÃO
RISQUE O LIVRO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica na área de Projetos e Materiais.

Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

Guaratinguetá

2006

644

644

1110000644

Data: 24/1/07
Valor: R$20,00
C/D/T: D

Malère, Ernesto Pedro
M245a Análise comparativa de ferramentas cerâmicas na usinagem de ferros fundidos e aços endurecidos / Ernesto Pedro Malère. - Guaratinguetá : [s.n.], 2006
153f.: il.

Bibliografia: f. 147-149
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá, 2006
Orientador: Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro

1. Ferramentas cerâmicas. 2. Ferros fundidos. 3. Aços endurecidos. I. Título

CDU 669.13

unesp

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
CAMPUS DE GUARATINGUETÁ

"ANÁLISE COMPARATIVA DE FERRAMENTAS CERÂMICAS NA USINAGEM DE FERROS FUNDIDOS E AÇOS ENDURECIDOS"

ERNESTO PEDRO MALERE

ESTA DISSERTAÇÃO FOI JULGADA ADEQUADA PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE "MESTRE EM ENGENHARIA MECÂNICA"

PROGRAMA: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. João Andrade de Carvalho Júnior
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. MARCOS VALÉRIO RIBEIRO
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. ANGELO CAPORALLI FILHO
Unesp-Feg

Prof. Dr. ANSELMO EDUARDO DINIZ
Unicamp

Agosto de 2006

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

DADOS CURRICULARES

ERNESTO PEDRO MALÈRE

NASCIMENTO	10.01.1946 – AZUL/ PCIA. BS. AS./ ARGENTINA
FILIAÇÃO	José Maria Pedro Malère Maria Dibos de Malère
1963/1968	Engenharia Mecânica Facultad de Ingeniería- Universidad Nacional de La Plata Argentina Revalidação pela USP, São Paulo.
1974/1976	Curso de Pós Graduação em Administração de Empresas, Fundação Getúlio Vargas- São Paulo
2003/2005	Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, nível de Mestrado na Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá da UNESP

AGRADECIMENTOS

Agradeço:

Ao Prof. Dr. Marcos Valério Ribeiro, meu orientador, pelo paciente aconselhamento e pela permanente e afável disponibilidade.

À UNESP, Campus de Guaratinguetá de uma forma geral, na pessoa das suas autoridades, professores e pessoal de apóio, por ter- me propiciado esta singela oportunidade de crescimento.

À Diretoria da Aços Villares, Srs. Verástegui e Miguel A. Carvalho, pela autorização para a elaboração desta dissertação incluindo dados práticos colhidos na realidade da fábrica.

Aos colegas da Aços Villares: Dalton, Jorge, Ricardo, João Carlos, André, Jefferson, Paulo Roberto, Décio, Paulo Roberto e outros do chão da fábrica, pela boa vontade no fornecimento de dados e opiniões.

A minha esposa Claudia e filhos Luiz e João, pela compreensão durante este período em que lhes dediquei menor atenção do que habitualmente.

MALÈRE, E.P. **ANÁLISE COMPARATIVA DE FERRAMENTAS CERÂMICAS NA USINAGEM DE FERROS FUNDIDOS E AÇOS ENDURECIDOS, 2006, 153** f. Dissertação (Mestrado em Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006

RESUMO

Esta dissertação focaliza a substituição das ferramentas inicialmente utilizadas de metal duro, por outras de cerâmica, no processo de torneamento de cilindros de laminação. Exceto no desbaste da superfície bruta de forjamento ou fundição, as ferramentas de cerâmica substituiram as de metal duro diminuindo o tempo do torneamento. O maior ganho de produtividade foi observado na mesa de trabalho dos cilindros, que é a região mais dura dos mesmos e que menor usinabilidade oferece. Em tabelas referenciadas ao longo do texto, são mostrados os parâmetros de corte utilizados nos processos principais de torneamento longitudinal com aplicação de ferramentas de metal duro, e também com as ferramentas de cerâmica que as substituiram. Foram realizadas observações práticas sobre o desgaste das cerâmicas, objetivando fornecer idéias para racionalizar seu consumo.

PALAVRAS- CHAVE: Ferramentas cerâmicas, ferros fundidos, aços endurecidos, desgaste, produtividade.

unesp

MALÈRE, E.P. **COMPARATIVE ANALYSIS OF CERAMIC TOOLS ON THE MACHINING OF HARDENED CAST IRONS AND STEELS, 2006, 153** p. Dissertação (Mestrado em Projetos e Materiais) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2006

ABSTRACT

This dissertation focuses some aspects on the substitution of the initially used carbide inserts by ceramic inserts, in the turning processes on a roll (for rolling mills) machining shop. Excluding some of the rough machining on the as cast or as forged surface, the ceramic tools took the task of the carbides decreasing the machining times. The largest productivity gains were obtained in the table of the rolls, which is the hardest region of the roll with the lowest machinability. Within the tables referred along the text, the cutting parameters of the longitudinal turning processes are shown in both cases: with carbides and with their substitutes, the ceramic inserts. The wear mechanism of the ceramic inserts was observed, in order to provide ideas to rationalize its use.

KEYWORDS: machining, ceramic tools, cast irons, hardened steels, wear, productivity

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

TABELA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

TABELA DE SÍMBOLOS

1 INTRODUÇÃO 17

1.1 EVOLUÇÃO DOS CILINDROS DE LAMINAÇÃO 17

1.2 JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO 18

1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO 19

1.4 CARÁTER DA DISSERTAÇÃO 19

2 MATERIAIS 21

2.1 GENERALIDADES SOBRE OS MATERIAIS EM USINAGEM 21

2.2 USINAGEM DE PRODUÇÃO 22

2.3 MATERIAIS DE CORTE 24

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 28

3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE CORTE USUAIS EMPREGADOS EM USINAGEM 28

3.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE CORTE USUAIS: 30

3.3 BREVE HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DAS FERRAMENTAS CERÂMICAS 32

3.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS CERÂMICAS 35

3.5 TIPOS DE CERÂMICAS 36

3.6 NITRETO DE SILÍCIO E DERIVADOS: 38

3.7 CARACTERÍSTICAS DAS FERRAMENTAS DE CERÂMICA 42

unesp

3.8 COMPARAÇÃO DE DUREZAS 45
3.9 USINAGEM DE FERROS FUNDIDOS 46
3.10 USINAGEM DE AÇOS 47
3.11 MODOS DE FALHA E DESGASTE NAS FERRAMENTAS CERÂMICAS 48
3.12 CORRELAÇÃO ENTRE DESGASTE E SOLUBILIDADE. 57
4 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO 62
4.1 TORNOS 62
4.2 INSERTOS DE CORTE 64
4.2.1 Porta- ferramentas 64
4.2.2 Afiação da aresta de corte dos insertos cerâmicos 67
4.2.3 Materiais constituintes dos insertos cerâmicos: 68
4.3 TIPOS DE MATERIAIS EM USINAGEM: 70
4.3.1 Cilindros de trabalho para laminação de tiras a frio (LTF): 70
4.3.2 Cilindros de encosto para laminação de tiras a frio ou a quente (BUR): 71
4.3.3 Cilindros de trabalho para laminação de tiras a quente (FHW), ferro fundido de coquilhamento indefinido, com núcleo de ferro fundido nodular. 72
4.3.4 Cilindros de trabalho para laminação de tiras a quente (FHW), ferro fundido tipo Alto Cromo (17% Cr). 74
4.3.5 Cilindros de trabalho para laminação de tiras a quente (FHW), tipo Aço Rápido fundido. 75
4.3.6 Cilindros de trabalho para laminação de não planos a quente (WR em ferro fundido centrifugados e Nodulares) 77
4.4 PROCESSOS DE TORNEAMENTO LONGITUDINAL 78
4.4.1 Desbaste de mesa FHW e PM 78
4.4.2 Acabamento de mesa 81
4.4.3 Desbaste do raio da mesa e pescoços 82
4.4.4 Desbaste final e acabamento de pescoços 83

unesp

4.4.5 Desbaste dos cilindros WR 84
4.4.6 Acabamento de mesa e pescoços dos cilindros WR e Nodulite 87
4.5 PROCESSOS DE TORNEAMENTO LONGITUDINAL PARA DESBASTE E ACABAMENTO DE CILINDROS FORJADOS LTF E BUR 88
4.5.1 Processo de forjamento de cilindros LTF e torneamento de desbaste da mesa e pescoços; torneamento de acabamento antes de têmpera 88
4.5.2 Acabamento dos pescoços e da mesa de cilindros LTF após têmpera 91
4.5.3 Processo de forjamento de cilindros BUR e torneamento de desbaste da mesa e pescoços 93
4.5.4 Desbaste e Acabamento da mesa de cilindros BUR após têmpera; acabamento dos pescoços 95
4.6 REALIZAÇÃO DAS IMAGENS DE DESGASTE 97
5 RESULTADOS 98
5.1 DESGASTE DOS INSERTOS DE CERÂMICA MISTA NA USINAGEM DE LTFS (AÇO FORJADO) 98
5.1.1 Insertos RCMA 321900 T em cilindros de aço forjado LTF 98
5.1.2 Seqüências típicas de desgaste dos insertos RCMA 311900 T em cilindros LTF 108
5.1.3 Insertos SNG 12800 T, cerâmica mista, antes e depois da têmpera, em cilindros LTF. 111
5.2 DESGASTE DOS INSERTOS DE CERÂMICA NOS CILINDROS FHW (FERRO FUNDIDO) 115
5.2.1 Insertos RCMA 311900 T 115
5.2.2 Seqüência típica de desgaste em ferramenta RCMA de cerâmica mista, em usinagem de ferro fundido CI80. 119
5.2.3 Insertos SNG 12800 T, acabamento de mesa de FHW. 120
5.2.4 Desgaste dos insertos de cerâmica LNU em desbaste de pescoços de ferro nodular de cilindros FHW. 122

unesp

5.2.5 Observações sobre o desgaste dos insertos LNU 6688T 126
5.2.6 Seqüência típica de desgaste em inserto LNU, no desbaste de pescoços de ferro nodular. 127
5.2.7 Observação do desgaste de insertos RCMA, SNG e LNU fraturados... 128
5.3 PARÂMETROS DE PROCESSO PARA METAL DURO E CERÂMICA.. 128
5.4 MORFOLOGIA DOS CAVACOS 136
5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MORFOLOGIA DOS CAVACOS 141
5.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE CONSUMO E CUSTO DE INSERTOS 141
6 CONCLUSÃO 145
7 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA 147
8 APÊNDICE 150
9 GLOSSÁRIO 153

LISTA DE FIGURAS

Figura 1-Arranjo típico de laminador para produtos planos.....18
Figura 2-Representação gráfica de resistência à deformação a quente vs. resistência à fratura em materiais de corte usuais.....29
Figura 3-Representação gráfica da dureza vs. tenacidade em materiais de corte usuais. .30
Figura 4-Quadro de cronologia de ferramentas de corte desde aço carbono até nitreto de silício.....34
Figura 5- Sinterização.....35
Figura 6-Afiação de arestas de corte e estilos de insertos ordenados de menor para maior resistência mecânica.....44
Figura 7-Representação dos desgastes em um inserto.....49
Figura 8-Trincas em cerâmica pela ação de corpos duros (penetradores).....52
Figura 9-Pares de interação cerâmica- ligas de ferro.....55
Figura 10-Influência dos teores dos elementos de liga sobre o coeficiente de atividade do nitrogênio.....56
Figura 11- Desgaste-de cratera em diferentes SiAlONs.....59
Figura 12-Torno Binns 30", com 750 mm de diâmetro admissível, 7000 mm entre pontas 63
Figura 13-Torno MFD, com 3.750 mm de diâmetro admissível, 15.000 mm entre pontas. 63
Figura 14-Insertos RCMA 321900 T, LNU 6688 T e SNG 12800 T.....64
Figura 15-- Inserto LNU 6688T 65
Figura 16-Inserto RCMA 321900T 66
Figura 17-Inserto SNG- 12800 T.....66
Figura 18-Afiação da aresta principal de corte com chanfro e arredondamento.....67
Figura 19-Porta- ferramentas para inserto SNG 12800 T.....68
Figura 20- Porta-ferramentas para insertos LNU e RCMA:.....68
Figura 21-Microfotografia de inserto em cerâmica mista 69

unesp

Figura 22-Microfotografia de inserto de nitreto de silício. 69
Figura 23-Fotomicrografia LTF. 70
Figura 24-Fotomicrografia BUR 71
Figura 25-Fotomicrografia FHW 72
Figura 26-Fotomicrografia FHW 73
Figura 27-Fotomicrografia de pescoço em ferro fundido nodular 74
Figura 28-Fotomicrografia Alto Cromo FHW 75
Figura 29-Fotomicrografia Aço Rápido FHW 76
Figura 30-Fotomicrografia Aço Rápido FHW 76
Figura 31-Desbaste de mesa FHW 79
Figura 32-Superfície bruta de fundição de cilindro FHW 80
Figura 33-Superfície bruta de fundição de cilindro PM 81
Figura 34-Passe do acabamento da mesa FHW 82
Figura 35-- Desbaste do raio da mesa e pescoços FHW, ... 82
Figura 36-Desbaste de pescoços FHW, na direção do centro 83
Figura 37-Acabamento dos cilindros FHW 84
Figura 38-Superfície dos cilindros WR antes da usinagem 85
Figura 39-Desbaste de mesa WR e Nodulites 86
Figura 40-Desbaste de pescoços WR e Nodulite. 86
Figura 41-Acabamento da mesa WR e Nodulite. 87
Figura 42-Acabamento de pescoços de cilindros WR e Nodulite 87
Figura 43-Superfície característica de cilindro LTF bruto de forjamento 89
Figura 44-Desbaste da mesa LTF 89
Figura 45-Desbaste de pescoços LTF 90
Figura 46-Acabamento de pescoços e face da mesa antes da têmpera 90
Figura 47-Acabamento de mesa de cilindros LTF antes da têmpera 91
Figura 48-Acabamento do pescoço e face da mesa LTF após tempera 92
Figura 49-Acabamento de mesa LTF após tempera 93
Figura 50-Desbaste de mesa BUR 94

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

Figura 51-Acabamento do diâmetro de mesa antes da têmpera 94
Figura 52-Desbaste diâmetro da mesa após têmpera..... 95
Figura 53-Acabamento da mesa BUR 95
Figura 54-Acabamento da mesa BUR 96
Figura 55-Estereomicroscópio Leica GZ6..... 97
Figura 56- Microscópio invertido Zeiss 97
Figura 57-Vista normal à superfície de saída em inserto RCMA. Sugestão de cratera. ... 99
Figura 58-Marcas na superfície de saída de inserto RCMA..... 100
Figura 59- Diferentes profundidades de usinagem e avanços em ferramenta RCMA. ... 101
Figura 60- Desgaste da ferramenta RCMA, região de maior espessura de corte. 102
Figura 61- Inserto RCMA com marcas dentro do início de cratera. 103
Figura 62- Inserto RCMA. Fratura na região de maior espessura de corte. 104
Figura 63- Inserto RCMA, região de maior espessura de cavaco. 105
Figura 64-Inserto RCMA após corte com profundidades de usinagem diferentes. 106
Figura 65- Inserto RCMA com lascamentos nas superfícies de saída e folga. 107
Figura 66-Lascamentos na aresta de corte em ferramenta RCMA. 108
Figura 67-Seqüência de desgaste em insertos RCMA, em LTF não temperado. 109
Figura 68- Seqüência típica de inserto RCMA em usinagem de aço LTF temperado. ... 110
Figura 69- Inserto SNG. Desgaste por lascamentos acumulados, cratera e entalhes, em material não temperado. 112
Figura 70- Desgaste de cratera em inserto SNG..... 113
Figura 71-Lascamentos em inserto SNG em cilindro LTF temperado. 114
Figura 72- Desgaste de folga por lascamento em inserto SNG de cerâmica mista, na usinagem de liga VC9 temperada. 115
Figura 73-Segmento da aresta principal de inserto RCMA correspondente à maior espessura de usinagem. 116
Figura 74-Desgaste severo por lascamentos em degraus, em inserto RCMA em usinagem da liga CI80. 117
Figura 75-Inserto RCMA. Superfície de folga 117

Figura 76- Desgaste severo de superfície de saída em inserto RCMA, na usinagem da liga CI 80. 118
Figura 77- Seqüência típica de desgaste de inserto RCMA na usinagem de ferro fundido 119
Figura 78- Inserto SNG após usinagem de mesa em liga CI80. 120
Figura 79- Inserto SNG com desgaste de cratera. 121
Figura 80- Inserto LNU em SiAlON, após usinagem de ferro nodular. 123
Figura 81- Inserto LNU após usinagem de pescoço em ferro nodular, com cratera e lascamentos. 124
Figura 82- Inserto LNU com cratera e lascamentos, após passe em ferro nodular. 125
Figura 83- Lascamentos na superfície de saída. 126
Figura 84- Seqüência típica de desgaste de insertos LNU 127
Figura 85-Cavacos de mesa de cilindro Nodulite fundido estaticamente. 137
Figura 86-Cavacos de mesa de cilindro FHW. 137
Figura 87-Cavacos de desbaste de pescoço, cilindro FHW 138
Figura 88-Cavacos de pescoço de ferro nodular, de cilindro FHW 138
Figura 89-Cavacos de mesa de cilindro FHW em Alto Cromo (18% Cr) 139
Figura 90-Cavacos de mesa de cilindro FHW em Aço Rápido (1,8% C). 139
Figura 91-Cavacos de mesa de cilindro BUR em liga VC4A. 140
Figura 92-Cavacos de mesa de cilindro LTF em liga VC9. 140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1-Aplicações típicas de nitreto de silício, sialon, aluminas (cerâmicas brancas, cerâmicas pretas) e cerâmicas com monocristais, no torneamento. 40
Tabela 2-Parâmetros de corte usuais 41
Tabela 3-Comparação de dureza de aços e ferros, unidades de medida comuns 45
Tabela 4-Tipos de inserto e fornecedores 65
Tabela 5-Limites de composição química:LTF (aço forjado marca VC9) 71
Tabela 6-Limites de composição química BUR (aço forjado marca VC4A) 72
Tabela 7-Limites de composição química:FHW (ferro fundido marca CI80S) 73
Tabela 8-Limites de composição química: núcleo de ferro fundido nodular FHW 74
Tabela 9-Limites de composição química:FHW alto cromo (ferro fundido marca VHCr17) 75
Tabela 10-Limites de composição química:FHW aço rápido (aço rápido fundido marca VHHS18) 76
Tabela 11-Limites de composição química Nodulite (ferro fundido nodular marca Nodulite B) 77
Tabela 13-Quadro de horas de usinagem com cerâmica sobre total de horas de usinagem mensais 143

unesp

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BUR	Back Up Roll, cilindro de encosto para laminação de tiras a frio e a quente
CBN	*Cubic Boron Nitride*, Nitreto Cúbico de Boro
FHW	*Finish Hot Work*, cilindro de trabalho para laminação de tiras a quente
HSc	Dureza Shore C
LTF	Cilindro de trabalho para laminação de tiras a frio
MD	Metal Duro
PCD	*Policristalline Diamond*, Diamante Policristalino
PM	*Plate Mill*, cilindro de trabalho para laminação de chapas grossas, chamado também (na Aços Villares) cilindro Composto devido ao seu método de dupla fusão
WR	*Wire Rod*, cilindro de trabalho para laminação de produtos longos a frio
CNC	Comando Numérico Computadorizado
DOCN	*Depth of cut notch*, Desgaste de entalhe

unesp

LISTA DE SÍMBOLOS

χ	Ângulo de posição da ferramenta
λ	Ângulo de saída da ferramenta

unesp

1 INTRODUÇÃO

1.1 EVOLUÇÃO DOS CILINDROS DE LAMINAÇÃO

O torneamento de aços forjados endurecidos (por têmpera e revenimento) e de ferros fundidos endurecidos (por fundição em coquilha metálica com posterior tratamento térmico) é um tema de suma importância para os fabricantes e usuários de cilindros de laminação para trabalho a quente ou a frio. Para maximizar a vida dos cilindros durante as campanhas de laminação (ou seja, no período em que o cilindro trabalha continuamente no laminador até ser substituído por outro novo ou recuperado), a camada endurecida na área de trabalho dos cilindros (sua mesa) deve resistir ao desgaste e às deformações permanentes induzidas pelo material em processo de laminação.

Na Figura 1 pode ser visto um arranjo típico de laminadores para produtos planos, com os cilindros de encosto (BUR), os cilindros de trabalho (LTF ou FHW), o produto em laminação e a representação em corte, da camada coquilhada ou temperada dos cilindros. Os cilindros para produtos não planos também devem apresentar camada superficial endurecida para resistir ao desgaste. Os requisitos dimensionais e geométricos dos produtos planos (chapas) para planicidade e espessura; e dos produtos longos (barras e fio máquina) para diâmetro, apresentam progressivamente menores tolerâncias admissíveis por exigência das indústrias que os utilizam. Isto que faz com que os fabricantes de cilindros tenham aumentado os níveis de dureza para minimizar os desgastes, colocando desafios adicionais para as usinagens.

As cerâmicas para usinagem (que iniciaram sua comercialização em maior escala na década de 1990) fazem parte das soluções encontradas para lidar produtivamente com os altos níveis de dureza, graças a sua capacidade de trabalho em altas velocidades. Este tipo de ferramenta também é utilizado com vantagens sobre o metal duro nos desbastes; a menor tenacidade da cerâmica, que faz com que os avanços de usinagem sejam menores que aqueles utilizados em situação similar com metal duro, é compensada pela maior

unesp

velocidade de corte que pode ser utilizada, dando lugar a um ganho em produtividade representado pela maior taxa horária de remoção de cavaco.

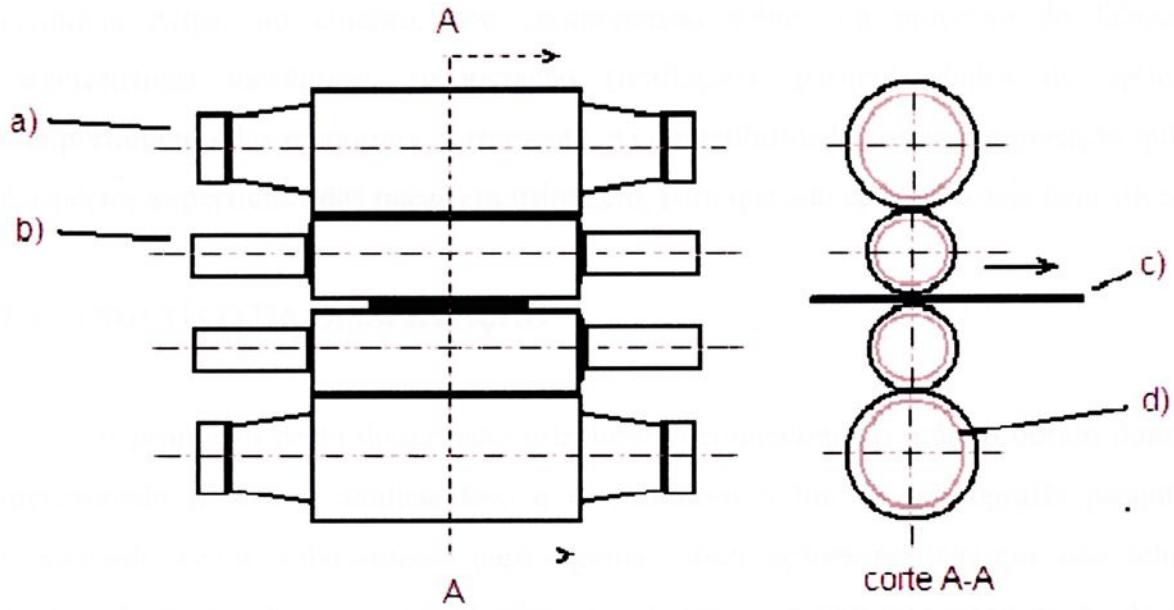


Figura 1-Arranjo típico de laminador para produtos planos
a)cilindro de encosto b)cilindro de trabalho c)produto em laminação d)camada coquilhada ou temperada

1.2 JUSTIFICATIVAS DO TRABALHO

Na usinagem da fábrica de cilindros da Aços Villares SA foi iniciada a utilização de cerâmicas a partir de 1993, quando foram incorporados novos tornos para cilindros de ferro fundido, chamados a substituir outros tornos que trabalhavam na fábrica em regime de locação e que deviam ser devolvidos à empresa proprietária. Além da concepção mais atualizada das novas máquinas em termos de comando (CNC) e rigidez, a tecnologia com elas introduzida (do uso de ferramentas cerâmicas) fez possível substituir de imediato 4 tornos por apenas 2 mantendo o nível de produção. Estes são tornos de grande porte, exigindo alto investimento para sua aquisição, montagem e colocação em marcha. Portanto, essa foi a primeira das economias realizadas pelo uso da cerâmica como

ferramenta de corte. A utilização destas ferramentas foi ampliada paulatinamente passando a serem utilizadas nos tornos para cilindros de aço forjado, com os ganhos de produtividade que são relatados no corpo desta dissertação. O uso de ferramentas de cerâmica exige, no entanto, boa compreensão sobre seu processo de fabricação, características mecânicas, recuperação (reafiação), particularidades de aplicação, comportamento das máquinas- ferramenta, e compatibilidade com a composição química e aspectos superficiais das peças em usinagem, para que sua aplicação seja bem sucedida.

1.3 OBJETIVO DA DISSERTAÇÃO

É propósito desta dissertação estruturar o conhecimento prático obtido durante o mencionado processo, analisando-o e discutindo-o à luz da bibliografia pesquisada, procurando assim embasamento para algumas observaçãoes práticas que não achavam explicação dentro dos nossos conhecimentos da época. A presente estruturação de dados e resultados também evitará, em alguma medida, a diluição e perda do conhecimento adquirido ao longo do tempo, permitindo assim sua melhor transmissão no processo de treinamento, base fundamental do processo de melhoria contínua.

1.4 CARÁTER DA DISSERTAÇÃO

O caráter desta dissertação é tecnológico, no sentido que os dados obtidos foram extraídos de situações práticas no chão da fábrica, não sendo provenientes de ensaios planejados em condições controladas. O fato da fábrica estar trabalhando em regime de 24 horas/dia, 7 dias por semana e capacidade totalmente ocupada, também não permitiu realizar testes com dedicação exclusiva de tempo das máquinas, assim, os dados (por exemplo, as séries de fotografias de desgaste) foram obtidos diretamente de situações práticas, cujas condições por vezes apresentam variações próprias aos diferentes processos e produtos. O sucesso da fábrica entre outros fatores, está diretamente ligado ao reduzido lead- time (tempo de fabricação), que é um dos mais baixos registrados entre

unesp

concorrentes desse segmento industrial. Para isto, certamente contribui o uso de ferramentas elaboradas com cerâmicas avançadas, com suas consequentes vantagens em termos de consistência dimensional e velocidade de usinagem.

2 MATERIAIS

2.1 GENERALIDADES SOBRE OS MATERIAIS EM USINAGEM

Os materiais cuja usinagem estudaremos, são utilizados para a fabricação de cilindros de laminação. Estes cilindros são aplicados na laminação de aço e, em alguns casos, de alumínio.

O aço é utilizado na indústria e na construção, principalmente sob a forma de laminados planos e não planos; os laminados planos são comercializados em forma de chapas, tiras e fitas. Já os laminados não planos são comercializados sob a forma de tarugos, barras, fios máquina, arames e perfis.

Ambos tipos de laminados, planos e não planos, são produzidos por meio de laminadores; o processo de laminação é realizado a quente, com exceção das chapas finas, em que o processo é conduzido a frio.

As ferramentas utilizadas para realizar a deformação do metal nos laminadores, são os cilindros de laminação.

Os cilindros de laminação são fabricados pelos processos de fundição ou de forjamento.

Os cilindros para trabalho a frio (laminação de planos) são geralmente forjados em aço. As propriedades exigidas para estes cilindros são: alta resistência ao desgaste na superfície de trabalho e alta resistência mecânica no seu núcleo para suportar os esforços de laminação.

Os cilindros para trabalho a quente em laminação de planos, são fabricados geralmente em ferro fundido por centrifugação. Exige- se deste material, alta resistência ao desgaste e à fadiga térmica, e também alta resistência mecânica para absorver os esforços e choques durante a laminação.

unesp

Os cilindros para trabalho a quente em laminação de não planos podem ser fundidos ou forjados (dependendo do produto a ser laminado). Os materiais utilizados também devem possuir boa resistência ao desgaste e ao choque térmico.

Em caso de cilindros que atuam em laminação de tarugos e barras é utilizado o ferro fundido, produzido pelos métodos estático ou centrifugado; e no caso dos cilindros empregados para laminar perfis de grandes dimensões, utiliza- se o aço forjado. Neste último caso, o aço forjado perde para o ferro fundido em termos de resistência ao desgaste e ao choque térmico, mas ganha na resistência mecânica no caso do cilindro ser utilizado com canais profundos (os quais diminuem sua seção resistente).

Existe um tipo de cilindro, de encosto, que é empregado na laminação de planos para aumentar por contato mecânico, a rigidez à flexão dos cilindros de trabalho anteriormente descritos. Estes cilindros (seja no caso da laminação a frio ou a quente) são fabricados com aço forjado que deve resistir ao desgaste (estes cilindros estão em permanente contato com os cilindros de trabalho) e à fadiga de contato.

Na medida em que o cilindro desgasta por efeitos do trabalho, o mesmo é retirado do laminador e retificado na oficina de cilindros, para recuperar sua superfície retirando marcas recuperando suas características dimensionais.

A profundidade de camada endurecida, medida sobre o raio da mesa de trabalho, ao longo da qual as propriedades mecânicas mantém- se praticamente inalteradas, define o parâmetro chamado vida do cilindro ou camada de trabalho.

2.2 USINAGEM DE PRODUÇÃO

A usinagem inicial dos cilindros de laminação, ou seja aquela realizada durante a fabricação dos mesmos, é realizada na superfície da mesa de trabalho, que é a região onde a dureza e a resistência são máximas. O mesmo acontece na usinagem dos pescoços, onde existe uma região superficial (especialmente no caso dos cilindros fundidos) em que as propriedades mecânicas (dureza e resistência) são máximas. Os pescoços sofrem

unesp

pouco desgaste durante a vida útil do cilindro, sendo raramente re- usinados nas oficinas dos laminadores.

Do exposto, percebe-se que os materiais empregados em cilindros de laminação (sejam estes de ferro fundido ou de aço forjado) apresentam elevada resistência ao desgaste com elevada resistência mecânica na camada de trabalho da mesa. No caso do ferro fundido, estas características são obtidas pela precipitação de carbetos por efeito da alta velocidade de resfriamento superficial durante a solidificação; e (no caso específico de cilindros para laminação de planos) pela obtenção de matriz de martensita revenida após tratamento térmico de alívio de tensões (em alguns casos há presença residual de austenita retida, que acrescenta notável dificuldade de usinagem).

No caso dos aços forjados, a têmpera superficial, o tratamento sub-zero e o revenimento permitem obter uma matriz de martensita revenida, mas em certos casos a adição de elementos de liga determina uma rede de carbetos dispersos que aumenta a resistência ao desgaste.

A utilização dos cilindros exige elevada resistência ao impacto no núcleo da mesa e nos pescoços, motivo pelo qual os correspondentes materiais (sejam estes ferros fundidos ou aços forjados) apresentam alta tenacidade (dentro dos parâmetros típicos de cada uma destas famílias de materiais).

A presença de carbetos dispersos diminui a velocidade de corte passível de ser empregada por aumentar a taxa de desgaste das ferramentas; e dependendo do processamento, o tipo de matriz obtida pode provocar alongamento dos cavacos de usinagem, aumentando a solicitação térmica sobre a ferramenta de corte.

O processo de fabricação dos cilindros de laminação inclui as etapas de fundição ou forjamento, tratamento térmico e usinagem.

A operação de usinagem (e particularmente de torneamento, que focalizaremos neste trabalho) é realizada em diferentes etapas: o pré-desbaste (durante o qual é eliminada a casca de fundição ou forjaria), o desbaste (durante o qual é eliminada a maior parte do sobremetal) e o acabamento (algumas partes do cilindro são acabadas no torno, e outras são acabadas com sobremetal para retífica).

unesp

2.3 MATERIAIS DE CORTE

Durante muitos anos o torneamento dos cilindros de laminação foi executado com metal duro. No entanto, começaram a aparecer no mercado no início dos anos 90, diferentes tipos de cerâmica que permitiram acelerar notavelmente as operações de torneamento. Com efeito, este tipo de ferramentas permite aumentar (em geral, 3 vezes ou mais) a velocidade de corte em relação à utilizada com ferramentas de metal duro; e apesar do menor avanço permissível com cerâmica (geralmente até a metade do utilizado com metal duro), o resultado final é o de aumentar como mínimo em 50% a taxa de remoção de cavacos na usinagem dos cilindros.

Neste trabalho será apresentada a substituição de ferramentas de metal duro por ferramentas de cerâmica, realizada nas operações de torneamento longitudinal no processo de fabricação de cilindros para laminação de produtos planos e não planos. Em tabelas referenciadas ao longo do texto, serão mostrados os parâmetros de corte utilizados nos processos principais de torneamento longitudinal com aplicação de ferramentas de metal duro, e também com as ferramentas de cerâmica que as substituiram. O processo de torneamento com cerâmica foi implantado paulatinamente no caso prático que estudaremos, até que se chegou à utilização de cerâmica em grande parte dos processos longitudinais, com expressivo ganho de produtividade. O metal duro foi mantido apenas nas operações de pré- desbaste, devido ao fato que os sobremetais nas peças brutas de fundição e de forjaria apresentam variações (inclusive carepas ou regiões mais duras ou incrustradas de tinta de fundição, algumas ovalizações e irregularidades, etc.) que podem levar à quebra os insertos de cerâmica, devido a sua menor resistência ao impacto quando comparados aos insertos de metal duro.

Nesta dissertação também são descritos os processos de torneamento longitudinal que definem a utilização de insertos cerâmicos para a realização de todas ou algumas das suas operações. Estes processos são aplicados ao desbaste e acabamento de cilindros de laminação em ferro fundido (cilindros de trabalho para laminação de produtos planos e

unesp

não planos) e em aço forjado (cilindros de trabalho e cilindros de encosto, ambos para produtos planos). As operações de torneamento longitudinal são aquelas que maior tempo de usinagem consomem relativamente à totalidade do tempo consumido na usinagem dos cilindros. No processo de torneamento longitudinal, a cerâmica como ferramenta de corte, em substituição ao metal duro, encontra extensa aplicação.

Foi realizada uma revisão bibliográfica sobre a utilização de ferramentas de corte na usinagem de materiais ferrosos, focando particularmente a aplicação de cerâmicas. Foram abordados sucintamente assuntos geralmente não tratados em manuais para usuários de ferramentas, como o processo de fabricação das cerâmicas, seus mecanismos de falha e desgaste e, dentre estes, o processo de desgaste químico, que depende também da composição química da liga em usinagem e que em certas condições torna-se o mecanismo de desgaste (e falha posterior) predominante.

Um dos obstáculos para o uso mais ampliado da cerâmica como ferramenta de corte em usinagem é a sua fragilidade. Conforme indicado na literatura e verificado na prática de usinagem de cilindros de laminação, as irregularidades e heterogeneidades superficiais das peças são causas importantes de quebras de insertos. A dureza elevada do material da peça (no caso dos ferros fundidos coquilhados ou dos aços temperados) não constitui problema para o corte com cerâmicas (pelo contrário, no chão de fábrica da usinagem sempre é citado o ditado: para cerâmicas, quanto mais duro melhor); mas a combinação de elevada dureza com heterogeneidades geométricas e físicas (como propriedades mecânicas irregulares na superfície), é desfavorável para este tipo de insertos, podendo provocar fratura total com a consequente parada da máquina para sua troca. Esta situação é indesejável devido a diminuição de produtividade que acarreta, e aos perigos que envolve uma fratura repentina para o operador da máquina (podem ser projetados fragmentos do inserto) e para a peça (fragmentos do inserto podem entrar no espaço entre o porta-ferramenta e a peça danificando sua superfície). A troca do inserto pelo operador requer esfriamento dos fragmentos restantes no porta-ferramenta com ar comprimido, alívio da pressão do grampo pela soltura do parafuso correspondente, limpeza e verificação do alojamento (calços), retirada dos fragmentos, colocação e aperto

unesp

do novo inserto, usinagem de uma faixa de medida na peça, realização da medida da faixa na peça com trena de diâmetro, e realimentação da coordenada no Comando Numérico antes do reinício da usinagem. Caso tiverem sido registrados danos nos calços que suportam o inserto no porta- ferramenta, deverá ser substituído manualmente o bloco porta- ferramenta com peso aproximado de 15 kg, após ter soltado as cunhas de aperto e rosqueado um olhal para seu transporte até a bancada de ferramentas. Pelas razões explicadas, deve ser evitada ao máximo a ocorrência de fraturas dos insertos para manutenção da produtividade em nível adequado.

Os cilindros fundidos convencionalmente, ou seja Compostos ou PMs, para laminação de chapas grossas a quente, e Nodulares, para laminação de produtos não planos e perfís de aço, assim como os cilindros WR, centrifugados, para laminação de produtos não planos de aço, são passíveis de desbaste utilizando insertos de cerâmica desde o estado bruto de fundição. Já nos cilindros FHW centrifugados, para laminação de produtos planos de aço, não é viável a execução do desbaste desde o estado bruto de fundição com insertos de cerâmica, mesmo utilizando Si_3N_4 ou SiAlON, variedades estas de melhor tenacidade, devido aos elevados desgaste e número de quebras que são observados. Através de análise do processo de fabricação e de inspeção superficial dos cilindros mencionados nos parágrafos anteriores e da leitura de algumas publicações, procuramos neste capítulo alinhar as causas prováveis para explicar as diferenças de usinabilidade na operação de torneamento de desbaste a partir do estado bruto de fundição. Foram recolhidos cavacos típicos das principais operações de desbaste e acabamento em cilindros de laminação da produção normal, nas ligas mais frequentes. O objetivo da atividade foi o de observar a morfologia dos cavacos obtidos, verificando as afirmações da literatura quanto à melhor adequação da cerâmica aos materiais que apresentam cavacos curtos ou quebradiços.

Este trabalho procurou também mostrar de maneira resumida as faixas de parâmetros de corte habitualmente utilizados no torneamento com insertos de cerâmica em ferros fundidos e aços para cilindros, comparando- os aos valores dos parâmetros que habitualmente são utilizados para definir a usinabilidade do material (composição

unesp

química, tratamento térmico, microestrutura, características mecânicas), a classe de cerâmica (composição química, método de conformação, características microestruturais) e os parâmetros de corte (ângulos da ferramenta, profundidade de corte, avanço e velocidade de corte), para melhor poder realizar a interpretação e comparação dos dados com aqueles oriundos de publicações (catálogos e artigos) ou de outras observações práticas.

Quanto à fratura e desgaste dos insertos, foi realizada uma caracterização das sequências de desgaste típicas para os insertos utilizados no desbaste e acabamento de mesas e pescoços.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROPRIEDADES DOS MATERIAIS DE CORTE USUAIS EMPREGADOS EM USINAGEM

Na Figura 2, adaptada de (MEHROTRA, 1998), os materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas, são classificados (qualitativamente) pela sua resistência à deformação térmica (nas ordenadas) e pela sua tenacidade à fratura (nas abscissas).

Os campos desenhados para cada material representam sua resistência relativa à deformação a quente e à fratura respectivamente.

