

UNIFEI - UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

**TORNEAMENTO DO AÇO ASTM 300M ENDURECIDO
COM FERRAMENTAS DE CERÂMICA E PCBN COM
GEOMETRIA “WIPER”**

GILDINEY TAVARES DE SALES

Itajubá, Outubro de 2004

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PRÓ-DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**TORNEAMENTO DO AÇO ASTM 300M ENDURECIDO
COM FERRAMENTAS DE CERÂMICA E PCBN COM
GEOMETRIA “WIPER”**

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

Curso: **Pós-graduação em Engenharia Mecânica**

Área de Concentração: **Projeto e Fabricação**

Dissertação apresentada ao Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Ciências em Engenharia Mecânica** na área de concentração em Projeto e Fabricação.

Itajubá, Outubro de 2004

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ITAJUBÁ
PRÓ-DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**

**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA MECÂNICA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**TORNEAMENTO DO AÇO ASTM 300M ENDURECIDO
COM FERRAMENTAS DE CERÂMICA E PCBN COM
GEOMETRIA “WIPER”**

Autor: Gildiney Tavares de Sales

Orientador: Prof. João Roberto Ferreira, Dr.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Alexandre M. Abrão – UFMG

Prof. Dr. Sebastião Carlos – UNIFEI

Prof. Dr. João Roberto Ferreira – orientador – UNIFEI

Itajubá, Outubro de 2004

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

S163t

Sales, Gildiney Tavares

Torneamento do aço ASTM 300M endurecido com ferramentas de cerâmica e PCBN com geometria wiper / por Gildiney Tavares de Sales. – Itajubá, (MG): [s.n.], 2004.

117 p.: il.

Orientador : Prof. Dr. João Roberto Ferreira

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Itajubá

1. Torneamento de aços endurecidos. 2. Usinagem. 3. Ferramentas cerâmicas. 4. Ferramentas de PCBN. I. Ferreira, João Roberto, orient. II. Universidade Federal de Itajubá. III. Título.

CDU 621.7(043)

Dedicatória

Dedico este trabalho especialmente a minha família. São para vocês: meu pai Silvio Tavares, a minha mãe Maria Aparecida Tavares e as minhas irmãs Edineia e Gerly que vão meus mais profundos agradecimentos, pois sem vocês me apoiando e me incentivando eu não teria conseguido vencer mais esta batalha da vida.

Também dedico este trabalho aos meus avós já falecidos: - Sebastião Tavares, José Tavares e Palmira Rita de Souza, que devido ao destino não puderam me ver concluir mais esta etapa, entre tantas outras da vida.

Agradecimentos

Agradeço enormemente as seguintes pessoas e instituições, que direto ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho:

- ⇒ Ao amigo e orientador Professor Dr. João Roberto Ferreira por todos ensinamentos transmitidos, pela orientação neste trabalho e pela amizade e compreensão nas horas mais difíceis e complicadas no desenvolvimento da dissertação;
- ⇒ A UNIFEI (Universidade Federal de Itajubá), que como instituição de ensino possibilitou a realização deste trabalho no mais alto nível possível;
- ⇒ A todos funcionários da UNIFEI: Pessoal da limpeza, secretárias, professores, bibliotecários, e em especial o pessoal da oficina e laboratório do Instituto de Engenharia Mecânica que prestou todo auxílio e serviço durante os trabalhos de preparação, medição e usinagem dos corpos de prova do aço endurecido 300M;
- ⇒ Ao amigo e colega de Mestrado Carlos Alberto Magalhães por toda ajuda e apoio durante todo período de desenvolvimento dos trabalhos, em especial ao empenho e atenção durante a fase de tratamento térmico dos corpos de prova, que foi realizado na IMBEL (Indústria de Material Bélico do Brasil);
- ⇒ A IMBEL (Indústria de Material Bélico do Brasil) e a todos funcionários envolvidos direto ou indiretamente no tratamento térmico dos corpos de provas do aço 300M;
- ⇒ A Alcoa por disponibilizar 1 dia por semana meu para realização do mestrado, por ajudar nas despesas inerentes a este e por possibilitar a realização de ensaios no Torno CNC da Oficina Central;

- ⇒ Ao Supervisor da Oficina Central da Alcoa Hélio Carvalho, pela disponibilização do equipamento e operador na realização dos ensaios de usinagem, e em especial ao operador Anderson pela atenção e dedicação prestada durante a realização dos ensaios;
- ⇒ Ao meu supervisor direto na Alcoa Leonardo Vinícius Brandão pelo incentivo e apoio na conclusão deste trabalho;
- ⇒ A todos colegas de mestrado pela amizade, ajuda e companheirismo em todos momentos destes três anos de trabalho e convivência;
- ⇒ Aos amigos e companheiros de república em Itajubá: Daniel, Ricardo, Tiago, Marcos, Rafael e Juliana que não só me ajudaram, mas que por um longo período foram minha família nesta estadia temporária em Itajubá;
- ⇒ A minha namorada Iliana pela compreensão dos momentos que nos privamos um do outro, em função do ritmo apertado dos trabalhos do mestrado na reta final da dissertação;
- ⇒ A todos meus amigos de Varginha, em especial para Marcos Vitor e Márcio Barbosa que sempre me incentivou a ir o mais longo possível;
- ⇒ Ao engenheiro químico Márcio Machado pela amizade e companheirismo prestado na cidade de Poços de Caldas;
- ⇒ Ao IAE/CTA, na pessoa do Msc. Francisco Romeo Martins, pelo fornecimento do Aço ASTM 300M

Índice

Resumo	xii
Abstract	xiii
Lista de figuras	xiv
Lista de tabelas	xix
Nomenclatura	xx
Capítulo 1: Introdução	1
Capítulo 2: O Aço 300M	5
2.1-Introdução.....	5
2.2-Histórico.....	6
2.3-Aplicação.....	7
2.4-Propriedades.....	7
2.4.1-Composição química.....	7
2.4.2-Elementos microligantes.....	8
2.4.3-Propriedades mecânicas.....	9
a-Usinabilidade.....	9
b-Limite de resistência à tração.....	9
c-Soldabilidade.....	10
d-Limite de escoamento.....	10
e-Dureza.....	11
f-Resistência a propagação de trincas ou tenacidade à fratura.....	11
g-Resistência ao amolecimento a altas temperaturas.....	12
h-Resistência à corrosão e o problema da descarbonetação.....	13
Capítulo 3: Torneamento de aços endurecidos	14
3.1-Introdução.....	14
3.2-Ferramentas de corte usadas no torneamento de aços endurecidos.....	15

3.2.1-Materiais cerâmicos.....	16
a-Ferramentas de materiais cerâmicos a base de alumina.....	17
a.1-Cerâmica pura, óxida ou branca.....	17
a.2-Cerâmica reforçada com whiskers.....	17
a.3-Cerâmica mista.....	17
b-Ferramentas de materiais Cerâmicos a base	
nitreto de silício (Si_3N_4).....	18
b.1-Cerâmica a base de nitreto de silício (Si_3N_4) puro.....	18
b.2-Sialon.....	18
c-Processo de produção das ferramentas cerâmicas.....	19
d-Propriedades das ferramentas cerâmicas.....	19
d.1-Dureza.....	20
d.2-Estabilidade química.....	21
d.3-Resistência ao choque térmico.....	22
d.4-Resistência mecânica.....	22
e-Aplicabilidade dos materiais cerâmicos nos	
processos de usinagem.....	22
3.2.2-Nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN).....	23
a-PCBNs para usinagem de desbaste.....	24
b-PCBNs para usinagem de acabamento.....	24
c-Propriedades dos PCBNs.....	25
c.1-Dureza.....	25
c.2-Tenacidade.....	26
c.3-Resistência ao choque térmico.....	27
c.4-Estabilidade química.....	27
d-Aplicabilidade dos PCBNs nos processos de usinagem.....	28
3.2.3-Características geométricas das ferramentas de corte.....	28
a-Ângulo de saída.....	28
b-Ângulo de folga.....	29
c-Ângulo de posição e de ponta.....	29
d-Ângulo de inclinação.....	30
e-Geometria alisadora (<i>Wiper</i>).....	30
3.3-Parâmetros de Corte.....	32
3.4-Porta ferramentas.....	33
3.5-Ferramentas modulares de troca rápida.....	33

3.6-Desgaste e vida das ferramentas de corte.....	36
3.6.1-Mecanismos de desgaste.....	36
a-Desgaste por adesão.....	36
b-Desgaste por abrasão.....	36
c-Desgaste por difusão.....	37
d-Desgaste por oxidação.....	37
3.6.2-Principais desgastes das ferramentas de corte.....	38
3.6.3-Avarias das ferramentas de corte.....	39
3.6.4-Apresentação de trabalhos sobre desgastes de ferramentas.....	40
a-Desgastes em ferramentas de corte de cerâmica mista e de PCBN.....	41
b-Rugosidade como critério de fim de vida de ferramentas de corte.....	43
c.1-Influência da composição química e estrutural do material usinado nos desgastes das ferramentas de corte de cerâmica mista.....	45
c.2-Influência da composição química e estrutural do material usinado nos desgastes das ferramentas de corte de PCBN.....	48
3.7-Mecanismo de formação do cavaco.....	50
3.8-Características da superfície usinada.....	51
3.8.1-Rugosidade superficial.....	51
a-Desvio médio aritmético (R_a).....	51
b-Desvio médio quadrático (R_q).....	52
c-Altura das irregularidades dos 10 pontos (R_z).....	52
d-Altura máxima das irregularidades ($R_{máx}$).....	53
e-Profundidade média (R_p).....	53
Capítulo 4: Condições econômicas de usinagem.....	56
4.1-Introdução.....	56
4.2-Tempos de usinagem.....	57
4.3-Velocidade de corte de máxima produção (V_{cmxp}).....	57
4.4-Custos de produção.....	60
4.4.1-Vida econômica da ferramenta.....	61
4.5-Intervalo de máxima eficiência.....	63

Capítulo 5: Procedimento experimental	64
5.1-Máquinas e ferramentas.....	64
5.1.1-Máquinas.....	64
5.1.2-Ferramentas utilizadas.....	66
5.1.3-Portas-ferramentas utilizados.....	66
5.2-Material usinado.....	67
5.3-Ensaio preliminares (qualitativos).....	68
5.3.1-Torno CNC Nardini Logic 175.....	68
a-Condições de usinagem.....	68
5.3.2-Torno CNC Romi Multiplic 35D.....	68
a-Condições de usinagem.....	68
5.4-Ensaio definitivos (quantitativos).....	69
5.4.1-Condições de usinagem.....	69
5.5-Instrumentos de medição.....	70
Capítulo 6: Resultados e discussão	71
6.1-Ensaio preliminares (qualitativos).....	71
6.1.1-Torno CNC Nardini Logic 175.....	71
a-Acabamento superficial.....	71
b-Formação do cavaco.....	75
c-Desgaste da ferramenta de corte.....	76
6.1.2-Torno CNC Romi Multiplic 35D.....	79
a-Acabamento superficial.....	79
b-Formação do cavaco.....	82
c-Desgaste da ferramenta de corte.....	82
6.2-Ensaio definitivos (quantitativos).....	85
6.2.1-Ferramentas cerâmicas (CC 650).....	85
a-Número de peças usinadas e acabamento superficial.....	85
b-Formação do cavaco.....	89
c-Desgaste e avarias da ferramenta de corte.....	90
6.2.2-Ferramentas de PCBN (7020).....	94
a-Número de peças usinadas e acabamento superficial.....	94
b-Formação do cavaco.....	99
c-Desgaste e avarias da ferramenta de corte.....	99
6.3-Geometria alisadora <i>wiper</i> WG e WH.....	102

6.4-Condições econômicas de usinagem.....	105
6.4.1-Tempos de usinagem.....	105
6.4.2-Custos de produção.....	106
Capítulo 7: Conclusões e sugestões para trabalhos futuros.....	109
7.1-Conclusões.....	109
7.2-Sugestões para trabalhos futuros.....	111
Referencia bibliográfica.....	112

Resumo

SALES, Gildiney T., Torneamento do aço ASTM 300M endurecido com ferramentas de cerâmica e PCBN com geometria alisadora. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2004. 125 p. Dissertação de Mestrado.

O setor produtivo, principalmente o setor metal/mecânico possui necessidade contínua e crescente na produção de peças e produtos com qualidade, rapidez e baixo custo. Somado a isso está a flexibilidade das células produtivas, indispensável nos dias de hoje para tornar uma empresa competitiva. Perante este cenário, a indústria de ferramentas de corte, dispositivos e máquinas de usinagem vem se desenvolvendo em grande escala nos últimos anos. Um dos setores que vem se destacando muito dentro da usinagem, são os materiais e as geometrias das ferramentas de corte. Tal evolução, juntamente com máquinas de maior rigidez e precisão tem sido fundamentais na substituição do tradicional processo de retificação pelo processo de torneamento de aços endurecidos em alguns casos. Este trabalho faz um estudo comparativo entre os resultados obtidos no torneamento de acabamento no aço ASTM 300M endurecido com ferramentas cerâmica ($Al_2O_3 + TiC$) e de PCBN (CBN + TiN) com geometria convencional e geometria alisadora. São analisados o acabamento superficial da peça, desgaste e avarias na ferramenta, formação do cavaco, tempo de usinagem e vida da ferramenta de corte. Como critério para o fim de vida de cada aresta de corte da ferramenta foi adotado um acabamento superficial igual ou superior a $R_a = 0,6 \mu m$, acabamento este compatível ao processo de retificação. Durante os ensaios preliminares utilizou-se dois tornos CNC para comparação dos resultados. Após todos ensaios quantitativos fez-se uma análise comparativa do custo x benefício entre todas condições ensaiadas, onde a ferramenta cerâmica de geometria alisadora WG, nas condições de corte $V_c = 150 \text{ m/min.}$ e $f = 0,20$ e $0,30 \text{ mm/v}$ apresentou os menores custos de usinagem, sendo também a que proporcionou uma das melhores vidas para a aresta de corte e um dos menores tempo de usinagem.