Durante a usinagem, a principal variável com influência sobre a temperatura é a velocidade de corte (SHAW, 1994); portanto quanto maior a velocidade, maior deverá ser a resistência à deformação a quente do material utilizado para assegurar uma vida conveniente ao inserto.

O aumento nominal das variáveis mencionadas nas abscissas (avanço, profundidade de corte, choque térmico e mecânico), provoca solicitações mecânicas crescentes nos insertos. Com isto, o material utilizado para confeccionar os mesmos deve apresentar uma resistência à fratura crescente.

unesp

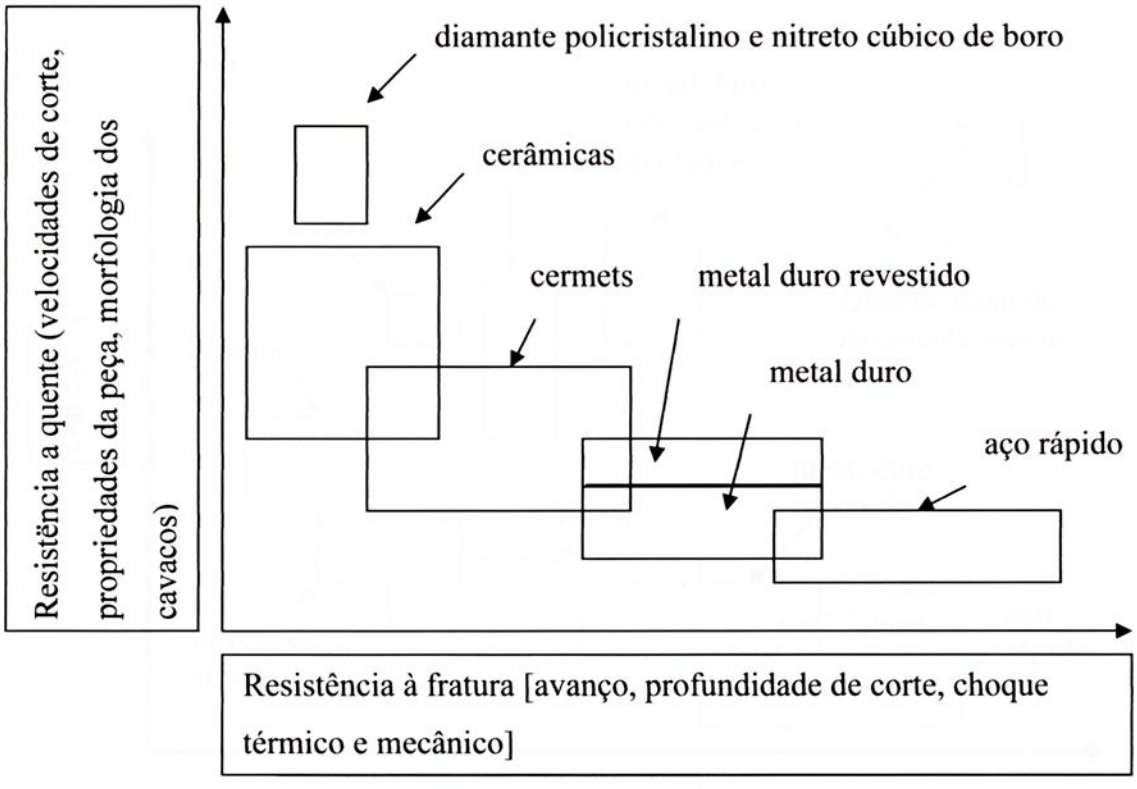


Figura 2-Representação gráfica de resistência à deformação a quente vs. resistência à fratura em materiais de corte usuais.

Adaptado de (MEHROTRA, 1998)

Na Figura 3, adaptada de (SHEN, 1998), os materiais de corte mais comuns para usinagem de ligas metálicas são classificados (qualitativamente) pela sua dureza (nas ordenadas) e pela sua tenacidade (nas abscissas).

Os campos desenhados para cada material representam suas dureza relativas e suas tenacidades respectivamente.

unesp

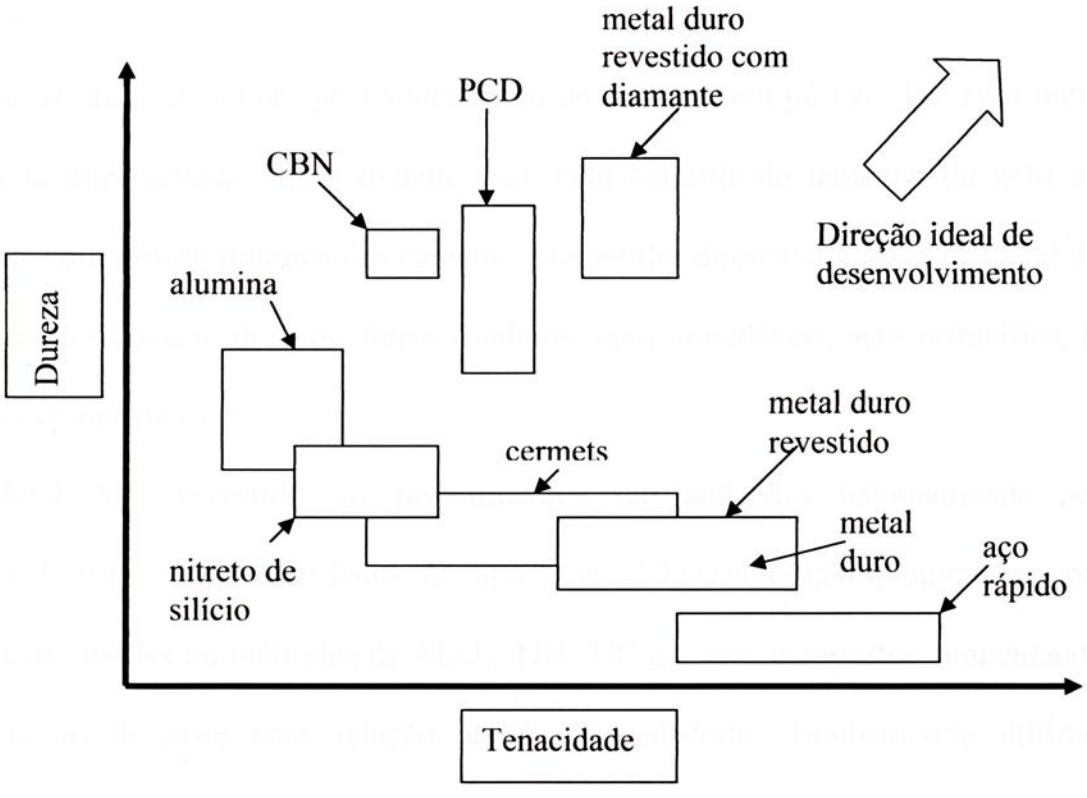


Figura 3-Representação gráfica da dureza vs. tenacidade em materiais de corte usuais.

Adaptado de (SHEN, 1998)

3.2 DESCRIÇÃO DOS MATERIAIS DE CORTE USUAIS:

Aços rápidos (CHRISTOPHER, 1994): a composição química destes aços incorpora C em teores mais altos que os dos aços comuns, e Cr, Mo, W, V, Co e outros elementos com o propósito de formar carbonetos que aumentam a resistência ao desgaste, para proporcionar resistência ao revenimento e para melhorar as propriedades mecânicas em altas temperaturas. Podem ser elaborados pelo processo convencional de lingotamento e laminação ou forjamento, e pelo processo de sinterização, que assegura

propriedades mecânicas mais isotrópicas. Também são utilizados com revestimentos cerâmicos.

Metal duro: elaborado pela sinterização de carbetos em pó (W, Ta, Ti, e outros) com um ligante metálico (normalmente Co). Pelo controle do tamanho do grão e da proporção/ composição química dos carbetos, são obtidas diferentes classes de metal duro apropriadas à usinagem de aços, ferros fundidos, aços inoxidáveis, aços refratários, não metálicos, compostos, etc.

Metal duro revestido: os revestimentos são aplicados habitualmente pelos processos de PVD (Deposição física de vapor), ou CVD (Deposição química de vapor), em camadas simples ou múltiplas de Al_2O_3, TiN, TiC e outros compostos; aumentando a resistência ao desgaste com relação àquela do substrato. Também são utilizadas ferramentas com revestimento de diamante.

Cermets: produzidos pela sinterização de óxidos e outros compostos (TiC, TiN, TaC), ligados com Ni (ou também Co e Mo) como ligante metálico.

O metal duro pode ser definido como um cermet, aonde o WC é o constituinte cerâmico.

Os cermets têm preço aprox. 20% menor que um Metal Duro sem revestimento. São efetivos para usinagem de aços, resistentes ao desgaste e à cratera durante a formação do cavaco contínuo.

Os cermets são mais populares no Japão (30% das vendas de ferramentas), contra % de utilização nos EUA (CHRISTOPHER, 1994)

Cerâmicas: produzidas por sinterização de pós cerâmicos refinados em grande variedade de composições químicas, as cerâmicas para usinagem em uso atualmente são baseadas em alumina (Al_2O_3) ou em variedades de nitreto de silício (Si_3N_4). Também são

unesp

utilizadas cerâmicas compostas (reforçadas com fibras cerâmicas), e cerâmicas revestidas com revestimentos cerâmicos.

Diamante policristalino: sintetizado a grandes pressões e temperaturas, é utilizado em ferramentas de corte e abrasivos. Encontra campo de aplicação na usinagem de ligas de alumínio silício e diferentes tipos de materiais compostos. A orientação randômica do PCD constitui uma melhoria com relação ao diamante natural, devido à possível presença neste, de planos de clivagem.

Nitreto Cúbico de Boro (CBN): sintetizados a grandes pressões e temperaturas, são utilizados como ferramentas de corte e abrasivos. Utilizados na usinagem de aços temperados, ferros fundidos duros, e superligas.

O CBN pode ser usado para tornear ligas de níquel, mas dificilmente compete em custo neste campo contra os insertos de alumina com whiskers (relação de custo 3:1).

Outra aplicação é a de tornear ligas ferrosas duras (65 a 68 HRC). Este tipo de peça é habitualmente retificado e não usinado. A taxa de remoção da usinagem é aproximadamente 10 vezes maior que a de retificação. (CHRISTOPHER, 1994)

3.3 BREVE HISTÓRICO DE DESENVOLVIMENTO DAS FERRAMENTAS CERÂMICAS

As ferramentas de cerâmica constituem até 5% do mercado total de ferramentas de usinagem (MARCONDES, 1990); esta percentagem também é citada informalmente por técnicos ligados a funções de venda de ferramentas na atualidade, nas estimativas de mercado de ferramentas de corte. Outro autor (TRENT; WRIGHT, 2000) conceitua como de 8% as vendas de insertos de cerâmica sobre o as vendas totais de insertos; levando em conta as vendas de aço rápido, que respondem por aproximadamente metade das vendas totais de ferramentas de corte, obteremos uma percentagem de vendas de cerâmica de ordem de grandeza comparável aos 5% já citados. Deve ser levado em conta que estas percentagens são calculadas a partir de estimativas, já que os resultados de pesquisas das empresas que participam deste mercado não são acessíveis.

unesp

Apesar da maior vida de aresta e velocidade que os insertos de cerâmica permitem com relação ao metal duro revestido (inclusive pelo fato de serem re- afiáveis), sua maior tendência à fratura (e a aleatoriedade desta) têm restringido sua aplicação em usinagem. As épocas de surgimento de alguns dos diferentes materiais de corte está esquematizado na Figura 4.

A primeira ferramenta de cerâmica foi introduzida por Degussa na Alemanha em 1905.

Em 1954, Ford Motor Co. foi a primeira a utiliza- las em produção em larga escala. (KRISHNAMURTI; GOKULARATHNAM, 1994)

As primeiras ferramentas consistiam de Al_2O_3 com fase vítrea de talco ou argila (pouca dureza a quente).

Nos anos 1930 foi lançada a Degussit (Al_2O_3, tamanho de grão 3 μm, densidade 98%) com adição de MgO. Uma ferramenta similar, a Microlite, foi lançada na União Soviética à época. Nos anos 1960 apareceram no Japão, Europa e EUA diversas composições com Al_2O_3.

Por exemplo, a divisão Carboloy da GE lançou o Al_2O_3 com TiO_2, que ganhou muita aceitação no mercado.

Também nos anos 60, foram lançadas cerâmicas prensadas a quente; entre as mais difundidas estavam a CCT-707 Carborundum e a VR- 97 Norton (esta última composta de Al_2O_3 e MgO), vide Figura 4, adaptada de (BALDONI; BULJIAN, 1994).

A prensagem a quente permite obter maior densidade e torna o material menos susceptível a heterogeneidades na mistura. (KING, 1994).

Ao longo da década de 60 foram lançadas comercialmente as cerâmicas a base de Al_2O_3 adicionado de TiC e TaC, com objetivo de aumento de tenacidade. As ferramentas a base de nitreto de silício iniciaram sua aplicação na mesma época, até que no fim da década de 70 foram lançados no mercado os insertos de Si_3N_4 e SiAlON (TRENT; WRIGHT, 2000), muito bem sucedidos em várias aplicações. Porém, apenas na década de 80 as ferramentas de cerâmica conquistaram uma parcela não desprezível do mercado de ferramentas de usinagem (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003), na medida dos

unesp

desenvolvimentos obtidos no processamento desses materiais (por exemplo, melhor controle de tamanho de grão). Duas das classes melhor sucedidas no fim da década de 80 e início dos anos 90 para a usinagem de ferros fundidos e aços temperados foram respectivamente a KY 3000 (SiAlON) da Kennametal, e a HC2 (Al_2O_3 com TiC) da NTK. Na década de 90 foram lançadas no mercado novos tipos de cerâmicas (a base de alumina reforçadas com monocristais ou whiskers de carbeto de silício) (TRENT; WRIGHT, 2000) com maior tenacidade, e também nitretos de silício com recobrimentos múltiplos de Al2O3 e TiCN (NTK CUTTING TOOLS, 2000) com resistência ao desgaste e tenacidade otimizadas.

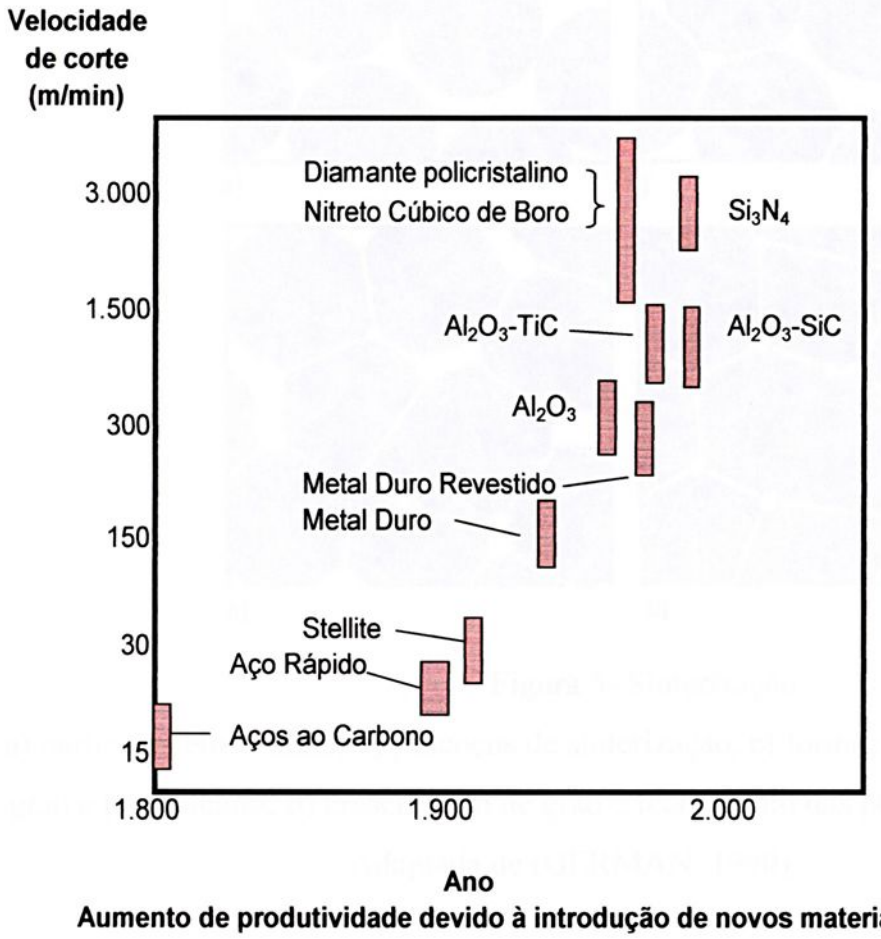


Figura 4-Quadro de cronologia de ferramentas de corte desde aço carbono até nitreto de silício.

Adaptado de (BALDONI; BULJIAN, 1994)

3.4 PROCESSO DE FABRICAÇÃO DAS CERÂMICAS

As cerâmicas avançadas são elaboradas a partir de pós, com tamanho de partículas de dimensões geralmente menores a 1 μm (KING, 1994). O processo é esquematizado na Figura 5, adaptada de (GERMAN, 1990).

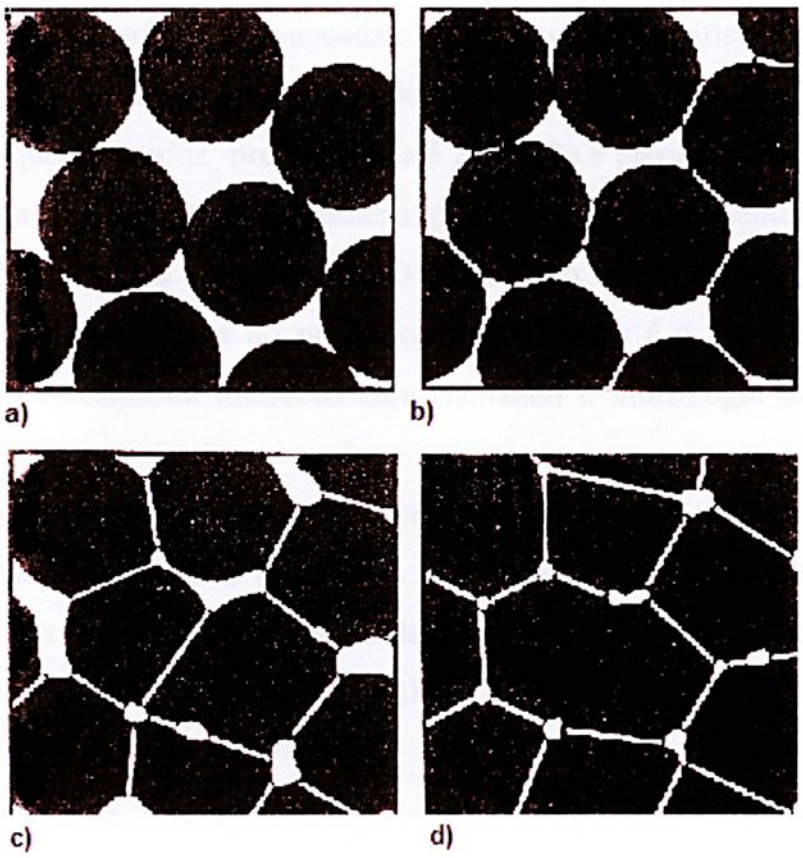


Figura 5- Sinterização

a) partículas em contato, b) pescoços de sinterização, c) formação de contornos de grão e porosidades, d) crescimento de grão e fechamento das porosidades.

Adaptada de (GERMAN, 1990)

Os pós cerâmicos para fabricação de cerâmicas avançadas são obtidos por processos físico- químicos cujo propósito é o de diminuir o teor de elementos contaminantes; diversamente das cerâmicas comuns (como as louças de mesa, os

porcelanatos e outras) cujas matérias primas são geralmente obtidas na natureza com relativamente pouco processamento posterior (KINGERY, 1976).

Uma das etapas críticas na fabricação de cerâmicas avançadas é a cominuição (moagem e mistura dos pós cerâmicos e aditivos), já que o controle da granulometria é crítico nestes produtos; ao mesmo tempo em que é necessário evitar que a moagem contamine a mistura com os produtos de desgaste dos elementos moedores.

Na conformação das cerâmicas avançadas, a prensagem isostática a quente é largamente utilizada para densificar cerâmicas destinadas a ferramentas de corte; a prensagem isostática a quente produz pressões de até 200 MPa e procede sob gás inerte (N_2, Ar) como atmosfera de compactação. A sinterização também é geralmente realizada sob atmosfera controlada, neutra ou redutora. O tratamento térmico das cerâmicas avançadas é outro dos passos críticos do processo, cujo objetivo é o de minimizar a porosidade mantendo o controle da microestrutura (tamanho e morfologia dos grãos, transformação de fases).

Uma particularidade do processamento das cerâmicas avançadas para ferramentas de usinagem é que alguns compostos como TiC e TiN (utilizados para aumentar a resistência ao desgaste das aluminas) dificultam a densificação por tratamento térmico, o que adiciona complexidade ao processamento. (GRUSS; FRIEDERICH, 1994)

3.5 TIPOS DE CERÂMICAS

As cerâmicas podem ser divididas em: com matriz de óxidos, misturadas e sem óxidos.

Dentro do grupo de cerâmicas sem óxidos, podemos classificar o nitreto cúbico de boro, o Si_3N_4 e o diamante.

O Sialon entra no grupo das cerâmicas misturadas e das cerâmicas sem óxidos.

Vários tipos de cerâmica têm sido utilizados ao longo do tempo, mas apenas duas estão em uso corrente atualmente: à base de alumina (mais resistente ao desgaste) e à base de nitreto de silício (mais resistente à fratura) (KING, 1994).

unesp

Quanto à alumina, uma das suas limitantes ao seu uso como ferramenta de corte na usinagem é sua baixa resistência á fratura, que provoca quebras súbitas dos insertos.

Durante a usinagem, a maior tensão de tração existe geralmente logo abaixo da superfície do inserto e com direção paralela à mesma, o que pode promover o início de trincas perpendiculares à superfície que se propagadas, levam à destruição total dos insertos.

A alumina prensada a frio (processo este que evita o crescimento excessivo dos grãos) apresenta habitualmente cor branca; a adição de TiC e ou TiN aumenta a dureza ao formar uma dispersão de partículas duras, que permite usinar aços ferramenta de dureza de até 63 HRC (CHRISTOPHER, 1994). As partículas de 2ª fase desviam as trincas em início de formação, dirigindo- as para a superfície. O resultado é a formação de pequenas partículas de desgaste ao invés de grandes volumes. A baixa expansão térmica e alta condutividade de calor desses carbetos também melhoram a resistência ao choque térmico e à fadiga das cerâmicas. O TiN melhora a resistência a trincas têrmicas (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

A alumina pura apresenta resistência à flexão de 70- 84 kg/ mm^2, sendo que a alumina com adição de carbeto de titânio (TiC) apresenta resistência à flexão de 84- 94 kg/ mm^2, pela ação dos grãos de TiC que dificultam a propagação das trincas iniciadas na superfície.

Também podem ser utilizadas partículas menos refratárias (zircônia parcialmente estabilizada) que extraem energia da trinca permitindo seu redirecionamento. Para evitar a transformação de fase da zircônia, adiciona- se óxido de ítria. (SHAW, 1994)

As aluminas também podem ser prensadas a quente; este processo é menos dependente das propriedades do pó do que a prensagem a frio com sinterização posterior, assegurando densidade praticamente total. As cerâmicas prensadas a quente apresentam habitualmente cor preta.

As aluminas pode ser reforçada com monocristais (*whiskers*) (JIANXIN; XING, 1996) de carbeto de silício (SiC), adicionados à cerâmica base com orientação randômica, obtendo- se alta tenacidade (estas cerâmicas compostas obtém sucesso particularmente

unesp

nas ligas de níquel). Os monocristais habitualmente utilizados são os de carbeto de silício (SiC) com diâmetro de 0,5 μm e comprimento de 30 μm aproximadamente. Os monocristais representam 40% em volume deste tipo de cerâmica, e tipicamente contém fases beta ou mistura de alfa e beta de SiC.

O custo da cerâmica reforçada é aproximadamente o dobro daquele da cerâmica Al_2O_3 +TiC.

A alumina com monocristais de SiC têm sido usada com sucesso em usinagem de alta velocidade, devido á sua dureza e tenacidade superiores. Este material também apresenta boa estabilidade química a altas temperaturas (menor no entanto do que as aluminas sem reforço de monocristais).

A susceptibilidade da Al_2O_3 ao choque mecânico limitou sua aplicação industrial; a principal razão para esta característica é a ausência de uma segunda fase dútil para deter as trincas e o lascamento (KRISHNAMURTI; GOKULARATHNAM, 1994). No metal duro, este papel é desempenhado pela 2ª. fase de cobalto (com carbetos de titânio); e nos cermets pelo níquel e pelos carbetos de titânio (TiN).

3.6 NITRETO DE SILÍCIO E DERIVADOS:

Há 3 famílias diferentes de cerâmicas baseadas em Si_3N_4 (BALDONI; BULJIAN, 1994):

- nitreto de silício com aditivos de sinterização para formar fases vítreas
- soluções sólidas de nitreto-alumínio-oxigênio (SiAlONs)
- compostos com matriz de nitreto de silício

A forte ligação covalente do nitreto de silício determina alta resistência, estabilidade térmica até aproximadamente 1850 °C (a partir da qual decompõe), boa resistência à oxidação, baixo coeficiente de expansão térmica (portanto boa resistência ao choque térmico), e um módulo de elasticidade maior que o de muitos metais. No entanto devido à natureza da sua ligação, possui um baixo coeficiente de auto- difusão que não permite a aplicação de tecnologias convencionais de processamento como sinterização em estado sólido, requerendo aditivos (dopantes) para se obter alta densificação.

unesp

Por meio de cominuição os aditivos de sinterização são misturados ao pó, que posteriormente é densificado (geralmente em atmosfera de nitrogênio) em altas temperaturas. Posteriormente a mistura é prensada isostaticamente a quente.

A impureza predominante no Si_3N_4 é o SiO_2 (fase alfa), presente na superfície das partículas. Durante a densificação a mistura de aditivos reage com o SiO_2 para formar uma fase líquida (vítrea) que facilita o re- arranjo das partículas de Si_3N_4. A fase intergranular é um vidro (ou vidro parcialmente desvitrificado) baseada em SiO_2 e outros aditivos de sinterização como alumina, ítria, magnésia, óxido de césio, etc. (DE SOUZA, 2005). Durante o processo o Si_3N_4 alfa dissolve e precipita na fase beta (transformação de fase reconstrutiva), cujos núcleos crescem como grãos alongados entrelaçados.

As propriedades mecânicas de uma cerâmica de Si_3N_4 dependem na granulometria e distribuição do beta nitreto de silício, assumindo completa conversão da fase alfa (o que é geralmente desejado). As fases intergranulares amorfas quando presentes em volume excessivo, diminuem a resistência a quente da cerâmica.

Para explicar a sinterização dos SiAlONs, deve ser analisado um diagrama de fases $Si_3N_4/SiO2/Al_2O_3/AlN$, o qual revela uma região de solubilidade de Al e O no β Si_3N_4 , que substituem posições de Si e N respectivamente, formando a solução sólida substitucional, referida como β SiAlON.

A equação geral deste material é

$$Si_{6-z}Al_zO_zN_{8-z} \qquad (1)$$

(BALDONI; BULJIAN, 1994) onde z designa o número de átomos de oxigênio substituidos por nitrogênio e têm um valor limite de 4,2 para 1700 °C e 2 a 1400 °C.

No SiAlON, a fase intergranular resultante da sinterização (mais frágil) pode ser relativamente pequena devido à incorporação (por substituição) de elementos do dopante na matriz; afetando assim em menor grau sua dureza e tenacidade.

Os SiAlONs apresentam elevadas dureza a quente e resistência ao choque térmico, e boa tenacidade; mas sua estabilidade química é baixa. As cerâmicas a base de nitreto de

unesp

silício puro apresentam resistência ao desgaste similar à das cerâmicas de alumina, com uma tenacidade superior a estas (DE SOUZA, 2005); razão pela qual são utilizadas em desbaste, e estas últimas em acabamento. Tanto os SiAlONs quanto os nitretos apresentam baixa estabilidade química quando usinando ligas de ferro (particularmente aços com cavacos longos). As cerâmicas de nitretos normalmente exibem maior resistência à fratura e menor resistência ao desgaste que SiAlON.

O uso de cerâmicas a base de nitretos quando aplicáveis, pode aumentar tipicamente a taxa de remoção em mais de 200% sobre o Metal Duro.

Têm sido desenvolvidos compostos com monocristais de SiC adicionados ao Si_3N_4 para a usinagem de alta velocidade, especialmente em superligas. A forma lenticular do nitreto, e eventualmente do SiCw (*whiskers*, ou monocristais de carbeto de silício), colaboram com a tenacidade (por sua elevada razão de aspecto) (MEHROTRA, 1998).

Na Tabela1 são relacionadas algumas famílias de materiais e os tipos de cerâmicas mais convenientes para a usinagem das mesmas.

Tabela 1-Aplicações típicas de nitreto de silício, sialon, aluminas (cerâmicas brancas, cerâmicas pretas) e cerâmicas com monocristais, no torneamento.
Adaptada de (MC COLM, 1992)

Material da Ferramenta	Aplicação
Nitreto de Silício	Desbaste de ferros fundidos e superligas
SiAlON	Desbaste de ferros fundidos e superligas
Cerâmicas com Whiskers	Acabamento de superligas
Cerâmicas pretas	Acabamento de ferros fundidos, aços, e aços temperados
Cerâmicas brancas	Acabamento de ferros fundidos e aços

unesp

Na Tabela 2 observam- se os materiais de corte recomendados para ferros fundidos, aços e superligas, e velocidades de corte e avanços normalmente recomendados para cada tipo de material em usinagem e para cada tipo de ferramenta de corte.

Tabela 2-Parâmetros de corte usuais
em função do material da ferramenta e do material da peça.
Adaptada de (MC COLM, 1992)

Material da ferramenta	Parâmetros de corte (V_c [m/min] f [mm/rot.])	Ferros Fundidos	Superligas	Aços	Torneamento de aços temperados
Nitreto de Silício	v_c	180- 1070	90- 245		
	f	0,08- 1,02	0,15- 0,31		
SiAlON	v_c	180- 1220	90- 310		
	f	0,08- 0,76	0,10- 0,30		
Cerâmica com Whiskers	v_c		90- 430		30- 105
	f		0,08- 2,60		0,08- 0,36
Cerâmica preta	v_c	150- 1370	185- 430	150- 910	30- 140
	f	0,08- 0,76	0,08- 0,20	0,13- 0,38	0,08- 0,37
Cerâmica branca	v_c	310- 1070		150- 910	
	f	0,13- 0,51		0,13- 0,38	
Metal Duro revestido	v_c	60- 430	25- 120	60- 430	25- 70
	f	0,08- 0,76	0,01- 0,02	0,15- 0,76	0,003- 0,014
Nitreto Cúbico de Boro	v_c				61- 152
	f				0,05- 0,31

unesp

3.7 CARACTERÍSTICAS DAS FERRAMENTAS DE CERÂMICA

O principal motivador para o desenvolvimento de ferramentas de cerâmica é a possibilidade de utilizar velocidades de corte da ordem de 300 m/min ou maiores (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998); o fator determinante da vida da ferramenta a essas temperaturas é a interação química, campo no qual as cerâmicas apresentam vantagens devido à sua relativamente baixa reatividade.

O maior problema das cerâmicas e que limita sua aplicação mais ampla na usinagem é a falta de tenacidade, o que resulta em quebra ou lascamento. Devido à fragilidade das cerâmicas, os defeitos superficiais nas ferramentas (como lascamentos produzidos durante a usinagem ou desgastes não removidos durante as reafiações anteriores) agem como amplificadores de tensão e precipitam frequentemente a fratura do inserto durante a usinagem (PHILIPS, 1972). Por este motivo, a utilização ideal das cerâmicas é aquela que provoca desgaste apenas por abrasão ou desgaste químico, porque desta forma evita-se o surgimento de lascamentos que ao se propagarem ou ao induzir fraturas, encurtam a vida da ferramenta (MEHROTRA, 1998).

Para utilizar ferramentas de cerâmica, a máquina ferramenta deve ser capaz de operar em alta velocidade para aproveitar a característica deste das mesmas em termos de resistência a quente. Além disso, não deve apresentar vibrações indevidas durante o corte (as vibrações aumentam a probabilidade de lascamentos e trincas na ferramenta). As grandes forças de corte que surgem durante a usinagem de materiais endurecidos requerem ferramentas com alta resistência e dureza, como as cerâmicas. Estas são muitas vezes utilizadas com geometrias negativas (MEHROTRA, 1998) (no caso dos cilindros de laminação são sempre utilizadas com ângulos de saída negativos e chanfros) para protegê-las de lascamentos devido à sua fragilidade, o que aumenta as forças de corte. As tensões nas regiões de pressão dos grampos sobre as ferramentas devem ser baixas evitando-se as concentrações de tensão; os calços e as superfícies de apóio das ferramentas devem ser planas ou ajustar-se bem à forma das ferramentas.

unesp

A velocidade de corte é a influência dominante sobre a temperatura da ferramenta na região do corte; os materiais de confecção de ferramentas com melhor resistência a quente permitem a aplicação de maiores velocidades (caso das cerâmicas), o que pode representar maior produtividade (MEHROTRA, 1998).

A resistência do inserto a lascamentos e fraturas depende do tipo de preparação da aresta principal de corte (afiação) e da sua geometria. Na Figura 6, adaptada de (KING, 1994) é possível comparar a resistência atribuída aos diferentes tipos de preparação da aresta de corte. A aresta chanfrada é considerada a mais resistente a lascamentos. Na mesma Figura é possível comparar a resistência à fratura atribuída a diferentes geometrias de insertos, que é crescente a partir do formato triangular, passando pelo losangular, quadrado, chegando à resistência máxima nos insertos de seção circular. Na medida que o ângulo de posição decresce e a força de corte se distribui ao longo de uma aresta maior, as tensões na região do corte decrescem. Por exemplo, um inserto redondo aplicado a pequenas profundidades de corte fornece comparativamente com outras geometrias, a maior vida da ferramenta.

A escolha da forma do inserto e sua medida dependem da geometria da peça, sendo que a resistência do inserto aumenta na medida do aumento do ângulo incluido nas arestas de corte, ou da ponta da ferramenta. A resistência do inserto também aumenta com o aumento da espessura e do seu tamanho, Figura 6. Na escolha da geometria do inserto deve ser levado em conta o número de arestas de corte, para maximizar sua utilização através de indexação, diminuindo o custo.

A preparação da aresta de corte é de fundamental importância no desempenho do inserto. Entende- se por preparação ou afiação, a execução de chanfro (um plano retificado em ângulo com relação ao plano da superfície de saída do inserto, no sentido de tornar esse plano de saída mais negativo nas imediações da aresta principal de corte). O chanfro (*T- land* em inglês) é geralmente dimensionado com um ângulo de saída de -10 a -35°, e largura de 0,05 até 0,15 mm; uma combinação de ângulo e largura muito utilizada é -20 ° x 0,10 a 0,15 mm. A largura do chanfro deve ser maior quanto maior for o avanço, e seu ângulo negativo de saída deve ser diminuir quanto maior for a largura do chanfro.

unesp

No caso de torneamento duro, deve ser realizado *honing* (arredondamento da intersecção entre o ângulo de saida no chanfro, e o plano de folga) para aumentar a resistência da aresta de corte ao lascamento, cujo raio guarda proporção com o chanfro adotado e é determinado experimentalmente.

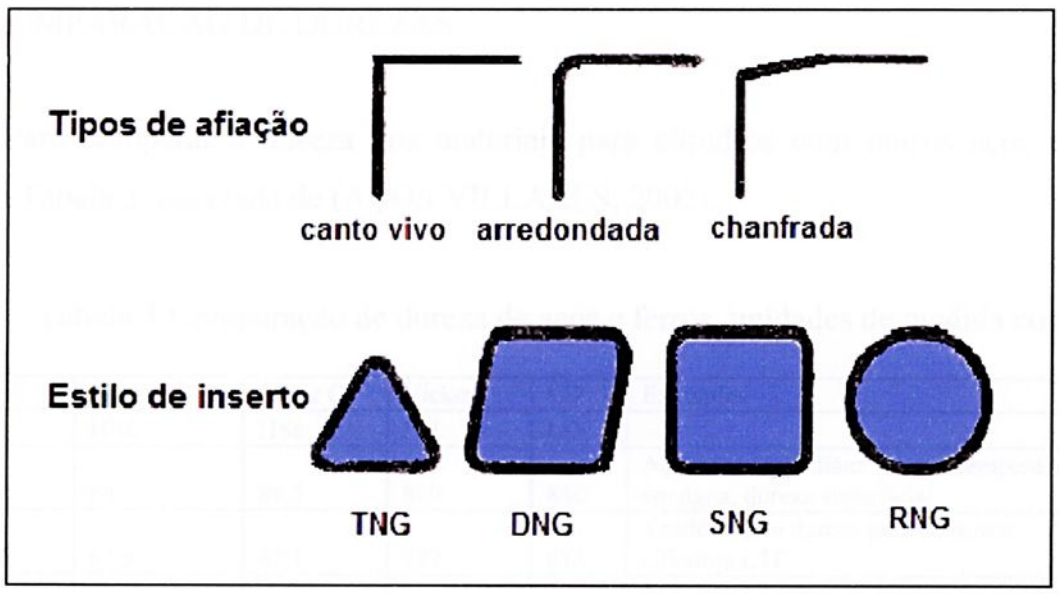


Figura 6-Afiação de arestas de corte e estilos de insertos ordenados de menor para maior resistência mecânica.
Adaptada de (KING, 1994)

A temperatura durante o corte é a variável isolada mais importante.
A equação da vida da ferramenta de Taylor:

$$vT^n = Cte \quad (2)$$

(com v= velocidade de corte, T= tempo e n= expoente que depende do material da ferramenta de corte), apresenta boa aproximação para metal duro e cerâmica na gama habitualmente utilizada de parâmetros de corte: velocidades, avanços e vida da ferramenta.

Na equação de Taylor pode ser adotado um coeficiente n= 0,4 para ferramentas de cerâmica com boa aproximação (SHAW, 1994).

O expoente n aumenta na medida da refratariedade do material de corte (maior resistência ao amolecimento térmico).

3.8 COMPARAÇÃO DE DUREZAS

Para comparar a dureza dos materiais para cilindros com outros aços comuns segue a Tabela 3, adaptada de (AÇOS VILLARES, 2002).

Tabela 3-Comparação de dureza de aços e ferros, unidades de medida comuns

Brinell	Rockwell	Shore C	Vickers	LD	Exemplos
HB	HRC	HSc	HV	LD	
(722)	64	88,5	800	846	Aço AISI 1095 diâm. 25 mm temperado em água, dureza superficial
(714)	63,5	87,1	787	842	Tendência de dureza para os novos cilindros LTF
(644)	59,5	80	685	803	Aço para cilindros de laminação de planos a frio (LTF), temperado e revenido. Ferro de coquilhamento indefinido para cilindro de laminação de produtos planos (FHW)
(632)	58,8	78,8	672	798	Aço rápido para cilindros de laminação de produtos planos a quente (FHW)
(609)	57,7	76,8	647	787	Ferro de coquilhamento indefinido 17% Cr (FHW). Ferro indefinido (WR) para cilindro acabador de laminação de produtos não planos
(550)	54,4	71,9	584	757	Ferro Nodulite para cilindro acabador de laminação de produtos não planos
(477)	49,7	64,6	508	717	Ferro Nodulite para cilindro pré- acabador de laminação de produtos não planos. Aço AISI 1040 diâm. 25 mm temperado em água, dureza superficial
(466)	48,8	63,4	495	709	Aço para cilindros de encosto de laminação de planos, temperado e revenido (BUR)
(453)	47,8	62,2	482	696	Ferro Nodulite B para cilindro intermediário de laminação de produtos não planos
(431)	46	59,7	457	683	Aço AISI 1030 diâm. 25 mm temperado em água, dureza superficial
319	34	46,1	336	598	Ferro Nodulite para cilindro desbastador de laminação de produtos não planos

unesp

3.9 USINAGEM DE FERROS FUNDIDOS

A usinagem de ferro fundido cinzento produz cavacos curtos, e causa desgaste abrasivo nas ferramentas devido às partículas de carbonetos. O ferro fundido nodular produz cavacos mais longos, acelerando as reações químicas e o desgaste na ferramenta (MEHROTRA, 1998).

As cerâmicas de nitreto de silício e SiAlON são aplicadas à usinagem de ferros fundidos. Devido à sua resistência à fratura são usadas também em ferro nodular, com maior desgaste do que na usinagem do ferro fundido comum devido à maior reatividade (aumentada devido às maiores temperaturas desenvolvidas durante o corte).

As cerâmicas brancas e pretas oferecem maior resistência ao desgaste do que as ferramentas da família dos nitretos na usinagem de ferros fundidos, portanto são utilizadas em acabamento (torno) dessas ligas devido à sua maior capacidade de manutenção das tolerâncias dimensionais. Em certas casos, as cerâmicas brancas podem ser utilizadas também na usinagem de superligas, constituindo- se em alternativa mais econômica.

Normalmente não é utilizada refrigeração (MEHROTRA, 1998) durante a usinagem dos ferros fundidos com ferramentas de cerâmica. Isto é devido à sua melhor capacidade de manutenção de dureza em altas temperaturas, mas também devido à sua menor resistência ao choque térmico. O acesso do fluído de corte às regiões aquecidas da ferramenta não é contínuo devido ao fenômeno de formação e quebra do cavaco, o que submete a ferramenta a uma sucessão de choques térmicos que normalmente não é bem suportada pelas cerâmicas, especialmente as da família das aluminas.

Para ferros de menor dureza (não ligados), a cerâmica branca oferece uma alternativa econômica na usinagem de acabamento. As solicitações mecânicas introduzidas por este tipo de materiais na ferramenta relativamente baixas, sendo bem suportadas por este tipo de cerâmicas mais frágeis mas ao mesmo tempo de menor custo de fabricação, portanto de menor preço do que as cerâmicas mistas (adicionadas de carbetos). Em contraposição, a mellhor resistência à fratura do SiAlON o faz ideal para

unesp

usinagem de desbaste e de peças de alta resistência. A melhor tenacidade das cerâmicas da família dos nitretos as faz capazes de suportar inclusive aplicação em usinagem interrompida de superligas, naturalmente em velocidades menores do que as que seriam aplicáveis em SiAlON ou em cerâmicas compostas (reforçadas).

As cerâmicas com whiskers (monocristais) não são geralmente usadas em usinagem de ferro fundido devido à rápida reação entre SiCw (abreviatura química dos moncristais de carbeto de silício) e o ferro levando a rápido desgaste (MEHROTRA, 1998).

3.10 USINAGEM DE AÇOS

Produzem cavacos longos e contínuos, levando a altas temperaturas de corte e reações acentuadas com o material da ferramenta. Praticamente todo o calor é absorvido pelo cavaco, quando a usinagem é realizada dentro de parâmetros usuais (MEHROTRA, 1998).

A resistência do aço aumenta com o conteúdo de carbono; e a penetração de dureza no raio da peça depende do teor de ligas e do tratamento térmico. Maior resistência mecânica do material requer também maior resistência da ferramenta de corte.

Cerâmicas brancas e pretas são usadas para usinagem de acabamento de alta velocidade em aços (médio carbono e baixa ou média liga) devido à sua boa resistência ao desgaste. No entanto, não são adequadas ao corte interrompido. Na usinagem de aços, o modo predominante de desgaste das ferramentas de nitreto de silício é químico (com desgaste da ordem de 2 vezes maior que na usinagem de ferro cinzento) (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998).

Da mesma maneira do que na usinagem de ferros fundidos, o uso de refrigeração não é recomendado em usinagem de aços com cerâmicas.

Uma das variáveis que devem ser controladas durante a usinagem dos aços é a da quebra dos cavacos por motivos de segurança, disposição, estocagem e re-processamento. A tecnologia dos quebra cavacos não têm sido desenvolvida nos insertos

unesp

de cerâmica (tecnologia que no entanto já foi desenvolvida em ferramentas de cermets e metal duro). Nas cerâmicas, os quebra- cavacos são fixados em forma de placas em cima das ferramentas.

Nitretos, SiAlON e aluminas reforçadas não são geralmente usadas em usinagem de aços devido à reatividade excessiva entre o nitreto ou os whiskers com o ferro, levando a rápido desgaste (MEHROTRA, 1998).

Tolerâncias dimensionais estreitas e near net shape (procura pelos menores sobremetais possíveis aproximando as peças brutas às medidas finais) nos processos de forjamento, fundição ou sinterização, tem exigido torneamento de peças com pequenos sobremetais e durezas de têmpera de 50 a 65 HRC em aços (bem como também em ferros fundidos); e este é o caso dos cilindros de laminação nas suas mesas de trabalho.

Assim como no caso de usinagem de ferros fundidos, as cerâmicas brancas são usadas em peças de aço de baixa dureza com cortes contínuos e leves. As cerâmicas mistas aplicam- se bem a cortes de acabamento em aços endurecidos. As cerâmicas reforçadas (com monocristais) não são convenientes para usinagem de aço em alta velocidade devido ao rápido desgaste químico; este desgaste é menor nas cerâmicas reforçadas com monocristais que receberam adição de zircônia (MEHROTRA, 1998). Estudos dos mecanismos de desgaste químico têm levado mais recentemente ao desenvolvimento de ferramentas cerâmicas de nitreto de silício revestido com alumina e/ ou nitreto de titânio, quimicamente mais inertes que o material base.

3.11 MODOS DE FALHA E DESGASTE NAS FERRAMENTAS CERÂMICAS

Uma boa compreensão dos mecanismos de desgaste é fundamental para a utilização bem sucedida destas das ferramentas de corte de cerâmica.

O processo de desgaste da ferramenta durante a usinagem é complexo e não pode ser explicado apenas por um mecanismo simples como abrasão, deformação plástica, delaminação, adesão, instabilidade química, reação química ou tribo- oxidação. Na Figura 7 foram esquematizados.alguns tipos de desgaste (MEHROTRA, 1998).

unesp

Em geral, o desgaste da ferramenta pode ser explicado como uma combinação de mecanismos químicos e mecânicos. O desgaste químico pode ser visto como dissolução e difusão do material da ferramenta na peça (e no cavaco).

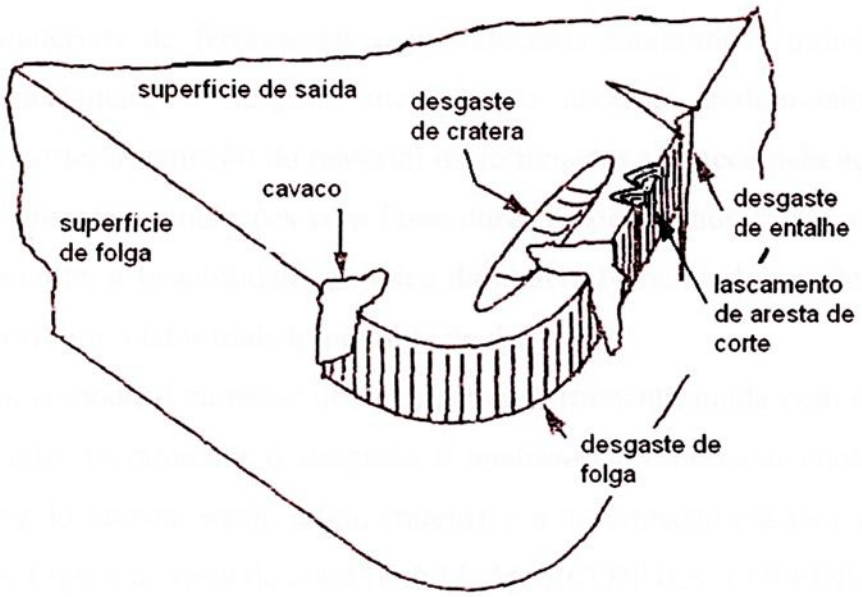


Figura 7-Representação dos desgastes em um inserto.
Adaptado de (MEHROTRA, 1998)

As cerâmicas são consideradas materiais de grande resistência ao ataque químico; mas em certas aplicações de usinagem podem falhar devido à alta temperatura gerada em regiões adjacentes à aresta cortante. A temperatura alcançada depende dos parâmetros de corte empregados (velocidade de corte e avanço), da geometria da cunha cortante e dos materiais constituintes da peça e da ferramenta.

Nas ferramentas de metal duro revestido e cerâmicas, o desgaste (ao menos no seu estágio inicial) parece ser devido principalmente a dissolução química e abrasão (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998)

Nos casos práticos de usinagem de cilindros de laminação, seja no caso de desbaste ou acabamento, comprovamos que de fato o desgaste inicial de um inserto novo

unesp

ou reafiado apresenta características de desgaste químico e por abrasão; mas após o aparecimento de leves crateras, riscos e porosidades, inicia o despreendimento de lascas que progressivamente tornam- se maiores; e caso for extendido o uso do inserto, podem desembocar em fraturas que provocam grandes perdas de massa ou dividem o inserto inutilizando- o ao se tornar impossível sua recuperação por reafiação. De uma forma geral e para materiais de ferramentas com moderada estabilidade química e médias propriedades mecânicas, o desgaste mecânico e abrasão predominam em baixas velocidades de corte; a remoção do material da ferramenta acontece pela ação de pontos mais duros ou salientes e inclusões com fases duras na peça e nos cavacos. Em maiores velocidades de corte, a instabilidade química do material (incluindo reações do material com a atmosfera) vira o fator mais importante de desgaste.

Portanto, o modo dominante de desgaste da ferramenta muda com a temperatura da aresta cortante. Geralmente o desgaste é analisado levando em conta o local da ferramenta atingido (aresta, saída, folga, cratera); e a deformação plástica, que atinge os planos de saída, folga e a aresta de corte (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2003).

A variável com maior influência sobre a temperatura da ferramenta é a velocidade de corte utilizada; a segunda maior influência sobre a mesma é o avanço. O aumento do avanço gera um cavaco mais espesso que consegue dissipar mais calor e por isso diminui a temperatura na zona de geração de calor. Portanto, há uma faixa de velocidades e avanços para um determinado valor da dureza do material, que é capaz de limitar adequadamente a temperatura de corte (CHOLL; SMITH, 1994).

Por exemplo, regulando avanços e velocidade de corte para criar na frente da ferramenta uma zona a aprox. 1.200 ^{o}C utilizando cerâmicas reforçadas, a taxa de remoção de cavaco de uma liga de níquel pode ser aumentada até 10 vezes com relação a uma ferramenta de metal duro.

Na usinagem de materiais que têm forte tendência ao encruamento, como por exemplo todas as ligas de níquel aplicadas na indústria aeronáutica, é característico o rápido surgimento do desgaste de entalhe. O desgaste de entalhe na aresta secundária de corte provoca aumento de rugosidade superficial na peça; este tipo de desgaste pode

unesp

inclusive provocar a quebra catastrófica da cunha cortante limitando assim a vida da ferramenta. Considera- se que o desgaste por entalhe é um fenômeno principalmente ligado a temperatura (portanto de natureza química), apesar de que em certas condições pode ser um fenômeno predominantemente mecânico e ligado à formação de cavacos.

O modo predominante de falha para uma alumina reforçada com whiskers é a de *DOCN* (*depth of cut notching*) (CHOLL; SMITH, 1994), ou desgaste de entalhe; em ordem decrescente de importância vêm depois o desgaste de flanco, o lascamento da aresta cortante, e o lascamento de plano paralelo ao plano de saída (esta é a direção mais fraca, devido à orientação predominante dos whiskers). A química de superfície dos whiskers também têm grande influência na tenacidade à fratura.

O *DOCN* é atribuído a agarramento e despreendimento de material da ferramenta por ação do cavaco. Este processo é acelerado quando há carepa presente durante a operação de desbaste. Alguns materiais (como alumínio e titânio) apresentam muita afinidade pelo oxigênio presente nos óxidos na superfície; e isto tende a formar ligações estreitas com a superfície da alumina.

Em baixas velocidades de corte o mecanismo principal de desgaste em cerâmicas é abrasão (BALDONI; BULJIAN, 1994), devido a fases duras e pontos ásperos e salientes na peça e cavacos.

Há dois processos associados a este fenômeno:

- sulcos plasticamente deformados que não envolvem remoção de material
- remoção de material com formação de microcavacos

As cerâmicas são pouco tolerantes à deformação, e seu desgaste é devido à sua baixa tenacidade à fratura.

A vida das ferramentas de SiAlON está limitada geralmente pelo desgaste de flanco. Um critério prático típico de vida de ferramenta é o de máximo desgaste de flanco de 300 micrometros (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998) e máximo desgaste de cratera de 140 micrometros. Estte tipo de inserto revela muita sensibilidade na transição entre a parte livre da aresta de corte e a parte da aresta em contato com o material. A parte da aresta de corte em contato contínuo da peça pode não mostrar lascamento.

unesp

A ação de um penetrador permite modelar a resposta do material ao emular um ponto duro saliente da peça (Figura 8).

Em materiais frágeis a ultrapassagem de um valor crítico da força aplicada no penetrador provoca uma trinca semicircular no plano de simetria da tensão aplicada, e com carga adicional a trinca subsuperficial cresce até uma medida crítica a partir da qual torna- se instável e se expande até a superfície. O processo ocorre durante o carregamento e descarregamento (MC COLM, 1992).

No fim do processo, será obtida uma trinca radial estável e totalmente propagada (*half penny crack*) (MENCIK, 1992).

O comprimento da trinca radial em relação à penetração é determinada pela tenacidade à fratura do material indentado.

Com carregamentos maiores, será gerada uma trinca lateral. Esta se origina debaixo da superfície e extende- se para fora da região penetrada, paralelamente à superfície.

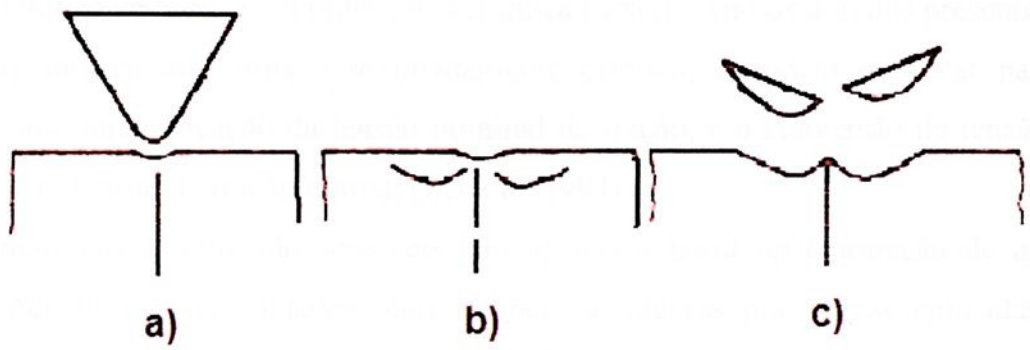


Figura 8-Trincas em cerâmica pela ação de corpos duros (penetradores).
Adaptado de (MENCIK, 1992).

unesp

Em cerâmicas frágeis, a remoção de material por fratura que ocorre na abrasão pode ser atribuido à interseção de trincas laterais de indentações (partículas duras ou abrasivas) adjacentes.

O desgaste na superfície de folga acontece principalmente por adesão e abrasão. Na medida que a folga sofre desgaste, a temperatura sobe rapidamente bem como o desgaste quando o ponto de amolecimento do material da peça é atingido.

A condição desejável de uso da cerâmica é o desgaste gradual das superfícies de folga e saída (MEHROTRA, 1998).

A tenacidade à fratura (K_{IC}) e a resistência ao cisalhamento (TRS) são indicadores da tendência do material a fraturar (MEHROTRA, 1998). Na utilização prática de ferramentas de corte, o crescimento sub- crítico de trincas não é frequentemente observado.

Outros fatores com influência no desgaste e falha das ferramentas são a geometria do inserto e da aresta cortante, o estilo do inserto, sua espessura, o porta- ferramentas, a máquina ferramenta, o uso de fluídos de corte, etc.

Os defeitos de fabricação típicos da cerâmica (assim como os defeitos presentes no metal duro) apresentam forma aproximadamente esférica, e podem provocar na sua adjacência uma intensificação da tensão nominal de tração, e a conversão da tensão de compressão em tensão de tração normal (SHAW, 1994).

Os materiais frágeis são sensíveis não apenas a build up (formação de aresta postiça) e películas finas soldadas, mas também a quebras por cargas aplicadas ou retiradas abruptamente, como nas seguintes situações (SHAW, 1994):

- No fim do corte há um gradiente na força de corte que proporciona uma variação brusca na força aplicada ao inserto aumentando a probabilidade de quebra.
- Uma camada de cavaco aderida á ferramenta (devida aos diferentes coeficientes de dilatação) causa tensão de tração no fim do corte
- A mudança de tensão de compressão para tração devida a overshooting da ferramenta também pode causar quebra (entrada ou saída brusca do corte).

unesp

A pressão média do material na ferramenta é proporcional à energia específica de corte (u). Com u alta o desgaste devido a fratura é atenuado pelo aumento de pressão hidrostática; mas a taxa de crescimento de aresta postiça aumenta e isto pode aumentar a taxa de desgaste total nas cerâmicas. A cerâmica encontra melhor campo de aplicação em materiais que usinam com baixo valor de energia específica de corte.

O ferro fundido por exemplo, têm energia de corte muito baixa e os cavacos tendem a fraturar; os flocos de grafite responsáveis pela baixa energia de corte, também lubrificam e diminuem a adesão. A interdifusão de ferro, silício e ítrio entre a ferramenta cerâmica e a peça de aço é muito menor do que na usinagem de ferro fundido.

Apesar que o desgaste devido à instabilidade química (solução- difusão- oxidação) está normalmente associado à formação de cratera na saída, também pode ser um mecanismo principal no plano de folga da ferramenta.

A Figura 9, adaptada de (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998) ilustra um par de interação (ensaio de desgaste realizado a quente aplicando pressão entre os componentes de um par liga ferrosa- cerâmica).

unesp

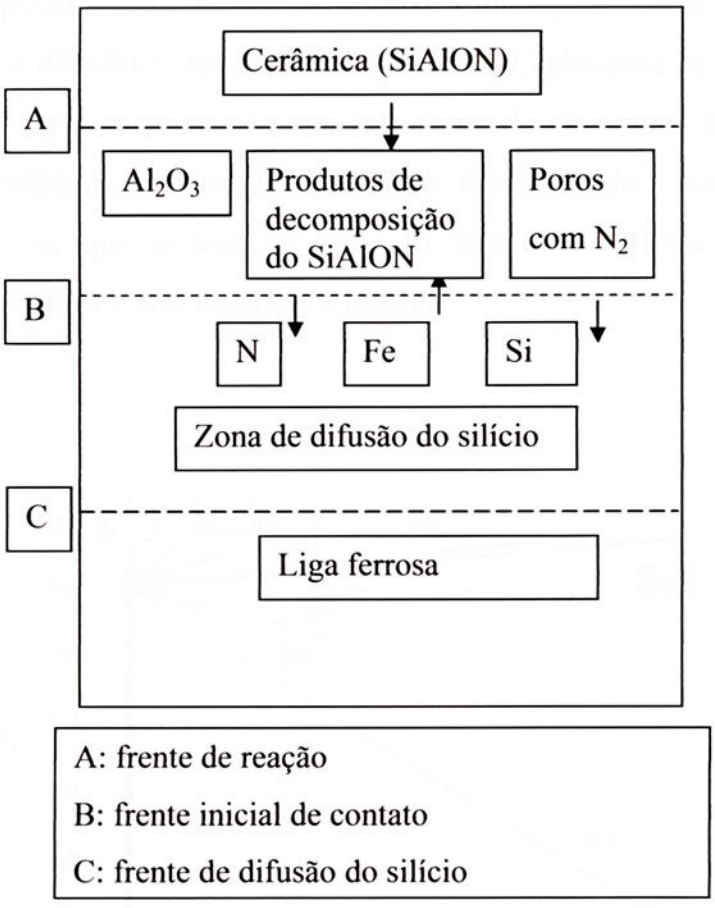


Figura 9-Pares de interação cerâmica- ligas de ferro.
Adaptada de (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998)

A zona de interação do lado da cerâmica de SiAlON, contém produtos ricos em alumínio e oxigênio em matriz rica em ferro, da mesma composição química da zona de interação do lado metálico.

Quando a componente cerâmica do par é o YSiAlON, os produtos de reação são ítrio, alumínio, silício, oxigênio, e sob certas condições, nitrogênio.

Em observação microscópica com grandes aumentos, pequenos poros podem ser encontrados do lado cerâmico de interação. O nitrogênio pode se alojar nos poros, a partir de cerâmica dissociada.

unesp

Com o par composto por SiAlON e puro ferro, a interação mostra nitretos do lado do metal, indicando sua difusão e dissolução. A Figura 10, adaptada de (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998) permite verificar a influência de elementos de liga da parte ferrosa do par, na solubilidade do nitrogênio no ferro. Comparando a reatividade do par aço- SiAlON verifica- se que o teor de Ni e Si têm uma influência negativa na reatividade, entanto teor de Cr e Mo aumenta a mesma.

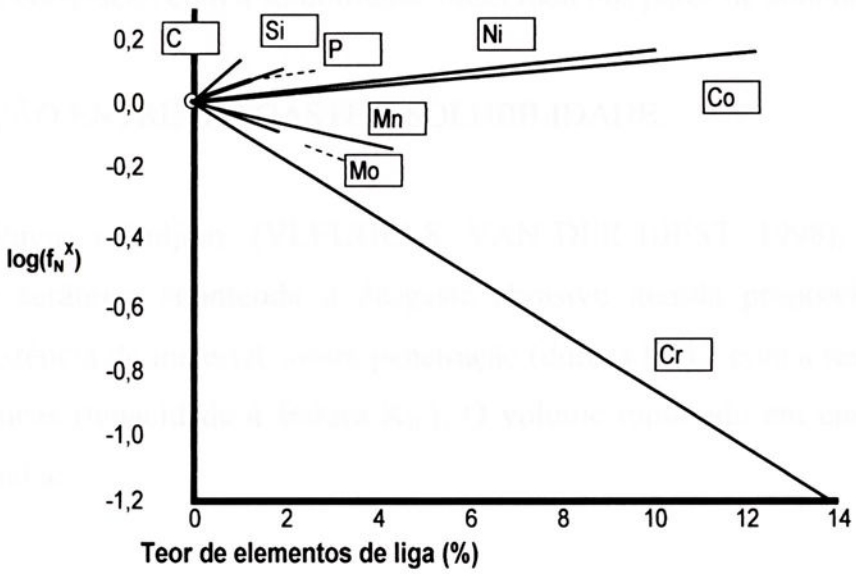


Figura 10-Influência dos teores dos elementos de liga sobre o coeficiente de atividade do nitrogênio.

Adaptado de (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998)

O ferro fundido é geralmente menos reativo do que os aços; essa menor reatividade pode ser explicada pelos maiores teores de C e Si; a presença de fósforo pode também contribuir para a menor reatividade do ferro fundido.

O silício e o nitrogênio da cerâmica dissolvem no ferro fundido, entretanto o alumínio e o oxigênio combinam com a fase amorfa do contorno de grão cerâmico para

formar o produto de reação YSiAlON, permanecendo do lado da cerâmica no par de reação.

A presença de nitrogênio é evidenciada após esfriamento por grandes bolhas de gás no seio do ferro fundido.

A menor reatividade do ferro fundido cinzento com relação ao aço coincide com a prática industrial, já que as cerâmicas de SiAlON mostram performance excelente ao usinar ferro fundido.

O cálculo teórico da solubilidade dos diferentes SiAlONs na liga ferrosa não mostra no entanto, correlação com a solubilidade observada nos pares de contato.

3.12 CORRELAÇÃO ENTRE DESGASTE E SOLUBILIDADE.

Segundo Wayne e Buljian (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998), a taxa de desgaste de uma cerâmica submetida a desgaste abrasivo guarda proporcionalidade inversa com a resistência do material contra penetração (dureza Hv) e com a resistência à propagação de trincas (tenacidade à fratura K_{IC}). O volume removido em ensaio pino-disco é proporcional a:

$$W_{abrasão} \alpha [1/(K_{IC}^{3/4} x H_V^{1/2})] \qquad (3)$$

Onde K_{IC}= tenacidade à fratura em MPa $m^{1/2}$, e Hv dureza em GPa, da cerâmica.

Há discrepâncias entre o comportamento dos pares estáticos de interação e as observações realizadas em ensaios de torneamento de diversos aços, com SiAlONs apresentando diversas fases (β', X e O)

Os desgastes de flanco e cratera durante o torneamento, diminuem com o aumento do nível substitucional na fase β SiAlON, devido à menor solubilidade da cerâmica no aço com o aumento do nível substitucional. Esta tendência no entanto, está em contradição com a reatividade medida nos pares estáticos, nos quais a reatividade

aumenta com o aumento do nível substitucional na fase β SiAlON (portanto com o teor decrescente de N na cerâmica).

Os ensaios de torneamento (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998) (Figura 11) realizados em 1, 2 e 4 minutos com diferentes classes de SiAlONs que apresentam solubilidade decrescente no ferro puro devido à sua composição química e predominância de certas fases: YSiAlON (SNC), fase β (BI, BIII), fase β-O (I e II), fase β-X (III), β-X-Al_2O_3 (IV e V), e X SiAlON (X) mostraram que a adição de fases não reativas como alumina e X SiAlON a uma matriz de β SiAlON, aumentam a resistência ao desgaste químico (acontece o contrário em pares estáticos).

Geralmente falando, a ordem de reatividade dos SiAlONs não corresponde (no ensaio realizado de torneamento de um determinado tipo de aço ao CrNi), ao desgaste observado em SiAlONs de diferentes níveis substitucionais durante o torneamento. No entanto, o desgaste dessas diferentes cerâmicas corresponde muito bem com o equilíbrio de solubilidade calculado para ferro puro a 1.200 ^{o}C. (Figura 11)

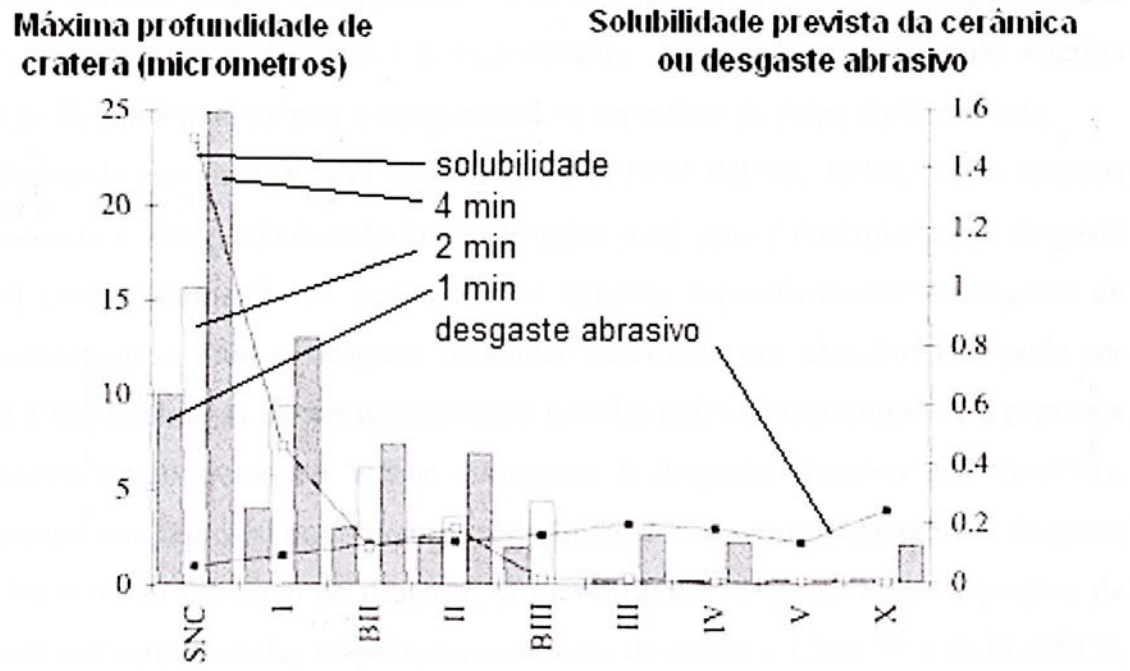


Figura 11- Desgaste-de cratera em diferentes SiAlONs

Curvas de solubilidade em equilíbrio de cerâmica em ferro puro (cm3 de cerâmica/ mol de ferro), ou desgaste abrasivo calculado $(MPa\ m^{1/2})^{-3/4} x GPa^{-1/2}$. Ensaio realizado em aço 50NiCr13 a velocidade de corte 100 m/min. Adaptado de (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998)

Do ensaio de torneamento (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998), que foi também realizado em vários outros tipos de aço além do apresentado na Figura 11, conclui- se que a reatividade num par estático de interação (a qual é definida como a profundidade de penetração do metal dentro da cerâmica) é controlada pela taxa de dissolução do nitrogênio, a qual é controlada principalmente pela solubilidade do N na liga ferrosa e pelo teor de N da cerâmica, sendo que a taxa de desgaste químico nas ligas ferrosas durante o torneamento correlaciona- se com a solubilidade em equilíbrio do material da ferramenta no ferro puro.

O comprimento do contato entre o cavaco e a ferramenta têm influência direta na temperatura do processo e a energia que é dissipada na ferramenta, e isto terá influência sobre o comportamento de desgaste termicamente ativado. A maior temperatura com

formação de cavacos longos é atingida na superfície de saída da ferramenta, a uma certa distância da aresta, onde acontece a craterização. A maior quantidade de energia dissipada pode também aumentar a temperatura na superfície de folga da ferramenta.

Torneando aço CrMoV (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998), (cujos cavacos são curtos), não é observada correlação do desgaste total (que é controlado por desgaste mecânico) com solubilidade da cerâmica. No entanto, especificamente o desgaste de folga correlaciona-se com o desgaste mecânico calculado por abrasão; isto pode ser explicado considerando as baixas temperaturas geradas pelos cavacos curtos e a presença de carbonetos muito duros de V que aumentam o desgaste abrasivo nos SiAlONs, especialmente em aqueles com menor resistência ao desgaste. Quando o desgaste químico for o modo principal de desgaste, o mesmo pode ser previsto das equações de solubilidade em equilíbrio das respectivas cerâmicas de sialon a 1.200 °C (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998).

Pode ser postulado (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998) que os resultados dos pares estáticos de interação podem ser utilizados para predizer o desgaste químico relativo de um SiAlON quando usinando diferentes ligas ferrosas, assumindo que a temperatura de contato cavaco- ferramenta é a mesma para todas as peças.

Mesmo se sabendo que o desgaste químico do SiAlON é controlado pela solubilidade da cerâmica na peça e não pela taxa de dissolução do N como nos pares estáticos, é de se esperar que diferenças de solubilidade de N entre os diferentes aços influenciem a solubilidade da cerâmica (VLEUGELS; VAN DER BIEST, 1998).

Apesar de que os processos químicos foram identificados como potencialmente contributivos ao desgaste das ferramentas baseadas em Si_3N_4, em testes de alta velocidade (5000 m/min) comprova- se que o desgaste é principalmente mecânico (abrasão).

Grandes deformações plásticas da aresta de corte resultam em maiores forças de corte e temperaturas levando a maior taxa de desgaste e possibilidades de quebra catastrófica, sendo causa principal de desgaste em ferramentas de metal duro e aço.

unesp

Em cerâmicas, as deformações plásticas não são um mecanismo preponderante de desgaste. O mecanismo principal de desgaste em cerâmicas é abrasão, devido a fases duras e pontos ásperos e salientes da peça em usinagem (BALDONI; BULJIAN, 1994).

4 DESCRIÇÃO DOS PROCESSOS DE PRODUÇÃO

4.1 TORNOS

Os tornos para usinagem de cilindros de laminação na Aços Villares (Usina de Pindamonhangaba), aonde são conduzidos os processos de torneamento longitudinal, têm diâmetros admissíveis entre 900 e 1.500 mm, distância entre pontas de 6.000 até 12.000 mm, e potências no motor do cabeçote, entre 150 e 300 KW. Controladas a CNC, estas máquinas apresentam configuração geométrica e rigidez compatíveis com as elevadas forças de corte desenvolvidas durante a usinagem de cilindros de laminação. Uma das características dos equipamentos é a de operar com lunetas de compensação, que complementam a rigidez do cilindro visando evitar vibrações excessivas devido à esbeltez dos mesmos. Os barramentos são mais largos (relativamente aos tornos chamados de universais) para acomodar o vetor força de corte entre as guias, evitando momentos em cima das torres, as quais por sua vez apresentam configurações de alta rigidez. As placas são igualmente reforçadas, com castanhas múltiplas apertadas hidraulicamente ou com mecanismos multiplicadores de força. Devido às elevadas forças de corte desenvolvidas durante a usinagem, o contato das castanhas da placa com o cilindro deve ser suficiente para evitar patinamentos e vibrações.

Imagens de dois tornos utilizados na usinagem de cilindros na Aços Villares são mostradas a seguir. Com algumas variações, os demais equipamentos apresentam características construtivas similares às exibidas nestas Figuras. O torno da Figura 12, com 20 t de peso admissível entre pontas, 150 kW de potência, CNC, com luneta para suportar a peça pela mesa, está usinando um cilindro de trabalho para tiras a frio (LTF). O torno da Figura 13, com 300 t de peso admissível, 150 kW de potência, a CNC, está usinando um Cilindro de encosto (BUR).

unesp

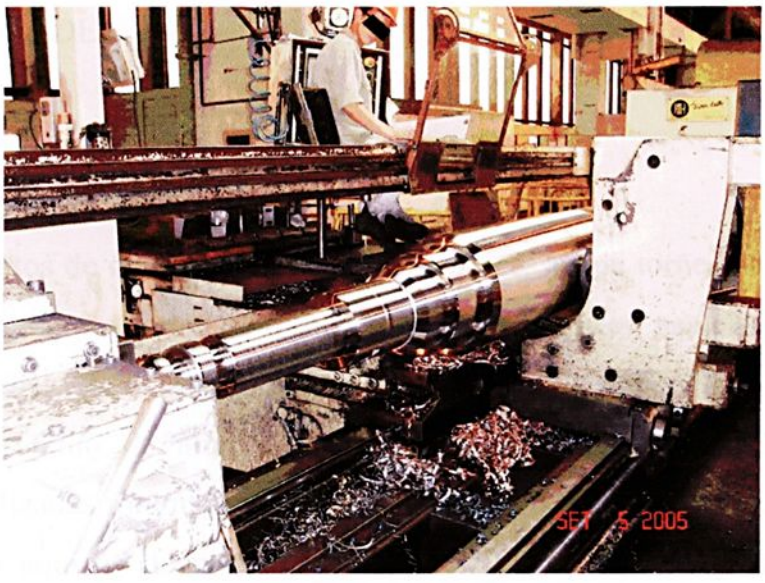


Figura 12-Torno Binns 30", com 750 mm de diâmetro admissível, 7000 mm entre pontas

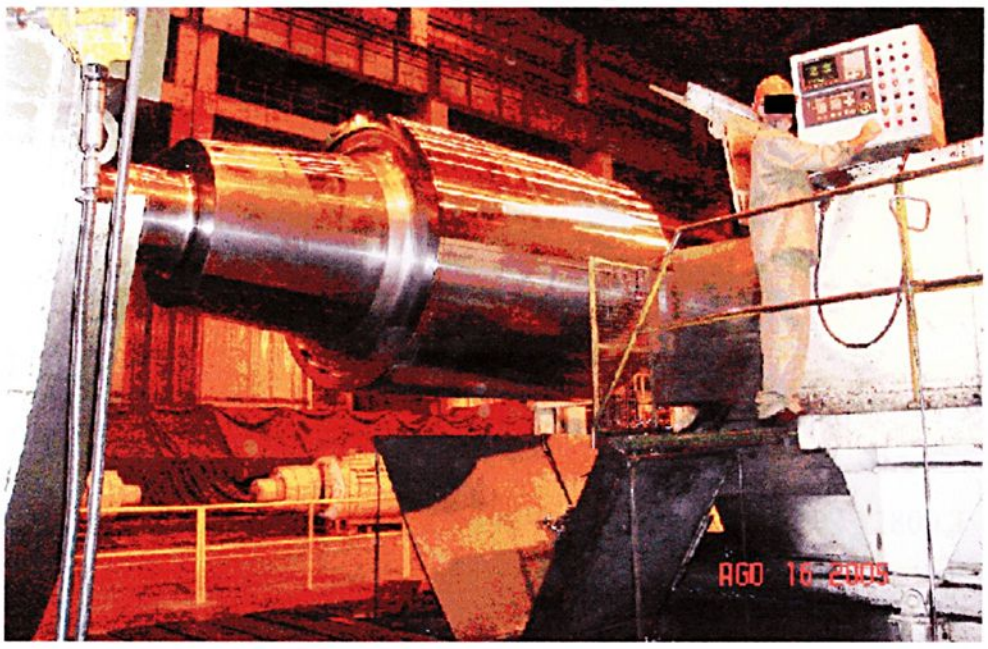


Figura 13-Torno MFD, com 3.750 mm de diâmetro admissível, 15.000 mm entre pontas.

4.2 INSERTOS DE CORTE

4.2.1 Porta- ferramentas

Os insertos de cerâmica utilizados nos processos de torneamento longitudinal dos cilindros de laminação foram os fornecidos por Kennametal nas classes K090 (Óxido de alumínio e Carbeto de titânio, prensada a quente) e KY 3000 (SiAlON); e por NTK nas classes HC2 (Óxido de alumínio e Carbeto de titânio), e NTK SX1 (Si_3N_4). As geometrias utilizadas foram: SNG 12800 T, RCMA 321900 T, e LNU 6688 T (Figura 14 e); adotamos aqui as denominações comerciais dos insertos, já que dois duas das geometrias abordadas não são contempladas pela tabela de designações da Norma ISO 1832:2004 (ISO, 2004). Os porta- ferramentas são utilizados em Aços Villares, na Unidade de Cilindros de Laminação.

Figura 14-Insertos RCMA 321900 T, LNU 6688 T e SNG 12800 T

Tabela 4-Tipos de inserto e fornecedores

	Tabela de Insertos e Fornecedores				
Fabricante	***Composição***	**Classe conforme fabricante**	*LNU 6688 T*	*RCMA 321900 T*	*SNG 12800 T*
Kennametal	Al_2O_3+ TiC	K090	**X**	**X**	**X**
Kennametal	SiAlON	KY3000	**X**		
NTK	Al_2O_3+ TiC	HC2	**X**	**X**	**X**
NTK	Si_3N_4	SX1	**X**		

O inserto LNU- T (Figura 15) é empregado no desbaste de mesas e pescoços de cilindros.