Palavras chaves

Torneamento de aços endurecidos, Usinagem, Ferramentas cerâmicas, Ferramentas de PCBN, Acabamento superficial, Aço ASTM 300M, Geometria convencional, Geometria alisadora, Custo x benefício, Desgaste e avarias da ferramenta.

Abstract

Sales, Gildiney T., Turning hardened steel ASTM 300M with ceramic and PCBN tools with wiper geometry. Itajubá: Universidade Federal de Itajubá, 2004. 125 p. Master's Degree.

The metalworky sector continuous by requires components with higher quality and lower cost. Thus, the productive cells' flexiblility becomes essential for any competitive business. The cutting tools industry, devices and machining equipments have developed at large scale from the past years up to now. One of the sections which has standed out in the factory business is the material and the cutting tools geometry. Such evolution, along with higher precision and stiffer machines have been utterly important in the replacement, in same cases, of the traditional grinding process with the turning of hardened steel process. This work compares the results obtained in the finish turning of hardened steel ASTM 300M with ceramic ($Al_2O_3 + TiC$) and PCBN ($CBN + TiN$) tools with convencional geometry and wiper geometry, in which the surface finish, tool wear and life are analysed. As a criterion for the end of life of each cutting tool edge a surface finish equal to or higher than $Ra=0,6 \mu m$ was used, which is compatible with the grinding process. After all quantitative tests, a cost x profit comparison was done for all the tested conditions, in which the ceramic tools with wiper geometry, (using $V_c = 150 \text{ m/min.}$ and $f = 0.20$ and 0.30 mm/v) presented lower production costs and lower machining time.

Keywords:

Turning hardened steel, Machining, Ceramic tools, PCBN tools, Superficial finishing, ASTM 300M steel, Conventional geometry, Wiper geometry, Cost x profit, Wear and damage at tools.

Lista de Figuras

Figura 2.1 –Relação inversa entre tenacidade à fratura e resistência à tração.....	12
Figura 3.1 –Classes dos materiais cerâmicos usados para produção de ferramentas.....	16
Figura 3.2 –Variação da dureza em função da temperatura de diversas classes cerâmicas e do metal duro.....	21
Figura 3.3 –Variação da dureza em função da percentagem de volume de CBN de ferramentas de PCBN.....	25
Figura 3.4 –Variação da dureza em função da temperatura para diversos materiais de ferramentas.....	26
Figura 3.5 –Ferramentas de PCBN produzidas pela Mitsubishi Materials.....	29
Figura 3.6 –Geometria do raio de ponta de uma ferramenta alisadora.....	30
Figura 3.7 –Relação de avanço e rugosidade para ferramentas alisadoras (Wiper) e convencionais.....	31
Figura 3.8 –Rugosidade X avanço em geometrias alisadoras e convencionais.....	32
Figura 3.9 –Porta-ferramentas com fixação por grampo.....	33
Figura 3.10 –Porta-ferramentas e torre do sistema capto.....	34
Figura 3.11 –Polígono cônico do sistema capto.....	35
Figura 3.12 –Porta-ferramenta capto com furo de refrigeração.....	35
Figura 3.13 –Influência da temperatura/velocidade de corte nos desgastes das ferramentas de corte.....	37
Figura 3.14 –Principais desgastes das ferramentas de corte.....	38
Figura 3.15 –Avarias das ferramentas de corte.....	39
Figura 3.16 –Trinca e quebra de origem mecânica da aresta de corte.....	40
Figura 3.17 –Curva de vida para as ferramentas A65 e A66N.....	42
Figura 3.18 –Curvas de desgaste para $V_c=180\text{m/min.}$, $f=0,08\text{ mm/v}$ e $a_p=0,15\text{ mm}$	42

Figura 3.19 –Curvas de desgaste para $V_c=180$ e 250 m/min., $f=0,08$ mm/v e $a_p=0,15$ mm para a classe BNX20.....	43
Figura 3.20 –Vida das ferramentas em função das velocidades de corte.....	44
Figura 3.21 –Agente do fim de vida nas ferramentas cerâmicas (lascamento).....	45
Figura 3.22 –Agente do fim de vida nas ferramentas de PCBN (desgaste de flanco e cratera).....	45
Figura 3.23 –Desgaste de flanco e volume do desgaste de flanco por unidade de comprimento.....	46
Figura 3.24 –Morfologia dos desgastes na ferramenta de corte usada para usinar à amostra 1 do aço BS817M40, após um comprimento de corte (l_c) de 2,94 km.....	47
Figura 3.25 –Morfologia dos desgastes na ferramenta de corte usada para usinar à amostra 1 do aço BS817M40, para uma velocidade de corte de 150 m/min.....	49
Figura 3.26 –Cavaco obtido na usinagem do aço AISI 52100 com 58 HRC de dureza.....	50
Figura 3.27 –Desvio médio aritmético “ R_a ”	51
Figura 3.28 –Altura das irregularidades dos 10 pontos “ R_z ”.....	52
Figura 3.29 –Altura máxima das irregularidades “ $R_{máx}$ ” e profundidade média “ R_p ”.....	53
Figura 3.30 –Variação da $R_{máx}$ em função dos parâmetros de usinagem.....	54
Figura 4.1 –Tempo de produção por peça X velocidade de corte.....	59
Figura 4.2 –Custo por peça produzida X velocidade de corte.....	62
Figura 4.3 –Intervalo de máxima eficiência.....	63
Figura 5.1 –Torno CNC Nardini Logic 175.....	64
Figura 5.2 –Torno CNC Romi Multiplic 35D.....	65
Figura 5.3 –Painel de controle e torre do torno CNC Romi Multiplic 35D.....	65
Figura 5.4 –Croqui dos corpos de prova do aço 300M utilizados nos ensaios de usinagem.....	67
Figura 5.5 –Corpo de prova do aço 300M sendo torneado no torno Romi.....	67

Figura 6.1 –Rugosidade R_a ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).....	72
Figura 6.2 –Rugosidade R_t ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).....	73
Figura 6.3 –Rugosidade R_a ($V_c=200\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).....	74
Figura 6.4 –Rugosidade R_t ($V_c=200\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).....	74
Figura 6.5 –Rugosidade R_a ($V_c=200$ e 150 m/min, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).....	75
Figura 6.6 –Cavaco dente de serra formato de fita ($f = 0,2$ mm/v).....	76
Figura 6.7 –Cavaco dente de serra formato helicoidal ($f = 0,3$ mm/v).....	76
Figura 6.8 –Cavacos dente de serra formato de vírgula ($f=0,4$ mm/v).....	76
Figura 6.9 –Desgaste de flanco e cratera na ferramenta CC 650 convencional (cotas em μm).....	77
Figura 6.10 –Desgaste de flanco e cratera na ferramenta CC 650 convencional.....	78
Figura 6.11 –Avarias (lascamento) na ferramenta CC 650 alisadora (cotas em μm).....	78
Figura 6.12 –Avarias (lascamento) na ferramenta CC 650 alisadora.....	79
Figura 6.13 –Rugosidade R_a ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).....	80
Figura 6.14 –Rugosidade R_t ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).....	81
Figura 6.15 –Rugosidade R_a ($V_c = 150\text{m/min}$, $a_p = 0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora), usinagem no torno Nardini e Romi.....	82
Figura 6.16 –Lascamento e desgaste de cratera na ferramenta CC 650 convencional (torno Romi, cotas em μm).....	83
Figura 6.17 –Lascamento e desgaste de cratera na ferramenta CC 650 alisadora (torno Romi).....	84
Figura 6.18 –Lascamento e quebra na ferramenta CC 650 alisadora (torno Romi, cotas em μm).....	84

Figura 6.19 –Rugosidade R_a em função do número de peças usinadas no torno Nardini ($V_c = 150\text{m/min}$).....	86
Figura 6.20 –Rugosidade R_a em função do número de peças usinadas no torno Nardini ($V_c = 200\text{ m/min}$).....	87
Figura 6.21 –Número de peças usinadas para cada condição de usinagem e geometria das ferramentas cerâmicas CC 650.....	88
Figura 6.22 –Tempo de corte por peça para cada condição de usinagem aplicada nas ferramentas cerâmicas CC 650.....	88
Figura 6.23 –Cavaco dente de serra em forma de vírgula.....	89
Figura 6.24 –Cavaco dente de serra em forma de fita.....	90
Figura 6.25 –Cavaco dente de serra em no formato helicoidal.....	90
Figura 6.26 –Desgaste de cratera e avaria na ferramenta de geometria convencional, para uma vida de 17 peças ($V_c=200\text{ m/min. e }f=0,08\text{ mm/v}$).....	91
Figura 6.27 –Desgaste de cratera e avaria na (aresta secundária) ferramenta de geometria convencional ($V_c=150\text{ m/min. e }f=0,08\text{ mm/v}$).....	91
Figura 6.28 –Desgaste de cratera, franco e avaria na (lascamento) ferramenta de geometria convencional, para uma vida de 20 peças ($V_c=150\text{ m/min e }f=0,08\text{ mm/v}$).....	92
Figura 6.29 –Desgaste de cratera e avaria na (lascamento) ferramenta de geometria alisadora, para uma vida de 56 peças ($V_c=150\text{ m/min. e }f=0,2\text{ mm/v}$).....	92
Figura 6.30 –Avaria na (lascamento) ferramenta de geometria alisadora, para um vida de 36 peças ($V_c=150\text{ m/min, }f=0,3\text{ mm/v e cotas em } \mu\text{m}$).....	93
Figura 6.31 –Quebra da ferramenta de geometria alisadora ($V_c=165\text{ m/min. e }f=0,2\text{ mm/v}$).....	94
Figura 6.32 –Quebra da ferramenta de geometria alisadora ($V_c=180\text{ m/min. e }f=0,3\text{ mm/v}$).....	94
Figura 6.33 –Quebra da ferramenta de geometria alisadora ($V_c=200\text{ m/min. e }f=0,2\text{ mm/v}$).....	94

Figura 6.34 –Rugosidade R_a em função do número de peças usinadas no torno Nardini ($V_c = 150$ e 200 m/min).....	96
Figura 6.35 –Rugosidade R_a em função do número de peças usinadas no torno Nardini ($V_c = 200$ e 250 m/min).....	97
Figura 6.36 –Número de peças usinadas para cada condição de usinagem e geometria das ferramentas de PCBN 7020.....	98
Figura 6.37 –Tempo de corte por peça para cada condição de usinagem aplicada nas ferramentas de PCBN 7020.....	98
Figura 6.38 –Desgaste de cratera, flanco e avaria na ferramenta de geometria convencional que usinou 38 peças ($V_c=200$ m/min. e $f=0,08$ mm/v).....	99
Figura 6.39 –Desgaste de cratera e avaria na ferramenta de geometria convencional, que usinou 18 peças ($V_c=250$ m/min. e $f=0,08$ mm/v).....	99
Figura 6.40 –Desgaste de cratera e avaria na (quebra) ferramenta de geometria alisadora, que usinou 21 peças ($V_c=150$ m/min. e $f=0,20$ mm/v).....	100
Figura 6.41 –Desgaste de cratera na ferramenta alisadora que usinou 14 peças ($V_c=200$ m/min. e $f=0,20$ mm/v).....	101
Figura 6.42 –Desgaste de flanco na ferramenta alisadora, que usinou 14 peças ($V_c=200$ m/min. e $f=0,20$ mm/v).....	101
Figura 6.43 –Desgaste de cratera na ferramenta alisadora que usinou 64 peças ($V_c=150$ m/min. e $f=0,15$ mm/v).....	101
Figura 6.44 –Comparativo entre as pontas das ferramentas cerâmicas (WG e chanfro T) e de PCBN (WH e chanfro S), ambas com raio de ponta de $0,8$ mm.....	103
Figura 6.45 –Distância da ponta da ferramenta cerâmica CC650 WG até a interseção das linhas das arestas laterais.....	104
Figura 6.46 –Distância da ponta da ferramenta de PCBN CB7020 WH até a interseção das linhas das arestas laterais.....	104

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 —Composição química do aço 300M utilizado na indústria aeronáutica, aeroespacial e na indústria bélica.....	7
Tabela 2.2 —Parâmetros controlados com elementos microligantes.....	8
Tabela 2.3 —Variação de valores de propriedades mecânicas em função dos tratamentos térmicos.....	13
Tabela 3.1 —Propriedades das ferramentas de corte de PCD e PCBN.....	15
Tabela 3.2 —Propriedades relativas dos materiais cerâmicos comparados com o metal duro.....	20
Tabela 3.3 —Coletânea de propriedades das ferramentas cerâmicas e de PCBN.....	28
Tabela 3.4 —Parâmetros de corte para ferramentas cerâmicas e de PCBN.....	33
Tabela 3.5 —Composição química dos aços usinados (O e Ca em ppm).....	46
Tabela 3.6 —Composição química do aço usinado BS817M40 (O e Ca em ppm).....	48
Tabela 3.7 —Volume da taxa de desgaste de flanco ($\Delta V\alpha/\Delta l_c$, em $\mu\text{m}^3/\text{m}$).....	48
Tabela 6.1 —Comparativo dos valores de rugosidade (R_a) obtido entre os corpos de prova usinados com ferramentas cerâmicas WG e de PCBN WH.....	102
Tabela 6.2 —Tempos passivos dos ciclos de usinagem dos corpos de prova do aço 300M.....	105
Tabela 6.3 —Tempos ativos de usinagem e vida da ferramenta de corte para cada condição e ferramenta ensaiada (lote de 1000 peças).....	106
Tabela 6.4 —Custos fixos referentes ao processo de usinagem dos corpos de prova do aço 300M.....	107
Tabela 6.5 —Custos totais de usinagem por peça e para o lote de 1000 peças em cada condição e ferramenta ensaiada.....	107

NOMENCLATURA

Abreviações

ASTM	American Society for Testing Materials
AUST	Austenitização
CaO	Óxido de cálcio
CBN	Nitreto de boro cúbico
COEF	Coeficiente
CONV	Convencional
C.T	Como temperado
CTOD_c	Parâmetro de tenacidade à fratura, no caso de fratura instável
ENCR	Encruamento
HRC	Escala de dureza rockwell
HV	Escala de dureza vickers
K_{1c}	Tenacidade à fratura em condições de deformação plana
K_p	Custo de aquisição da pastilha intercambiável
LAM	Laboratório de automação e manufatura
LET	Limite de escoamento à tração
LRT	Limite de resistência à tração
MnS	Sulfeto de manganês
PCBN	Nitreto de boro cúbico policristalino
PCD	Diamante policristalino
Pop-in	Descontinuidade na abertura da trinca
R_g	Raio de ponta
R_t	Rugosidade máxima
RESF	Resfriamento
Sh	Salários e encargos do operador

Sm.....Custo total da máquina
t_a.....Tempo de aproximação e afastamento da ferramenta de corte
t_c.....Tempo de corte
TEMP......Temperatura
t_{ft}.....Tempo de troca da ferramenta de corte
t_p.....Tempo de preparo da máquina
t_s.....Tempo secundário de usinagem
t_t.....Tempo total de usinagem
VB_B.....Desgaste de flanco médio
V_{si}.....Custo de aquisição do porta-ferramentas
V_a.....Desgaste de flanco por unidade de comprimento
ZTA.....Zona termicamente afetada

Siglas

ABM.....Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais

AISI.....American Iron and Steel Institute

AMS.....American Society for Metals

CNC.....Comando Numérico Computadorizado

IAE.....Instituto de Aeronáutica e Espaço

ISO.....International Standardization Organization

WIPER.....Ferramenta de corte com geometria alisadora

Letras latinas

a_p	Profundidade de corte (mm)
B	Boro
C	Carbono
Cr	Cromo
f_n	Avanço por volta (mm/v)
l_c	Comprimento de corte
Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
Nb	Nióbio
NB	Nitreto de boro
Ni	Níquel
P	Fósforo
S	Enxofre
Si	Silício
T	Vida da ferramenta de corte(n° de peças usinadas por aresta de corte)
Ti	Titânio
V	Vanádio
V_c	Velocidade de corte (m/min)
Z	Lote de peças
Zr	Zircônio
W	Wiper

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Com a evolução da humanidade muitos setores tiveram que evoluir juntamente, mesmo que ainda não estivessem preparados para acompanhar tanto avanço em tão curto prazo. Quando se fala na evolução da humanidade é inevitável logo pensar na engenharia, ciência a qual parece sempre estar caminhando na frente. Porém para suprir esta engenharia foram e são necessários novos materiais que atendessem cada vez mais os quesitos alta resistência mecânica, boas propriedades químicas e baixo peso. Devido a essa e outras necessidades vinculadas aos materiais, inovações da ciência dos materiais como fibra de carbono, ligas de alumínio e titânio, materiais compósitos e cerâmicos são hoje largamente utilizados nos mais diversos setores da indústria (Padilha,1990; Diniz¹, et al., 2002). Paralelamente a esses materiais modernos ou também chamados nobres pela indústria mecânica, está o velho e conhecido aço, chamado de material convencional (velho). Entre os altos e baixos do setor mundial de aciaria, onde fatores não só vinculados às propriedades poucas atrativas do aço como falta de qualidade, peso alto entre outras deficiências químicas e mecânicas, mas também como várias deficiências no setor de produção (tecnologias ultrapassadas) foram fatores predominantes no desuso do aço em aplicações mais específicas. Perante todo esse panorama desfavorável a indústria do aço começou a se reestruturar, tanto no setor de produção (atualização tecnológica) como na pesquisa e desenvolvimento de novos compostos e melhoria de qualidade (Orton,1990). Com isso sugeriram novas ligas de aço ou como são conhecidos aços com elementos de liga, onde nessa nova era estão os aços de ultra-alta resistência baixa liga. Dentre esta classe de aço com propriedades melhoradas está o aço 300M, o qual será objeto de estudo no aspecto de usinabilidade neste trabalho. O aço que recebe a denominação comercial 300M é um melhoramento do aço AISI 4340, que recebe uma maior quantidade de silício, carbono e

molibdênio, também é adicionado em sua composição química o vanádio. Esta composição química foi formulada na década de 50 pela International Nickel Company (ASM, 1978).

Com a evolução e aplicação desses novos materiais na indústria mecânica surge uma outra demanda no setor, no que se refere aos processos de fabricação. Neste trabalho em si trabalhou-se em cima do processo de usinagem, especificamente no torneamento de aços endurecidos. A usinagem de aços endurecidos até poucos anos atrás era em quase sua totalidade dominado pelo processo de retificação, principalmente pela deficiência das máquinas operatrizes (pouca rigidez e flexibilidade) e pela falta de ferramentas de corte com propriedades avançadas como alta dureza a quente, resistência ao desgaste e a altas temperaturas, tenacidade e estabilidade química (König et al., 1984). Com o desenvolvimento de novos materiais de ferramentas de corte como o PCBN e cerâmica mais o avanço na manufatura de máquinas operatrizes cada vez mais rígidas, computadorizadas e com tolerância extremamente precisa, a operação de torneamento de aços endurecidos (dureza superior a 45 HRC) vem se tornando cada vez mais comum e tomando mercado do processo de retificação, pois seus benefícios são imensos. Com a inovação das ferramentas no que se refere ao poder de acabamento, devido principalmente as chamadas ferramentas de geometria alisadora (*wiper*), é possível conseguir um acabamento super fino se comparado com ferramentas convencionais ou igual para avanços de duas a quatro vezes acima, com isso obtem-se alta produção com mesmo padrão de acabamento.

Mesmo com tantos benefícios, ainda hoje o processo de torneamento de aços endurecidos não é explorado em sua totalidade. Fatores como os citados abaixo contribuem para a limitação no uso deste processo:

- ⇒ Desconhecimento dos parâmetros de corte ideais para cada aplicação;
- ⇒ Uso de ferramentas inadequadas tanto no que se refere a geometria quanto ao material a ser utilizado;
- ⇒ Incompreensão dos fenômenos de desgaste e avarias das ferramentas de corte;
- ⇒ Falta de domínio no processo de formação do cavaco e no uso ou não do fluido de corte;
- ⇒ Desconhecimento da existência de novas ferramentas que possibilitam acabamento superficial tão fino quanto o processo de retificação.

Perante este panorama ainda desfavorável na aplicação do processo de torneamento em aços endurecidos, este trabalho tem como missão pesquisar, desenvolver e concluir os seguintes tópicos:

- ⇒ Realizar revisão bibliográfica sobre o aço 300M e suas propriedades;
- ⇒ Realizar revisão bibliográfica sobre processo de torneamento de aços endurecidos com todas suas peculiaridades;
- ⇒ Através de ensaios preliminares estudar a influência do uso de ferramentas de geometria convencional e alisadora (*wiper*), uso de diferentes tornos CNC e da variação do avanço e velocidade de corte sobre a rugosidade da superfície usinada do corpo de prova;
- ⇒ Após a determinação dos parâmetros ótimos para a rugosidade superficial (avanço de corte) nos ensaios preliminares, realizar-se-á nos ensaios definitivos (quantitativos) análise da vida das ferramentas de corte de geometria convencional e alisadora (*wiper*), para isto testando diferentes velocidades de corte, ferramentas de cerâmica mista e PCBN;
- ⇒ Analisar todos fenômenos impactantes na vida das ferramentas (desgaste e avarias), bem como o processo de formação do cavaco durante os ensaios preliminares e definitivos;
- ⇒ Após o término dos ensaios quantitativos realizar estudo para condições econômicas de usinagem;

Para atingir os propósitos citados anteriormente este trabalho foi dividido em 7 Capítulos da seguinte forma:

- ⇒ **Capítulo 1**-Introdução;
- ⇒ **Capítulo 2**-O aço 300M: neste capítulo realizou-se uma revisão bibliográfica sobre o aço 300M, onde serão relatadas particularidades químicas e mecânicas, como ele surgiu e onde é aplicado, quais suas vantagens em relação a outros materiais e qual a sua importância para a indústria do aço;
- ⇒ **Capítulo 3**-Torneamento de aços endurecidos: aqui revisou-se a literatura sobre os materiais, geometrias e desgastes de ferramentas de corte, formação do cavaco, forças de corte e todas outras peculiaridades que regem o processo de torneamento de aços endurecidos;
- ⇒ **Capítulo 4**-Condições econômicas de usinagem: fez-se neste capítulo uma revisão da literatura sobre condições econômicas de usinagem. Foram abordadas a velocidade de corte de mínimo custo (V_{co}) e a velocidade de corte de máxima produção (V_{cmxp}), que nada mais é que uma análise de custo X benefício da velocidade de corte (maior ou menor);

- ⇒ **Capítulo 5**-Procedimentos experimentais: descreveu-se nesta etapa do trabalho as características das máquinas, ferramentas de corte, material usinado, corpos de prova e dos parâmetros de corte adotados;

- ⇒ **Capítulo 6**-Resultados e discussões: discutiu-se nesta fase, todos resultados dos ensaios preliminares e definitivos. Foram analisados a qualidade do acabamento superficial, desgaste e avarias das ferramentas de corte, formação do cavaco, geometrias e material das ferramentas de corte, condição econômica de usinagem e a influência dos parâmetros de corte em todos quesitos citados.

- ⇒ **Capítulo 7**-Conclusões e sugestões para trabalhos futuros: apresentou-se as conclusões finais deste trabalho e algumas sugestões para trabalhos futuros;

- ⇒ **Referencias Bibliográficas.**

CAPÍTULO 2

O AÇO 300M

2.1-Introdução

Hoje em dia é comum ao se falar de materiais usados na engenharia, citar produtos como a fibra de carbono, ligas de titânio, ligas de alumínio, materiais compósitos e cerâmicos. Cada vez menos se houve falar a palavra aço para aplicações específicas e de alta confiabilidade na engenharia, como no setor aeronáutico e aeroespacial. Esta afirmação já deixou de expressar a realidade no mercado de materiais, pois neste capítulo será mostrado como a indústria do aço vem se recuperando nesses últimos 20 anos e qual o caminho percorrido pelo setor para colocar o aço como um produto barato, confiável e com excelentes propriedades mecânicas e químicas (Orton,1990). Essa evolução do aço deve-se ao melhoramento de todo processo produtivo (siderurgia do aço), ao aumento da qualidade e confiabilidade de sua composição e estrutura e ao desenvolvimento dos aços de ultra-alta resistência (Tokimatsu, 1995), cujo um de seus grupos engloba o aço de ultra-alta resistência e baixa liga 300M. É esse aço 300M que será descrito neste capítulo, todas suas particularidades químicas e mecânicas, como ele surgiu e onde é aplicado, quais suas vantagens em relação a outros materiais e qual a sua importância para a indústria do aço.

2.2-Histórico

A 2ª Guerra Mundial e as várias crises do petróleo foram acontecimentos históricos que impulsionaram o desenvolvimento em vários segmentos da humanidade. Dentre esses segmentos o que alcançou maior destaque foi a engenharia. Para suprir esse avanço na engenharia veio a necessidade de desenvolver novos materiais, mais leves e resistentes, com durabilidade elevada e que consumissem menos energia em sua produção. A partir desta nova visão tecnológica, novos materiais como fibra de carbono, ligas de alumínio e titânio, materiais compósitos e cerâmicos são hoje largamente utilizados nos mais diversos setores da indústria (Monteiro,1990).

Há alguns anos era inevitável afirmar que a “Era do Aço” estava acabando, pois o aço estava perdendo seu domínio na empregabilidade em tecnologias avançadas. Um outro fator que também apontou para este aspecto foi à diminuição da produção siderúrgica mundial no início da década de 90. O que se tem observado nos últimos 10 anos é que a indústria do aço está retomando seu lugar no mercado de materiais, isso é explicável não só pelo o avanço na pesquisa de novas composições (novas ligas), mais também pelas profundas melhorias aplicadas ao processo de produção do aço, onde se consegue obter aços mais puros, com faixas de composições químicas mais apertadas, mais confiáveis e com alta tecnologia. Todas essas mudanças propiciaram ao aço mais qualidade, variedade e menor custo (Orton,1990). Nos países desenvolvidos, a utilização de materiais convencionais (velhos) como o aço carbono, ferro fundido, alumínio puro, etc; estão estagnados. Existe uma grande demanda para materiais avançados, como as superligas, aços de ultra-alta resistência, materiais compósitos e outros. Já nos países em desenvolvimento embora exista um mercado em ascensão para os materiais avançados, o mercado ainda é dominado pelos materiais tradicionais (Padilha, 1990).