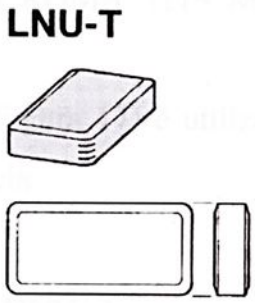


Figura 15-- Inserto LNU 6688T

T=espessura= 5/8"= 15,87 mm

W=largura= ¾"= 19,05 mm

L= comprimento aresta= 1 ½" = 38,10 mm (KENNAMETAL TOOLS, 1991)

Este inserto não está contemplado na Norma ISO 1832:2004 (não é previsto na Norma, o formato retangular) (ISO, 2004).

O inserto RCMA T (Figura 16) é utilizado no acabamento de mesas e pescoços.

RCMA-T

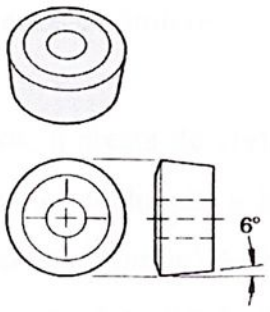


Figura 16-Inserto RCMA 321900T

IC=diâmetro maior= 1 ¼"= 31,75 mm

T= espessura= ¾"= 19,05 mm (KENNAMETAL TOOLS, 1991)

Este inserto é identificado como ROMA 3119 MO S através da Norma ISO 1832:2004 [32].

O inserto de geometria SNG T (Figura 17) é utilizado no acabamento de mesas devido à sua geometria de maior resistência

SNG- T

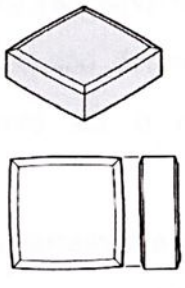


Figura 17-Inserto SNG- 12800 T

S= quadrado, com lados constituídos de segmentos de círculo de raio= 128 mm

IC=diâmetro inscrito= 1 ½ "= 38,10 mm

T= espessura= ½"= 12,70 mm (KENNAMETAL TOOLS, 1991)

Este inserto não está contemplado na Norma ISO 1832:2004 (não é previsto na Norma, o formato quadrilátero com arestas semicirculares) (ISO, 2004)

4.2.2 Afiação da aresta de corte dos insertos cerâmicos

Em todos os insertos mencionados, a aresta de corte apresenta uma afiação com chanfro (daí a denominação dos fabricantes incluindo a letra T, do inglês *T-Land*) de comprimento= 3 mm, λ= -15°, e raio de aresta (*honing*) de 0,2 mm

A afiação da aresta principal de corte é realizada nos insertos das 3 geometrias mencionadas, como mostra a Figura 18.

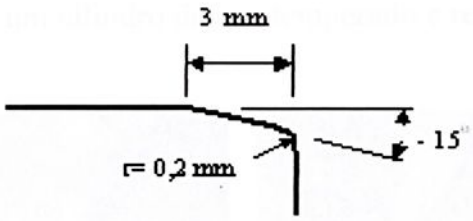


Figura 18-Afiação da aresta principal de corte com chanfro e arredondamento.

Conforme mencionado na literatura (KENNAMETAL TOOLS, 1991), o raio do arredondamento e a dimensão do chanfro são determinados pela experiência: quanto maior o avanço utilizado, maior deverá ser o chanfro (com o arredondamento proporcional ao chanfro).

A Figura 19 representa um porta-ferramenta para inserto SNG, e a Figura 20 contém imagens dos porta-ferramentas para insertos LNU e RCMA respectivamente.

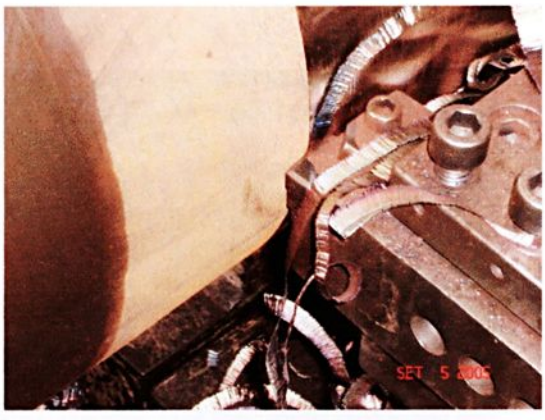


Figura 19-Porta- ferramentas para inserto SNG 12800 T
durante o corte de um cilindro de aço temperado e revenido. λ=–5°, χ=5°.

a) b)

Figura 20- Porta-ferramentas para insertos LNU e RCMA:
a) insertos LNU λ=–5° , χ = 60°, e b) insertos RCMA λ=0°, α=6°

4.2.3 Materiais constituintes dos insertos cerâmicos:

A título de exemplo apresentamos abaixo a microestrutura de um inserto de cerâmica mista prensada a quente (óxido de alumínio e carbeto de titânio,Na microfotografia da Figura 21 podem ser notados grãos unidos pelos pescoços de sinterização conforme indicado. A escala da fotografia foi deduzida da tabela comparativa apresentada na fonte de referência.

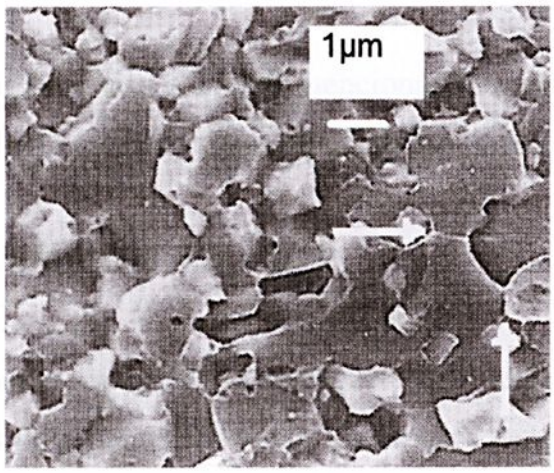


Figura 21-Microfotografia de inserto em cerâmica mista (óxido de alumínio e carbeto de titânio) prensada a quente (NTK CUTTING TOOLS, 2000)

As cerâmicas mistas de ambos os fabricantes mencionados na (classes K090, HC2) apresentam comportamento similar durante a usinagem de cilindros.

Na Figura 22 pode ser observada a microestrutura de um inserto de β-Si3N4, conceitualmente semelhante ao inserto de classe SX1 apresentado na Figura 22-Microfotografia de inserto de nitreto de silício. .

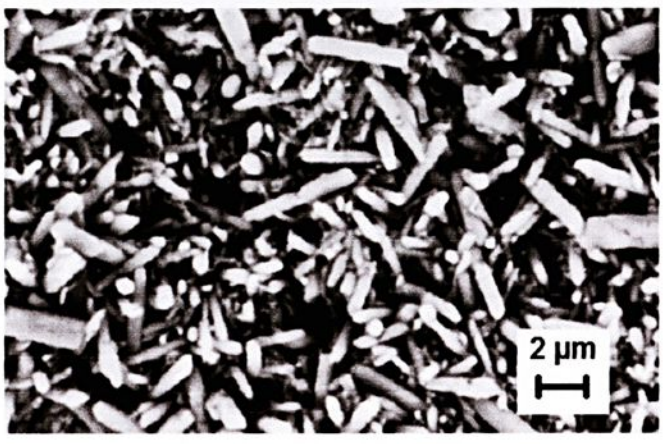


Figura 22-Microfotografia de inserto de nitreto de silício.

(DE SOUZA, 2005)

O inserto de SiAlON classe KY3000 mencionado apresenta desempenho similar ao de Si_3N_4 classe SX1 durante os processos de usinagem observados.

4.3 TIPOS DE MATERIAIS EM USINAGEM:

Foram selecionados os tipos de materiais mais representativos (os que apresentam maior volume de vendas na produção normal). Os ataques para micrografia foram feitos com Nital a 2% v/v.

4.3.1 Cilindros de trabalho para laminação de tiras a frio (LTF):

A Figura 23 registra a matriz constituída de martensita revenida, e a Tabela 5 sua composição química.

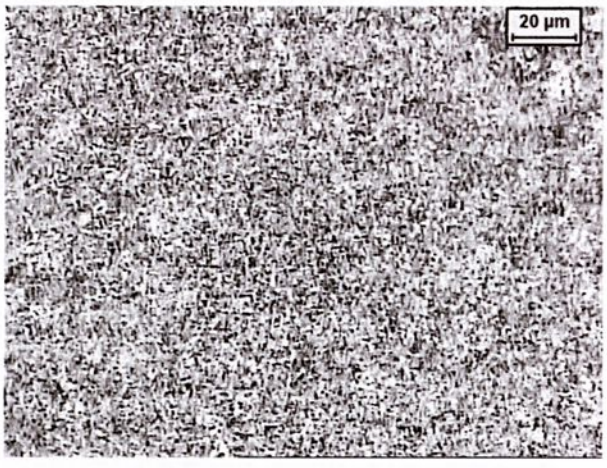


Figura 23-Fotomicrografia LTF.
Superfície da mesa de trabalho

Tabela 5-Limites de composição química:LTF (aço forjado marca VC9)

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%	V%	S%	P%
mín	0,70	0,20	0,20	3,00		0,32	0,05		
máx	0,95	0,35	0,30	4,00	0,20	0,45	0,11	0,015	0,015

Processo de fabricação: forjamento livre

Tratamento térmico: mesa normalizada, temperada diferencialmente na superfície, e revenida

Pescoço normalizado e revenido

Dureza superficial mesa: 80 ShC

Dureza superficial pescoço: 45 ShC

4.3.2 Cilindros de encosto para laminação de tiras a frio ou a quente (BUR):

A microestrutura na Figura 24 é constituída de martensita revenida com ocorrências de bainita. A Tabela 6 contém a especificação química de uma das ligas mais comuns.

Figura 24-Fotomicrografia BUR
obtida a 5 mm da superfície da mesa

Tabela 6-Limites de composição química BUR (aço forjado marca VC4A)

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%	V%	S%	P%	Nb%
mín	0,40	0,20	0,50	2,70		0,80	0,05			0,07
máx	0,48	0,30	0,90	3,00	0,40	1,00	0,09	0,015	0,015	1,00

Processo de fabricação: forjamento livre

Tratamento térmico: normalizado: temperado superficialmente e revenido (mesa); normalizado e revenido (pescoço)

Dureza superficial mesa: 63 HSc

Dureza superficial pescoço: 40 HSc

4.3.3 Cilindros de trabalho para laminação de tiras a quente (FHW), ferro fundido de coquilhamento indefinido, com núcleo de ferro fundido nodular.

A microestrutura na Figura 25 (e com maior ampliação na Figura 26) é constituida de grafita na forma semi-compacta e vermicular, carbonetos eutéticos do tipo M_3C, em matriz constituída de martensita revenida e bainita.

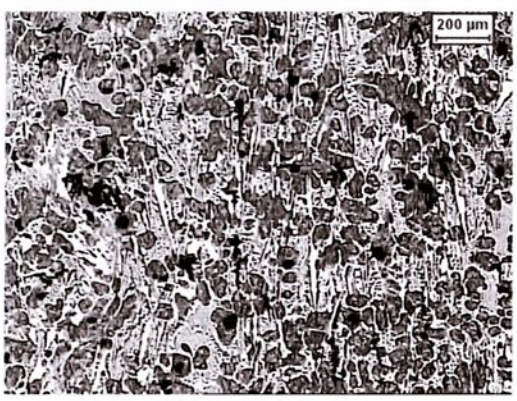


Figura 25-Fotomicrografia FHW
obtida na superfície da mesa

Figura 26-Fotomicrografia FHW
obtida na superfície da mesa

Na Tabela 7 visualiza- se a composição química da mesa FHW:

Tabela 7-Limites de composição química:FHW (ferro fundido marca CI80S)

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%	W%	S%	P%
mín	3,00	0,55	0,70	1,50	4,20	0,30			
máx	3,60	1,15	1,30	2,10	4,80	0,70	0,10	0,030	0,100

Processo de fabricação: fundido por centrifugação

Tratamento térmico: alívio duplo de tensões

Dureza superficial mesa: 80 HSc

Dureza superficial pescoço: 37 HSc

Na Figura 27 visualiza-se a microestrutura típica dos pescoços nodulares, que contém os nódulos de grafita sobre matriz bainítica; e na Tabela 8, a composição química dos pescoços de ferro nodular.

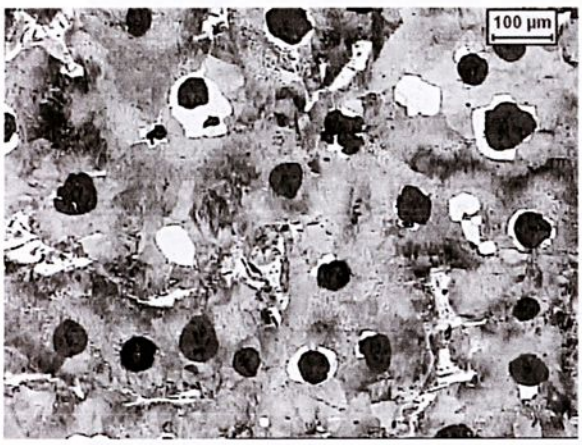


Figura 27-Fotomicrografia de pescoço em ferro fundido nodular para cilindro FHW

Tabela 8-Limites de composição química: núcleo de ferro fundido nodular FHW

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	S%	Mg%
mín	3,30	0,70	0,50				
máx	3,60	1,00	0,80	0,60	0,20	0,05	0,1

Dureza superficial mesa: 40 a 67 HSc (faixa mais utilizada 62 a 65 HSc)

Dureza superficial pescoço: 35 a 55 HSc

4.3.4 Cilindros de trabalho para laminação de tiras a quente (FHW), ferro fundido tipo Alto Cromo (17% Cr).

A Figura 28 traz microfotografia que registra carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 em matriz composta por martensita, com ocorrências de perlita. A Tabela 9 contém sua composição química.

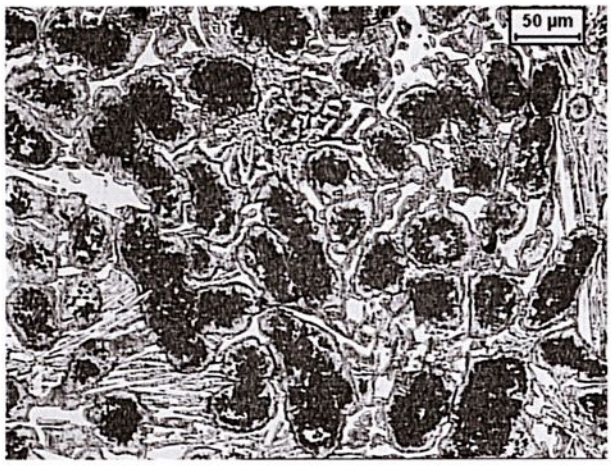


Figura 28-Fotomicrografia Alto Cromo FHW

Tabela 9-Limites de composição química:FHW alto cromo (ferro fundido marca VHCr17)

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%	S%	P%	V%
mín	2,10	0,45	0,70	14,00	0,90	0,90			
máx	2,60	0,95	1,30	18,00	1,90	1,90	0,03	0,06	0,40

Processo de fabricação: dupla fundição por centrifugação

Tratamento térmico: alívio duplo de tensões

Dureza superficial mesa: 78 HSc

Dureza superficial pescoço: 30 HSc

4.3.5 Cilindros de trabalho para laminação de tiras a quente (FHW), tipo Aço Rápido fundido.

A Figura 29 e a Figura 30 (esta com maior ampliação) permitem visualizar carbonetos eutéticos do tipo M_7C_3 em matriz composta por martensita. A Tabela 10 registra a composição química desta liga.

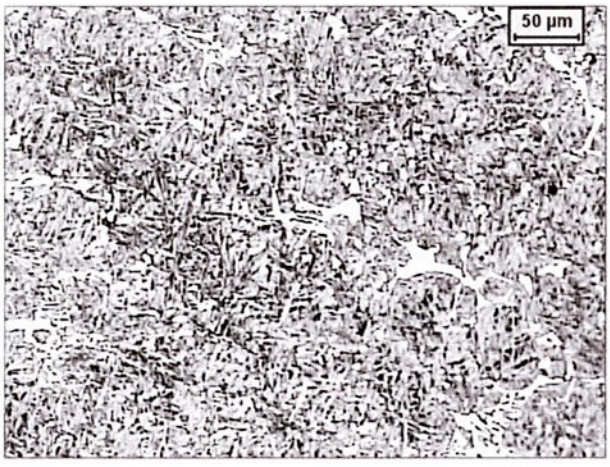


Figura 29-Fotomicrografia Aço Rápido FHW
obtida na superfície da mesa

Figura 30-Fotomicrografia Aço Rápido FHW
obtida na superfície da mesa.

Tabela 10-Limites de composição química:FHW aço rápido (aço rápido fundido marca VHHS18)

	C%	Si%	Mn%	Cr%	Ni%	Mo%	S%	P%	V%	W%
mín	1,75	0,75	0,35	7,20	0,80	1,90			4,50	1,90
máx	1,85	0,85	0,45	7,80	1,00	2,10	0,02	0,05	5,00	2,10

Processo de fabricação: dupla fundição por centrifugação

Tratamento térmico: recozimento, têmpera, revenimento

Dureza superficial mesa: 78 HSc

Dureza superficial pescoço: 35 HSc

4.3.6 Cilindros de trabalho para laminação de não planos a quente (WR em ferro fundido centrifugados e Nodulares)

A composição química e microestrutura dos cilindros WR centrifugados guardam semelhança com a dos cilindros FHW coquilhamento indefinido e Aço Rápido, Figura 25 e Tabela 7 (não existe a classe Alto Cromo em cilindros WR).

Método de fabricação: fundição centrifugada

Tratamento térmico: dependendo da composição química, normalizado e revenido (aços rápidos) ou alívio de tensões

Dureza superficial mesa: 60 a 82 HSc (dureza mais frequente, 77 HSc)

Dureza superficial pescoço: 30 a 40 HSc

Pode ser verificada na Tabela 11 a composição química mais frequente para os cilindros Nodulares:

Tabela 11-Limites de composição química Nodulite (ferro fundido nodular marca Nodulite B)

	C%	Si%	Mn%	P%	S%	Ni%	Cr%	Mo%	Mg%
mín	3,29	1,25	0,30			2,20	0,40	0,30	Cf. aplicação
máx	3,50	1,90	0,55	0,09	0,025	3,30	1,05	0,60	Cf. aplicação

Método de fabricação: fundição convencional

Tratamento térmico: dependendo da composição química, normalizado e revenido, alívio de tensões ou sem tratamento.

unesp

4.4 PROCESSOS DE TORNEAMENTO LONGITUDINAL

Estes processos são aplicados ao desbaste e acabamento dos cilindros em ferro fundido (cilindros de trabalho aplicados na laminação de produtos planos, abreviaturas FHW e PM; e aplicados na laminação de não planos: nodulares, abreviatura Nodulites, e centrifugados, abreviatura WR). As operações de torneamento longitudinal são aquelas que maior tempo de usinagem consomem relativamente à totalidade do tempo empregado na usinagem dos cilindros. Descrevemos a seguir cada item principal do processo de torneamento de cada tipo principal de cilindro, adicionando um croquis esquemático da operação.

4.4.1 Desbaste de mesa FHW e PM

Os cilindros FHW são produzidos em ferro fundido nodular (pescoços) e em diversos ferros fundidos resistentes ao desgaste (mesas de trabalho coquilhadas, por dupla fusão e centrifugação). Este tipo de cilindros constituem relativamente, o maior número de peças processadas na fábrica. Um processo similar de usinagem é aplicado ao restante dos cilindros de ferro, isto é PM e Nodulares, que são respectivamente produzidos em ferro ligado e pescoço cinzento por dupla fusão estática; e em ferro nodular totalmente, com mesa coquilhada. Este primeiro passe (

Figura 31) é realizado após tratamento térmico de alívio de tensões, com ângulo de posição $\chi = 5^{o}$, ângulo de saída $\lambda = -5^{o}$, e aresta de corte composta de múltiplos insertos SNGN 56. O estado de superfície dos cilindros FHW não permite a utilização de cerâmica para o desbaste desde o estado bruto de fundição; esta operação é realizada com metal duro.

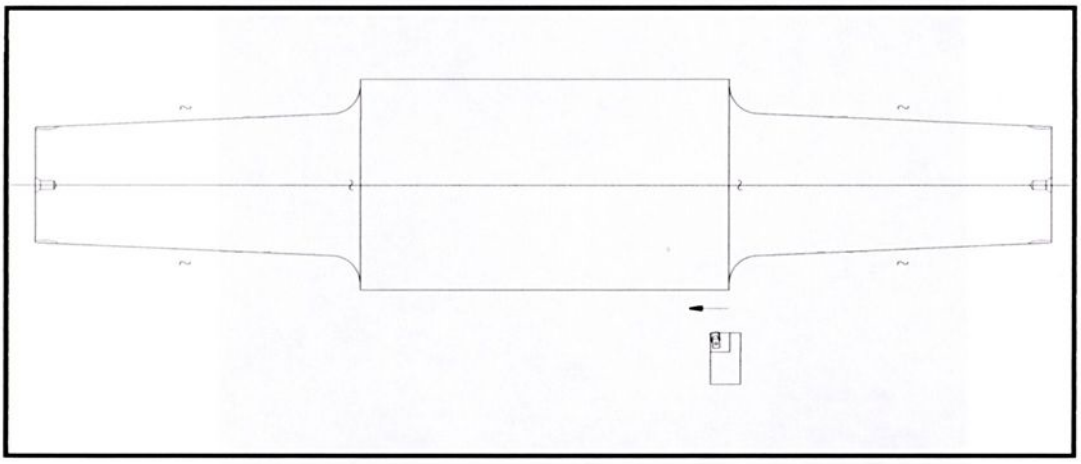


Figura 31-Desbaste de mesa FHW

Para proteger a coquilha durante a fundição dos cilindros FHW (fundidos por centrifugação), é aplicada sobre a superfície interna da mesma uma tinta refratária que após desmolde permanece aderida ao cilindro. As coquilhas apresentam furos em certos intervalos, para saída de gases; e isto provoca na região de influência de cada furo, regiões de maior dureza superficial.

Os cilindros FHW são esmerilhados na Fundição para remover a tinta refratária aderida ao cilindro antes do tratamento térmico. Depois do tratamento, a superfície apresenta ainda restos de tinta refratária, marcas de tinta mais destacadas na região dos furos de saída de gases, e oxidação desenvolvida durante o alívio de tensões. Estas ocorrências inviabilizam o uso de cerâmica no desbaste das mesas, já que os fatores de superfície acima descritos provocam quebras freqüentes dos insertos. A operação é realizada com metal duro. A

Figura 32 permite avaliar o estado de superfície do cilindro imediatamente antes da sua entrada no torno de desbaste.

unesp

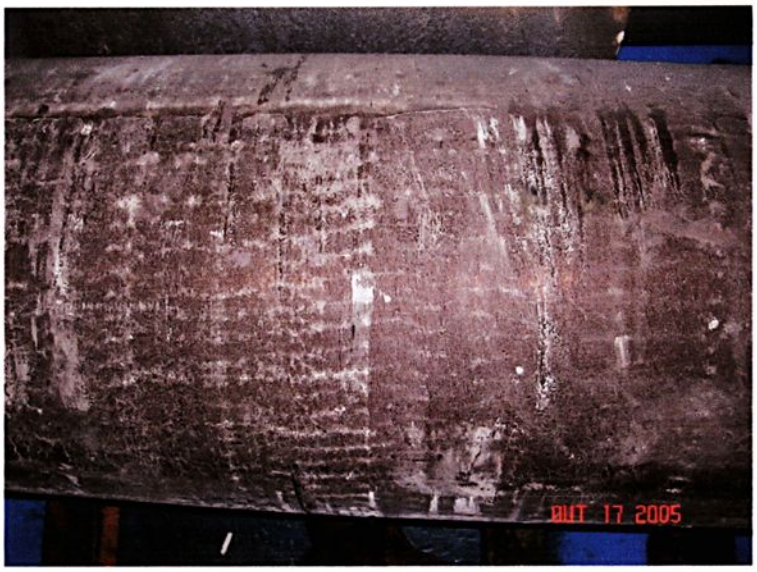


Figura 32-Superfície bruta de fundição de cilindro FHW

No caso dos cilindros de trabalho para chapas grossas PM (fundidos estaticamente), é aplicada sobre a coquilha uma tinta à base de grafita. A superfície após desmolde é mais suave e regular (Figura 33) que nos cilindros centrifugados, motivo pelo qual a tinta aderida ao cilindro não precisa ser removida por esmerilhamento, o que também diminui a oxidação durante o tratamento térmico. Isto parece confirmar que a grafita pode atuar como lubrificante durante a usinagem, e também no sentido da regularidade da superfície (em termos geométricos, de rugosidade e de menor ocorrência de pontos heterogêneos) resultar num facilitador para o uso de ferramentas cerâmicas. Os cilindros para chapas grossas fundidos estaticamente PM, permitem geralmente (exceto problemas superficiais como entranhamentos e outros desvios no processo de fundição) proceder ao desbaste no torno sem esmerilhamento utilizando ferramenta de cerâmica (SiAlON) de geometria SNG 12800 T, χ= 5°, λ= -5°, sem ocorrência de quebras excessivas, com parâmetros de corte similares aos utilizados no passe posterior de acabamento da mesa com cerâmica.

Figura 33-Superfície bruta de fundição de cilindro PM

4.4.2 Acabamento de mesa

No desbaste da mesa são eliminados os restos de tinta de fundição, a oxidação do tratamento térmico e o empenamento e ovalização da mesa eventualmente provocados pelo alívio de tensões. É durante o passe de acabamento que a cerâmica (K090 Kennametal, cerâmica preta mista) permite obter taxas de remoção superiores ao Metal Duro por meio de uma ferramenta com ângulo de posição $\chi = 5^{o}$, ângulo de saída $\lambda = -5^{o}$, geometria SNG 12800 T (Figura 34).

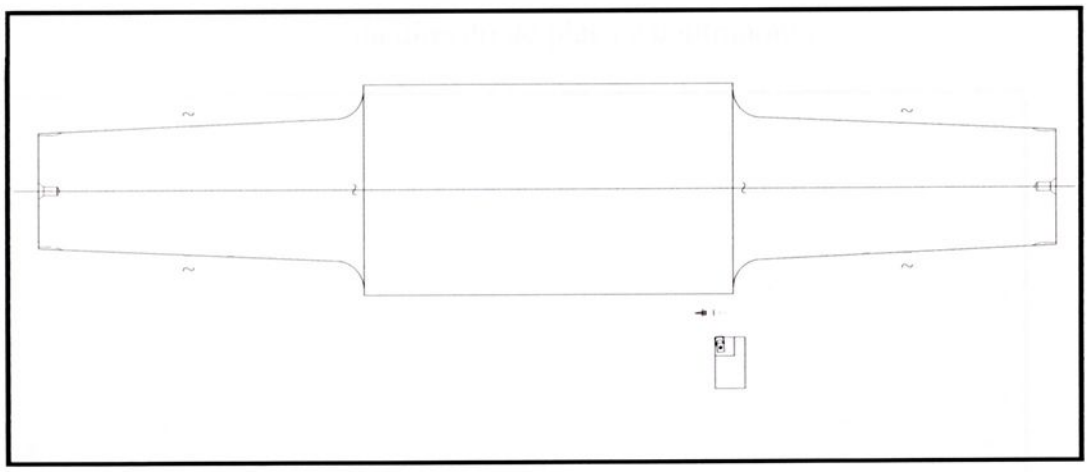


Figura 34-Passe do acabamento da mesa FHW

4.4.3 Desbaste do raio da mesa e pescoços

O desbaste dos raios mesa/pescoço é realizado em vários passes, cujo número depende do sobremetal de fundição e da geometria do cilindro acabado. Os primeiros passes de desbaste (são realizados na direção mesa/ face dos pescoços com ferramentas com $\chi = 60^{o}$ (Figura 35). Os últimos passes de desbaste são realizados na direção da mesa (Figura 36).

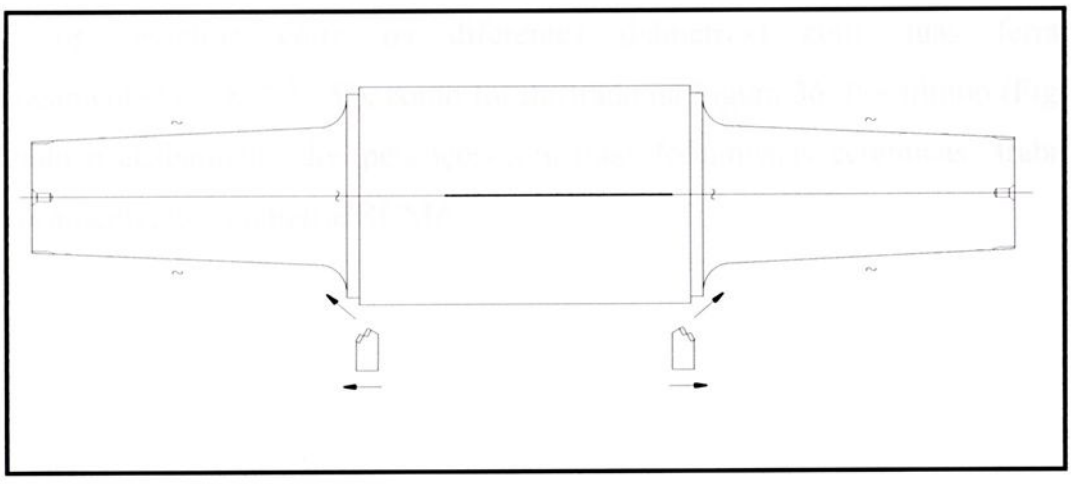


Figura 35-- Desbaste do raio da mesa e pescoços FHW,
na direção de placa e contraponto

unesp

na direção de placa e contraponto

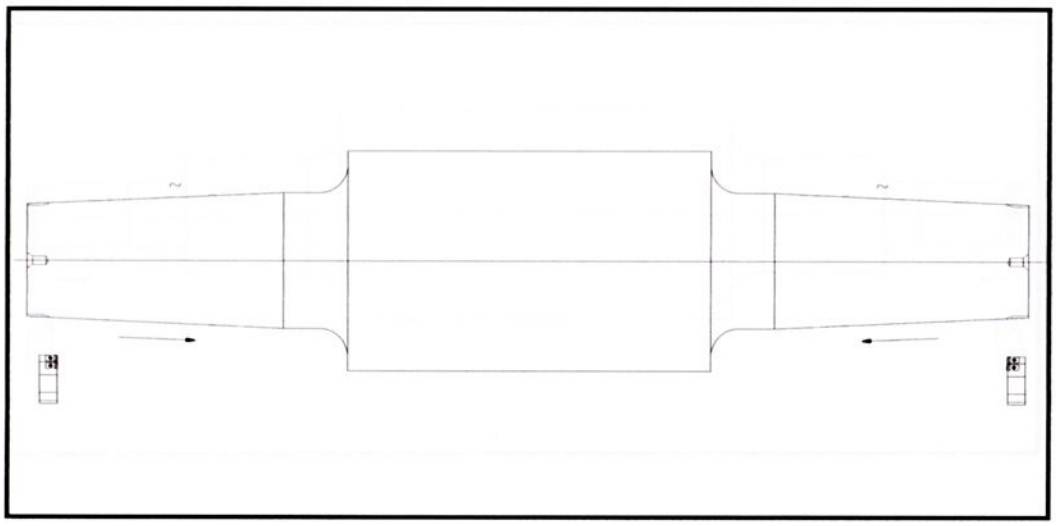


Figura 36-Desbaste de pescoços FHW, na direção do centro do cilindro.

4.4.4 Desbaste final e acabamento de pescoços

Os passes de desbaste finais são realizados na direção do centro do cilindro (para esboçar os ressaltos entre os diferentes diâmetros) com duas ferramentas simultaneamente (χ = 88°, λ -5°), como foi ilustrado na Figura 36. Por último (Figura 37) é realizado o acabamento dos pescoços com duas ferramentas cerâmicas trabalhando simultaneamente, de geometria RCMA.

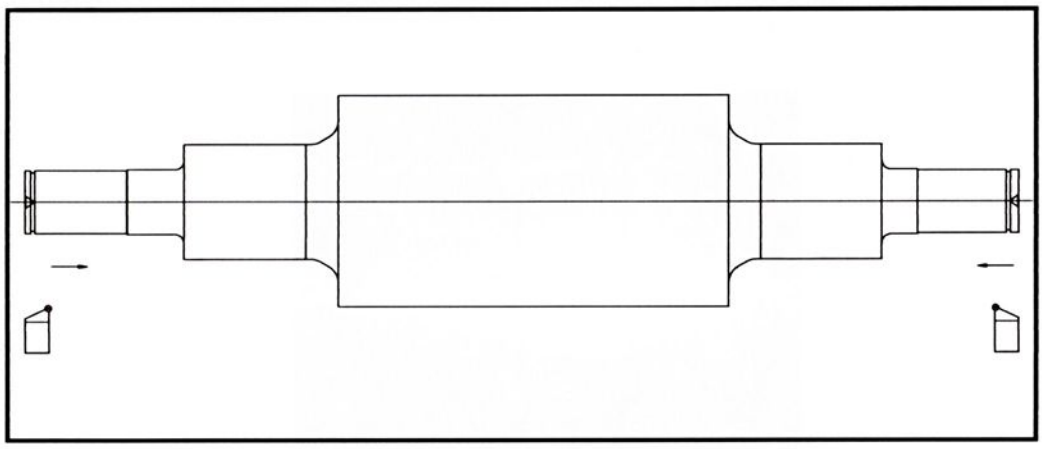


Figura 37-Acabamento dos cilindros FHW

4.4.5 Desbaste dos cilindros WR

Os cilindros para laminação de produtos não planos (seja em ligas nodulares quanto em ligas de coquilhamento indefinido, ou seja a maior parte dos WR) podem ser desbastados na sua maioria com ferramentas de cerâmica (Si_3N_4 ou SiAlON) desde o estado bruto de fundição, o que pode ser atribuido ao melhor estado superficial dos cilindros para não planos (Nodulares e WR) em comparação aos cilindros FHW. Os cilindros Nodulares após fundição apresentam boa cilindricidade e baixa rugosidade, não havendo necessidade de esmerilhamento; provavelmente a pintura de grafite aderida à superfície pode agir como lubrificante da aresta de corte. Nos cilindros WR (Figura 38) é realizado um esmerilhamento após desmolde na fundição, com melhores resultados quanto a cilindricidade e rugosidade superficial com relação aos cilindros já descritos FHW, especialmente pelo fato de não serem utilizados nas coquilhas dos cilindros WR os respiros de saída de gases de fundição, obtendo- se portanto uma superfície mais homogênea e sem pontos duros. A menor dureza média dos cilindros WR e o seu menor

diâmetro com relação aos cilindros FHW podem ser relacionados a um esmerilhamento após fundição com superfície mais regular (menos facetada), como ilustrado na Figura 38

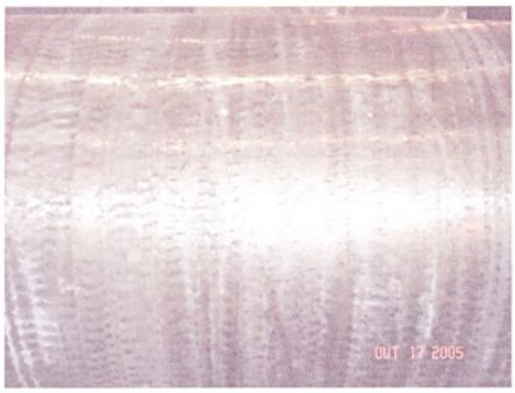


Figura 38-Superfície dos cilindros WR antes da usinagem

Esta operação de desbaste, diferentemente da mesma operação nos cilindros FHW, e analogamente ao desbaste dos cilindros PM, é realizada desde o estado bruto de fundição utilizando insertos de SiAlON tanto nos cilindros WR quanto nos Nodulites. O processo é esquematizado na Figura 39. Os tornos para estes cilindros possuem apenas um carro de torneamento, porque as reduzidas dimensões dos cilindros WR e Nodulites faria com que dois carros interferissem demasiadamente entre si. A ferramenta é o inserto LNU 6688 T posicionado em ângulos de χ= 60º e λ= -5º.

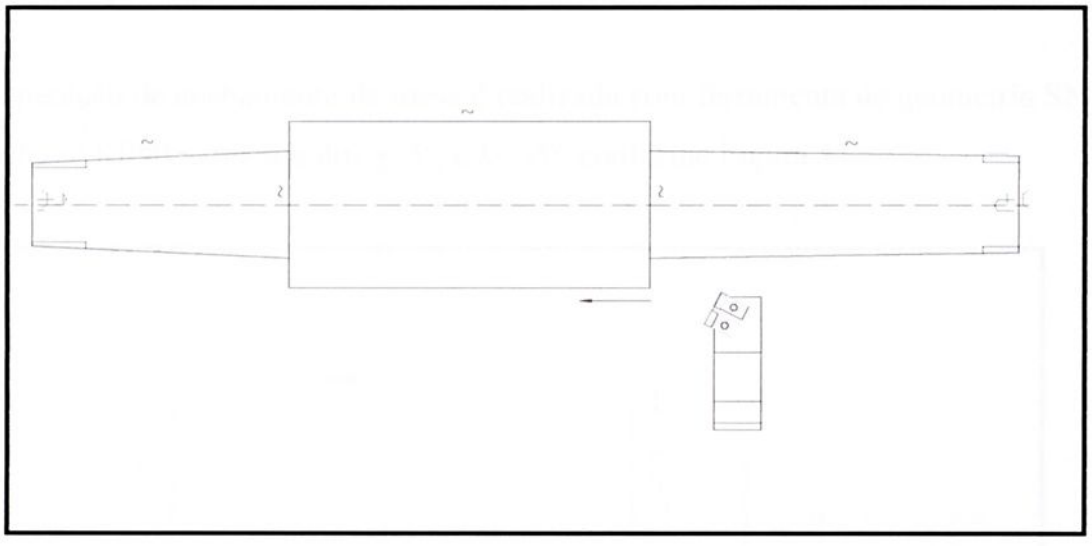


Figura 39-Desbaste de mesa WR e Nodulites

A operação de desbaste de pescoços é realizada com uma ferramenta análoga à de desbaste de mesa (Figura 40), com ferramenta K090, a ângulos de χ= 60° e λ= -5°.

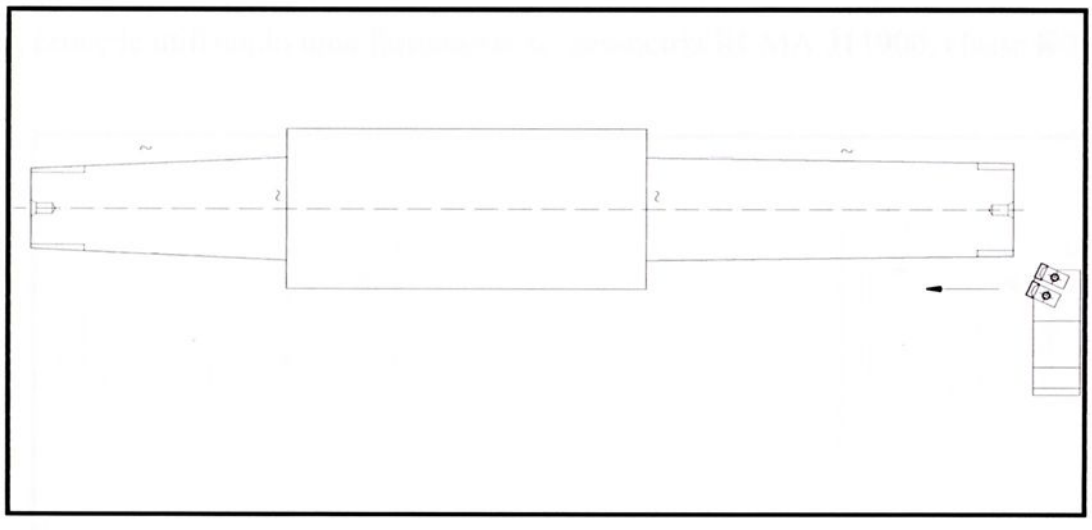


Figura 40-Desbaste de pescoços WR e Nodulite.