Dentre as novas composições reformuladas para o aço e os aços ligas, estão os aços de ultra-alta resistência. Esses aços surgiram por volta de 1950 e são divididos em 4 grupos:

- ⇒ Aços de baixa liga (AISI 4340 e 300M);
- ⇒ Aços de alta liga com endurecimento secundário (AISI HY 180, AF 1410, HP 9-4-20 e HP 9-4-30);
- ⇒ Aços endurecidos por precipitação (AISI 15-5PH e PH 13-8);
- ⇒ Aços maraging (AISI C250).

Neste trabalho será abordado somente o aço de baixa liga 300M, por ser este o aço que será utilizado nos ensaios de usinagem. O 1º aço de ultra-alta resistência e baixa liga desenvolvido foi o AISI 4340, usado comercialmente por volta de 1955 (Tomita, 1991). O aço que recebe a denominação comercial 300M é um melhoramento do aço AISI 4340, que

recebe uma maior quantidade de silício, carbono e molibdênio, também é adicionado em sua composição química o vanádio. Esta composição química foi formulada na década de 50 pela International Nickel Company (ASM, 1978).

2.3-Aplicações

Devido às suas propriedades especiais o aço 300M está sendo cada vez mais utilizado nos mais diversos setores da indústria. Dentre seus maiores consumidores estão a indústria aeronáutica/aeroespacial, que o utiliza em eixos, engrenagens, pinos, fusos, peças diversas de segurança (Silva e Mei, 1988), em estruturas de trens de pouso, fixação de motores e demais estruturas das aeronaves (Pagano, 1990). A indústria bélica também é um setor onde o aço 300M tem grande empregabilidade. É utilizado na confecção dos tubos dos foguetes, em mísseis e em blindagens conjugadas de carros de combate leve e de helicópteros (Suarez, 1990).

2.4-Propriedades

2.4.1-Composição química

Para manter suas propriedades especiais, o aço 300M além de sofrer tratamentos térmicos e mecânicos minuciosos, necessita de um rigoroso controle quanto ao nível de elementos residuais, quantidade e tipo de inclusões (limpeza) e homogeneidade de composição e estrutura. Para isto é indispensável que se tenha um alto controle no processo de fabricação e que este possibilite obter faixa muito restrita de composição química (Silva, 1988). A tabela 2.1 apresenta algumas composições do aço 300M .

Tabela 2.1 – Composição química do aço 300M utilizado na indústria aeronáutica, aeroespacial e na indústria bélica:

		Composição química (% em peso)																	
Norma	A	C		Si		Mn		Cr		Ni		Mo		V		P		S	
E300M	1	0,41		1,65		0,80		0,80		1,80		0,40		0,08		-		≤0,001	
ASTM	2	0,40	0,46	1,45	1,80	0,65	0,90	0,70	0,95	1,65	2,00	0,30	0,45	0,05		-	0,035	-	0,040
300M	3	0,40	0,45	1,45	1,80	0,60	0,90	0,70	0,95	1,65	2,00	0,30	0,50	0,05	0,1	0,005		0,005	

Nota: (A)-1 Aço equivalente AMS 6417. Eletrometal (Silva e Mei, 1988);
 -2 Aço equivalente 300M. Aços utilizados pelo IAE (NN, 1987);
 -3 Aço equivalente 300M.(Tokimatsu, 1995).

2.4.2-Elementos microligantes

Ao se falar de um aço-liga, não se pode deixar de ressaltar a importância dos elementos microligantes na obtenção de propriedades específicas nos aços. Com pequenas quantidades adicionadas se consegue grandes efeitos. Em geral para conseguir esta grande melhora nas propriedades mecânicas, os elementos de liga atuam com o propósito de controlar a microestrutura e neutralizar elementos fragilizantes. A tabela 2.2 apresenta os vários efeitos que os elementos microligantes são capazes de produzir nos aços. Foram destacados os mais usados, que são: nióbio(Nb), titânio(Ti), vanádio(V), zircônio(Zr) e Boro(B).

Tabela 2.2 – Parâmetros controlados com elementos microligantes (Meyer, et al., 1984).

Propósito	Elemento microligante	Mecanismo	Parâmetro microestrutural	Propriedades
Microestrutura	Nb	Endurecimento	-Tamanho de grão; -Tamanho e forma das partículas; -Estrutura da matriz; -Densidade de Discordâncias; -Textura	Resistência
	Ti	Recristalização		Tenacidade
	V	Precipitação		Forjabilidade
	B	Transformação $\gamma \rightarrow \alpha$		Soldabilidade
Elementos fragilizantes	Ti	- Evita a segregação de impurezas fragilizantes (N, S, P) devido à formação de compostos	-Precipitados	-Resistência ao envelhecimento;
	Zr			-Forjabilidade a frio;
	B		-Inclusões	- Resistência à propagação de trincas.

2.4.3-Propriedades mecânicas

Um aço para ser classificado como aço de ultra-alta resistência tem que apresentar um limite mínimo de resistência ao escoamento de 1380 MPa, limite este conseguido através de tratamento térmico e/ou mecânico (Tokimatsu, 1995). Para um melhor entendimento das propriedades mecânicas do aço 300M, estas foram divididas nos seguintes tópicos:

- a) Usinabilidade;
- b) Limite de resistência à tração;
- c) Soldabilidade;
- d) Limite de escoamento;
- e) Dureza;
- f) Resistência à propagação de trincas ou tenacidade a fratura;
- g) Resistência ao amolecimento a altas temperaturas;
- h) Resistência a corrosão e o problema da descarbonetação.

a) Usinabilidade

O aço 300M é caracterizado como um material de boa usinabilidade, devido principalmente à esferoidização da cementita (torna-se globular), que é obtida na normalização ou em um tratamento térmico para este fim. É um processo minucioso, pois além dessa excelente propriedade a esferoidização propicia ao material uma resistência à propagação de trincas, ou seja, deixa o material mais dúctil/tenaz. Deve-se ter muito cuidado ao executar tal processo, pois essa tenacidade é acompanhada com uma expressiva redução da dureza e na maioria das aplicações do aço 300M não é admissível substancial queda de dureza (Souza, 1989; ASM, 1978).

b) Limite de resistência à tração (LRT)

Atualmente o aço 300M atinge LRT próximos de 2940 MPa. Para se ter uma idéia da grandeza deste valor, os aços carbonos convencionais tem um LRT máximo na faixa de 690 MPa. O alto valor de resistência à tração do aço se deve a seus constituintes e principalmente ao tratamento térmico de revenimento, onde a estrutura martensítica é inteiramente revenida com temperaturas superiores a 450 °C. Porém com isso se perdia resistência ao choque, decaindo a taxa de estrição e alongamento (baixíssima tenacidade).

No caso específico do aço 300M isso não ocorre, pois com a adição de elementos de ligas, em especial o silício, molibdênio e vanádio permite-se a têmpera e o revenimento em temperaturas muito mais baixas (205 a 315 °C). Com isso o material é favorecido com propriedades simultâneas, que até então eram impossíveis de se obter em aços, como alta resistência à tração e resistência ao choque (dureza e tenacidade), conforme Chiaverini (1990).

c) Soldabilidade

Ao mesmo tempo em que vários autores destacam a boa soldabilidade do aço 300M, eles também alertam para evitar o quanto for possível o uso de solda nesse aço. Essa advertência é explicada pelo fato desse material possuir uma microestrutura refinada e uma composição química com tolerância muito restrita, além de ser endurecido. Deste modo qualquer acréscimo de calor provocará uma alteração desta microestrutura ou até mesmo modificação da composição química, pois sabemos que em altas temperaturas a afinidade dos elementos químicos aumentam, com isso constituintes do aço 300M podem reagir entre si ou com outros elementos encontrados no ambiente. Um outro agravante para utilização de solda neste aço é a fragilização por hidrogênio, que em quase todos tipos de soldagem é problema, mas neste caso específico é amplificada devido o elevado nível das propriedades mecânicas exigidas e as severas condições de trabalho que lhe são aplicadas, onde não é permitida em hipótese nenhuma, falhas. O acréscimo de níquel em baixas proporções (até 5,5%) melhora a soldabilidade dos aços em geral. Se for inevitável realizar soldagem no aço 300M com metal de adição, é imprescindível que este tenha a mesma composição química do metal de base e que seja utilizado um processo adequado. Após a soldagem quando possível realizar os devidos tratamentos térmicos para recuperar as propriedades na zona termicamente afetada (ASM, 1978).

d) Limite de escoamento

O maior problema na concepção de uma material como este é conseguir aliar todas propriedades já citadas com alongamento, estrição e um limite de escoamento favorável, já que se trata de um aço de ultra-alta resistência. Conseguem-se essa combinação graças a condições explicadas anteriormente e também com o acréscimo de certos elementos, como silício, níquel, cromo e molibdênio. O silício é o principal elemento, porque ele inibe o crescimento de carbonetos e a formação de cementita, dessa maneira não causando a fragilização e aliviando as tensões causadas pela têmpera, propiciando tenacidade ao aço (Souza, 1989).

e) Dureza

Neste trabalho afirmou-se que o aço 300M é um aço endurecido, pois sua dureza é igual ou superior a 45 HRC. Essa afirmação não é muito correta, pois em alguns casos específicos a dureza é inferior a 45 HRC, perdendo assim a denominação de aço endurecido. Dentre os elementos de liga mais importantes para propiciar o seu endurecimento estão o níquel, o cromo e o molibdênio (baixos teores). Os processos de tratamento térmico (têmpera), juntamente com os elementos microligantes, asseguram ao aço 300M uma dureza que oscila de 40 a 60 HRC. (Tokimatsu, 1995; Souza, 1989).

f) Resistência à propagação de trincas ou tenacidade à fratura

Quando se almeja resistência a tração muito alta em um aço corre-se o risco de se perder tenacidade, e a fratura se torna muito susceptível, principalmente se a peça possuir regiões ou reentrâncias favoráveis a isto. Este problema é agravado quando o material é submetido a baixas temperaturas. No caso do aço 300M não era muito diferente, porém nos últimos anos com o aprimoramento dos conceitos metalúrgicos: desenvolvimento de instrumentos de alta resolução, capazes de analisar composições químicas e aspectos microestruturais e também o desenvolvimento da “Teoria da Mecânica da Fratura”, conseguiu-se relacionar microestrutura com tenacidade à fratura do material. Com esse desenvolvimento conceitual e tecnológico, foi possível saber a influência dos microconstituintes (traços de impurezas, bainita, martensita, austenita retida, partículas de segunda fase e outros), juntamente com a composição química, sobre todas as propriedades mecânicas em especial a tenacidade à fratura. Trazendo não só para o 300M, mas para muitas outras categorias de aços especiais, propriedades antes específicas de materiais nobres como fibras de carbono, ligas de titânio e outras. A figura 2.1 a seguir mostra a curva esquemática da relação inversa entre tenacidade à fratura e resistência à tração, onde a curva contínua apresenta a relação antes da aplicação dos quesitos citados anteriormente e a curva tracejada a relação já com o uso das novas técnicas. (Tokimatsu, 1995).

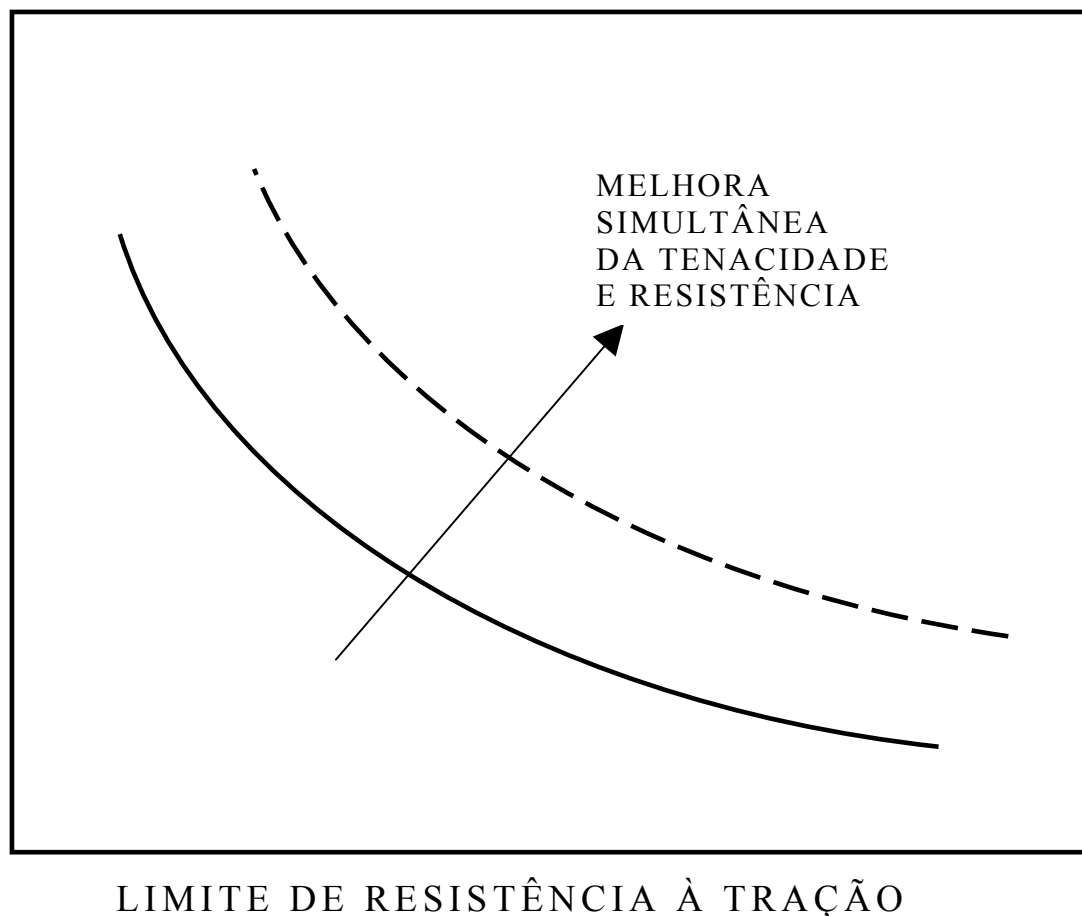


Figura 2.1 - Relação inversa entre tenacidade à fratura e resistência à tração.