4.4.6 Acabamento de mesa e pescoços dos cilindros WR e Nodulite

A operação de acabamento de mesa é realizada com ferramenta de geometria SNG 12800 T, classe K090, com ângulos χ=5°, e λ= -5° ,conforme Figura 41

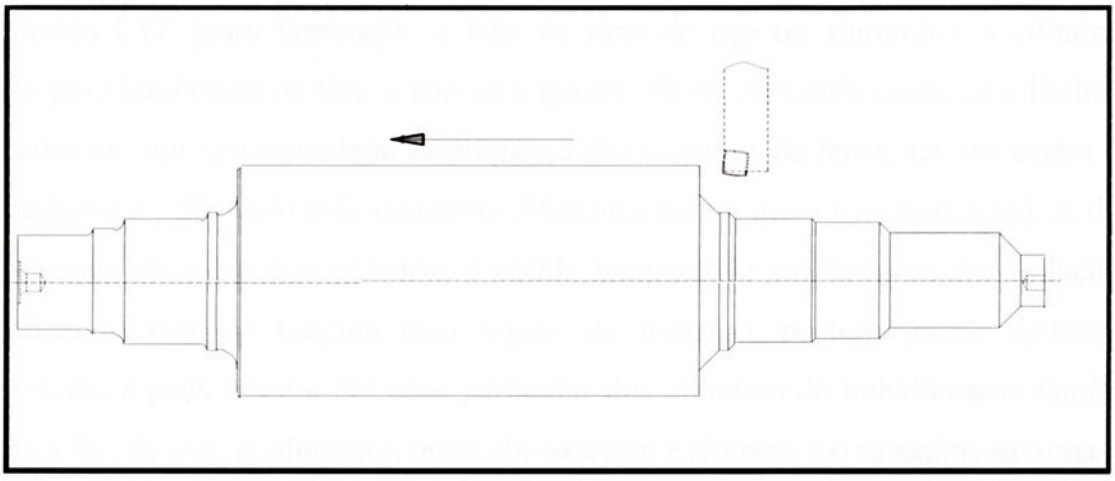


Figura 41-Acabamento da mesa WR e Nodulite.

O acabamento dos pescoços (Figura 42), analogamente ao processo dos cilindros FHW, procede utilizando uma ferramenta de geometria RCMA 311900, classe K090.

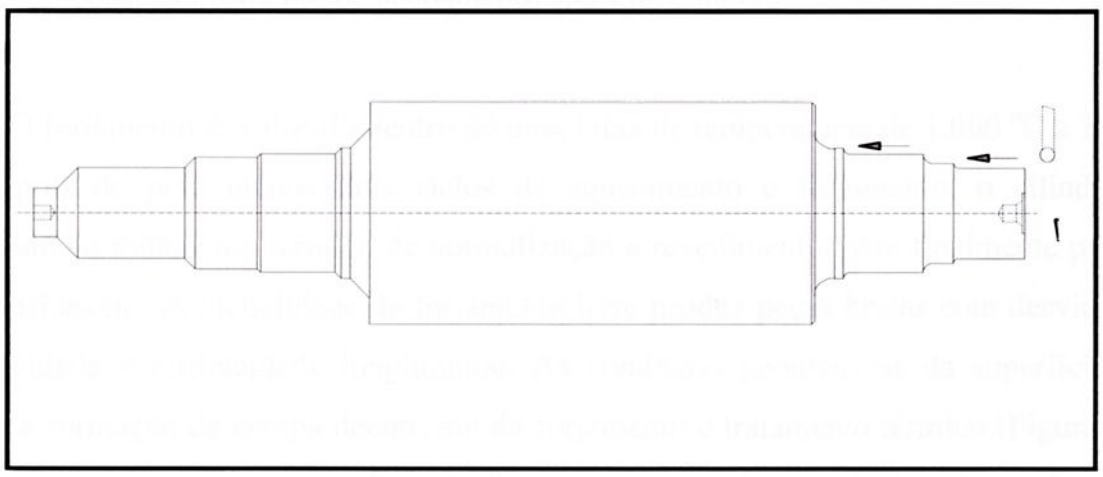


Figura 42-Acabamento de pescoços de cilindros WR e Nodulite

4.5 PROCESSOS DE TORNEAMENTO LONGITUDINAL PARA DESBASTE E ACABAMENTO DE CILINDROS FORJADOS LTF E BUR.

Estes cilindros são produzidos em aço forjado, em dois tipos principais: cilindros de trabalho LTF (para laminação a frio, de tiras de aço ou alumínio), e cilindros de encosto para laminação de tiras a frio ou a quente, BUR. Nos dois casos, os cilindros são fabricados em um único material (a diferença dos cilindros de ferro, que em certos casos são produzidos utilizando dois materiais diferentes para a mesa e os pescoços). A dureza mais elevada da mesa dos cilindros é obtida temperando em água ou por indução, ou normalizando com ar forçado essa região de trabalho, posteriormente aplicando o revenimento à peça inteira. No caso particular dos cilindros de trabalho para laminação de tiras a frio de aço ou alumínio, intercala- se entre a têmpera e o revenimento uma etapa de esfriamento sub- zero (– 70 ^{o}C) para minimização da ocorrência de austenita retida, microestrutura esta prejudicial ao desempenho do cilindro durante a laminação, e também à usinabilidade.

4.5.1 Processo de forjamento de cilindros LTF e torneamento de desbaste da mesa e pescoços; torneamento de acabamento antes de têmpera

O forjamento é realizado dentro de uma faixa de temperaturas de 1.000 ^{o}C a 1.250 ^{o}C. Depois de pelo menos dois ciclos de aquecimento e forjamento, o cilindro é conduzido ao tratamento térmico de normalização e revenimento, para finalmente passar para a usinagem. A modalidade de forjamento livre produz peças brutas com desvios de cilindricidade e retilineidade longitudinal. As condições geométricas da superfície da mesa e a formação de carepa decorrente do forjamento e tratamento térmico (Figura 43) não permitem uma utilização eficiente da cerâmica devido ao número de quebras de insertos que provocam, processando- se o desbaste com metal duro.

unesp

Figura 43-Superfície característica de cilindro LTF bruto de forjamento

As operações de torneamento longitudinal em cilindros forjados são aquelas que, maior tempo de usinagem consomem relativamente à totalidade do tempo empregado na usinagem dos cilindros (analogamente ao torneamento longitudinal dos cilindros de ferro fundido). O esquema do desbaste de pescoços com metal duro é visualizado na Figura 44.

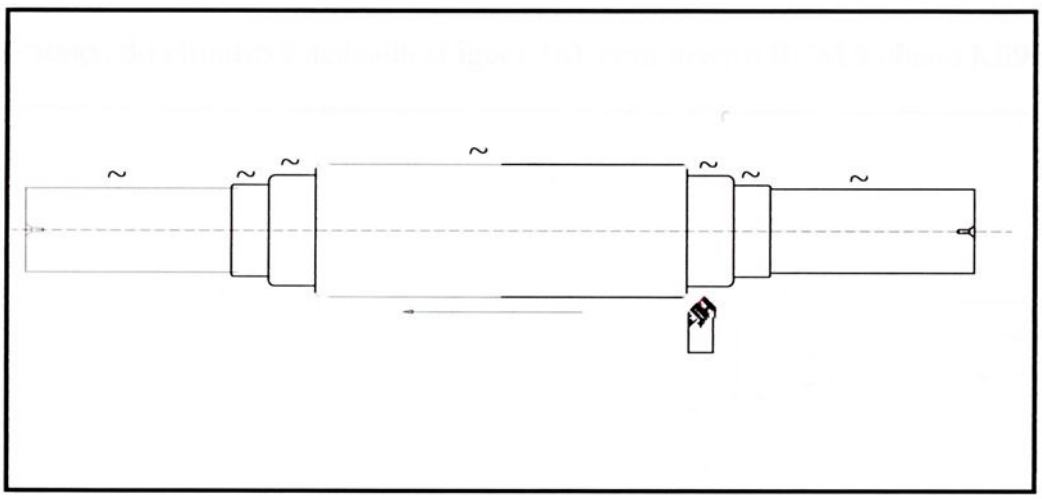


Figura 44-Desbaste da mesa LTF

Pelas mesmas razões relativas ao estado da superfície dos cilindros após forjamento e tratamento térmico explicadas em 4.5.1, o pescoço dos cilindros também é desbastado (Figura 45) com metal duro, com uma ferramenta composta por 6 insertos, χ= 60° e λ= -5°

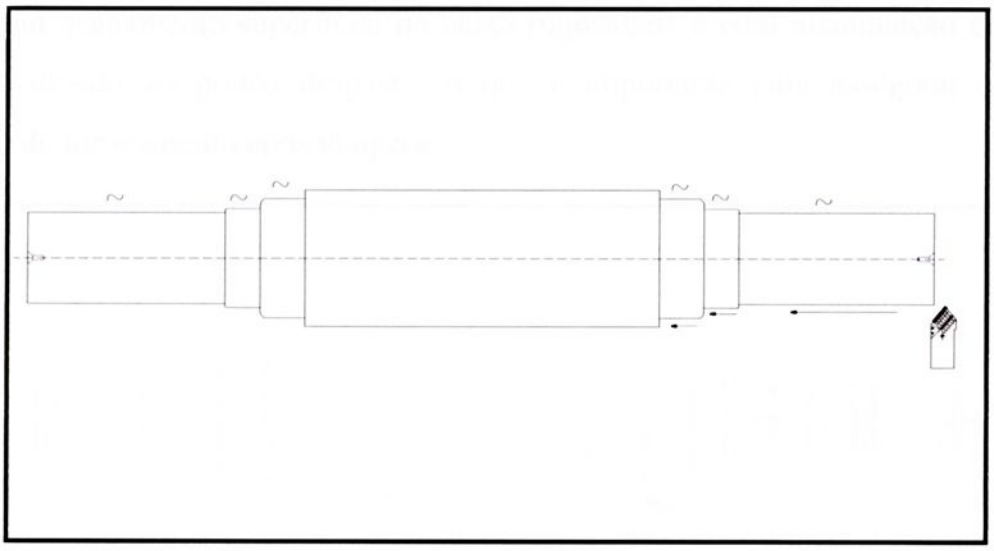


Figura 45-Desbaste de pescoços LTF

O pescoço do cilindro é acabado (Figura 46) com inserto RCMA classe K090.

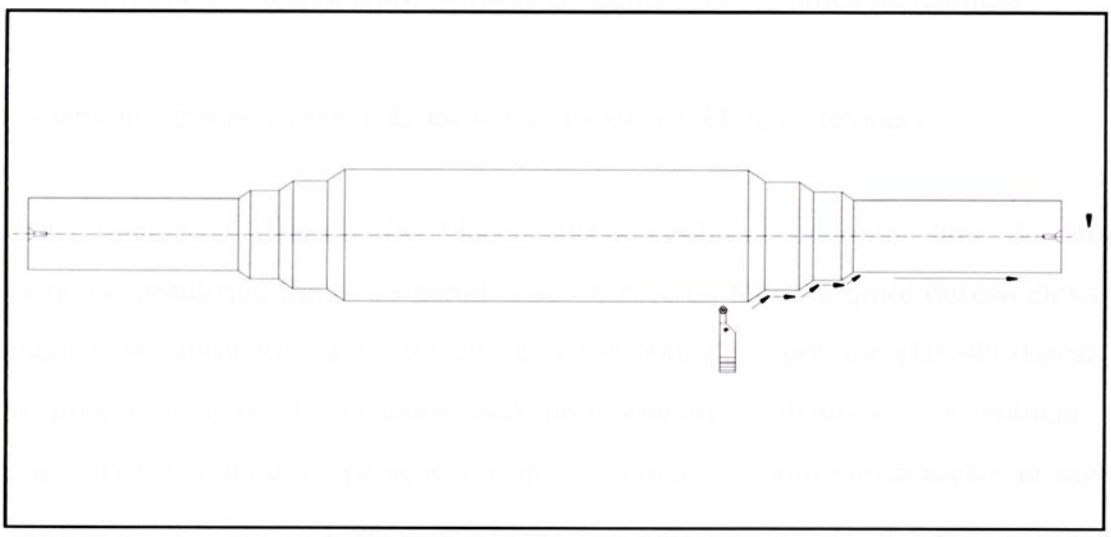


Figura 46-Acabamento de pescoços e face da mesa antes da têmpera

O acabamento da mesa antes de têmpera é realizado por meio de ferramenta cerâmica geometria SNG 12800 T, classe K090, com ângulos χ= 5°, e λ= -5° (Figura 47) com vantagens frente ao metal duro, já que a superfície foi totalmente desbastada na operação anterior e não há irregularidades que possam fraturar subitamente a cerâmica.

O inserto de cerâmica com essa geometria de amplo raio, também propicia a obtenção de um acabamento superficial de baixa rugosidade e com manutenção de boa cilindricidade devido ao pouco desgaste; o que é importante para assegurar a boa produtividade do torneamento após têmpera.

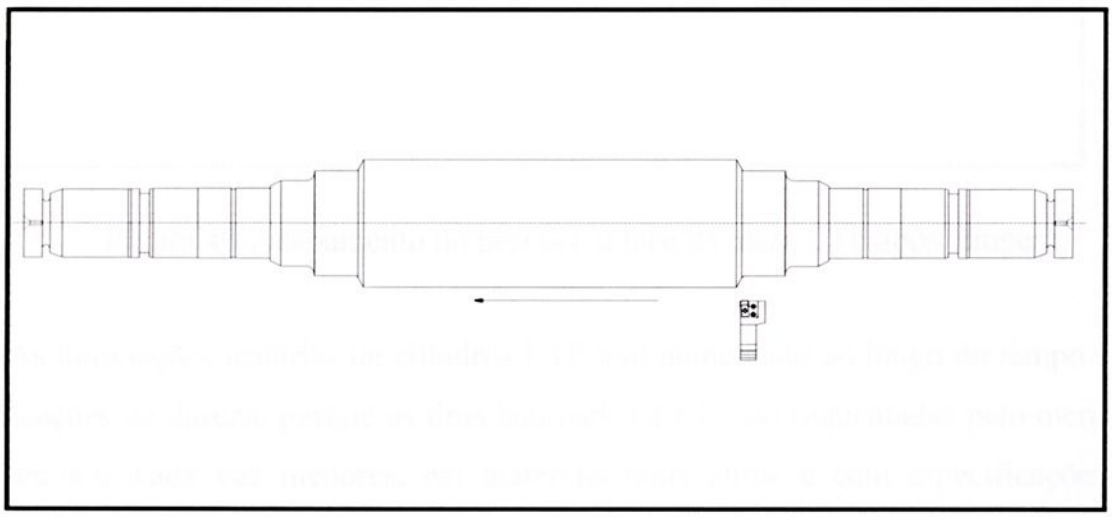


Figura 47-Acabamento de mesa de cilindros LTF antes da têmpera

4.5.2 Acabamento dos pescoços e da mesa de cilindros LTF após têmpera

Nestas operações (Figura 48, Figura 49) a cerâmica encontra uma das suas aplicações mais vantajosas frente ao metal duro. A face da mesa adquire dureza elevada após têmpera e revenimento, de modo que a ferramenta deve possuir elevada dureza e apresentar pouco desgaste (o cilindro está praticamente acabado e a tolerância de usinagem é estreita). Esta é a operação em que a cerâmica como substituição ao metal duro foi utilizada em primeiro lugar nos cilindros de aço forjado, já que a operação com metal duro era extremamente penosa e lenta. Uma vez acabada a face da mesa, a

usinagem do pescoço procede normalmente já que não há grande elevação de dureza nessa região do cilindro.

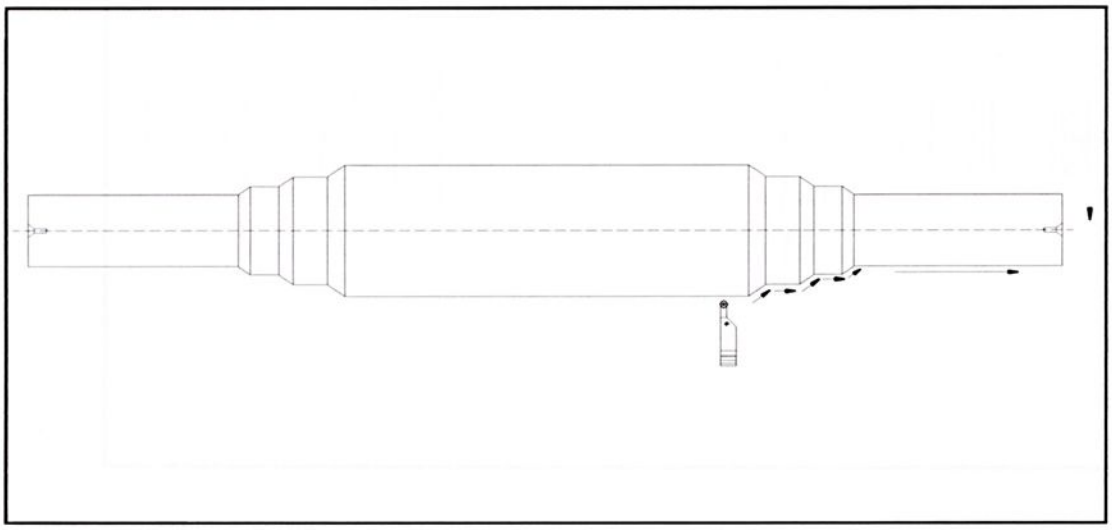


Figura 48-Acabamento do pescoço e face da mesa LTF após tempera

As laminações usuárias de cilindros LTF tem aumentado ao longo do tempo suas especificações de dureza, porque as tiras laminadas a frio são requisitadas pelo mercado em espessuras cada vez menores, em materiais mais duros e com especificações de planicidade maiores. Essas condições exigem dos cilindros de trabalho a frio, uma maior resistência mecânica e ao desgaste, condições estas que diminuem a usinabilidade. Os pedidos de cilindros de durezas superiores a 64 HRC são cada vez mais freqüentes, e nestes casos a usinagem com metal duro é praticamente impossível. O acabamento da mesa é realizado com ferramenta de geometria SNG 12800 T, classe K090, com χ= 5°, e λ= -5°. A geometria SNG 12800 T é muito conveniente para as cerâmicas, já que apresenta raio de curvatura de 128 mm, muito maior que o raio de uma ferramenta RCMA 311900 (cujo raio é 16 mm). Para as operações de torneamento duro, a geometria SNG apresenta muito maior resistência à fratura (e pode ser utilizada com maiores avanços) do que a ferramenta de geometria RCMA mencionada.

unesp

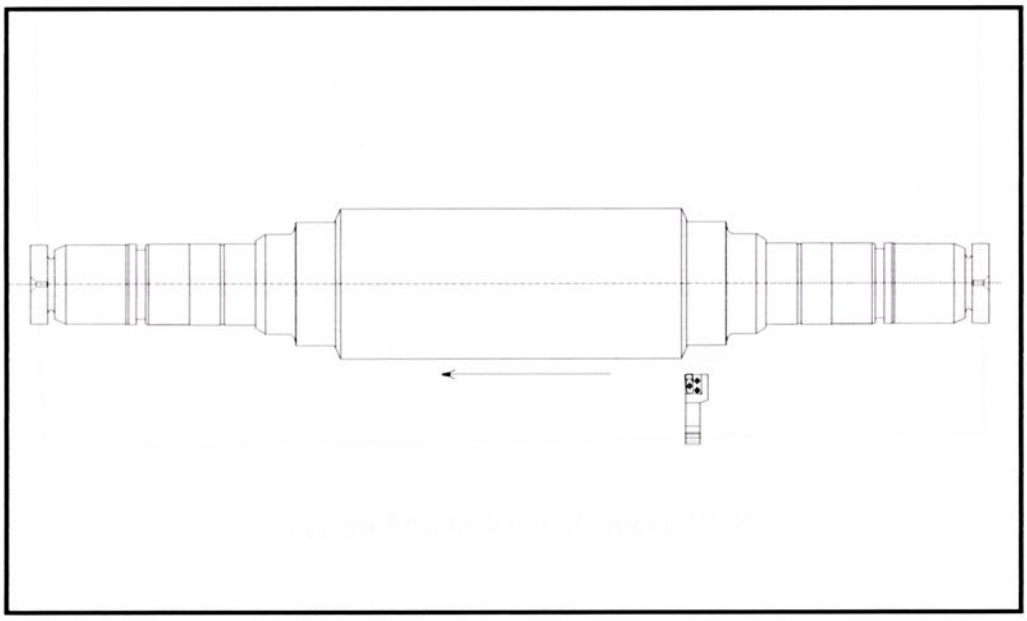


Figura 49-Acabamento de mesa LTF após tempera

4.5.3 Processo de forjamento de cilindros BUR e torneamento de desbaste da mesa e pescoços

Estes cilindros são produzidos em aço forjado em um único material; a dureza mais elevada da mesa é obtida aquecendo- a rapidamente em um forno a gás de alta potência, esfriando o cilindro de maneira controlada numa máquina rotativa a névoa d'água (tratamento térmico chamado de têmpera diferencial, porque possibita temperar apenas uma camada superficial do cilindro, de aproximadamente 60 mm). Posteriormente, os cilindros são revenidos. O desbaste do cilindro de encosto na condição bruta de forjamento deve ser realizado (Figura 50) com metal duro devido às irregularidades superficiais apresentadas pela peça bruta de forjamento, que causam quebras excessivas nos insertos de cerâmica de qualquer classe. A ferramenta apresenta aresta de corte reta composta de 6 insertos SNGN 56, com $\chi = 45^{o}$, $\lambda = -5^{o}$.

A Figura 51 permite visualizar o acabamento da mesa antes da têmpera do cilindro BUR, realizado com ferramenta SNG.

unesp

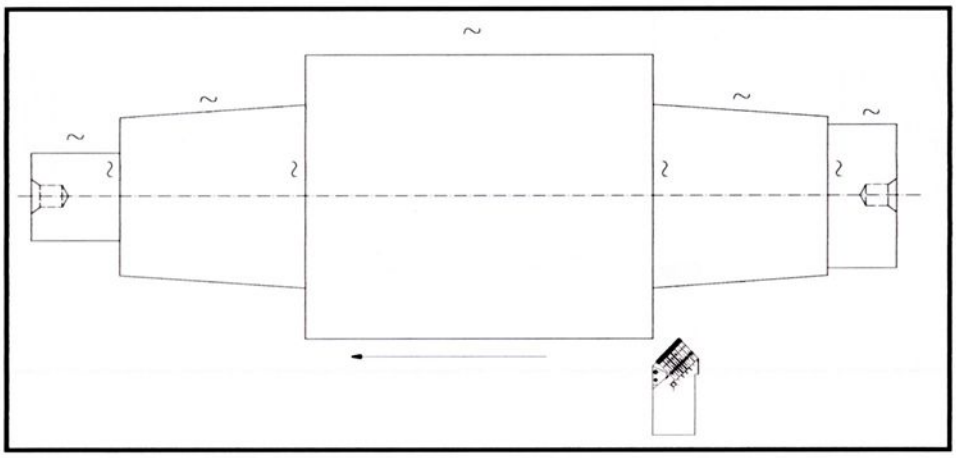


Figura 50-Desbaste de mesa BUR

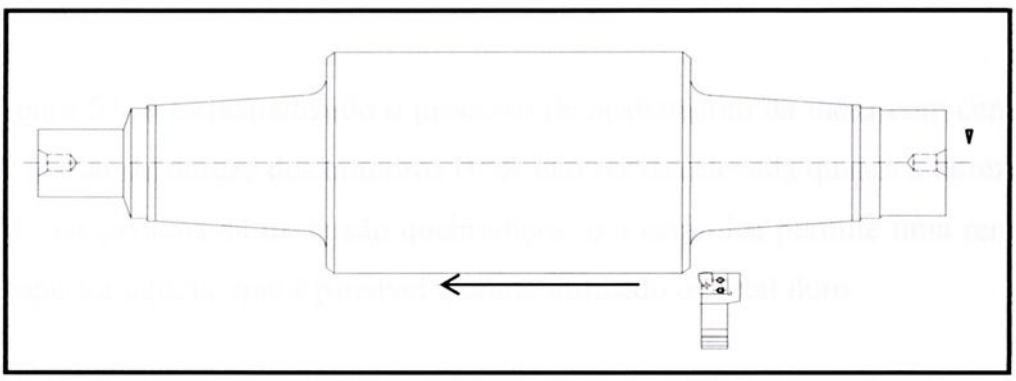


Figura 51-Acabamento do diâmetro de mesa antes da têmpera

Devido à carepa formada nos tratamentos térmicos de têmpera e revenimento, é necessário utilizar o metal duro (Figura 52) para realizar o primeiro passe de desbaste. A ferramenta conta com múltiplos insertos geometria SNGN 56, classe P05, χ= 30°, λ= -5°.

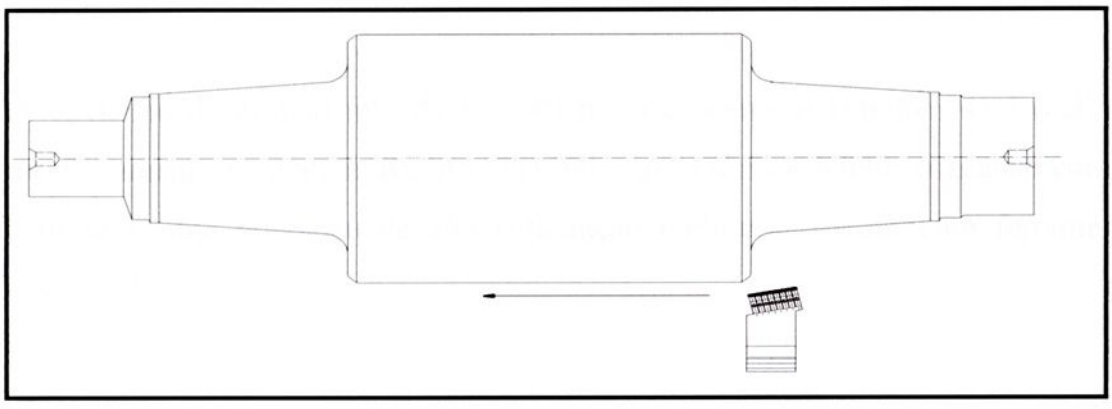


Figura 52-Desbaste diâmetro da mesa após têmpera

4.5.4 Desbaste e Acabamento da mesa de cilindros BUR após têmpera; acabamento dos pescoços

Na Figura 53 é esquamatizado o processo de acabamento da mesa com cerâmica classe K090; apesar da dureza dos cilindros BUR não ser tão elevada quanto a dureza dos cilindros LTF, os cavacos da mesa são quebradiços, e a cerâmica permite uma remoção de material superior àquela que é possível quando utilizado o metal duro.

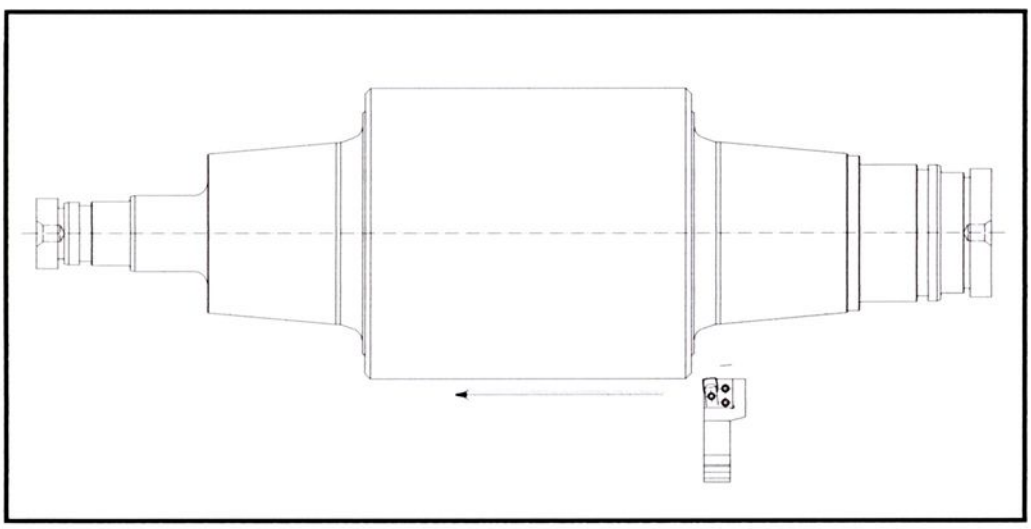


Figura 53-Acabamento da mesa BUR

A operação de acabamento da face da mesa e pescoços (Figura 54) é realizada com uma ferramenta geometria RCMA 311900, em cerâmica K090; o acabamento da face da mesa é uma operação de alta solicitação melhor resolvido com ferramentas cerâmicas.

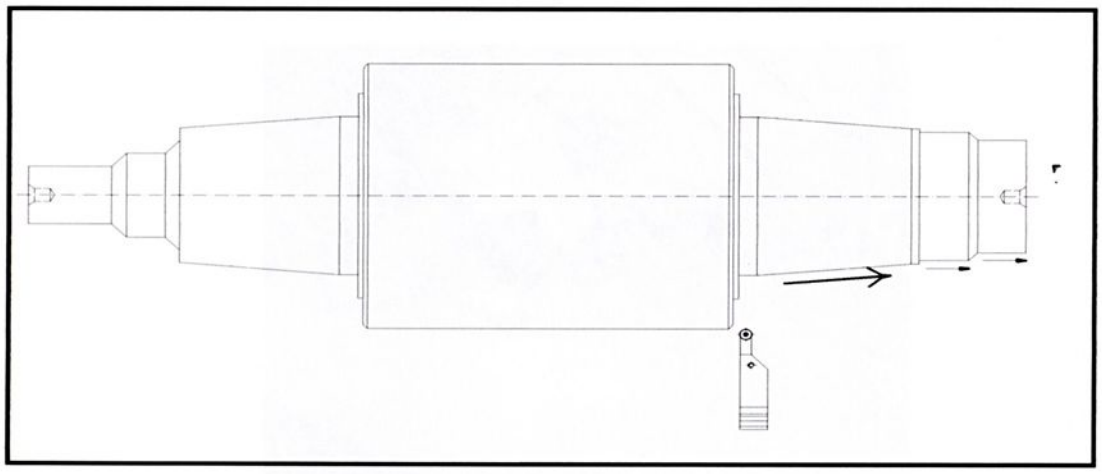


Figura 54-Acabamento da mesa BUR

4.6 REALIZAÇÃO DAS IMAGENS DE DESGASTE

As microfotografias foram realizadas no Estereomicroscópio Leica GZ6 do Laboratório de Materiais da FEG, Laimat 2 (Figura 55); e no Microscópio invertido Zeiss Laboratório de Materiais da FEG, Laimat 1 (Figura 56).

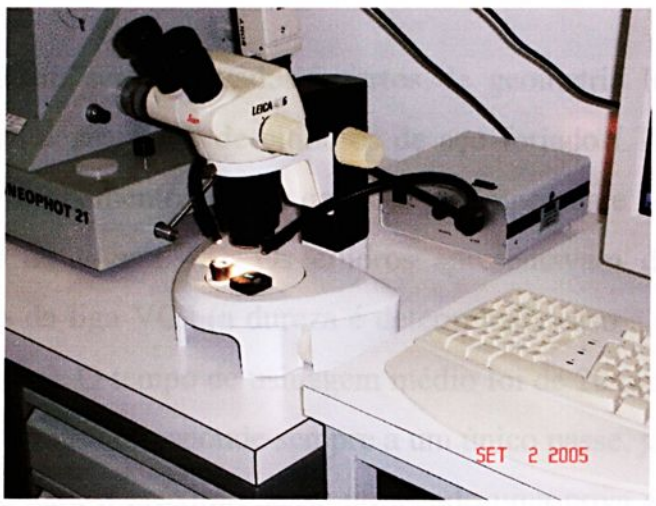


Figura 55-Estereomicroscópio Leica GZ6

Figura 56- Microscópio invertido Zeiss

5 RESULTADOS

5.1 DESGASTE DOS INSERTOS DE CERÂMICA MISTA NA USINAGEM DE LTFS (AÇO FORJADO)

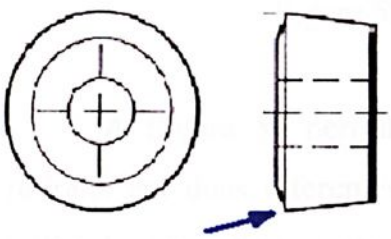
5.1.1 Insertos RCMA 321900 T em cilindros de aço forjado LTF.

Na seqüência, podem ser observados insertos de geometria RCMA 321900 T utilizados nos tornos para acabamento de cilindros de aço forjado LTF, após um passe completo na operação de acabamento da face da mesa já temperada e pescoço (conforme processo já apresentado na Figura 48). Os cilidros apresentavam diferentes durezas dentro das especificações da liga VC9 (a dureza é determinada caso a caso para atender os requisitos de cada cliente). O tempo de usinagem médio foi de 20 minutos. O desgaste nas arestas de corte observadas corresponde sempre a um único passe, já que a prática é a de girar sempre o inserto para o próximo passe utilizando uma nova aresta, ou trocá-lo por outro novo se todas as arestas tiverem sido utilizadas, ou no caso do inserto apresentar uma fratura importante. Portanto, as figuras que se seguem representam diferentes insertos. Os sobremetais que o inserto remove em cada passe apresentam variações ao longo do pescoço do cilindro devido ao empenamento que a peça apresenta após têmpera e revenimento, e que pode obrigar o operador do torno a mudar o número de passes previsto alterando assim o sobremetal em cada passe. O sobremetal também pode apresentar variações (conicidade da peça) provocada por desalinhamento geométrico das máquinas que realizam o acabamento das peças antes da têmpera. Os operadores frequentemente ajustam (diminuindo ou aumentando por meio do recurso do *override* do CNC) ao longo do passe, as condições de usinagem segundo sua avaliação do estado do inserto, as variações de sobremetal e o nível de dureza do cilindro em usinagem, respeitando os limites estabelecidos no processo. Face a essas condições variáveis observadas na prática, resulta difícil estabelecer uma análise dos mecanismos de

cm 1 2 3 4 5 6 7 unesp 11 12 13 14 15 16 17 18

desgaste. No entanto, podem ser reconhecidos padrões de desgaste mais típicos que procuramos agrupar nas séries de figuras que se sucedem, postulando uma relação com condições de corte características. Foram utilizados insertos da classe K090 (Kennametal, cerâmica mista), no acabamento de pescoço e mesas temperados de cilindros LTF liga VC9.

Um padrão de desgaste em passes de menor sobremetal, é o de múltiplas marcas aninhadas dentro de uma tênue cratera de superfície suave a), sendo b) a direção do avanço. Não há desgaste de folga mensurável neste estágio, Figura 57. Mesmo sem desgaste de folga apreciável, a aresta é sempre substituída (por giro do inserto sobre seu eixo) para o próximo passe. Evita- se assim sobrepor o desgaste provocado por 2 passes sucessivos, para diminuir o risco de fraturas. As três ramificações da indicação a) mostram marcas provocadas pelos diversos sobremetais removidos pelo inserto ao longo do passe. A influência de diferentes sobremetais sobre o desgaste de insertos de aresta de corte circular pode ser visualizado esquematicamente na Figura 59.



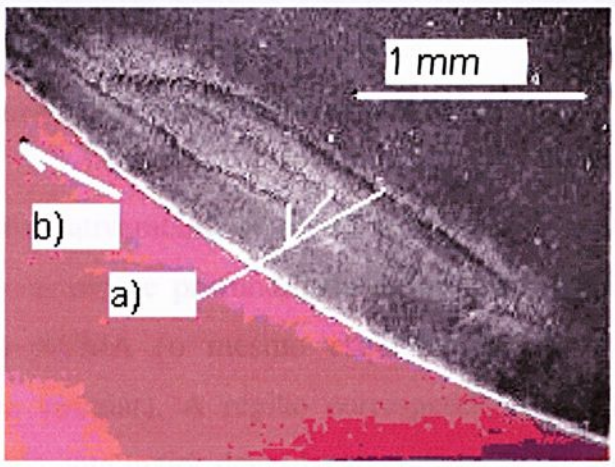


Figura 57-Vista normal à superfície de saída em inserto RCMA. Sugestão de cratera.

Marcas correspondentes às diferentes profundidades de corte e avanços.

Na Figura 58 é mostrada com maior ampliação, outra ferramenta com marcas (a) similares às apresentadas na Figura 57, sugerindo aderências do material da peça.

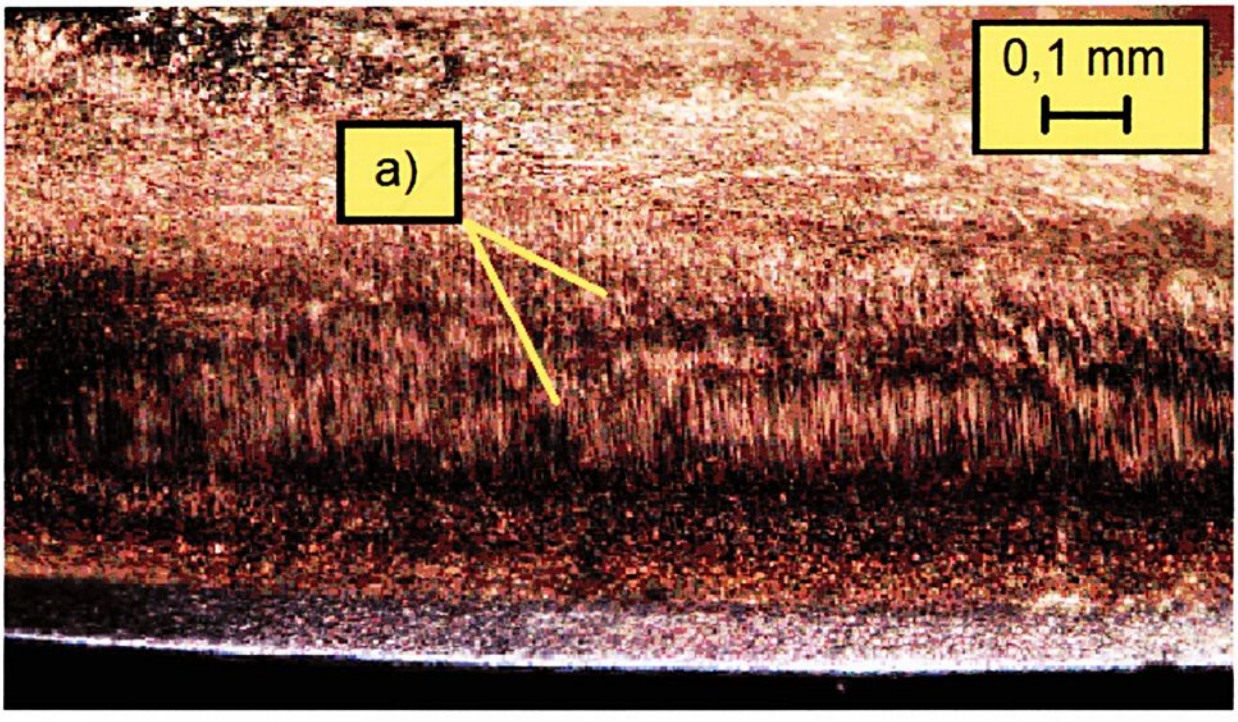


Figura 58-Marcas na superfície de saída de inserto RCMA

A Figura 59 permite visualizar ilustrativamente, a forma da seção de cavaco retirada em duas diferentes condições de avanço e profundidade de usinagem quando utilizada uma ferramenta de geometria RCMA (o mesmo esquema aplica- se às ferramentas SNG, que apresentam aresta circular). A região correspondente à maior espessura de corte é a que apresenta inicialmente maior degradação com sinais de atrito, escoamento de material, trincas, e depois lascamentos.

Na Figura 59 podem ser identificados: a), b) maior e menor profundidade de usinagem; c),g) Interseções entre a parte ativa e livre da aresta principal de corte; d) maior espessura de corte; e), f) maior e menor avanço.

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

644

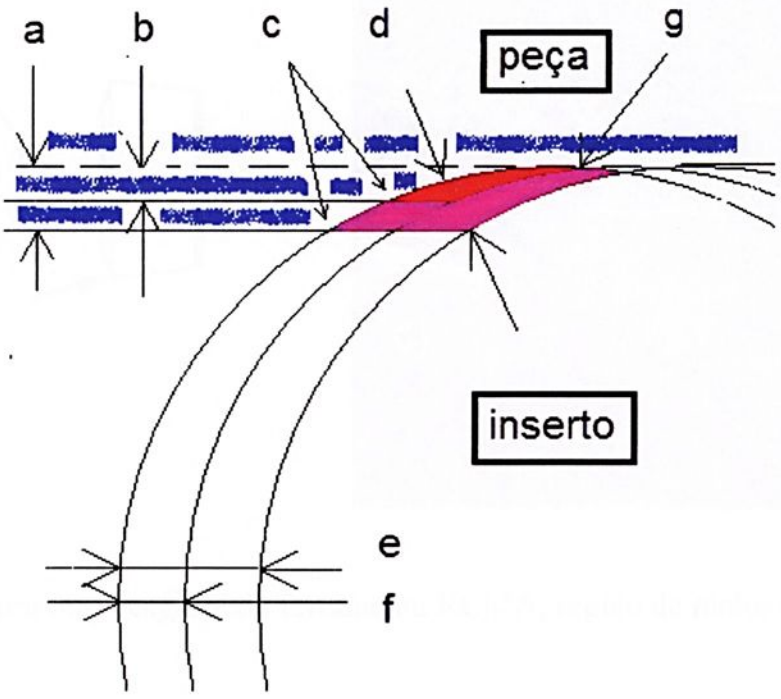


Figura 59- Diferentes profundidades de usinagem e avanços em ferramenta RCMA.

Na Figura 60 é possível perceber em outro inserto RCMA de cerâmica mista uma região com a superfície desgastada na região correspondente à maior espessura de corte. a) sinais de desgaste b) marcas sugestivas de trincas, na região de maior espessura de corte, c) direção do avanço. Vista normal à superfície de saída. O desgaste de flanco não é perceptível neste estágio de desgaste.

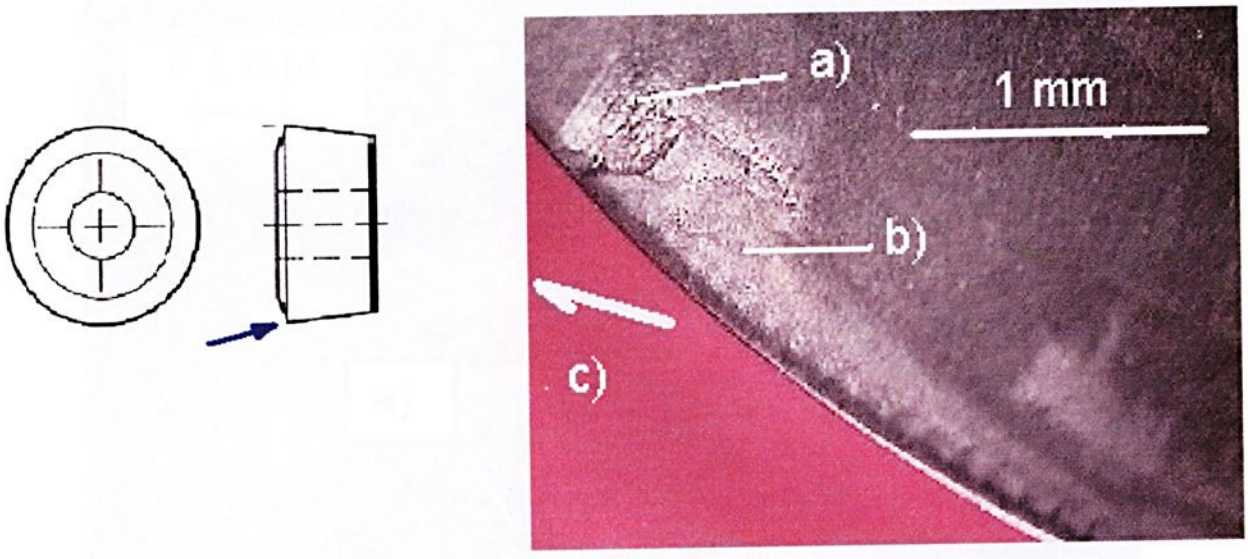


Figura 60- Desgaste da ferramenta RCMA, região de maior espessura de corte.

A Figura 61 registra um inserto RCMA com sinais de desgaste na região de maior espessura de corte. a) sinais de aderências e escoamento do material da peça; b) borda da cratera com sinais que sugerem aderências e escoamento do material da peça. Vista normal à superfície de saída. Na borda do inserto é visível o arredondamento da aresta de corte, que fornece uma coloração diferente daquela da superfície de saída.

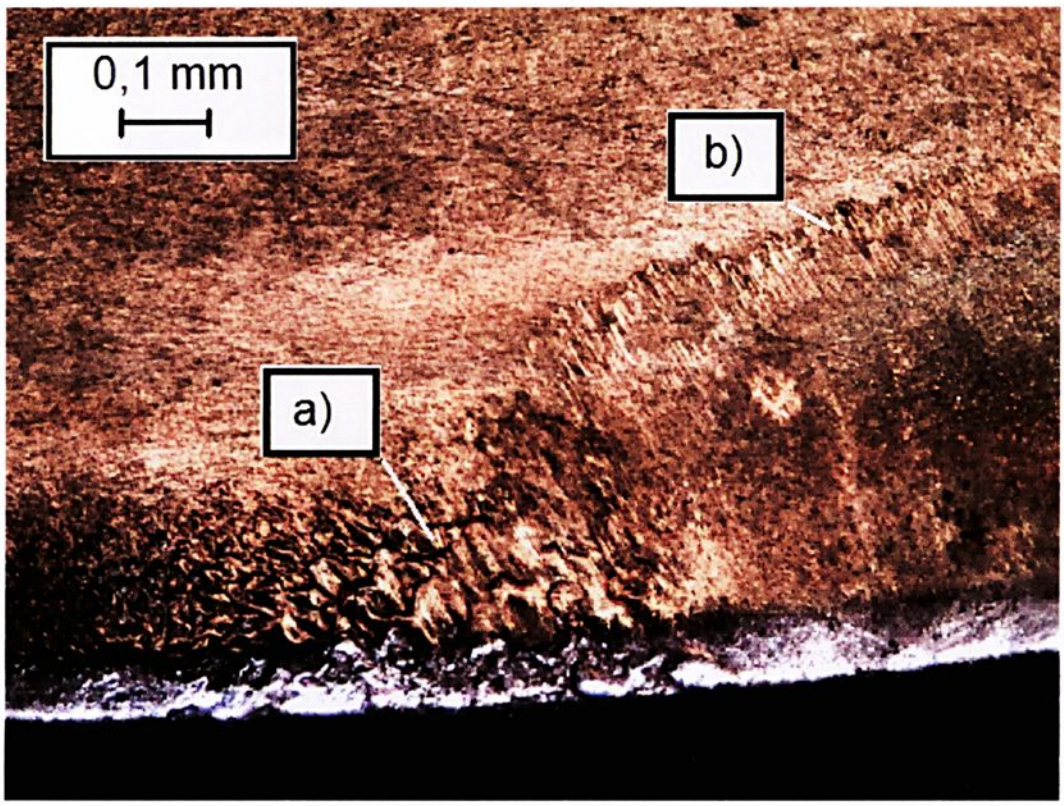


Figura 61- Inserto RCMA com marcas dentro do início de cratera.

A Figura 62 permite observar, em outra ferramenta, um estado de desgaste maior que o apresentado pelo inserto da Figura 61: a) superfície côncava decorrente de lascamento com despreendimento de volume discreto de material; b) leve cratera; e c) sinais sugerindo aderências e escoamento de material da peça, na região correspondente à maior espessura de corte (ver também Figura 63).

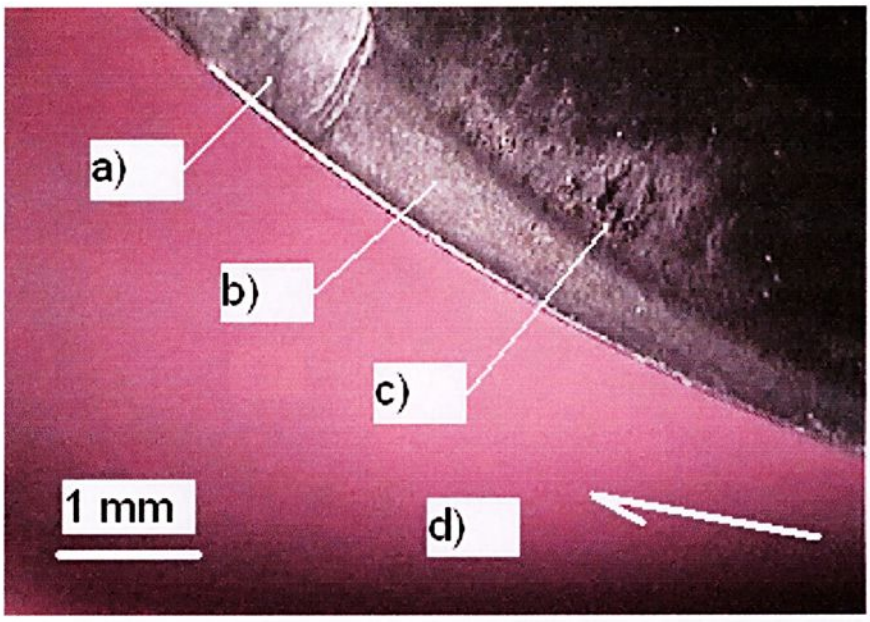


Figura 62- Inserto RCMA. Fratura na região de maior espessura de corte.

Na Figura 63 pode ser visualizada uma região da superfície de saída de outro inserto RCMA de cerâmica mista, que a semelhança da Figura 62, contém a imagem da região de maior espessura de corte em inserto RCMA, com: a) superfície côncava (profunda o suficiente com relação à superfície de saída, para ficar fora do campo de iluminação) provocada por lascamento com despreendimento de volume discreto de material; b) cratera; c) marcas que sugerem aderências e escoamento do material da peça. Vista normal à superfície de saída.

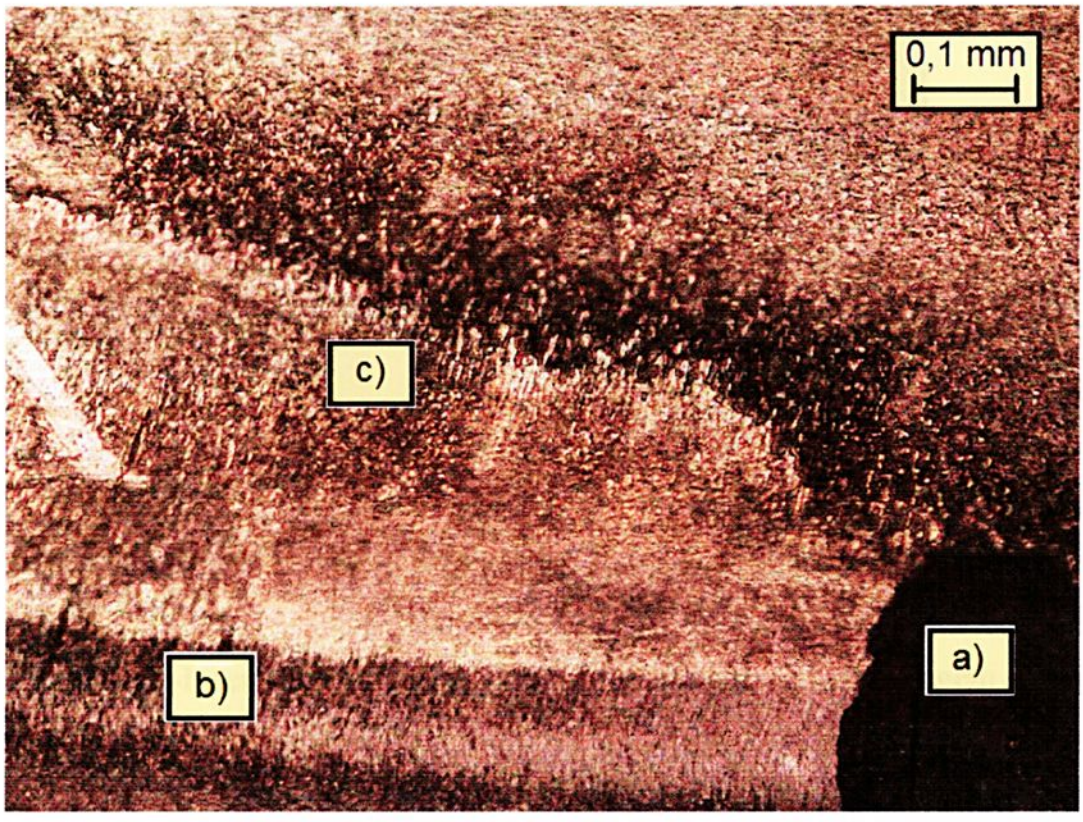


Figura 63- Inserto RCMA, região de maior espessura de cavaco.

São notadas na Figura 64, duas marcas de avanço correspondentes a diferentes profundidades de corte em inserto de cerâmica mista RCMA. No fim do passe, são frequentemente visíveis os lascamentos nas regiões que trabalharam com maior espessura de usinagem como no presente caso. São visíveis: a) dois segmentos da aresta de corte (correspondentes a variações no sobremetal), com lascamentos; b) início de cratera. Vista normal à superfície de saída

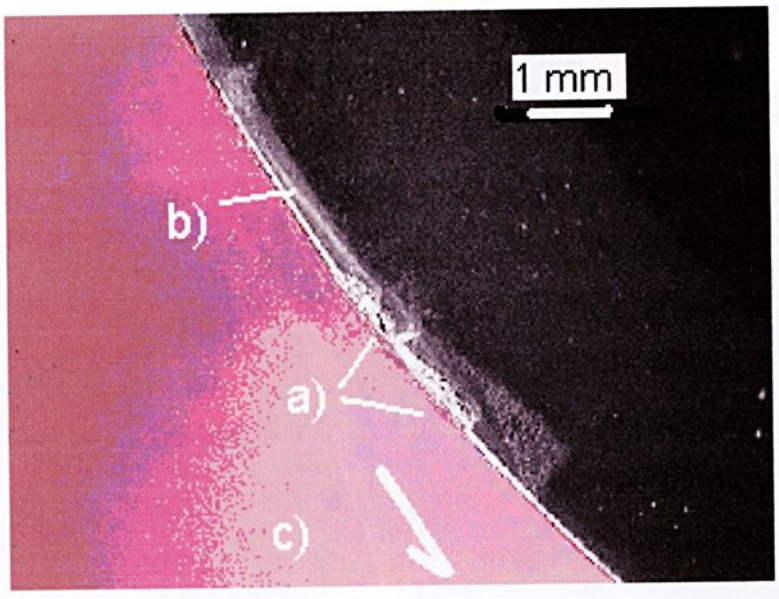


Figura 64-Inserto RCMA após corte com profundidades de usinagem diferentes.

Na Figura 65 são visíveis lascamentos na aresta de corte do inserto correspondente à maior espessura de corte, que provocaram desgaste nas superfícies de saída e folga; este desgaste aparece habitualmente nos cilindros que apresesentam as maiores durezas. a) desgaste medido sobre a superfície de folga, 1 mm; b) desgaste medido sobre a superfície de saída, 1,4 mm. Ambos os desgastes foram medidos por meio de lupa com escala, previamente à observação microscópica. O desgaste de folga observado corresponde aproximadamente à média dos maiores desgastes de folga observados em amostragem de insertos (ver Apêndice).

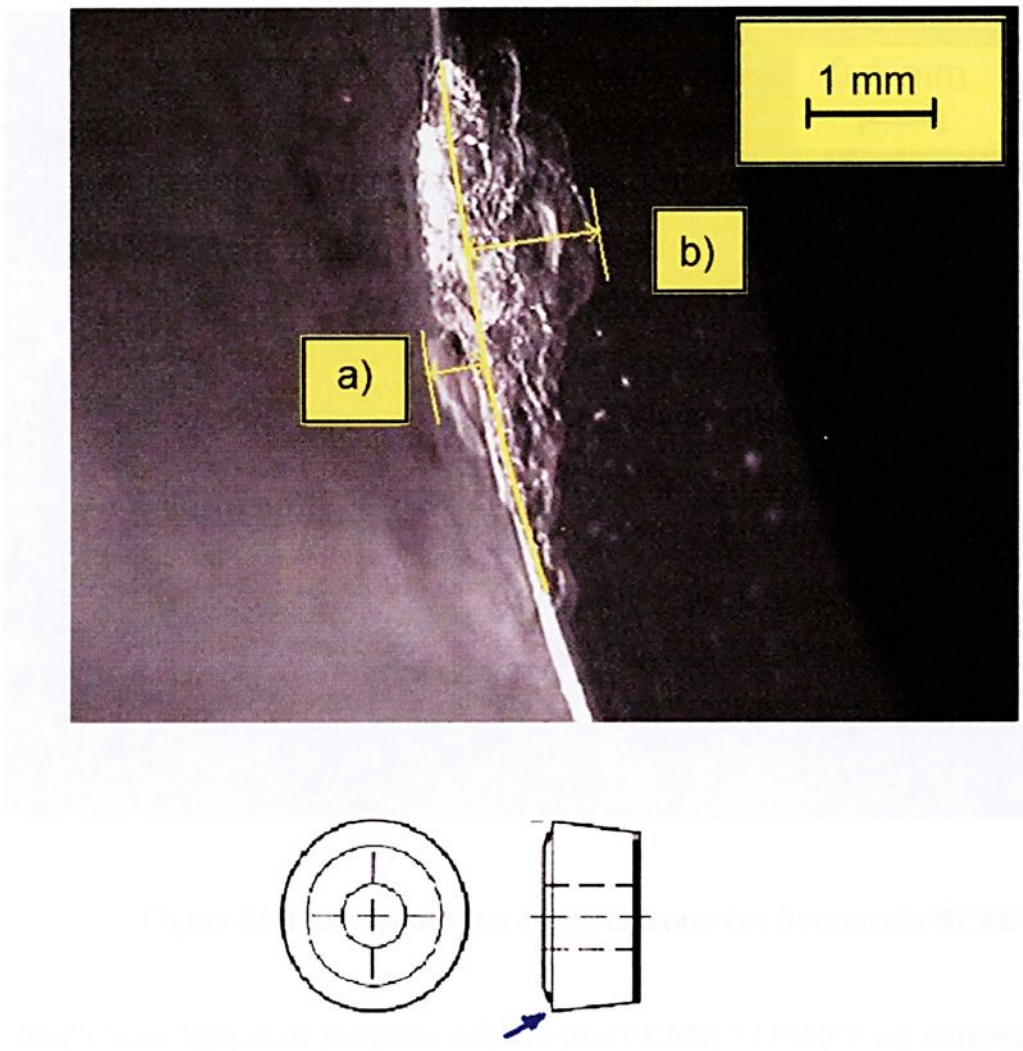


Figura 65- Inserto RCMA com lascamentos nas superfícies de saída e folga.

Na Figura 66 são visíveis lascamentos na aresta de corte de um inserto RCMA em cerâmica mista, que provocaram desgaste nas superfícies de saída e folga; a) lascamentos em degraus. Vista normal à superfície de saída. Trata- se do mesmo padrão de desgaste observado na Figura 65.

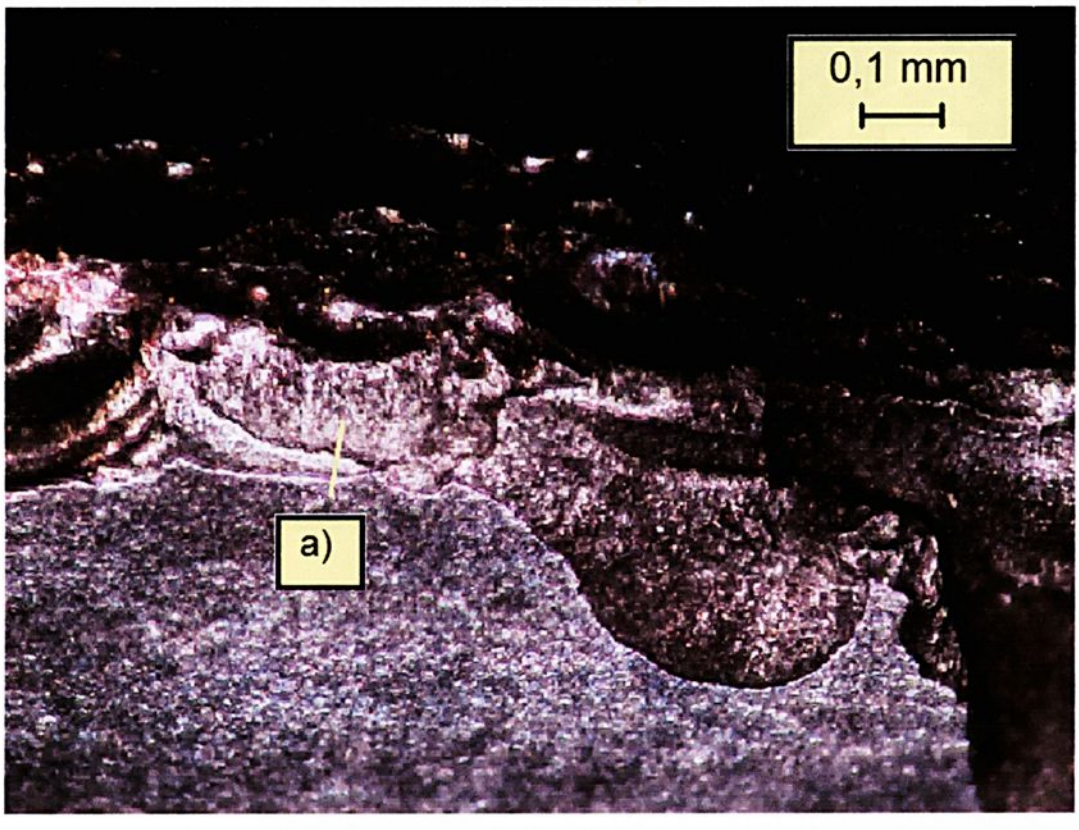


Figura 66-Lascamentos na aresta de corte em ferramenta RCMA.

5.1.2 Seqüências típicas de desgaste dos insertos RCMA 311900 T em cilindros LTF

Na Figura 67, seqüência de imagens de diferentes insertos RCMA apresentando diferentes níveis de desgaste após um passe de acabamento de pescoço e face de mesa não temperada de LTF, em diferentes condições de profundidade de usinagem (ditada pelo sobremetal a remover) e avanços, nos quais podem ser percebidos; a) tênue cratera; b) início de desgaste de flanco na região da aresta com maior espessura de corte; c) cratera mais profunda com sinais de aderências e escoamento de material, e desgastes nas partes livres da aresta; d) lascamentos progressivos nas áreas extremas das crateras, observados geralmente nas regiões das arestas submetidas às maiores espessuras de corte e nas regiões com desgaste inicial de entalhe.

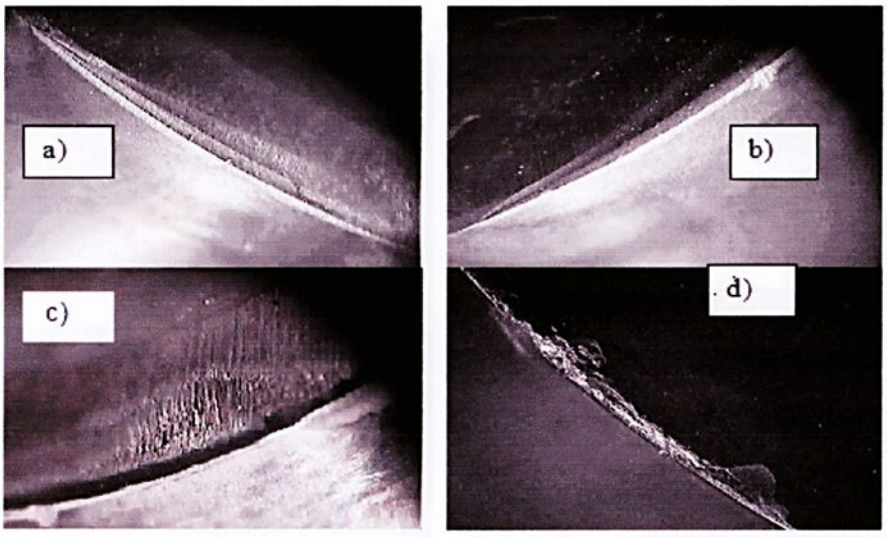


Figura 67-Seqüência de desgaste em insertos RCMA, em LTF não temperado.

Podem ser visualizados na Figura 68, os desgastes habituais em insertos RCMA quando utilizada para acabar pescoços e face de mesas temperadas: a) tênue cratera; b) início de desgaste de saída e flanco na região livre da aresta principal de corte (entalhe); c) início de desgaste de saída e flanco na região livre da aresta principal de corte (entalhe); d) lascamentos sucessivos iniciando nos desgastes de entalhe.

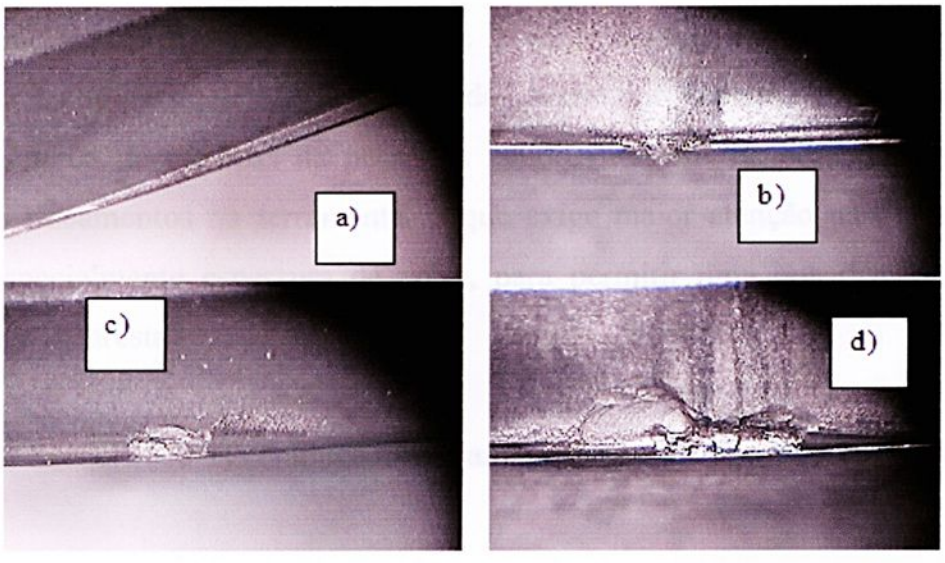


Figura 68- Seqüência típica de inserto RCMA em usinagem de aço LTF temperado.

O estágio inicial do desgaste dos insertos em cerâmica mista RCMA 311900 T durante a usinagem de pescoços, e faces de mesas temperadas ou não, é por cratera; a qual inicia no ponto correspondente à transição entre a aresta principal e a aresta secundária, e termina no ponto livre (sem corte) da aresta principal (vide Figura 59). Na região de maior espessura de corte, podem aparecer entalhes e lascamentos que progridem na medida do tempo de usinagem. Em casos mais severos, se o inserto não for girado ou substituído antes de terminar o passe, poderá ocorrer a fratura total e o conseqüente sucateamento do mesmo. A usinagem da face temperada da mesa intensifica os desgastes com relação ao estado antes da têmpera, com surgimento acelerado de cratera e entalhes, com eventuais lascamentos finais de maiores proporções.

O principal aprendizado obtido com a utilização dos insertos em cerâmica mista RCMA 311900 T no torneamento de aço forjado é que seu desgaste de flanco é menor que o apresentado por insertos de metal duro na mesma operação, permitindo maior aderência às tolerâncias dimensionais da peça acabada. Para minimizar o desgaste é conveniente manter os parâmetros de corte dentro de um campo tal a minimizar o

unesp

surgimento de lascamentos, já que estes dão lugar a outros lascamentos progressivamente maiores podendo levar à fratura da ferramenta. Lascamentos sucessivos também podem levar à interrupção do passe, devido ao acentuado desgaste provocado na ferramenta com a conseqüente perda de medidas da peça. As maiores durezas da peça preconizam o surgimento de lascamentos na ferramenta, o que exige maior atenção na definição de parâmetros (especialmente espessura de corte, para permitir uma boa distribuição de tensões ao longo da aresta).

5.1.3 Insertos SNG 12800 T, cerâmica mista, antes e depois da têmpera, em cilindros LTF.

No inserto mostrado na Figura 69 o passe de acabamento antes da têmpera na mesa de um cilindro de aço LTF liga VC9 provocou um desgaste de cratera; desgastes de entalhe, e um início de lascamento no segmento da aresta submetido à maior espessura de corte. a), c) desgastes de entalhe com lascamentos; b) desgaste de cratera; d) direção do avanço. O desgaste de flanco na região do entalhe a) não resultou importante (é esta a região com maior influência no acabamento superficial da peça).

unesp

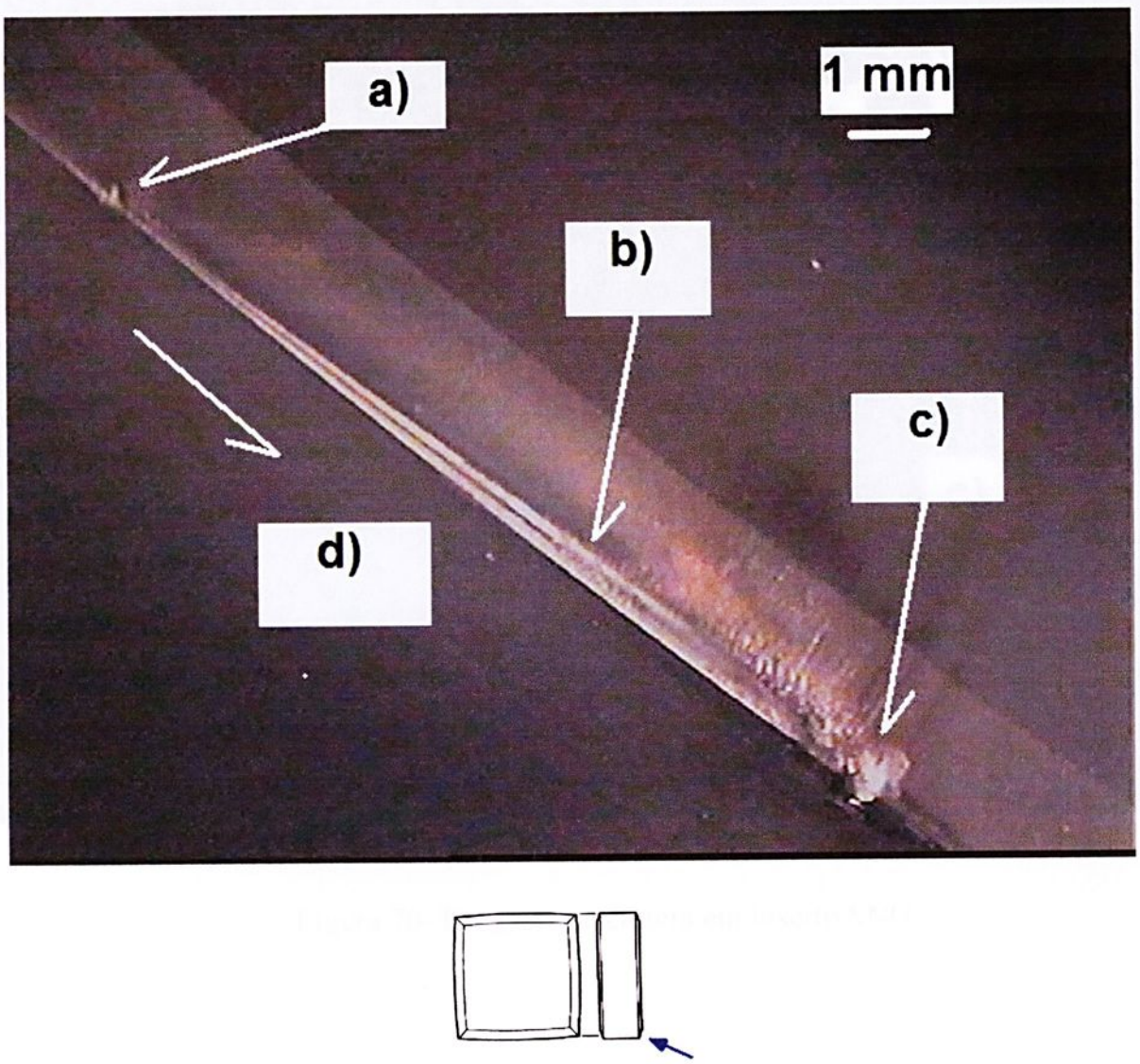


Figura 69- Inserto SNG. Desgaste por lascamentos acumulados, cratera e entalhes, em material não temperado.

No inserto SNG representado na Figura 70, é visível uma cratera c) na superfície de saída b). O inserto foi chanfrado na aresta principal de corte d). A posição da aresta principal de corte é sinalizada pelo segmento a).

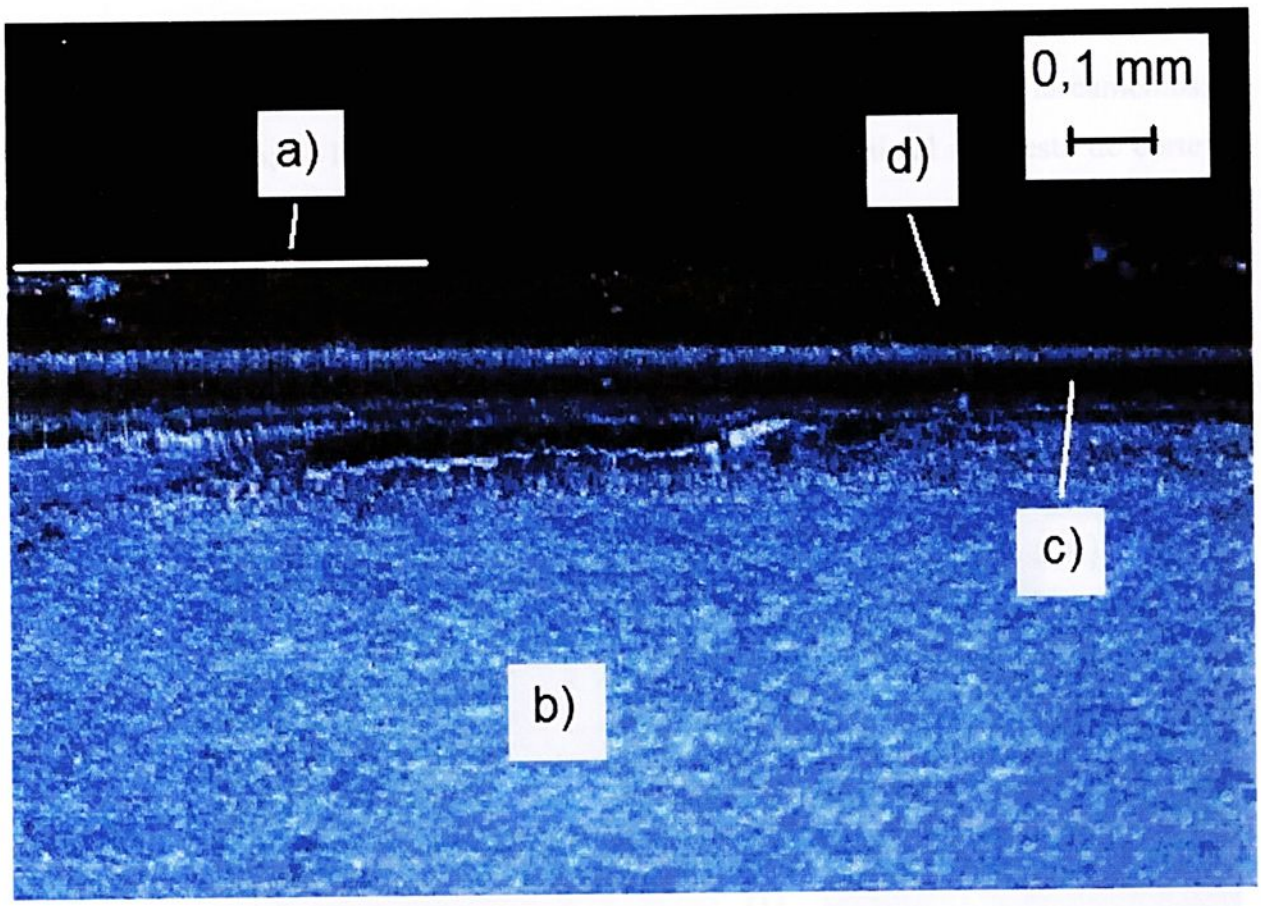


Figura 70- Desgaste de cratera em inserto SNG.

A Figura 71 contém ilustração representando o desgaste de um inserto SNG após corte em mesa temperada de cilindro LTF. a), d) desgastes de entalhe e lascamentos; b) direção do avanço; c) leve desgaste de cratera; d) posição inicial da aresta de corte; e) desgaste da superfície de saída; f) desgaste de folga.