Também é observado a indissolubilidade de precipitantes nas sub-microestruturas durante a austenitização, que também propicia a fratura ou queda do valor a tenacidade à fratura.(Youngblood, et al., 1977).

g) Resistência ao amolecimento a altas temperaturas

É uma particularidade do aço 300M, devido ao acréscimo de molibdênio (~ 2 %) e vanádio (~ 0,05 %) e de um tratamento térmico apropriado. Com isso ele suporta altas temperaturas, na faixa de 480 a 540 °C, mantendo praticamente os mesmos valores de resistência mecânica. É a principal característica observada pela indústria bélica na escolha do aço 300M na construção de tubos de mísseis e projeteis.(Chiaverini, 1990).

h) Resistência à corrosão e o problema da descarbonetação

Finalizando este capítulo serão abordadas agora duas propriedades, que são tidas como secundárias: a primeira é benéfica, trata-se da boa resistência à corrosão que o 300M possui, que embora não seja objetivada em primeira instância, também é muito importante para suas aplicabilidades. Isso se deve principalmente aos elementos de liga cromo e níquel. A segunda é a descarbonetação, maléfica. Durante os tratamentos térmicos em que o aço 300M é submetido acontece a formação de carbonetos na superfície do aço, causados pelo acréscimo de silício e molibdênio. Para evitar a descarbonetação basta tomar alguns cuidados durante os tratamentos térmicos. Ou se preferir, fazer a remoção desta camada descarbonetada após o término do processo (ASM, 1978).

A tabela 2.3 apresenta alguns valores de algumas propriedades dos aços 300M, para diferentes tratamentos térmicos. Nota-se alguns valores de limite de escoamento a tração abaixo de 1380 MPa, o que é explicado pelo fato desta tabela ser obtida de um trabalho experimental de pesquisa e não do aço 300M comercialmente utilizado.

Tabela 2.3 – Variação de valores de propriedades mecânicas em função de tratamentos térmicos (Tokimatsu, 1995).

	Temp. de revenido °C	Dureza (HRC)	LRT (MPa)	LET (MPa)	Estricção (%)	CTODc (µm)	K _{1c} (MPa)	Coef. Enchr.
-AUST. (870 °C)	C.T.	58,7	2320	1460	16,0	3,27	33	0,33
	200	54,9	2085	1605	32,0	7,71	65	0,20
	330	52,4	1910	1615	39,0	7,92	67	0,15
-Resf. (Óleo)	430	44,8	1610	1360	35,0	9,46	65	0,11
	550	42,8	1445	1325	45,0	21,25	95	0,07
-AUST. (1100 °C)	C.T.	59,1	2285	1445	8,0	4,92	47	0,32
	200	55,9	2110	1650	15,0	11,72	82	0,19
	330	54,4	2010	1690	17,0	11,93	80	0,14
-Resf. (Óleo)	430	50,3	1720	1455	12,0	6,38	59	0,13
	550	47,0	1570	1435	23,0	13,49	68	0,06
-AUST. (1100 °C)	C.T.	56,4	2180	1300	9,0	5,81	50	0,33
	200	53,8	2030	1530	17,0	13,99	87	0,20
	330	53,3	1945	1590	20,0	13,62	86	0,14
-Resf. (Ar)	430	48,6	1730	1330	12,0	6,58	60	0,12
	550	41,9	1345	1215	30,0	17,02	75	0,07

CAPÍTULO 3

TORNEAMENTO DE AÇOS ENDURECIDOS

3.1-Introdução

Atualmente, usinagem de aços endurecidos é um tema extremamente estudado, tal interesse em se pesquisar os fenômenos que regem a usinagem de aços endurecidos está sendo impulsionado pelas revoluções tecnológicas e principalmente pela necessidade da indústria de se adequar a um novo contexto, a tão falada globalização, onde é preciso diminuir tempos de produção, aumentar a qualidade e cortar custos. Esse processo de usinagem em aços endurecidos tem sido possível graças ao desenvolvimento de materiais de ferramentas como a cerâmica e o nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN), com excelentes propriedades, em especial a resistência ao desgaste a altas temperaturas e alta dureza. Outro aspecto também muito importante para esse processo de usinagem é o desenvolvimento de máquinas-ferramentas muito rígidas com potências elevadas, altíssimas rotações e excelente precisão. Neste capítulo será apresentada uma revisão da literatura sobre os materiais, geometrias e desgastes de ferramentas de corte, formação do cavaco, forças de corte e todas outras peculiaridades que regem o processo de torneamento de aços endurecidos.

3.2-Ferramentas de corte usadas no torneamento de aços endurecidos

As ferramentas de corte utilizadas no torneamento de aços endurecidos devem possuir algumas propriedades especiais a mais do que as ferramentas de corte convencionais, como a de metal duro e o aço rápido com ou sem cobertura, usadas para usinar aços dúcteis ou de dureza inferior a 50 HRC. Segundo König et al., citado por Matsumoto (1998), dentre essas propriedades especiais as mais importantes são:

- ⇒ alta dureza à temperatura ambiente e à quente (temperatura aproximada de 800 °C);
- ⇒ alta resistência à ruptura transversal (maior que 390 N/mm²);
- ⇒ alta tenacidade à fratura (k_{1c} maior que 5 MPa .m^{1/2});
- ⇒ alta resistência à compressão;
- ⇒ alta resistência ao choque térmico;
- ⇒ alta resistência a reações químicas.

Um outro material de ferramenta que possui uma dureza extremamente alta é o diamante policristalino (PCD), porém é um engano considerar o PCD um material adequado para usinar aços endurecidos, pois devido ao elevado teor de carbono o PCD tem uma afinidade natural com o ferro contido no aço. Além disso a temperatura limitante para sua utilização é 700 °C, temperatura esta facilmente ultrapassada em torneamento de aços endurecidos, o que provocaria a queima deste material de corte de PCD (Daumen, 2001). A tabela 3.1 apresenta uma comparação entre o PCD e nitreto cúbico de boro policristalino (PCBN). Com isso os materiais indicados para o torneamento de aços endurecidos são os materiais cerâmicos e o PCBN, que serão vistos a seguir.

Tabela 3.1 – Propriedades das ferramentas de corte de PCD e PCBN (Daumen, 2001).

	Dureza (HV)	Limite de tratamento térmico (°C)	Resistência à compressão (MPa)
PCD	8000 a 11000	700	200 a 808
PCBN	7000 a 8000	1400	2000 a 3000

3.2.1-Materiais cerâmicos

Em se tratando de material de ferramenta para usinagem a cerâmica é citada na literatura desde a década de 50, mas só começou a ocupar uma considerável fatia no mercado em meados da década de 80, devido ao melhoramento de suas propriedades e desenvolvimentos de novos compostos cerâmicos (Diniz¹, et al., 2002). As ferramentas de corte de material cerâmico são divididas em 2 grupos e 5 subgrupos, os quais estão descritos na figura 3.1.

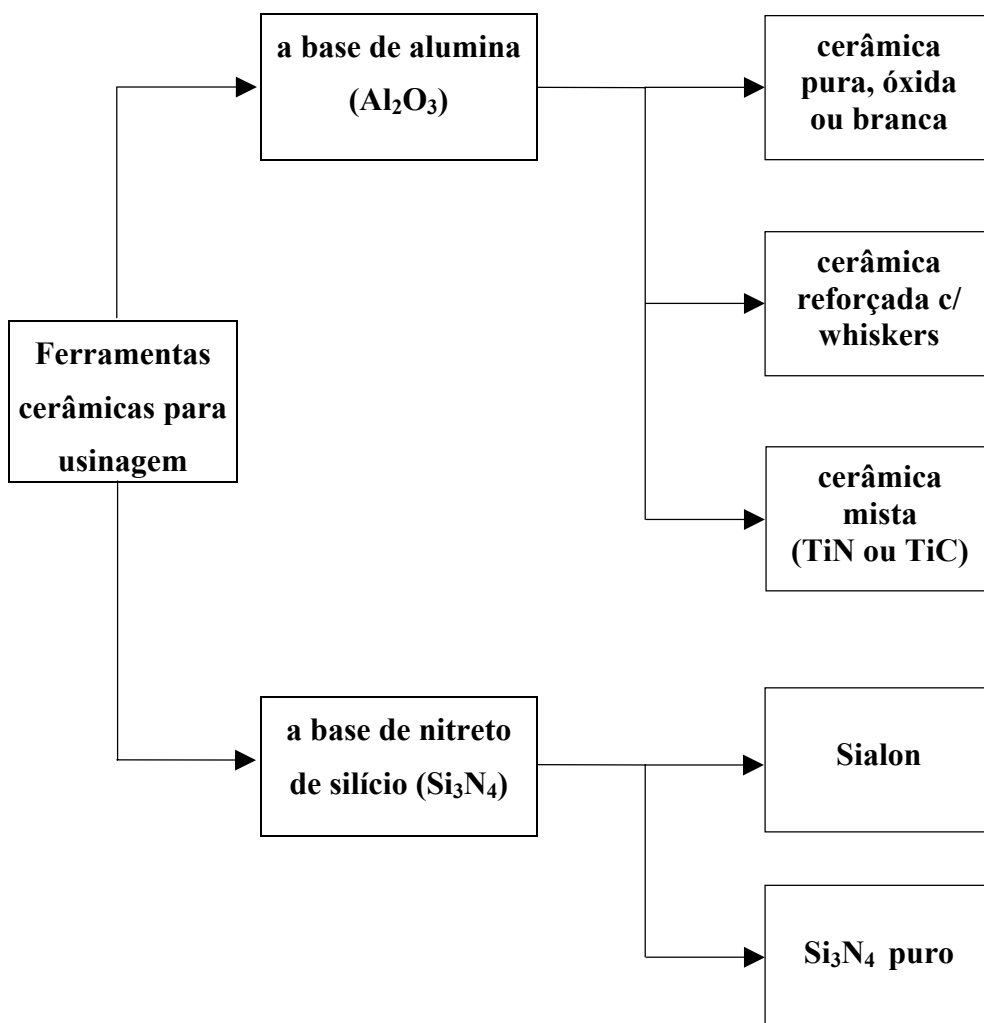


Figura 3.1-Classes dos materiais cerâmicos usados para produção de ferramentas (NN,2000-01).

a-Ferramentas de materiais cerâmicos a base de alumina (Al_2O_3)

a.1-Cerâmica pura, óxida ou branca

Segundo vários autores, como Jack (1986), os compostos alumina-zircônia ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$) surgiram por volta de 1980, com o objetivo de aumentar a aplicabilidade de ferramentas de corte de material cerâmico na usinagem de aços. A quantidade de partículas de zircônia tetragonal dispersa na matriz de alumina varia de 10 a 40%. A função do zircônia é agregar mais tenacidade ao composto, é apropriado para usinagem de acabamento em aços e ferros fundidos com altas velocidades de corte (~900 m/min) os compostos com baixo teor de zircônia, podendo os compostos com auto teor de zircônia também serem usados em desbastes (NN, 2000-01).

a.2-Cerâmica reforçada com whiskers

Neste material cerâmico a alumina é reforçada com cilindros monocristalinos de carboneto de silício (SiC) “os whiskers”, formando assim os compostos $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$ que possuem maior tenacidade à fratura e uma alta resistência ao choque térmico. O teor de whiskers no composto varia de 20 a 40%, compostos esses que apresentam uma coloração verde claro (Billman, et al., 1988). Segundo Abrão et al (1996), as ferramentas de alumina reforçadas com whiskers são indicadas para usinagem de superligas a base de níquel e cobalto, aços temperados e ferros fundidos endurecidos (com dureza superior a 45 HRC) em altas velocidades de corte (na faixa de 500 m/min.). De acordo com autores a usinagem de aços com dureza inferior a 45 HRC com estas ferramentas ocasiona uma alta taxa de desgaste de cratera, devido principalmente à afinidade química das fibras de SiC e os aços.

a.3-Cerâmica mista

Essa classe fundamenta-se em uma matriz de alumina com uma segunda fase dispersa, fase essa formada por carboneto de titânio com um teor em volume que varia de 25 a 40% ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$), comumente conhecida como cerâmica preta. Por volta de 1983 surgiu uma nova composição com um teor de aproximadamente 23% em peso de nitreto de titânio (TiN) mais (TiC), disperso na matriz de alumina. Esse novo composto possui propriedades químicas e mecânicas superiores as demais classes cerâmicas, em destaque para a maior resistência à ruptura transversal, dureza e condutividade térmica. Apresenta-

se com uma coloração marrom escuro (Brisksmeir e Bartsch, 1988). O combinado TiC e TiN na matriz de alumina reduz o risco de quebra súbita da ferramenta de corte, possibilitando assim o emprego de altas velocidades de corte (Gruss, 1988). Entre os benefícios e malefícios da adição do combinado TiC e TiN na matriz de alumina, destaque para a boa condução térmica, a maior resistência ao desgaste de flanco e o aumento do desgaste de cratera, este último devido pela alta solubilidade de carbonetos no cavaco, contrabalançado pelo aumento da resistência ao choque térmico e mecânico (Brandt, 1986). Por esses e outros aspectos a cerâmica mista é o material cerâmico mais estudado e utilizado na usinagem de aços endurecidos atualmente.

b-Ferramentas de materiais Cerâmicos a base nitreto de silício (Si_3N_4)

b.1-Cerâmica a base de nitreto de silício (Si_3N_4) puro

Isolados e caracterizados por volta de 1884, os nitretos só despertaram interesse após 1955, quando o nitreto de silício (Si_3N_4) teve suas propriedades térmicas, químicas e mecânicas notadas. Existem duas características básicas que distinguem cerâmicas a base de nitretos daquelas a base de óxidos:

- a primeira é que a matéria prima dos nitretos requerem um processamento termoquímico complexo e, portanto tem um custo maior;
- a segunda é que os nitretos são materiais covalentes, já a maioria dos óxidos são iônicos, devido a isso seu comportamento é determinado por ligações rígidas e direcionais, conferindo ao material elevada dureza e rigidez, mesmo em altas temperaturas. (Matsumoto, 1998; Hepworth, 1991). Possui excelente tenacidade, por isso ferramentas de corte de nitreto de silício puro (Si_3N_4) são recomendadas para desbaste e semi-acabamento de ferros fundidos (NN, 2000-01).

b.2-Sialon

O sialon é uma solução sólida de nitreto de silício, alumínio e oxigênio, esse composto apresenta algumas vantagens em relação às propriedades físicas, químicas e mecânicas do nitreto de silício convencional (puro), segundo Jawaid, et al. (1981). Dentre essas vantagens destacam-se:

- ⇒ menor custo;
- ⇒ maior resistência à oxidação;
- ⇒ maior resistência às reações químicas;
- ⇒ maior resistência à abrasão;
- ⇒ mais fácil de ser produzido.

Devido a sua dureza a quente, resistência ao choque térmico e boa tenacidade o sialon é indicado principalmente para desbastes leves em ferros fundidos, o que também se explica pelo fato de que na usinagem de ferro fundido, não é exigida boa estabilidade química (propriedade que esse composto não tem) devido o cavaco formado não provocar difusão na superfície de saída da ferramenta (Costa, 1993).

c-Processo de produção das ferramentas cerâmicas

Para uma mesma composição química as ferramentas cerâmicas diferem entre si pelo processo de produção e conseqüentemente pelas suas propriedades. O processo de produção varia conforme a composição química e objetivos a serem atendidos. Atualmente são produzidas por sinterização convencional, prensagem a quente e prensagem isostática a quente (Costa, 1993). A cerâmica é um produto da metalurgia do pó, que vem a cada ano caminhando a passos largos em novos compostos e processos produtivos, para produção de ferramentas de usinagem com excelência em suas propriedades. Esse assunto não será mais detalhado por não ser enfoque deste trabalho.

d-Propriedades das ferramentas cerâmicas

Neste tópico serão mostradas peculiaridades já pesquisadas e comprovadas sobre as propriedades das ferramentas cerâmicas, tais como dureza, estabilidade química, resistência ao choque térmico e resistência mecânica. Logo abaixo é apresentado na tabela 3.2 uma comparação entre algumas propriedades dos materiais cerâmicos e do metal duro citado por dezenas de estudiosos no assunto, onde essas propriedades recebem uma classificação de 1 (péssima) a 5 (excelente), valores absolutos.

Tabela 3.2–Propriedades relativas dos materiais cerâmicos comparados com o metal duro (Diniz, et al, 2002).

	Tenacidade	Dureza a quente	Resistência ao choque térmico	Estabilidade química (Fe)	Estabilidade química (Ni)
Cerâmica pura	2	2	1	5	5
Cerâmica mista	1	3	2	4	4
Cerâmica c/ whiskers	4	3	3	2	3
Sialon	3	5	4	1	2
Metal duro	5	1	5	3	1

d.1-Dureza

Das ferramentas cerâmicas mencionadas anteriormente, as que apresentam maior dureza a temperatura ambiente, são as cerâmicas a base de alumina reforçada com whiskers (2000 HV) e a cerâmica mista (2200 HV) (Baltoni e Buljan, 1988). Em estudos realizados sobre a dureza de materiais, Nakayama, et al. (1988) afirmam que a dureza a frio da aresta de corte de uma ferramenta de corte deve ser três vezes maior que a dureza da peça que será usinada. A figura 3.2 mostra o valor da dureza em função da temperatura para diversos materiais. Nota-se que a dureza varia em função da temperatura em níveis diferentes para cada material mostrado, por exemplo se comparar à dureza do metal duro e do Sialon 2, observamos que a 0 °C eles têm o mesmo grau de dureza, mas à medida que se eleva a temperatura a queda da dureza do metal duro é muito maior que a do Sialon 2. Agora, ao se fazer a mesma observação para $Al_2O_3 + TiC$ e Sialon 1 nota-se o efeito contrário, pois a dureza da classe $Al_2O_3 + TiC$ a 0 °C é bem superior a dureza da classe Sialon 1, o que se inverte à medida que se eleva a temperatura. Essa propriedade denomina-se dureza a quente, tão importante na usinagem de aços endurecidos devido às altas temperaturas alcançadas na interface ferramenta-peça/cavaco-ferramenta (~ 1200 °C).

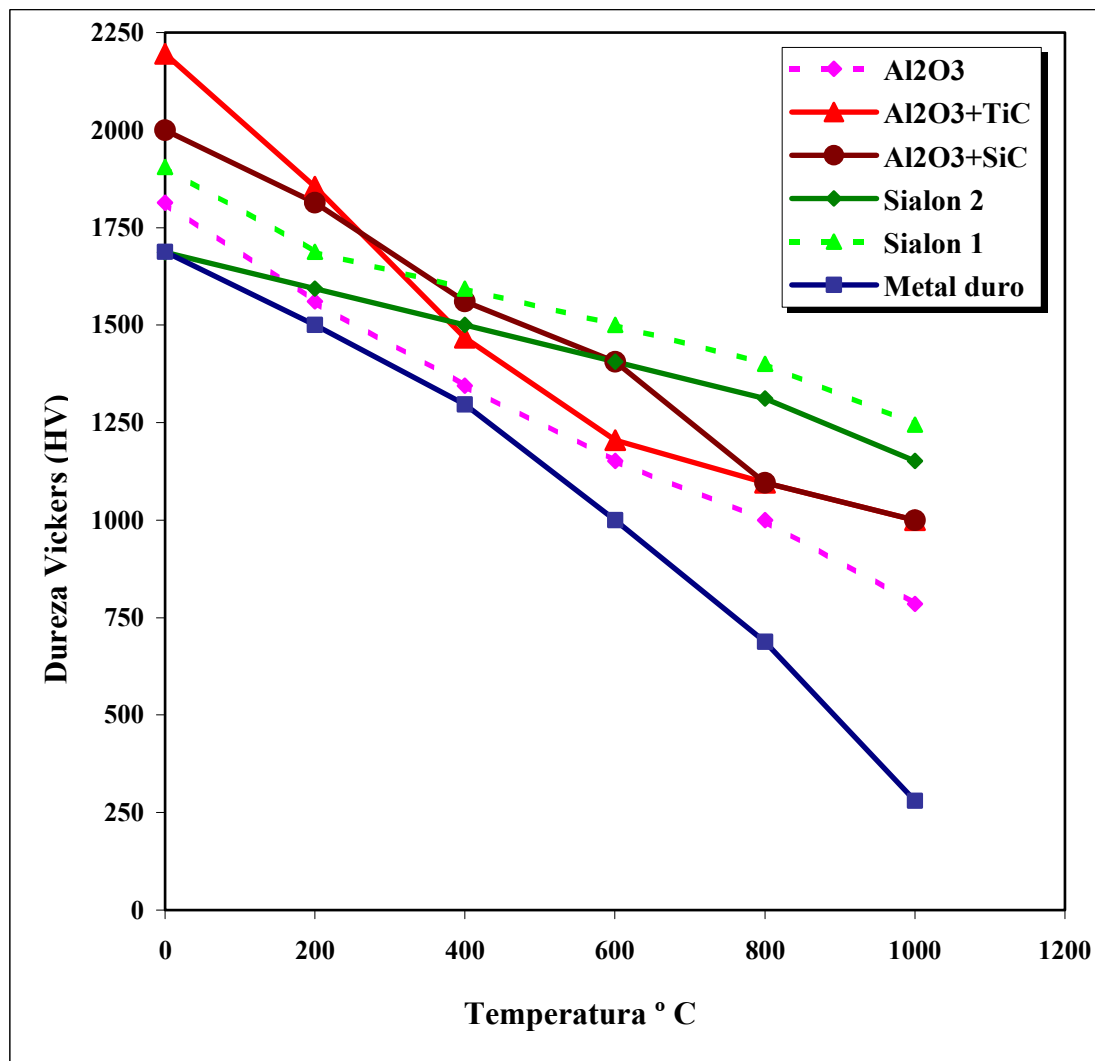


Figura 3.2 - Variação da dureza em função da temperatura de diversas classes cerâmicas e do metal duro (Komanduri e Samanta, 1989).

d.2-Estabilidade química

Dentre todas classes cerâmicas a de maior estabilidade química e resistente à corrosão é a alumina pura (Al_2O_3), isto se explica pelo fato da alumina ser inerte quimicamente devido a sua alta negatividade do nível de energia livre. O que em altas temperaturas é importante para evitar ou diminuir os mecanismos de desgastes de difusão e/ou dissolução química, e em baixa temperatura abrasão. Já as classes mais reativas são as reforçadas com whiskers ($\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$) e a base de nitrato de silício (Si_3N_4). Uma observação importante que se deve analisar é o fato da classe alumina ter baixíssima tenacidade, dureza a quente e resistência ao choque térmico, por isso é indicada para usinagem de acabamento em aços endurecidos e ferros fundidos onde ocorrem altas

temperaturas e conseqüentemente tendência ao desgaste por difusão. Dependendo da operação a ser executada deve-se procurar uma classe que tenha níveis de propriedades intermediários, objetivando uma maior eficácia do processo (Teixeira Filho, 2000).

d.3-Resistência ao choque térmico

A classe mais resistente ao choque térmico é o grupo a base de nitreto de silício (Si_3N_4). A cerâmica mista [$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Ti (N,C)}$] também possui uma boa resistência ao choque térmico. Essa propriedade está diretamente relacionado com o coeficiente de expansão e a condutividade térmica; portanto quanto maior a condutividade térmica e menor o coeficiente de expansão térmico, maior será a resistência ao choque térmico. Para operações adversas como fresamento, corte interrompido e uso ininterrupto de fluido refrigerante é indicado o uso da classe a base de nitreto de silício (Si_3N_4), conforme Ezugwu e Wallbank, (1987).

d.4-Resistência mecânica

Em geral as ferramentas cerâmicas tem reduzida resistência ao choque mecânico e quase sempre falham por fratura frágil. Isso ocorre pelo fato das cerâmicas apresentarem uma reduzida deformação plástica antes da ruptura (ruptura devido à propagação de trincas a altas tensões) e baixa resistência à tração. Porém, as cerâmicas possuem uma alta resistência à compressão. Por este motivo e para atenuar os efeitos desfavoráveis da falta de resistência ao choque mecânico das ferramentas cerâmicas, que se recomenda ferramentas com o ângulo de saída negativo (Matsumoto, 1998) e que a aresta de corte possua um chanfro cuja dimensão varia de 0,05 a 0,3 mm, com ângulos entre 20° e 30° (esse ângulo do chanfro não deve ser muito grande para não aumentar os esforços de corte), segundo Diniz, et. al. (2002).

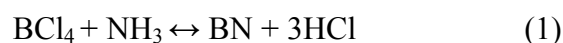
e-Aplicabilidade dos materiais cerâmicos nos processos de usinagem

Basicamente, como já citado as ferramentas cerâmicas são utilizadas na usinagem de ferros fundidos, de aços endurecidos e de ligas de titânio e níquel resistentes ao calor. As aplicações citadas a seguir, são as mais indicadas pelos fabricantes e alguns autores, porém nada impede que os materiais em questão sejam usados para outras aplicações, conforme testes já realizados por alguns estudiosos no assunto.

- É na usinagem de ferro fundido onde se concentra a utilização de todas classes de ferramentas cerâmicas, sendo as cerâmicas puras usadas para usinar ferros fundidos de boa qualidade e pré-usinados (acabamento) devidos às propriedades já mencionadas desta classe. Em seguida vem as demais classes óxidas que além da operação de acabamento também pode ser usada na operação de semi-acabamento. Posteriormente as cerâmicas mistas são indicadas para situações em que há variação térmica, que ocorre em situações de desbaste, fresamento, corte interrompido, etc.;
- Em geral a cerâmica mista, pura e reforçada com whiskers são utilizadas na usinagem de aços endurecidos. Quanto maior a dureza e/ou velocidade de corte maior serão as tensões térmicas e o efeito conjunto do aumento de temperatura e dos esforços de corte, o que provoca o desgaste por abrasão ou difusão. A classe que melhor resiste a esta situação é a cerâmica mista;
- Já na usinagem de ligas de titânio, níquel e ligas resistentes ao calor, as classes mais indicadas são em primeira escolha as cerâmicas a base de nitreto de silício e em segunda escolha cerâmicas reforçadas com whiskers. Essa escolha é explicada devido ao fato de que nesse tipo de usinagem ocorre um elevado desgaste de entalhe, que acontece entre o início e fim do contato cavaco-aresta de corte, portanto para se evitar tal nível de desgaste é necessário que o material da ferramenta a ser utilizado possua fraca adesão com o cavaco e boa microtenacidade, que é o caso das classes sugeridas (Diniz, et. al., 2002).