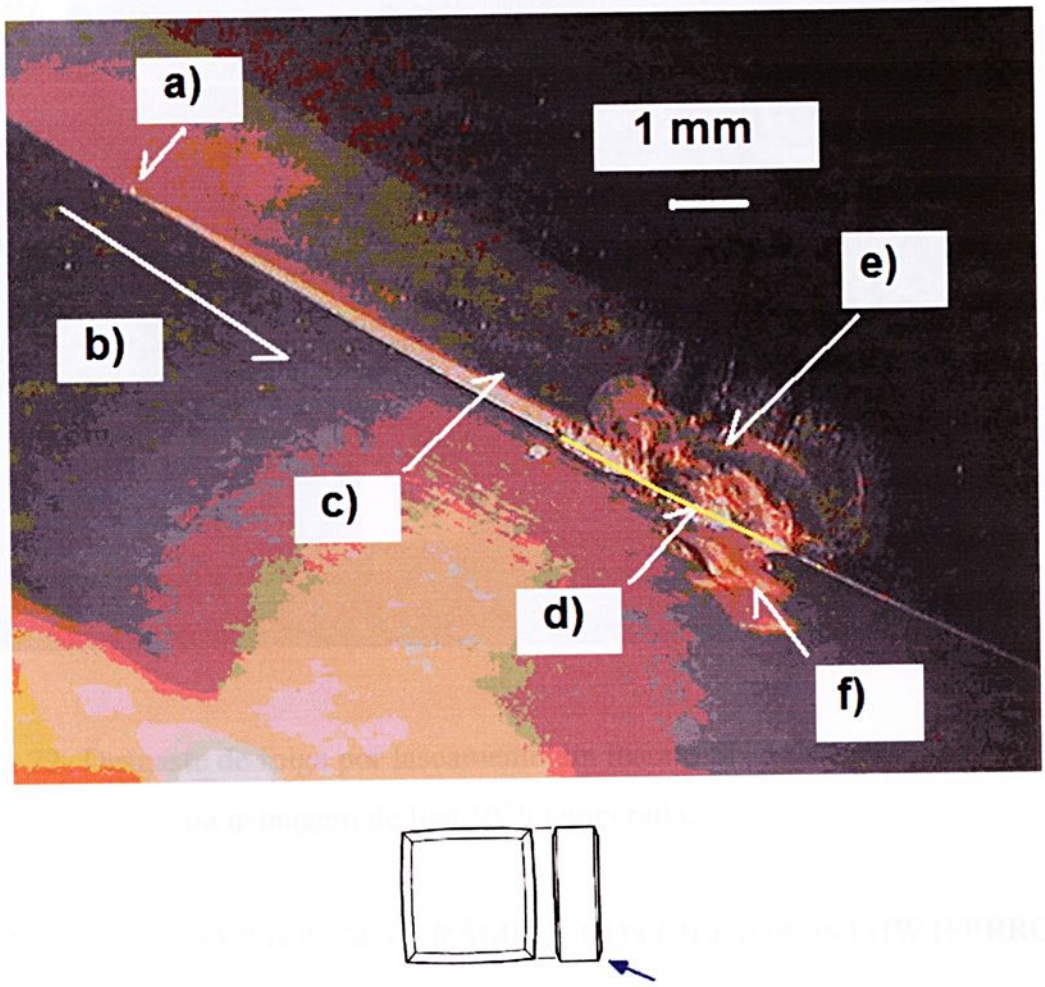


Figura 71-Lascamentos em inserto SNG em cilindro LTF temperado.

A Figura 72 permite visualizar o desgaste de folga por lascamentos em inserto SNG de cerâmica mista, após usinagem de cilindro LTF na liga VC9, temperado; a) situação da aresta de corte original; b) superfície de folga; c) lascamentos em degraus. Vista normal à superfície de folga.

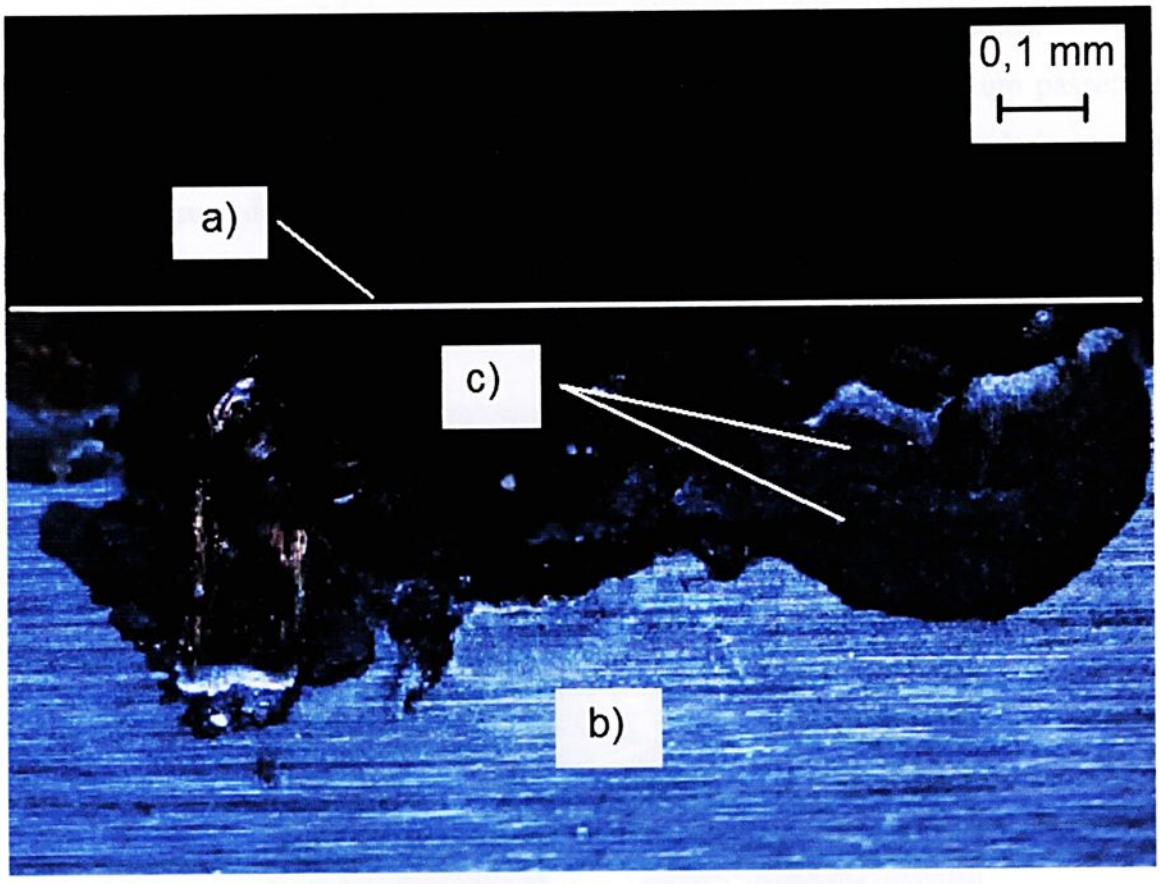


Figura 72- Desgaste de folga por lascamento em inserto SNG de cerâmica mista, na usinagem de liga VC9 temperada.

5.2 DESGASTE DOS INSERTOS DE CERÂMICA NOS CILINDROS FHW (FERRO FUNDIDO)

5.2.1 Insertos RCMA 311900 T

Na seqüência abaixo, podem ser observados insertos de geometria RCMA 321900 T utilizados nos tornos de acabamento de cilindros FHW, após um passe completo na operação de acabamento da face da mesa coquilhada e pescoço de cilindros na liga CI80. Foram selecionados dois exemplos de desgaste mais típicos para um botão, com baixo e

com alto desgaste, classificados por comparação relativa de insertos devolvidos à ferramentaria para afiação. O tempo de usinagem médio foi de 15 minutos.

Na Figura 73 observa- se um padrão de baixo desgaste após um passe: pode ser notada uma cratera inicial, sucedida por lascamentos de arestas arredondadas na região da maior espessura de corte. Os lascamentos propagam- se em degraus, na direção do raio do inserto. A vista normal à superfície de saída permite avaliar: a) chanfro da superfície de saída; b) cratera; c) lascamentos na aresta principal; d) direção do avanço.

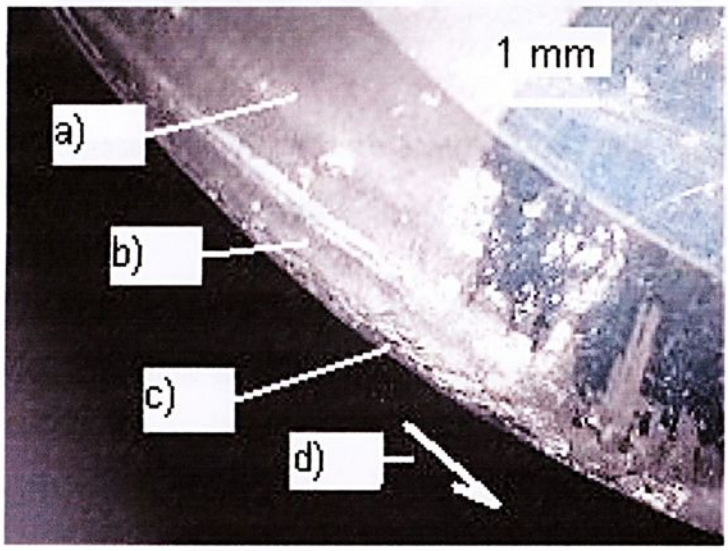


Figura 73-Segmento da aresta principal de inserto RCMA correspondente à maior espessura de usinagem.

Na Figura 74 pode ser observado um padrão de desgaste severo nas superfícies de saída e folga do inserto RCMA de cerâmica mista. Geralmente esse estado de desgaste não permite a continuidade da usinagem, gerando altas temperaturas e sinais helicoidais na superfície do cilindro. O desgaste da folga geralmente têm origem em entalhes e lascamentos. a) chanfro da superfície de saída (similar ao mostrado na Figura 18; b) lascamentos com suas bordas desgastadas pelo atrito com o cavaco; c) início de cratera; d) direção do avanço. Vista da superfície de saída.

unesp

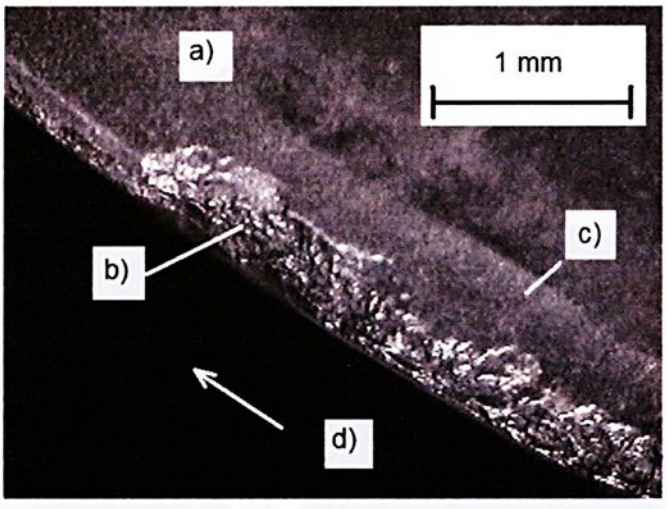


Figura 74-Desgaste severo por lascamentos em degraus, em inserto RCMA em usinagem da liga CI80.

Na Figura 75 desgaste de folga de inserto RCMA em cerâmica mista, com padrão de desgaste severo. a) superfície de folga; b) desgaste da superfície de folga.

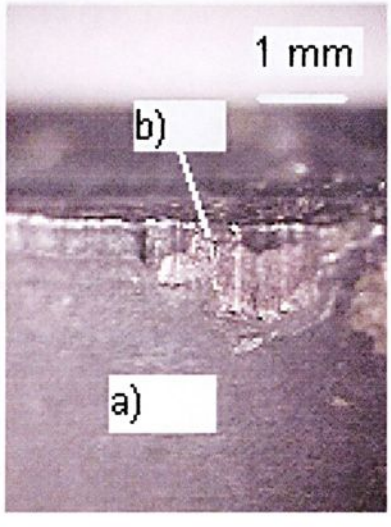


Figura 75-Inserto RCMA. Superfície de folga

Na Figura 76, inserto RCMA em cerâmica mista, após usinagem de borda de mesa de ferro fundido coquilhado CI 80 e pescoço de ferro nodular. a) superfície de saída; b)

desgaste por cratera e arredondamento por atrito; c) lascamentos; d) posição inicial da aresta de corte. Vista normal à superfície de saída.

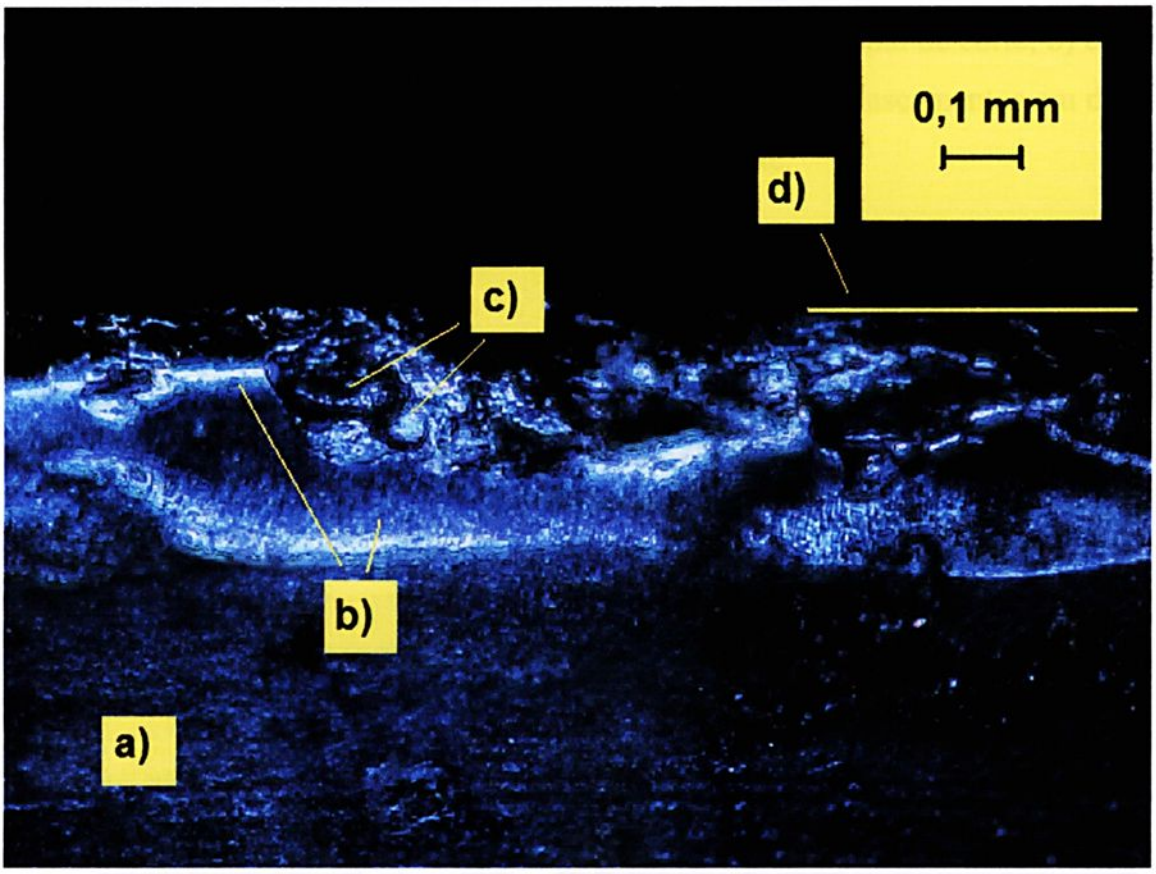


Figura 76- Desgaste severo de superfície de saída em inserto RCMA, na usinagem da liga CI 80.

5.2.2 Seqüência típica de desgaste em ferramenta RCMA de cerâmica mista, em usinagem de ferro fundido CI80.

A Figura 77 contém uma seqüência típica de desgaste para RCMA 321900 em cerâmica mista: a) tênue cratera com lascamentos na aresta principal de corte; b) cratera e lascamentos em degraus; c) desgaste de entalhe; d) desgaste por lascamentos em degraus, geralmente iniciados no entalhe, ao longo da aresta de corte.

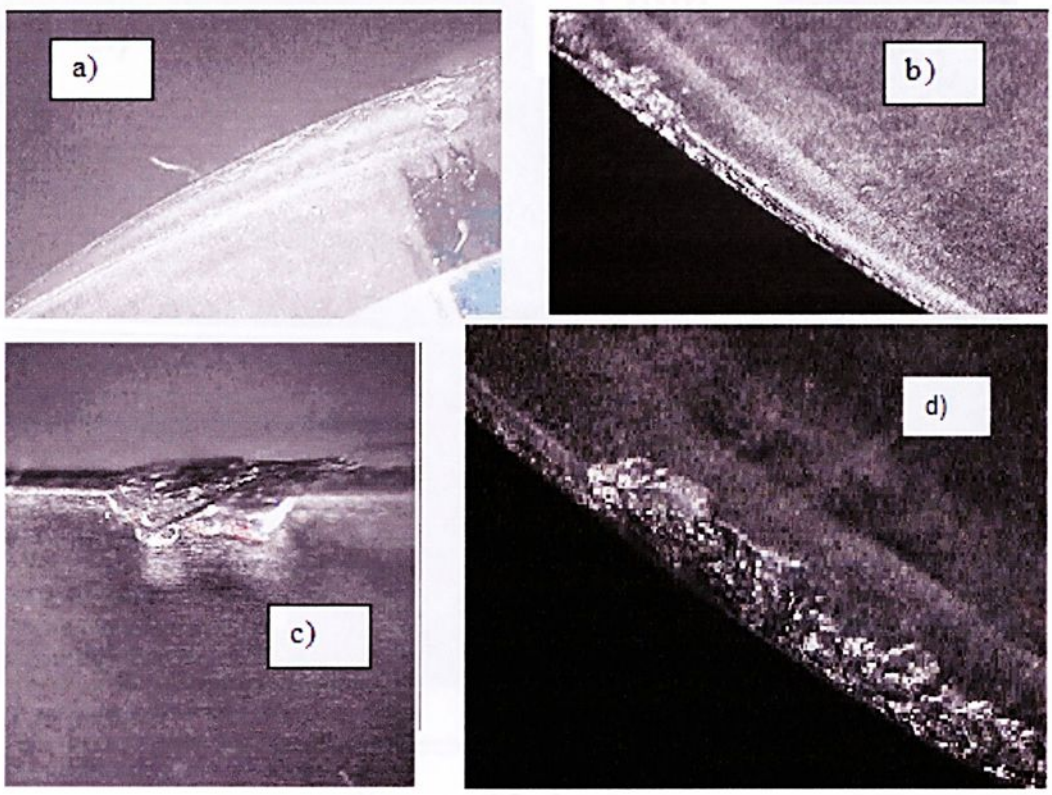


Figura 77- Seqüência típica de desgaste de inserto RCMA na usinagem de ferro fundido

5.2.3 Insertos SNG 12800 T, acabamento de mesa de FHW.

Na Figura 78 pode ser visualizado um inserto SNG 12800 T após passe de 20 min na mesa de um cilindro FHW. Neste caso não houve lascamentos, surgindo apenas um desgaste de cratera na superfície de saída. Vista normal à superfície de saída.

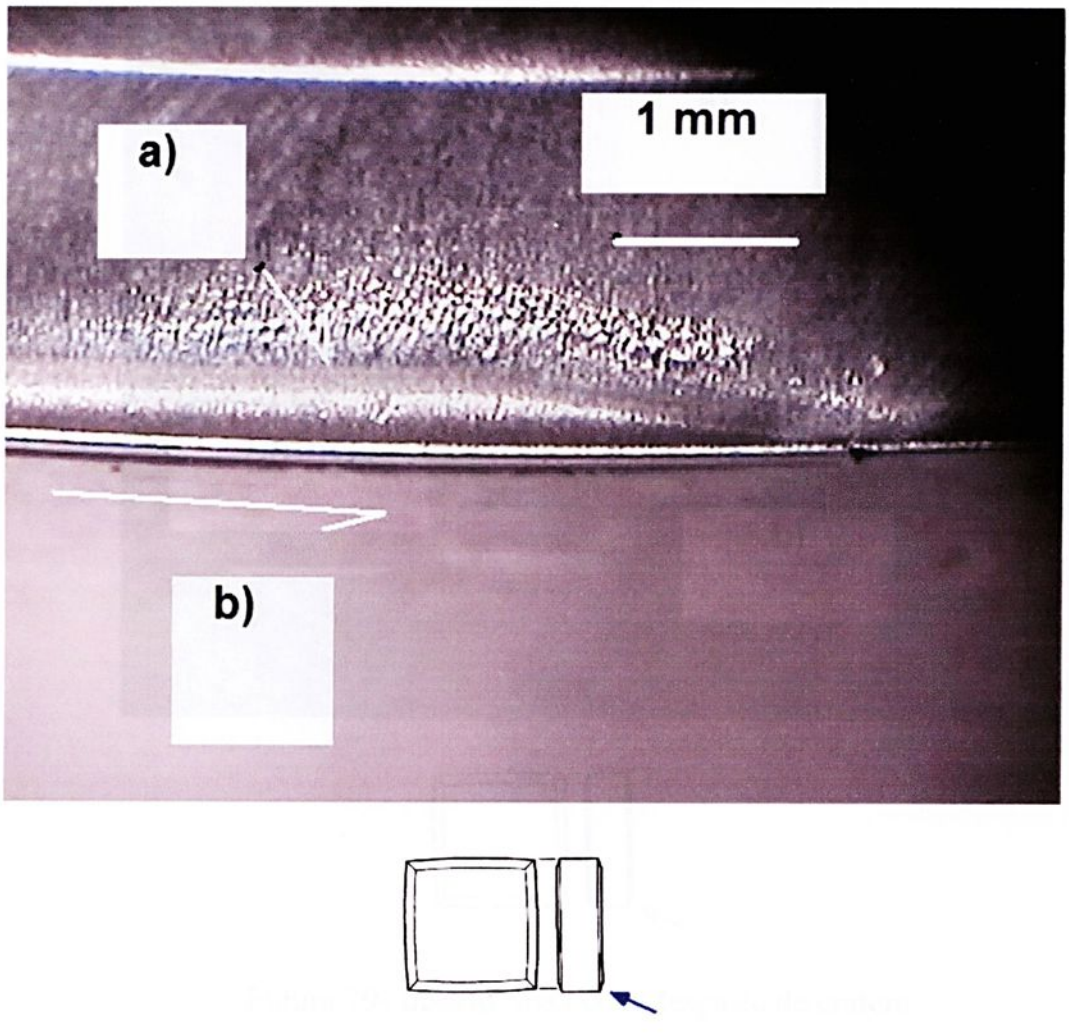


Figura 78- Inserto SNG após usinagem de mesa em liga CI80.

A Figura 79 permite verificar um lascamento originado em desgaste de entalhe no fim de duas crateras (o inserto foi utilizado nas 2 direções, coincidente com a região da maior espessura de usinagem, após usinagem de mesa de cilindro FHW. a) superfície de saída, apresentando cratera e lascamentos; b) superfície de folga com lascamentos.

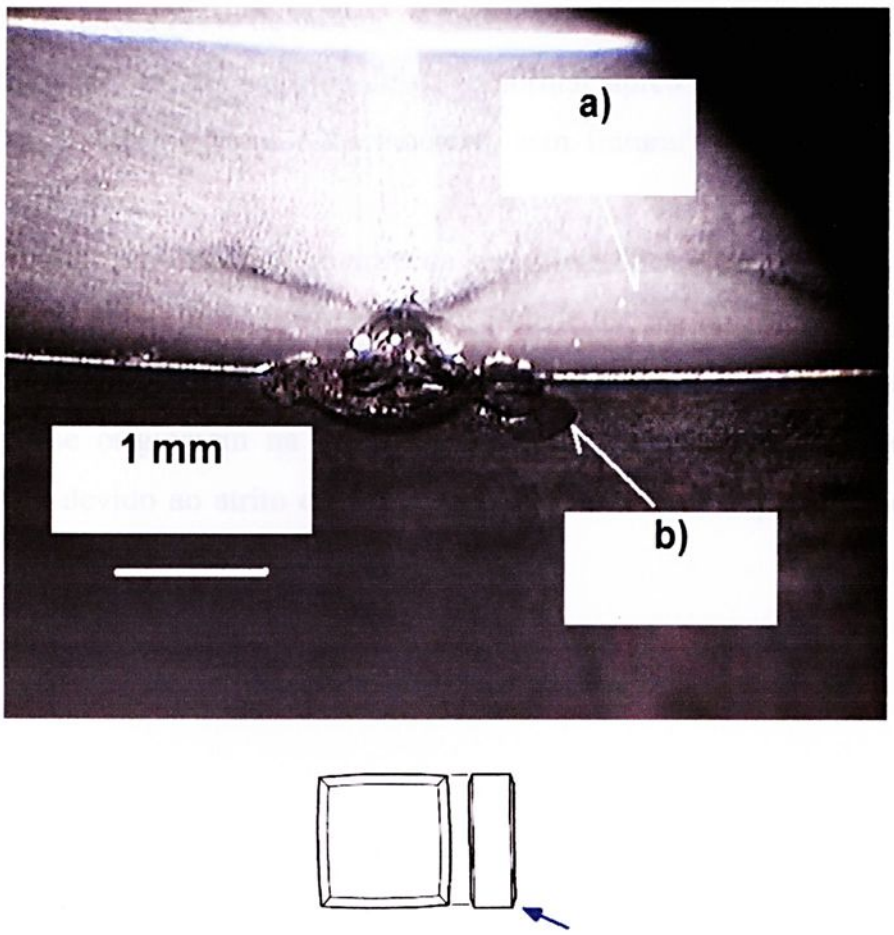


Figura 79- Inserto SNG com desgaste de cratera.
Vista das superfícies de saída e folga.

5.2.4 Desgaste dos insertos de cerâmica LNU em desbaste de pescoços de ferro nodular de cilindros FHW.

Na seqüência abaixo, podem ser observados insertos de geometria LNU 6688 T da classe KY 3000 (SiAlON) utilizados nos tornos de desbaste de cilindros FHW, após um passe completo na operação de desbaste da face da mesa coquilhada e do pescoço em ferro nodular de pescoços FHW de dureza 35 ShC.

Foi selecionado um exemplo de desgaste normal típico (isto é, quando o inserto sofre apenas desgaste por cratera e lascamentos, sem fraturar). O tempo de usinagem médio foi de 15 minutos.

Na Figura 80 visualiza- se o chanfro da superfície de saída, com a cratera que ao alterar a direção do plano do chanfro, passou a refletir em maior grau a iluminação do campo, tornando- se uma faixa mais clara na figura. A cratera foi afetada por lascamentos em degraus que se originaram na aresta de corte; os cantos vivos dos lascamentos sofreram desgaste devido ao atrito com o cavaco. a) Chanfro da superfície de saída; b) Cratera; c) Lascamentos sucessivos .

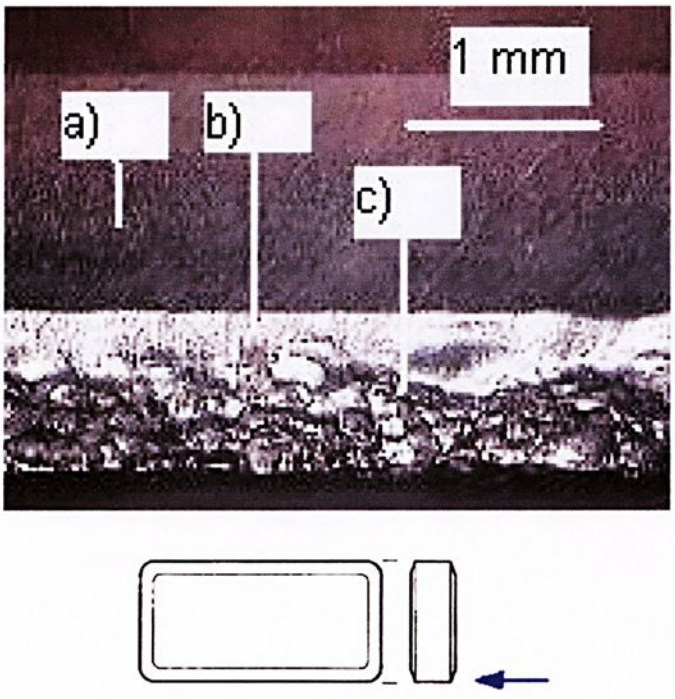


Figura 80- Inserto LNU em SiAlON, após usinagem de ferro nodular.
Vista normal à superfície de saída.

Na Figura 81, visualiza- se um inserto LNU em SiAlON da classe KY3000, com maior amplificação com relação à Figura 80, em vista normal à superfície de saída; sendo perceptíveis marcas normalmente associadas a lascamentos originados no arredondamento da aresta de corte. Depois da experiência acumulada de muitas observações de desgaste em insertos de SiAlON com lupa de observação de ferramentas, parece muito provável que essas marcas (muitas delas semicirculares) tenham sido originadas por lascamentos cujas bordas resultaram desgastadas pelo atrito com o cavaco. Os lascamentos progrediram avançando sucessivamente pela cratera inicial. a) cratera; b) marcas sugestivas de lascamentos em degraus.

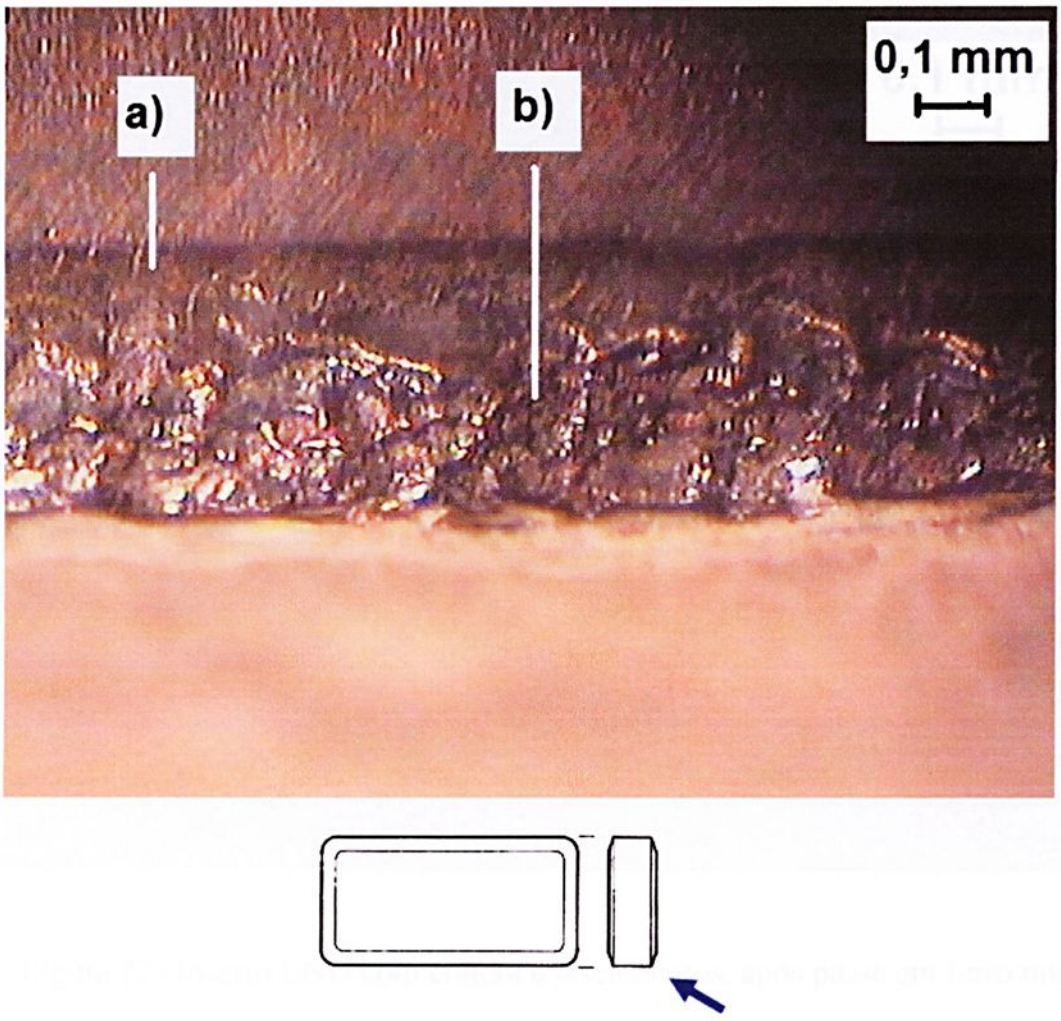


Figura 81- Inserto LNU após usinagem de pescoço em ferro nodular, com cratera e lascamentos.

Na Figura 82 pode ser visto outro exemplar da mesma geometria LNU, com vista normal à superfície de saída. Nota- se uma cratera, um lascamento maior (a esquerda) e outros menores que surgiram na aresta principal de corte. A tendência observada neste tipo de inserto na usinagem de ferro nodular, é a de surgimento de novos lascamentos a partir dos iniciais, até ocuparem a cratera e avançarem pelo chanfro da superfície de saída. a) lascamentos; b) cratera com pequenos lascamentos na aresta principal.

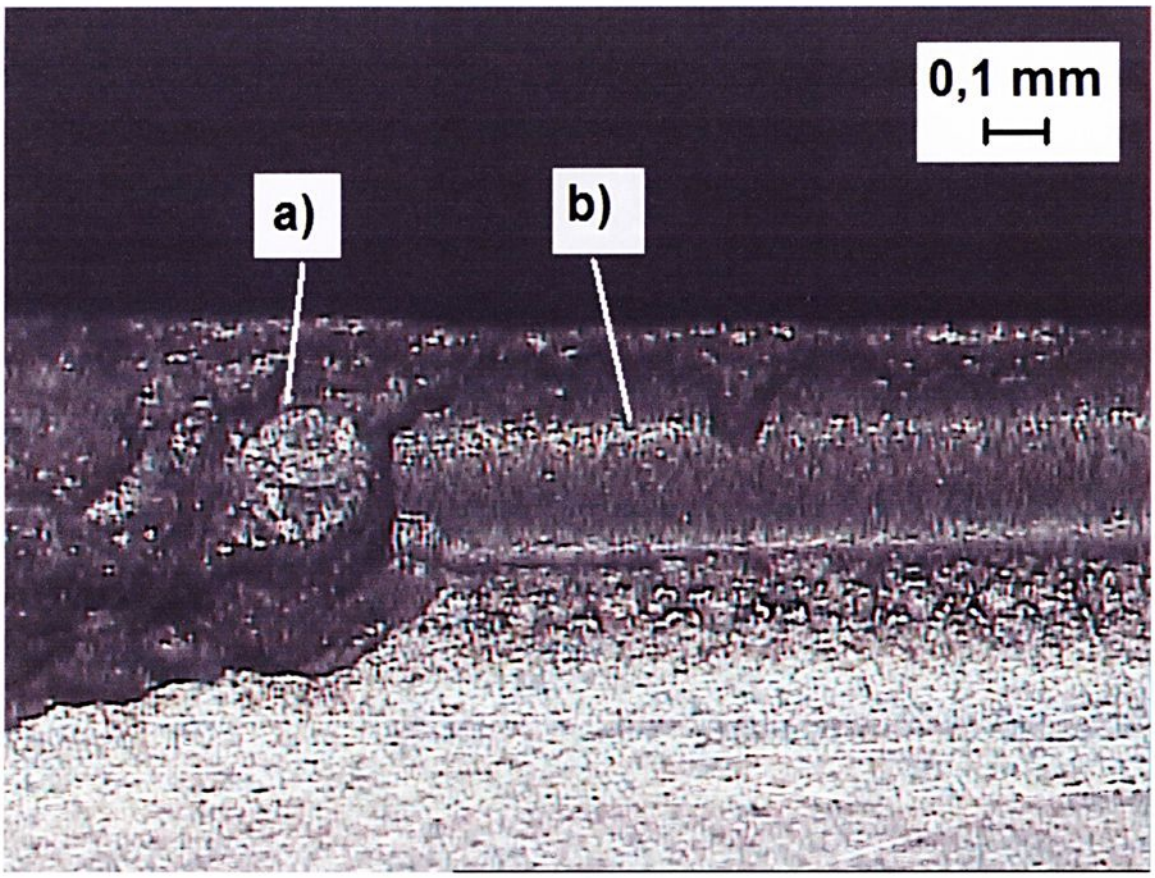


Figura 82- Inserto LNU com cratera e lascamentos, após passe em ferro nodular.

A Figura 83 permite observar a superfície de folga de uma ferramenta geometria LNU em SiAlON, com vista perpendicular à superfície de folga. Os lascamentos determinaram um rebaixamento da aresta de corte, cuja borda está arredondada pelo atrito. a) lascamento; b) desgaste de flanco, sugerindo desbaste abrasivo; c) posição inicial da aresta de corte.

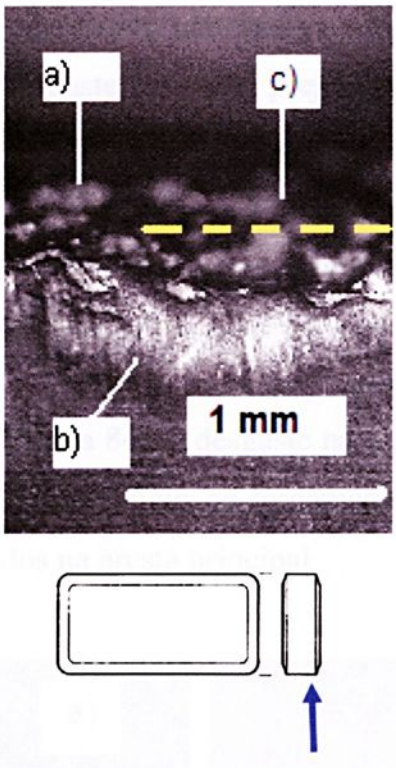


Figura 83- Lascamentos na superfície de saída.
Vista normal à superfície de folga.

5.2.5 Observações sobre o desgaste dos insertos LNU 6688T

Os insertos LNU 6688 T apresentaram durante a operação descrita no desbaste de pescoços FHW (5.2.4) uma cratera iniciada na superfície de saída, com aspecto suave e brilhante, característico do desgaste químico. Esta cratera é visível na Figura 80, na Figura 82, e na Figura 84 a).

Em etapa posterior, o desgaste foi provocado principalmente por lascamentos sucessivos que se extenderam desde a aresta principal até ocupar praticamente toda a cratera. O aspecto suave (com alguns veios pouco salientes) da região desgastada da superfície de folga adjacente à aresta principal, sugere uma combinação de mecanismos de abrasão (riscos verticais na Figura 83) e de desgaste químico (superfícies lisas e brilhantes como na Figura 80); estas percepções são apoiadas por numerosas observações realizadas com lupa de observação de ferramentas.

Os insertos de SiAlON e de Si_3N_4 não são empregados no acabamento dos cilindros devido ao seu elevado desgaste, que não prejudica no entanto a operação de desbaste devido às maiores tolerâncias dimensionais envolvidas.

5.2.6 Seqüência típica de desgaste em inserto LNU, no desbaste de pescoços de ferro nodular.

Podem ser visualizados na Figura 84: a) desgaste na superfície de saída; b) cratera no chanfro da superfície de saída, com início de lascamento; c) desgaste de folga; d) lascamentos sucessivos arredondados na aresta principal

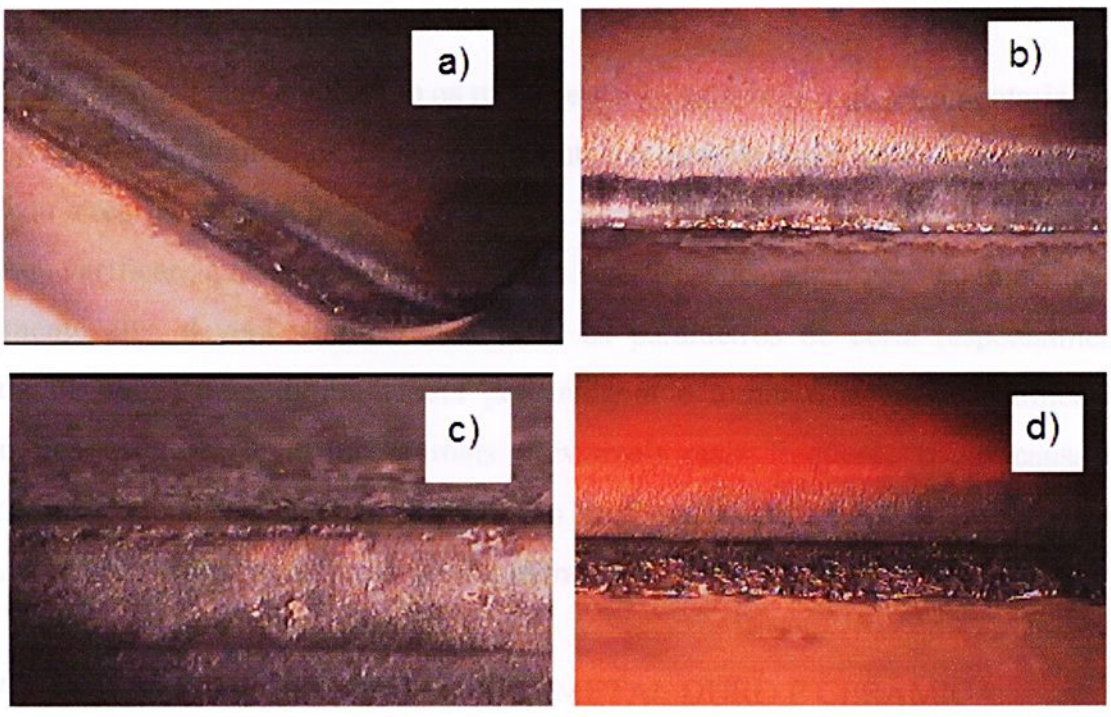


Figura 84- Seqüência típica de desgaste de insertos LNU

5.2.7 Observação do desgaste de insertos RCMA, SNG e LNU fraturados.

A análise estatística realizada sobre uma amostra de insertos sucateados por fratura ou lascamento excessivo inserida no Apêndice, permite deduzir que a maior parte das fraturas de insertos (aproximadamente 30%) acontece durante a primeira utilização (isto é, quando o inserto ainda não foi virado para aproveitar outras arestas de corte).