3.2.2-Nitreto de boro cúbico policristalino (PCBN)

As primeiras ferramentas de PCBN comerciais surgiram por volta de 1972, porém a forma cúbica do nitreto de boro “BN” (o BN se apresenta com estrutura cúbica diamante ou hexagonal grafite) foi produzida pela primeira vez em 1957 por pesquisadores da General Electric. As cerâmicas a base de nitrogênio possuem regiões imensas de homogeneidade, o que apresenta uma grande solução sólida (Sorrell e McCartney, 1986). O nitreto de boro cúbico (CBN) é um material sintético obtido pela seguinte reação química:



Através de um processo com pressões de 5000 a 9000 MPa, sob temperaturas de 1500 a 1900 °C e na presença de um catalisador que usualmente é o lítio, a estrutura hexagonal do composto BN é transformada em estrutura cúbica. Uma camada de 0,5 a 0,7 mm de espessura de partículas de nitreto cúbico de boro é sinterizada com a presença de uma fase ligante, fixando-se simultaneamente sobre uma base de metal duro, recebendo o

nome de plaquetas (blanks). Após esta etapa as plaquetas podem ser brasadas numa base de metal duro ou diretamente sobre um porta ferramenta de aço, mas também podem ser produzidas como ferramentas maciças o que eleva substancialmente o custo da ferramenta. Para a fabricação de ferramentas, o CBN é sintetizado sob pressões que oscilam de 4 a 13 GPa e temperaturas que variam da ambiente até 2000 °C (com ou sem catalisadores) (Abrão, et. al., 1995; Costa, 1993). Depois de sintetizados, os grãos de CBN são selecionados e sinterizados (em pressões de 5 a 7 GPa e temperaturas de 1500 a 1600 °C), resultando em uma grande massa policristalina (ferramentas de corte com geometria definida) o PCBN. Existem vários tipos de PCBNs no mercado, sendo que suas propriedades variam de acordo com o material usado, percentagem de aglomerantes (segunda fase), morfologia e distribuição das partículas. De um modo geral os PCBNs para usinagem são divididos em duas classes:

- ⇒ para desbaste;
- ⇒ para acabamento.

a-PCBNs para usinagem de desbaste

É caracterizado por ter uma altíssima concentração em volume de nitreto de boro cúbico. Devido a isso a tenacidade é aumentada pelo também aumento da ligação cristal com cristal e é possuidor da maior dureza dentre os PCBNs (o CBN é o segundo material existente mais duro). Com isso essa classe possui uma alta resistência ao mecanismo de desgaste de abrasão e aos esforços de corte, sendo indicada para condições adversas de usinagem (corte interrompido, fresamento, desbastes) em aços endurecidos e ferro fundidos cinzentos. É importante destacar que essa classe tem razoável estabilidade química e resistência ao choque térmico (Chou e Barash, 1995).

b-PCBNs para usinagem de acabamento

Distingue-se por ter adicionada uma fase cerâmica com o objetivo de melhorar a estabilidade química e térmica da classe descrita acima, porém isso provoca uma queda da dureza e da tenacidade da ferramenta. Essa combinação benéfica das propriedades pode ser explicada pelo fato da cerâmica possuir excelente resistência térmica e a reações químicas e o CBN ter alta dureza e tenacidade. Devida tal combinação de propriedades, essa classe é indicada para acabamentos de aços endurecidos e ferros fundidos, onde se trabalha com baixos avanços e profundidades de corte (gera altas temperaturas, devido à

pequena taxa de calor retirado pelo menor volume de cavaco) o que torna mais susceptível o desgaste por difusão (Chou e Barash, 1995).

c-Propriedades dos PCBNs

Dentre as propriedades das ferramentas de PCBN serão abordadas as principais, que são a dureza, tenacidade, resistência ao choque térmico e resistência a reações químicas.

c.1-Dureza

O que define o grau de dureza de uma ferramenta de PCBN em uma mesma faixa de temperatura é a percentagem em volume de CBN. A figura 3.3 apresenta a variação da dureza em função da percentagem em volume de CBN para uma carga de 1 kgf. A dureza a quente das ferramentas de PCBN é superior as ferramentas cerâmicas. A figura 3.4 mostra a variação da dureza (Vickers) em função da temperatura para os 5 materiais de maior dureza usados na produção de ferramentas para usinagem.

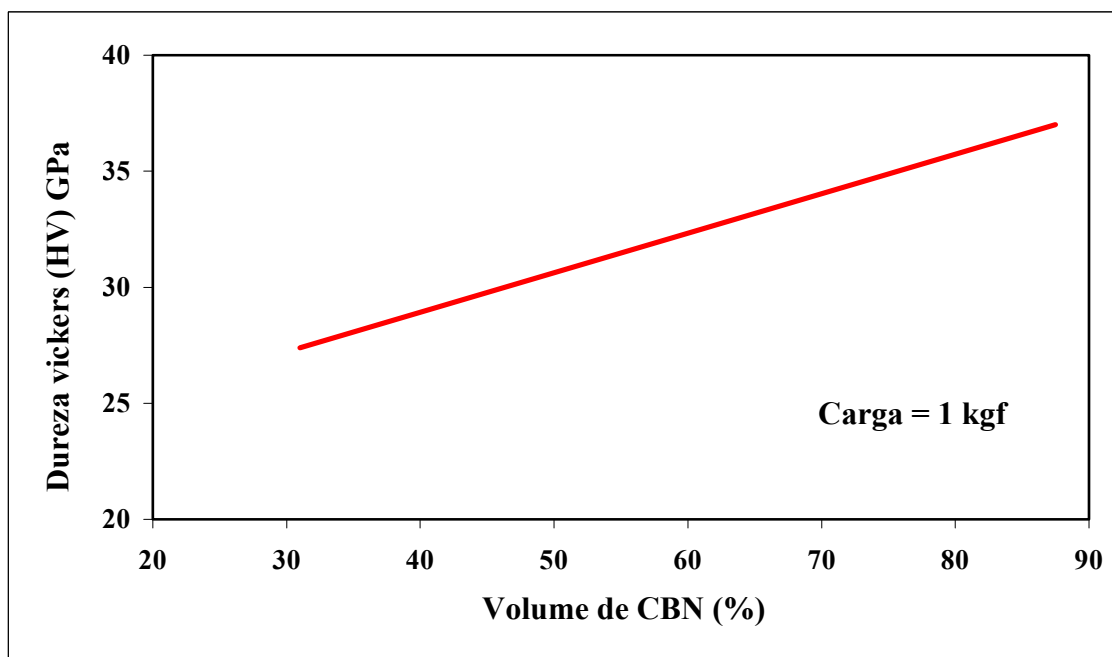


Figura 3.3 - Variação da dureza em função da percentagem de volume de CBN de ferramentas de PCBN (Wise, 1992).

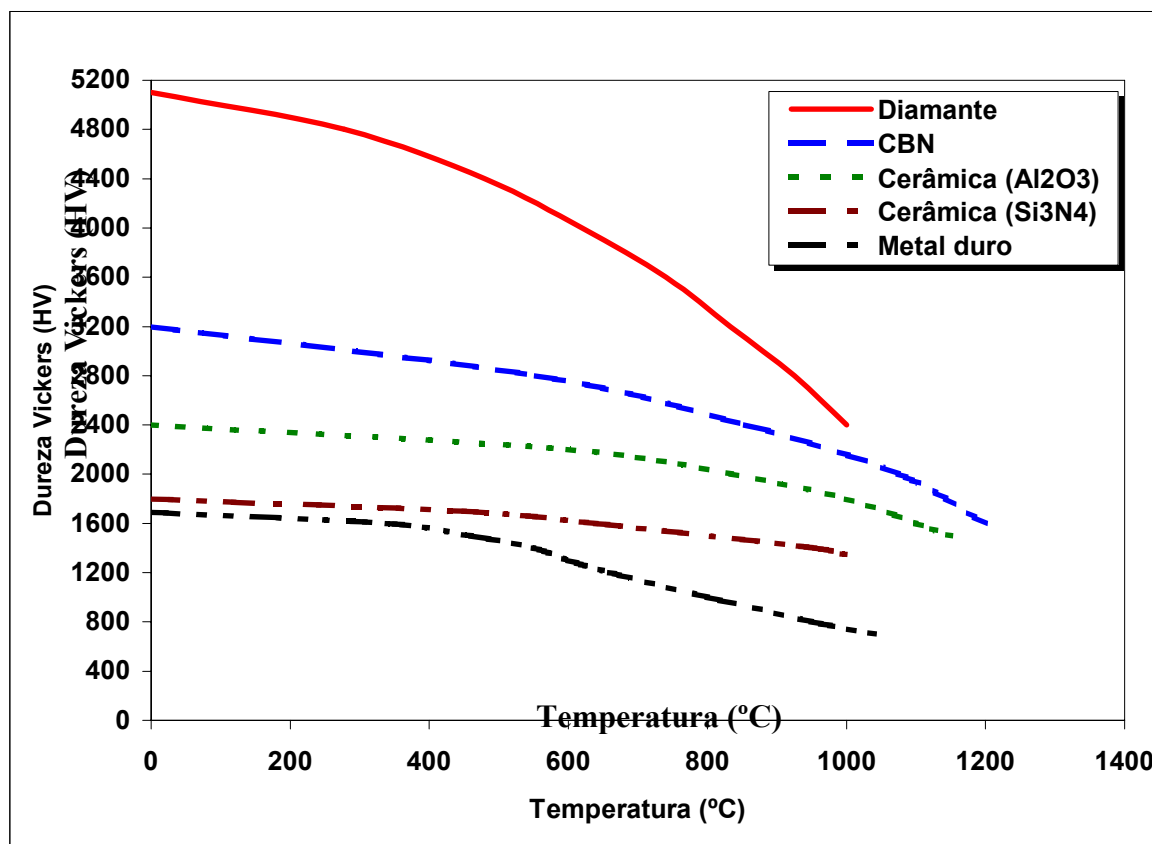


Figura 3.4 - Variação da dureza em função da temperatura para diversos materiais de ferramentas (Boehs, 1987).

c.2-Tenacidade

O PCBN possui uma combinação de propriedades bastante interessante, pois é o material de maior dureza após o diamante policristalino (PCD). Como já mencionado o que define o nível de dureza do PCBN é a percentagem em volume de CBN. Conseqüentemente, também possui alta resistência mecânica associada a uma boa tenacidade a fratura (superior as cerâmicas e próximo do metal duro). Esta combinação de propriedades tão difícil em ferramentas de corte é de fundamental importância tanto em temperatura ambiente quanto em altas temperaturas. Segundo alguns estudiosos a resistência a impactos nesta classe também é determinada pelas partículas de CBN e a trajetória da trinca é transgranular e não ao longo da fronteira partícula-partícula como em outras classes (Pipkin, et. al., 1987).

c.3-Resistência ao choque térmico

A classe de PCBN com maior resistência ao choque térmico é a classe com maior teor de CBN, devido à alta condutividade e expansão térmica do CBN. Já na classe com teores cerâmicos (TiC e TiN) adicionados como segunda fase, a queda da resistência ao choque térmico é inversamente proporcional, pois a condutividade térmica da cerâmica é bem inferior (aproximadamente 50%, segundo Matsumoto, 1998).

c.4-Estabilidade química

O diamante policristalino (PCD) tem propriedades mecânicas e térmicas bem superiores as do PCBN, porém é de nosso conhecimento que o PCD é altamente reativo com o ferro em altas temperaturas, que na usinagem moderna é inevitável atingir (cerca de 1000 °C). Já o PCBN é bem mais estável quimicamente (não reage com o ferro), o que se explica não só devido a seus elementos constituintes, mas também pelo fato do nitreto de boro presente no PCBN reagir com o oxigênio em altas temperaturas, formando assim o óxido de boro, que forma uma camada protetora dificultando posteriores reações (Teixeira Filho, 2000).

A tabela 3.3 mostra um apanhado geral das propriedades das ferramentas cerâmicas e de PCBN estudadas e apresentadas por diversos autores citados por Costa, (1993). Nesta tabela verifica-se que na usinagem de aços endurecidos a ferramenta de PCBN tem uma resistência muito maior ao desgaste abrasivo, trincas e quebras do que as ferramentas cerâmicas, isso se deve a sua alta tenacidade, dureza, condutividade e expansão térmica. Paralelamente, as ferramentas cerâmicas são bem mais superiores no que se refere à resistência ao mecanismo de desgaste difusivo, mecanismo esse que provoca o desgaste de cratera, o que se agrava pelo fato do aço endurecido apesar de ser duro não formar cavaco curto. As cerâmicas possuem essa propriedade devido a sua excelente estabilidade química.

Tabela 3.3 – Coletânea de propriedades das ferramentas cerâmicas e de PCBN (Costa, 1993).