Os desgastes médios de folga e saída são para esta aplicação de cilindros de laminação, maiores dos que aqueles habitualmente mencionados na literatura. Um dos aspectos a considerar é que as tolerâncias envolvidas são relativamente grandes devido à dimensão das peças usinadas, o que permite trabalhar por periodos mais longos com os insertos no torneamento dos cilindros, do que seria possível no torneamento de peças menores.

Pode ser verificado analisando os mesmos dados estatísticos de ferramentaria, que a maior parte dos sucatamentos de insertos aconteceu por lascamentos de dimensão tal a inviabilizar a reafiação (61%).

Ao verificar que a percentagem de insertos sucatados por lascamentos é relativamente alta, deverá se procurar ajustar os parâmetros de corte (especialmente espessura de corte) para diminuir esta percentagem e tornar o desgaste químico ou abrasivo dos insertos (de natureza mais previsível) mais freqüente como causa de sucatamento. Poderá ser sugerida à produção também, a utilização de insertos mais tenazes, como as cerâmicas reforçadas com monocristais, e os cermets.

5.3 PARÂMETROS DE PROCESSO PARA METAL DURO E CERÂMICA.

São apresentados na Tabela 12, os parâmetros de torneamento especificados pelo processo para cada tipo de cilindro, e também um valor médio observado na prática para as ligas mais representativas.

A coluna 1, "Operação", relaciona as operações mais representativas de torneamento longitudinal para desbaste e acabamento, em cilindros de laminação dos

tipos abordados nesta dissertação. São mencionadas em cada operação as figuras do texto que permitem visualiza- las, com um desenho esquemático do cilindro em usinagem e da ferramenta utilizada.

As colunas 2 e 3, "Parâmetros observados na prática" e "Parâmetros definidos no Processo", indicam a fonte de onde os parâmetros de corte foram obtidos: se de observações práticas instantâneas nos tornos, ou do Relatório de Parâmetros de Usinagem gerado pela Engenharia de Processos (documento interno da Aços Villares) (AÇOS VILLARES, 2001).

As colunas 4 e 5, "Material da Ferramenta", indicam se a ferramenta foi confeccionada com metal duro ou com cerâmica.

A coluna 6, "Classe da ferramenta", indica a classe da ferramenta. No caso do metal duro foi utilizada a nomenclatura da Norma ISO; e no caso das ferramentas de cerâmica foi utilizada a nomenclatura do fabricante Kennametal (KENNAMETAL TOOLS, 1991).

A coluna 7, "Geometria do Inserto", indica as dimensões geométricas dos insertos abrangidos por esta dissertação, já detalhados na Figura 15, Figura 16 e Figura 17.

A coluna 8, "Profundidade de usinagem mm", indica a profundidade de usinagem, medida no raio da peça em usinagem.

A couna 9, "Avanço mm/volta", indica o avanço efetivo, na direção do eixo "z" do torno.

A coluna 10, "Velocidade de corte m/ min, indica a velocidade de corte obtida como produto da velocidade de rotação da placa do torno, o diâmetro da peça, e o fator de proporcionalidade correspondente.

A coluna 11, "Taxa de remoção de cavaco em kg/h", contém os pesos de cavaco removidos na unidade de tempo na correspondente operação, obtidos através do produto do avanço, da profundidade de usinagem, da velocidade de corte, e do fator de proporcionalidade correspondente.

A coluna 12, "Tipo de liga em usinagem", permite verificar as ligas de cilindros em que cada operação foi realizada, utilizando a nomenclatura da Aços Villares e que foi explicada no item 4.3, Tipos de Materiais em usinagem.

A coluna 13, "Relação de taxas de remoção cerâmica/metal duro", contém o quociente entre as taxas de remoção observadas na prática, utilizando metal duro e cerâmica na mesma operação. Estes valores representam a o aumento de produtividade obtido em cada operação, ao substituir a ferramenta de metal duro por uma ferramenta de cerâmica.

unesp

Tabela 12-Parâmetros de usinagem comparativos em operações típicas de torneamento longitudinal em cilindros

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
OPERAÇÃO	Parâmetros observados na prática	Parâmetros definidos no Processo	Material da Ferramenta		Classe da ferramenta	Geometria do inserto	Profundidade de usinagem mm	Avanço mm/volta	Velocidade de corte m/min	Taxa de remoção horária de cavaco kg/h	Tipo de liga em usinagem	Relação de taxas de remoção cerâmica/metal duro
			metal duro	cerâmica			a_p	f	Vc	Tc		
Acabamento mesa FHW Figura 34		x		x	K090	SNG 12800 T	3	2 a 3	50 a 80		FHW CI 80	
	x			x	K090	SNG 12800 T	3	3	60	254,3		1,7
	x		x		K01	SNGN 56	3	7	15	148,4		
Desbaste raio e pescoços FHW Figuras 35 e 36		x		x	K090	LNU 6688 T	20	0,8 a 1	60 a 150		Ferro nodular para pescoço FHW	
	x		x		K01	SNGN 56	20	1,8	40	678,2		
	x			x	KY3000	LNU 6688 T	20	1	140	1318,8		1,9

Tabela 12-Parâmetros de usinagem comparativos em operações típicas de torneamento longitudinal em cilindros (continuação)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Acabamento de pescoços FHW Figura 37	x		x		K01	RCMA 311900	1	1	60	28,3	Família de ferros nodulares para pescoço FHW	
	x			x	K090	RCMA 311900	1	0,6	170	48,0		1,7
		x		x	K090	RCMA 311900	1	0,3 a 0,6	80 a 200			
Desbaste de mesa LTF antes da têmpera Figura 44		x	x		P05	SNGN 56	40	1,5	40	1130,4	VC9	
Desbaste de pescoços LTF antes da têmpera Figura 45		x	x		P05	SNGN 56	40	1,5	40	1130,4	VC9	
Acabamento de pescoços LTF antes da têmpera Figura 46	x		x		P05	RCMA 311900	1,5	1,5	85	90,1	VC9	
	x			x	K090	RCMA 311900	1,5	1	175	123,6		1,4

Tabela 12-Parâmetros de usinagem comparativos em operações típicas de torneamento longitudinal em cilindros (continuação)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Acabamento da mesa LTF antes da têmpera Figura 47	x		x		P05	RCMA 311900	2	1,2	85	96,1	VC9	
	x			x	K090	SNG 12800 T	2	1,5	120	169,6		1,8
Acabamento de pescoços LTF após têmpera Figura 48		x		x	K090	RCMA 311900	1,5	1,5	90	95,4	VC9	
	x		x		P05	RCMA 311900	1,5	1,5	70	74,18		
	x			x	K090	RCMA 311900	1,5	1,2	105	97,50		1,3
Acabamento da mesa LTF após têmpera Figura 49		x		x	K090	RCMA 311900	1	3	90 a 120		VC9	
	x		x		P05	RCMA 311900	1	1,8	35	29,7		
	x			x	K090	SNG 12800 T	1	3	100	141,3		4,8
Desbaste de mesa BUR antes da têmpera Figura 50		x	x		P20	SNGN 56	32	1,2	45	813,9	VC4A	

Tabela 12-Parâmetros de usinagem comparativos em operações típicas de torneamento longitudinal em cilindros (continuação)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Acabamento de mesa BUR antes da têmpera Figura 51		x			K090	SNG 12800 T	3	1,5	85	180,2		
	x		x		P20	RCMA 311900	1,5	1,2	65	55,1		
	x			x	K090	SNG 12800 T	3	1,5	85	180,2	VC4A	3,3
Desbaste de mesa BUR depois da têmpera Figura 52		x	x		P05	SNGN 56	7	5	35 a 50			
	x	x			P05	SNGN 56	7	5	35	577,0	VC4A	
Acabamento de face mesa e pescoço BUR depois da têmpera Figura 54		x		x	K090	RCMA 311900	1,2	1,5	80 a 100			
	x		x		P05	RCMA 311900	1,2	1,5	40	33,9		
	x			x	K090	RCMA 311900	1,2	1,5	85	72,1	VC4A	2,1

Tabela 12-Parâmetros de usinagem comparativos em operações típicas de torneamento longitudinal em cilindros (continuação)

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Acabamento de mesa BUR depois da têmpera Figura 53		x			K090	SNG 12800 T	1,2	3,5	60 a 80			
	x		x		P05	RCMA 311900	1,2	1,5	40	33,9		
	x			x	K090	SNG 12800 T	1,2	3	85	144,1	VC4A	4,3
Desbaste de mesa WR Figura 39		x		x	KY3000	LNU 6688 T	10	0,6	70	197,8	Noduilte	
	x		x		K01	SNGN 56	10	2	30	282,6		
	x			x	KY3000	SNG 12800 T	10	1	100	471,0		1,7
Desbaste de pescoços WR Figura 40		x		x	KY3000	LNU 6688 T	30	0,7 a 1	120 a 150		Ferro nodular pescoço	
	x		x		K05	SNGN 56	30	1,8	60	1526,0		
	x				KY3000	LNU 6688 T	30	1	140	1978,2		1,3
Acabamento de mesa WR Figura 41		x		x	K090	SNG 12800 T	1 a 3	3 a 5	8 a 200		Nodulite	
	x		x		K01	RCMA 311900	1	1,6	45	33,9		
	x			x	K090	SNG 12800 T	1	3	120	169,6		5,0

5.4 MORFOLOGIA DOS CAVACOS

Foram recolhidos cavacos no momento das operações de desbaste e acabamento nos tornos de produção, tendo como critério de escolha as famílias de ligas mais frequentes e dentre estas as de maior nível de dureza. A formação de cavacos é bastante similar nas ligas de uma mesma família, mas na medida que a dureza do material sobe, o desgaste do inserto é mais rápido; por isso o processo de torneamento (nas máquinas a CNC) é executado a menores velocidades de corte e avanço quanto mais duro for o material daquela família de ligas, visando permitir completar cada um dos passes sem virar o inserto. O operador da máquina mantém o controle do "override" ou alteração da velocidade de corte ou avanço programados no CNC, para amenizar condições não ideais de superfície como sinterizações de areia ou fluxo de fundição, pontos mais duros, incrustações de tinta de fundição, sobremetais maiores do que o devido deixados nas operações anteriores de desbaste, marcas de avanço mais profundas do que o convencional, etc.

Foram retirados cavacos durante a usinagem dos seguintes materiais:

- Fundidos convencionais: Nodulite 60 Sh C
- Fundidos centrifugados: FHW 80 Sh C, FHW 18% Cr, FHW Aço Rápido 1,8% C
- Fojados (BUR): 3%Cr
- Forjados (LTF): 3% Cr

Na Figura 85 podemos verificar os cavacos curtos e quebradiços. retirados da mesa de um cilindro de ferro Nodulite durante o passe de acabamento com ferramenta tipo RCMA.

Figura 85-Cavacos de mesa de cilindro Nodulite fundido estaticamente.
Retirados com inserto RCMA

Na Figura 86, cavacos curtos e quebradiços retirados durante passe de acabamento por meio de um inserto estilo SNG.

Figura 86-Cavacos de mesa de cilindro FHW.
Usinagem com inserto estilo SNG

Na Figura 87, cavacos curtos e quebradiços retirados durante o desbaste de pescoço de ferro nodular, de cilindro FHW por meio de inserto estilo LNU (vide também Tabela 12). Este é um caso em que a usinagem com insertos de classe SiAlON ou nitreto de silício mostra maior vantagem sobre metal duro.

Ferro Nodular pesc. FHW, Rv. ins. LNU
6688T

Figura 87-Cavacos de desbaste de pescoço, cilindro FHW
Retirados com inserto estilo LNU.

A Figura 88 registra cavacos curtos e quebradiços retirados durante o acabamento de pescoço de ferro nodular de cilindro FHW, com inserto estilo RCMA.

Ferro Nodular pesc. FHW, Rv. ins. RCMA
321900T

Figura 88-Cavacos de pescoço de ferro nodular, de cilindro FHW

Os cavacos dos cilindros de Alto Cromo também são curtos e quebradiços, (Figura 89). Durante o desbaste da mesa deste tipo de liga não são utilizados insertos de SiAlON, devido à alta taxa de desgaste que apresentam. Provavelmente o alto teor de cromo na composição da liga seja o responsável por esse comportamento.

Ferro 18% Cr, mesa Nz+ Rv, ins. SNG
12800T

Figura 89-Cavacos de mesa de cilindro FHW em Alto Cromo (18% Cr).
Retirados com inserto estilo SNG

A Figura 90 contém fotografia de cavacos obtidos durante a usinagem de mesa de um cilindro em Aço Rápido.

Aço Rápido 1,8% C, mesa Nz+ Rv, ins. SNG
12800T

Figura 90-Cavacos de mesa de cilindro FHW em Aço Rápido (1,8% C).
Retirados com inserto estilo SNG

A Figura 91 contém fotografia de cavacos obtidos durante a usinagem de mesa de um cilindro de encosto, da liga VC4A. Os cavacos são mais longos que aqueles das ligas de ferros fundidos. Durante as operações de acabamento o desempenho das cerâmicas é superior ao do metal duro, porém numa proporção menor que nas aplicações em ferro fundido.

Figura 91-Cavacos de mesa de cilindro BUR em liga VC4A.
Retirados com inserto estilo SNG

A Figura 92 contém fotografia dos cavacos obtidos durante a usinagem de acabamento de mesa temperada de cilindro LTF (liga VC9), utilizando inserto estilo SNG. Esta usinagem é a mais difícil para qualquer classe de ferramenta devido às elevadas dureza e tenacidade desta liga. Verifica- se que os cavacos são mais longos que aqueles obtidos dos cilindos de ferro, devido à maior tenacidade do material.

Figura 92-Cavacos de mesa de cilindro LTF em liga VC9.
Retirados com inserto estilo SNG

5.5 CONSIDERAÇÕES SOBRE A MORFOLOGIA DOS CAVACOS

Pode ser verificado que os cavacos oriundos dos ferros fundidos (seja Nodulares quanto FHW) são curtos e quebradiços, configurando portanto uma condição de usinagem favorável ao uso de cerâmicas (o menor contato do cavaco com a aresta de corte e superfícies de folga e saída ameniza os efeitos negativos da reatividade apresentada pelas cerâmicas às temperaturas em que se processa a usinagem).

Os cavacos oriundos dos cilindros de aço tendem a ser mais contínuos, mas mantém a característica de serem quebradiços e enrugados, diminuindo o tempo de contato permitindo assim manter as elevadas velocidades de corte.

O caso das ligas de cilindros BUR e LTF antes da têmpera, que apresentam cavacos contínuos, são as de menor usinabilidade com as ferramentas cerâmicas a base de óxido de alumínio, permitindo velocidades de corte não tão superiores às permitidas pelas ferramentas de Metal Duro. Esta constatação prática reforça o conceito exprimido na literatura, no sentido que cavacos longos e contínuos oferecem maiores dificuldades para a usinagem de materiais ferrosos com ferramentas de cerâmica.

5.6 CONSIDERAÇÕES SOBRE CONSUMO E CUSTO DE INSERTOS

O número de insertos de cerâmica consumidos por ano (dados de 2005) na fábrica de cilindros representou 8,4% do total de insertos consumidos. Este dado foi calculado dividindo a somatória simples do número de insertos de cerâmica requisitados pela produção dividindo- a pela somatória dos insertos de cerâmica e metal duro requisitados no periodo. Apesar desta metodologia de cálculo ser imprecisa já que não leva em conta o tamanho dos insertos e outras particularidades, permite realizar a título ilustrativo a comparação desta percentual com a de 5% utilizada como indicativo para avaliar o tamanho do mercado de insertos reversíveis de cerâmica sobre o total de vendas de ferramentas. No caso da aplicação estudada em cilindros de laminação, o consumo de

unesp

8,4% de insertos de cerâmica sobre o número total de insertos confirma que o torneamento duro é realmente o campo em que as cerâmicas demonstram o seu potencial.

A verificação das planilhas de custos de insertos em 2005 permitiu verificar que o custo total dos insertos de cerâmica representou 28% do custo total de insertos reversíveis. Os insertos de cerâmica (que são utilizados apenas no torneamento) apresentam dentro da gama de insertos utilizados na fábrica em estudo, volume médio por unidade, maior que o volume médio dos insertos de metal duro. Estes últimos além de serem consumidos nos tornos de desbaste e acabamento, são utilizados nas operações de torneamento de face e centro, mandrilhadeira a fresadora. Unitariamente, os insertos de cerâmica apresentam um preço maior com relação aos insertos equivalentes de metal duro, de até 30%.

Na Tabela 13 estão registradas as horas de usinagem necessárias por mês e por processo principal, visto o *mix* de cilindros verificado em 2005 na fábrica, levando em conta os tempos médios de usinagem. Conclui- se da análise da tabela que 71% das horas de torneamento de acabamento, e 16,4% das horas de torneamento de desbaste, empregaram cerâmicas. Considerando todas as operações de usinagem, 19% das horas de usinagem foram realizadas empregando cerâmica (nas operações de Face e Centro, Fresadora e Mandrilhadora não é utilizada a cerâmica).

Tabela 13-Quadro de horas de usinagem com cerâmica sobre total de horas de usinagem mensais

Participação nos tempos totais de usinagem	Torno Desbaste h/cil.	h Cerâmica	Torno Acabamento. h/cil.	h Cerâmica	Torno Face e Centro	Fresadora	Mandrilhadeira	Retífica	Horas Totais
Horas / mês	4034	661	3285	2333	2900	3540	2010	3480	15709
Ferramenta	MD+Cer	Cer	MD+Cer	Cer	MD	MD	MD		
% h Cer/ (MD+Cer) Torno		16,4		71,0					
% Cer/ (MD+Cer) Torno				40,9					
%Cer/ horas Totais de Usinagem									19,05

Os tempos de usinagem totais cilindro a cilindro não podem ser publicados por motivos de confidencialidade. A fábrica conta no presente, com 25 tornos para pocessar a produção de cilindros (todas as máquinas trabalham a plena ocupação). Calculando os tempos de usinagem que seriam obtidos utilizando apenas os processos de torneamento com metal duro (ou seja, renunciando aos aumentos de taxa de remoção horária conseguidos com cerâmica registrados na Tabela 12), chega- se à conclusão que seriam necessários 35 tornos para cilindros para se obter a produção atual da fábrica (agosto de 2006). Portanto, o uso de cerâmicas diminui a necessidade de máquinas em 10 unidades. Considerando que o investimento médio de uma máquina desse tipo instalada, mais a área industrial necessária para abriga- la e opera- la, conclui- se que o uso de ferramentas

cerâmicas diminui o investimento industrial na ordem de US$ 26.000.000 para o nível de produção hoje realizado.

6 CONCLUSÃO

Os insertos de cerâmica podem ser utilizados com sucesso em ligas ferrosas de difícil usinabilidade (como p. ex. ferros fundidos coquilhados e aços temperados, operação chamada de torneamento duro ou *"hard turning"* para significar torneamento de materiais endurecidos), contanto que as máquinas ferramenta apresentem excelente estabilidade.

A tendência das ferramentas de cerâmica a fraturar súbita é o fator que têm limitado o uso industrial mais extenso, de modo que os insertos de cerâmica devem ser observados em termos de desgaste máximo de folga e saída, e de eventuais lascamentos.

Após correta seleção dos parâmetros mencionados, é de se esperar uma taxa de remoção de cavaco entre 1,3 e 5 vezes superior à obtida com metal duro, com vidas da aresta superiores proporcionando assim operação mais produtiva e econômica ao diminuir a freqüência de troca de ferramentas.

Muitas assertivas da literatura podem ser comprovadas na prática industrial adotada, como por exemplo: as ferramentas à base de Si_3N_4 adaptam- se bem ao desbaste de ferros fundidos nodulares (com e sem coquilhamento) podendo ser utilizado avanço mais agressivo sem receio de fraturas freqüentes

O mecanismo principal de desgaste observado foi o mecânico (lascamentos sucessivos e progressivos), e que se inicia após um desgaste químico inicial (cratera e desgaste de entalhe, observados no início do uso dos insertos).

Há também uma série de conclusões que apoiam observações práticas realizadas pelo pessoal da Engenharia de Processos e pelos operadores, por exemplo:

Os aços de cavacos longos são extremamente agressivos com as cerâmicas à base de Si_3N_4, SiAlON ou alumina (as taxas de desgaste das duas primeiras são as maiores), não fazendo interessante o uso das cerâmicas devido ao seu intenso desgaste e fratura. No jargão do chão de fábrica, a cerâmica (qualquer classe) "frita", ou seja, desgasta rapidamente.

unesp

A maior tenacidade das ferramentas à base de Si_3N_4 permite utiliza- las em operações de desbaste em superfícies brutas de fundição, dentro de certos limites de homogeneidade da mesma.

As cerâmicas são sensíveis às mudanças bruscas de solicitação mecânica: por exemplo, a passagem do torneamento de um diâmetro (torneamento paralelo) para o torneamento de um raio de um cilindro deve ser feita diminuindo a velocidade de corte na ordem da metade, do contrário o inserto irá fraturar (esta diminuição na transição diâmetro/ raio seria desnecessária no torneamento com Metal Duro)

Em função da experiência observada, chega-se à regra prática utilizada pela Engenharia de Processos ao programar torneamento com cerâmicas: utilizar pelo menos uma velocidade de corte 3 vezes maior do que com Metal Duro, e ½ do avanço; esta combinação de parâmetros explica a maior produtividade obtida com as ferramentas de cerâmica. Uma percepção de chão de fábrica que se tornou um ditado é que "para a cerâmica, quanto mais duro o material, melhor". Enquanto o Metal Duro têm extrema dificuldade em lidar com as ligas de maior dureza e maior teor de ligas, os insertos de cerâmica permitem realizar passes sem interrupção nas mesas temperadas ou endurecidas, resultado que é ideal para o tipo de usinagem analisado, no qual as paradas para troca de ferramentas são penosas e demoradas.

unesp

7 BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

AÇOS VILLARES, **Práticas de usinagem da Aços Villares SA**, Pindamonhangaba, 2001.

AÇOS VILLARES, **Aços Especiais para Construção Mecânica**, São Paulo, 2002.

BALDONI, J. G.; BULJIAN, S. T. **Silicon nitride cutting tools**, Ceramic cutting tools- Materials, development and performance, Noyes Publications, University of Florida, EUA, 1994.

CALLISTER Jr., W. **Ciência e Engenharia dos Materiais, Uma Introdução,** L.T.C Editora, Rio de Janeiro, 2002.

CHOLL, J.; SMITH, K. H. **Alumina- Silicon Carbide Whisker Composite Tools**, Ceramic cutting tools- Materials, development and performance, Noyes Publications, EUA, 1994.

CHRISTOPHER, J. D. **Selection of cutting tool materials,** Ceramic cutting tools- Materials, development and performance, Noyes Publications, 1994.

DAWSON, T. G.; KURFESS, T.R. **Machining Hardened Steel with Ceramic coated and uncoated CBN Cutting Tools,** The George W. Woodruff School of Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, EUA, 2002..

D'ERRICO, G. E.; CALZAVARINI, R. **Advanced ceramic tools: an experimental assessment in turning tests**, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science, Amsterdam, 1994.

DE SOUZA, J. V. C. **Desenvolvimento de pastilhas cerâmicas a base de Si_3N_4 para aplicações tribológicas**, Tese de Doutoramento, Guaratinguetá, 2005.

DINIZ, E.A.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos materiais**, Editora Artliber, São Paulo, 2003. EVANS, A. G. **Fracture in Ceramic Materials, Toughening Mechanisms, Machining Damage, Shock**, Aspect of the reliability of Noyes Publications, University of Florida, EUA, 1983.

FERRARESI, D. **Fundamentos da usinagem dos metais**, Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, 1977.

GERMAN R. M. **Fundamentals of Sintering**, Engineering Science and Mechanical Department, Pennsilvania State University, EUA, 1990.

GRUSS, W. W.; FRIEDERICH, K. M. **Aluminum Oxide/ Titanium CarbideComposite Cutting Tools**, Ceramic cutting tools- Materials, development and performance, Noyes Publications, University of Florida, EUA, 1994.

ISO **International Standard 1832:2004**, Indexable Inserts for Cutting Tools- Designation, Geneva, Suíça, 2004.

JIANXIN, D.; XING, A. **Wear resistance of Al_2O_3/TiB_2 ceramic cutting tools in sliding wear tests and in machining processes**, Journal of Materials Processing Technology, Elsevier Science, Amsterdam, Holanda, 1996.

KENNAMETAL TOOLS **Tooling Systems and Services for the global metalworking industry**, EUA, 1991.

KING, A. G. **Behaviour of ceramic cutting tool materials**, Materials for Metal Cutting, The Iron and Steel Institute, EUA 1970.

KING, A. G. **Ceramic Cutting Tools- Reflections on the Continual Process of Improvement**, Ceramic cutting tools- Materials, development and performance, Noyes Publications, University of Florida, EUA, 1994.

KINGERY, W. D. **Introduction to Ceramics,** 2nd edition, John Wiley & Sons, EUA, 1976.

KRISHNAMURTI, R.; GOKULARATHNAM, C.V. **Phase transformation toughened materials for cutting applications**, in Ceramic cutting tools- Materials, development and performance, Noyes Publications, University of Florida, EUA, 1994.

KUHN, L.G. **Rolls for the Metalworking Industries**, The Iron and Steel Society, EUA, 1990.

MARCONDES, F. C. **A história do Metal Duro**, Sandvik Coromant, São Paulo, 1990.

unesp

MC COLM, I. J. **Ceramic Hardness**, Plenum Press, Bradford, Reino Unido, 1992.

MEHROTRA, P. K. **Applications of ceramic cutting tools**, Key Engineering Materials Vols. 138- 140, Trans Tech Publications, Suíça, 1998.

MENCIK, J. **Strenght and Fracture of Glass and Ceramics**, Elsevier, Amsterdam, 1992.

NTK CUTTING TOOLS **Ceramic, Cermet & Silicon Nitride Inserts**, EUA, 2000.

PHILIPS, C. J. **Fracture of Glass, in Fracture, an advanced treatise.** The George Washington University, EUA, 1972.

SANDVIK COROMANT **Materiais avançados de corte**, São Paulo, 2001.

SHAW, M. C. **Tool life**, Ceramic cutting tools- Materials, development and performance, Noyes Publications, University of Florida, EUA, 1994..

SHEN, C. H. **Performance and applications of CVD thin film diamond coated tools**, Key Engineering Materials Vols. 138- 140 Trans Tech Publications, Switzerland, 1998.

SOROKA, D. P. **Hard Turning and the Machine Tools,** Hardinge Inc., EUA, 2002..

TRENT E.M.; WRIGHT, P. K. **Metal cutting**, Butterworth Heinemenn, EUA, 2000.

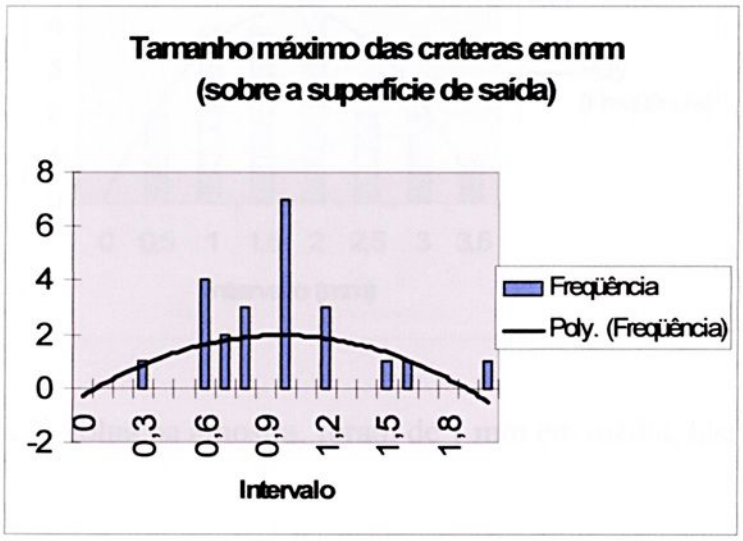
VAN DER BIEST, O.; VLEUGELS, J. **Perspectives on the Development of Ceramic Composites for Cutting Tool Applications**, Key Engineering Materials Vols. 206-213, Trans Tech Publications, Switzerland, 2002.

VLEUGELS, J.; VAN DER BIEST, O. **Chemical interaction between Sialon ceramics and iron- based alloys,** Key Engineering Materials Vols. 138- 140, Trans Tech Publications, Switzerland, 1998.

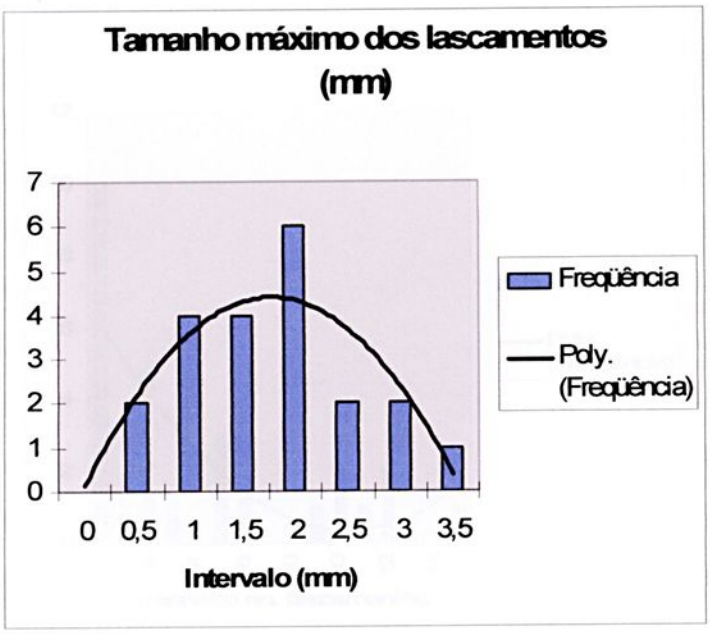
unesp

8 APÊNDICE

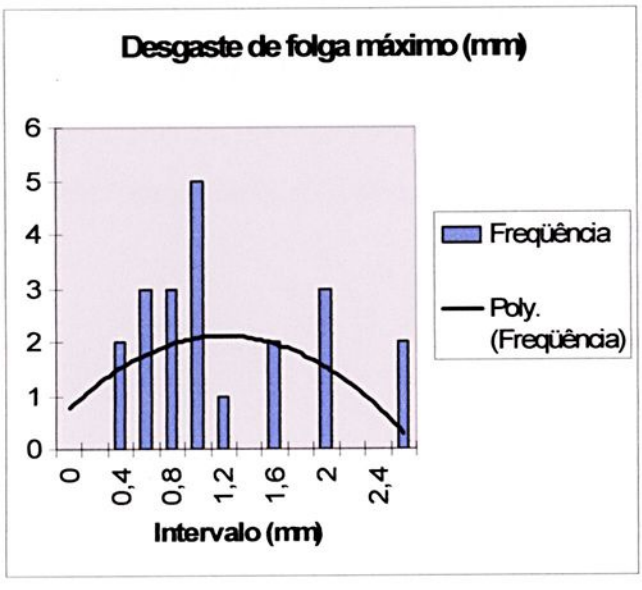
Em amostra de insertos usados (sucateados por fratura), a média das maiores crateras nas arestas utilizadas foi de 1 mm (histograma abaixo)



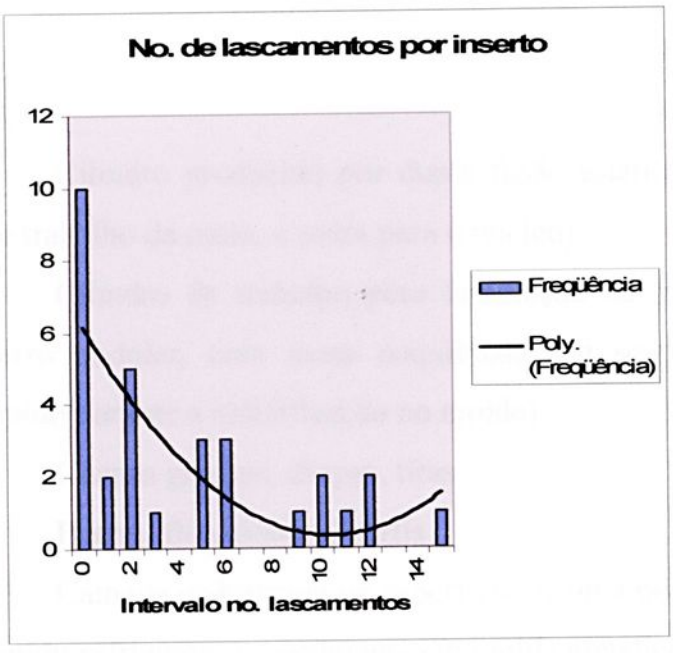
O tamanho (medido sobre a superfície de saída) dos maiore lascamentos desses insertos, foi de 2 mm em média (histograma abaixo)



Os máximos desgastes de folga na amostra, foram de 1 mm em média, histograma abaixo.



Aproximadamente 30% dos insertos analisados fraturaram sem qualquer desgaste prévio (subitamente), histograma abaixo.


No. de lascamentos por inserto
12
10
8
6
4
2
0
0
2
4
6
8
10
12
14
Intervalo no. lascamentos
Freqüência
Poly. (Freqüência)

9 GLOSSÁRIO

Composto — Cilindro produzido por dupla fusão estática (um vazamento para a casca de trabalho da mesa, e outra para o núcleo)

Nodulite, Nodular — Cilindro de trabalho para laminação de produtos longos a quente, em ferro nodular, com mesa coquilhada (ou seja endurecida pelo esfriamento rápido durante a solidificação no molde)

Produtos planos — Chapas grossas, chapas, tiras

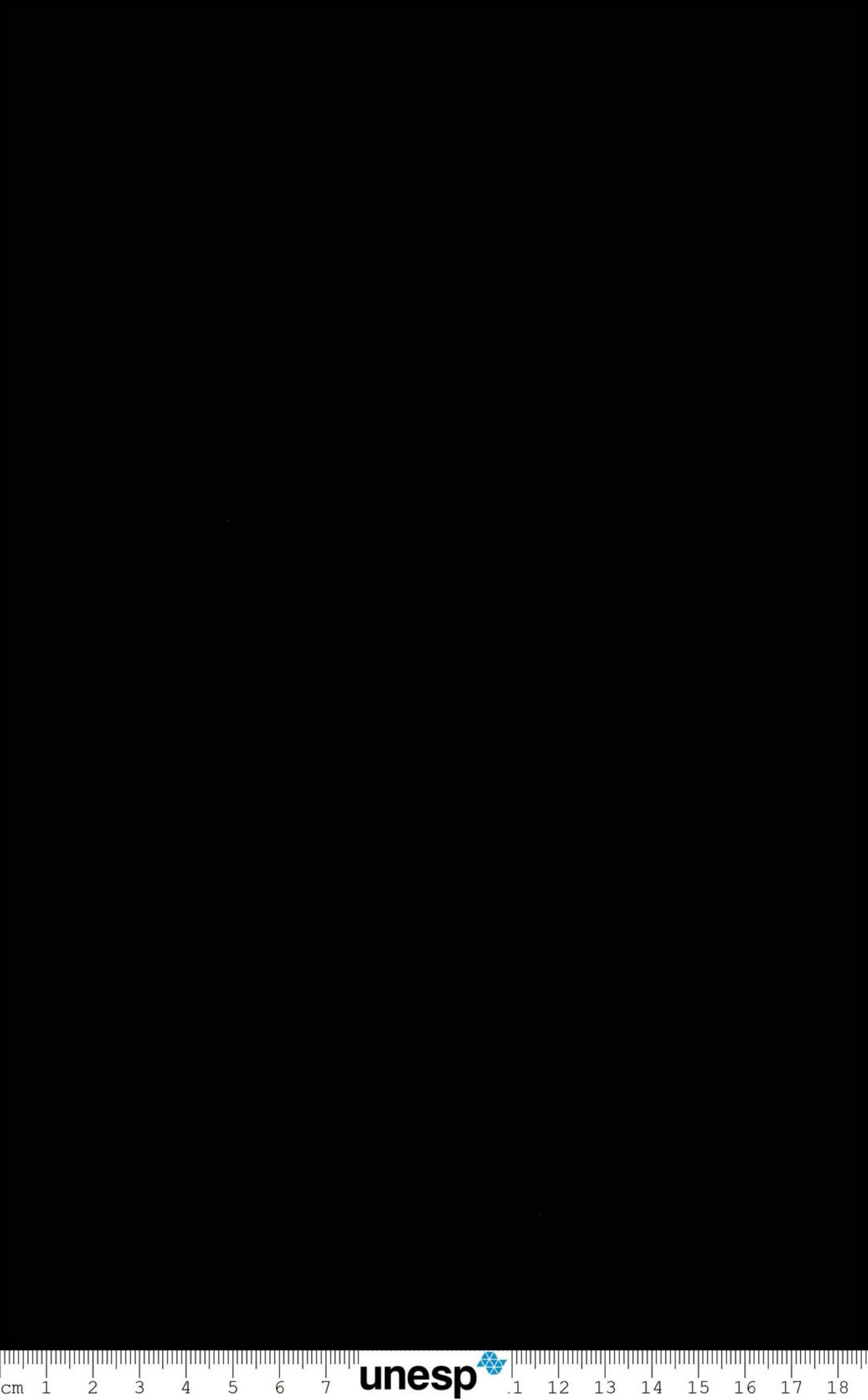
Produtos não planos — Barras, fio máquina, perfis

Camada coquilhada — Camada endurecida na superfície de uma peça fundida, obtida por meio de rápido esfriamento, geralmente em molde metálico.

Pescoço do cilindro — As partes de menor diâmetro pelas quais o cilindro é suportado no laminador, por meio de rolamentos ou mancais, através do qual recebe o torque.

Mesa do cilindro — A parte central, de maior diâmetro, utilizada no trabalho de deformação do produto em laminação.

override — Função do Comando Numérico do torno que permite aumentar ou diminuir um parâmetro de usinagem com relação ao valor programado.


cm 1 2 3 4 5 6 7
unesp
11 12 13 14 15 16 17 18