	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{ZrO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiC}$	$\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{SiC}$	Sialon	PCBN
Densidade (g/cm^3)	3,9	4,2	3,7	3,2	3,1
Dureza HV (a 20 °C)	1700	1900	2000	1600	4500
Tenacidade ($\text{MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$)	5,0 a 8,0	3,5 a 4,5	4,5 a 8,0	4,5 a 6,0	10
Resist. à ruptura transv. (MPa)	700 a 900	600 a 850	550 a 750	700 a 900	----
Condut. térm. ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$)	8	12	32	23	100
Coef. de exp. térmica	8,5	8	----	3,2	5

d-Aplicabilidade dos PCBNs nos processos de usinagem

As ferramentas de PCBNs são utilizadas na usinagem de aços endurecidos (45 a 65 HRC) em boas ou más condições (corte interrompido ou não), aços ferramentas, aços rápidos, ligas ferrosas resistentes a altas temperaturas a base de cobalto, metais duros e revestimentos duros com altas percentagens de carboneto de tungstênio ou cromo-níquel. Usualmente é indicado para situações onde o PCD (falta de estabilidade química) e o metal duro (dureza insuficiente) não podem ser usados. Os PCBNs disputam mercado com os materiais cerâmicos nos processos de fresamento, torneamento e mandrilhamento (Teixeira Filho, 2000).

3.2.3- Características geométricas das ferramentas de corte

a-Ângulo de saída

A maioria dos trabalhos publicados sobre torneamento de aços endurecidos recomenda o uso de ângulo de saída negativo (valor que oscila de -5° a -7° , $\beta_0 = 90^\circ$) independentemente se a operação é de desbaste ou de acabamento. Segundo Matsumoto (1998), é aconselhável na medida do possível o uso de arestas de corte chanfradas (o chanfro mais empregado é $0,1 \text{ mm} \times 20^\circ$ a 45°), com o objetivo de direcionar os esforços de corte para o centro da ferramenta, reduzindo assim a possibilidade de quebra da aresta

de corte. Daumen (2001), em um estudo sobre ferramentas de PCBN, ao destacar a microgeometria (chanframento das arestas), cita a importância da rugosidade da ferramenta sobre a rugosidade da peça usinada e da vida da ferramenta. Constatou-se que devido à superfície espelhada, durante a usinagem aparecem menos pontos de ataque para microtrincas prematuras na aresta de corte. Dependendo do processo de acabamento consegue-se uma rugosidade superficial da ferramenta de 0,2 a 1,4 μm . A figura 3.5 mostra alguns dos chanfros das arestas de ferramentas de PCBN produzidas pela Mitsubishi Materials (versões standard).

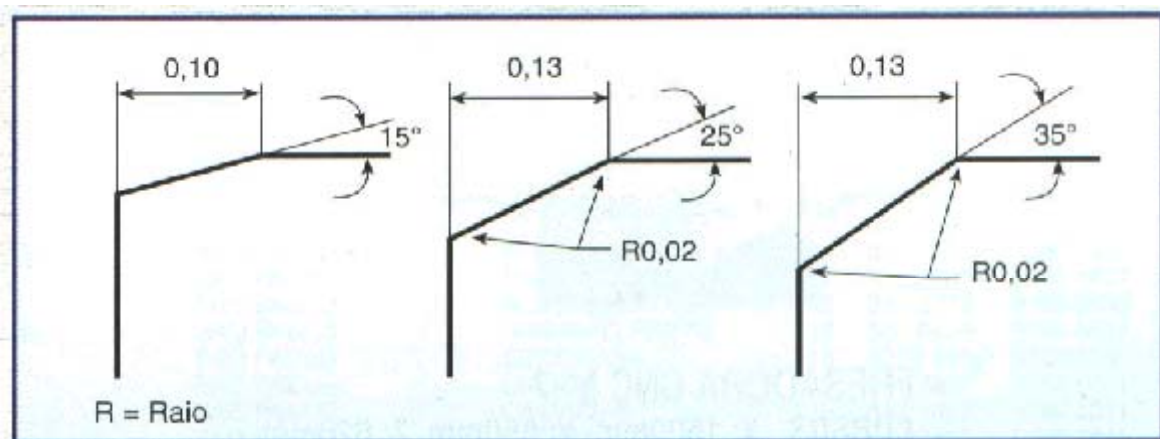


Figura 3.5 – Ferramentas de PCBN produzidas pela Mitsubishi Materials (Daumen, 2001).

b-Ângulo de folga

O ângulo de folga é muito importante quando o desgaste predominante da ferramenta de corte é o desgaste de flanco (VB_B), por isso ele deve ser razoavelmente grande para se evitar o atrito, porém não muito exagerado para não fragilizar a aresta de corte da ferramenta. (Ezugwu e Wallbank, 1987).

c-Ângulo de posição e de ponta

O que limita esta característica é a geometria da peça a ser usinada, mas segundo König et. al., (1990), sempre que possível deve-se usar ângulos de ponta grandes e ferramentas de forma quadrada ou redonda para tornar esta mais robusta. Comercialmente são encontradas ferramentas com ângulos de posição que variam de 45 a 107°.

d-Ângulo de inclinação

O ângulo de inclinação é uma característica fixa da ferramenta de corte, ou seja, pode-se fabricar ferramentas com ângulos de inclinação positivo ou negativo, porém quando montado no conjunto suporte-ferramenta, uma ferramenta que tem o ângulo positivo ou nulo pode passar a ter um ângulo negativo, o que se consegue devido as características geométricas do suporte e calços (exceto na usinagem de aços endurecidos).

e-Geometria alisadora (*Wiper*)

Esta geometria de ferramenta chegou ao mercado por volta de 1999, inicialmente desenvolvida pelo Centro de Desenvolvimento e Pesquisa da Sandvik na Suécia. É fundamentada na concordância de 3 círculos circunscritos na ponta da ferramenta, conforme mostrado na figura 3.6. Esta combinação de diferentes raios acrescenta a ferramenta o efeito alisador. Para uma mesma condição de corte pode-se melhorar duas vezes o acabamento superficial de uma peça usinada com ferramentas alisadoras em comparação com ferramentas comuns (raio de ponta convencional), ou ainda consegue-se manter o mesmo acabamento superficial após dobrar o avanço, quando se usar ferramentas alisadoras.

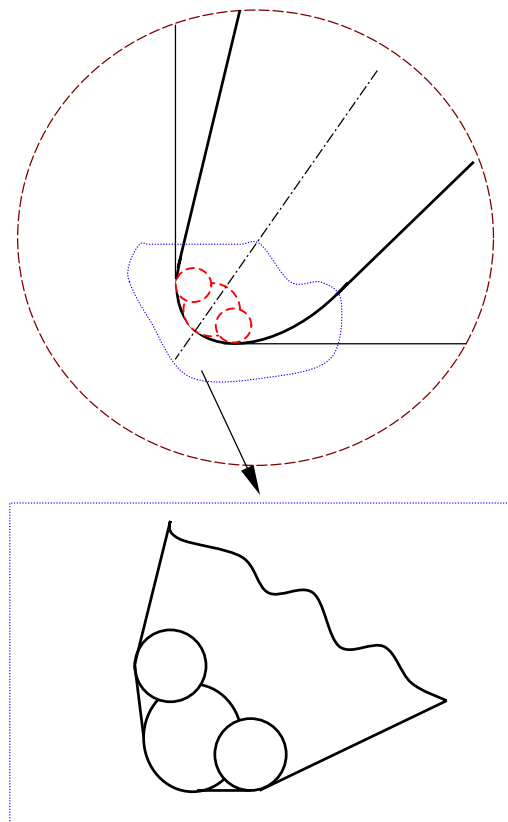


Figura 3.6 – Geometria do raio de ponta de uma ferramenta alisadora (NN, 2001-1).

A figura 3.7 ilustra tal explicação entre o avanço e a rugosidade superficial quando se usa ferramenta alisadora ou convencional (NN, 2001-1). A geometria alisadora aplicada nas classes cerâmicas e de PCBN, favorece ainda mais a substituição do processo de retificação em peças endurecidas (maior que 50 HRC) pelo processo de torneamento, pois possibilita atingir valores de R_a de até $0,3 \mu\text{m}$ (com perspectivas de valores menores) e excelente controle dimensional: com rapidez, economia, versatilidade e praticamente sem degradação do meio ambiente, pois não é necessário o uso de fluido de corte (Sandvik, 2001).

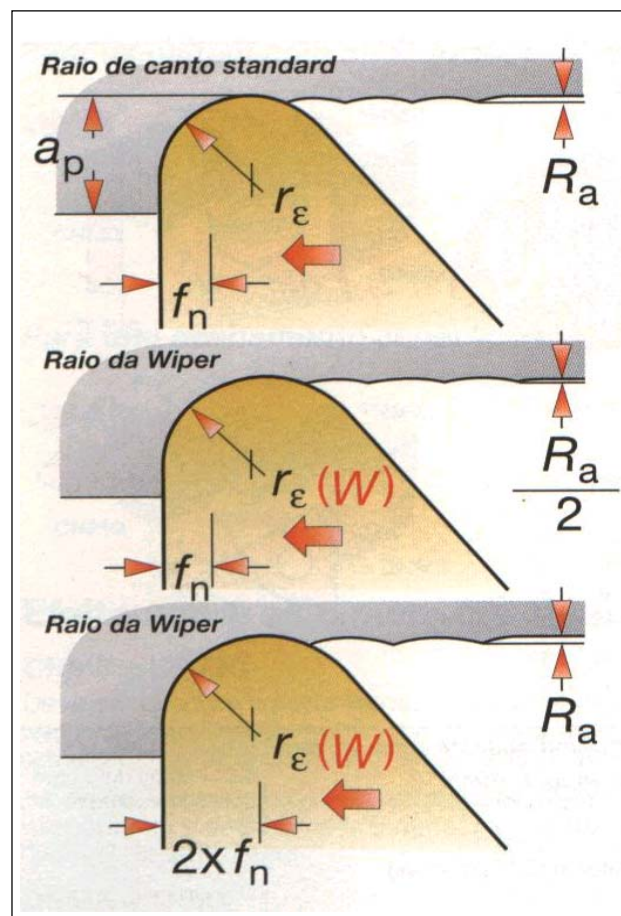


Figura 3.7 – Relação de avanço e rugosidade para ferramentas alisadora (*Wiper*) e convencionais (NN, 2000).

A geometria das ferramentas de corte alisadoras proporciona os seguintes benefícios:

- ⇒ Diminuição dos custos de usinagem, devido à ótima produtividade;
- ⇒ Pequeno ou nenhum acabamento superficial posterior, devido ao baixo nível de rugosidade conseguido;
- ⇒ Produção sem distúrbios (excelente controle dimensional);

A figura 3.8 mostra a variação da rugosidade em função do avanço para ferramentas *standard* e alisadora de diferentes geometrias e raio de ponta. Essa figura ilustra bem a afirmação já mencionada, que para um aumento de 100 % no avanço se reduz o tempo de usinagem pela metade e se mantém o mesmo acabamento superficial, quando se utiliza ferramenta com geometria alisadora.

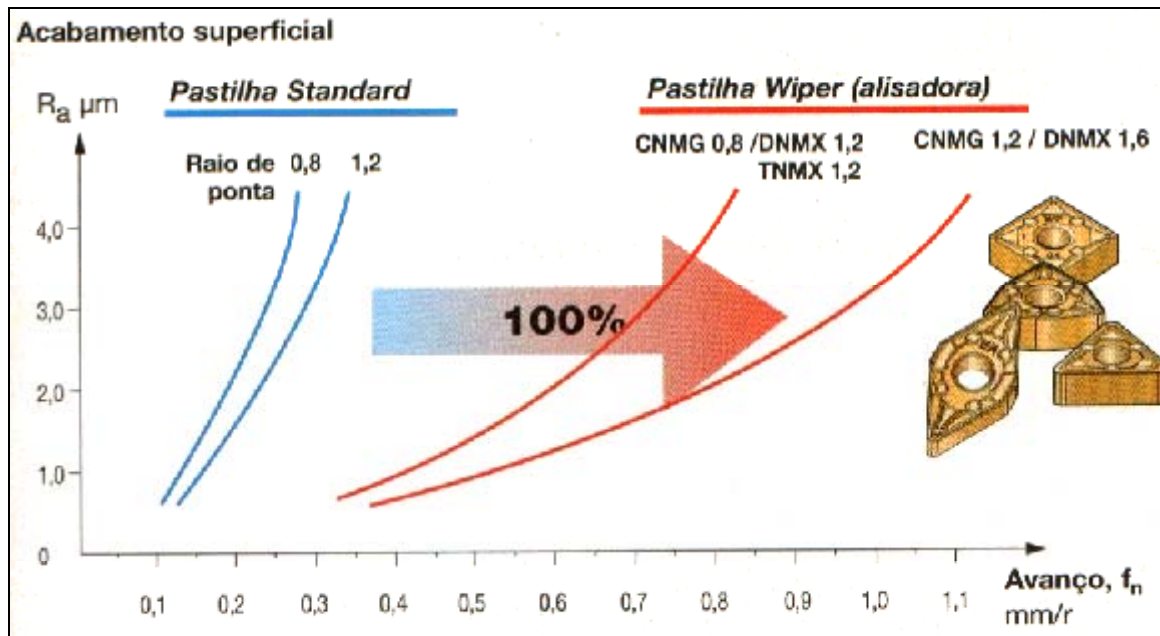


Figura 3.8 –Rugosidade versus avanço em geometrias alisadoras e convencionais (NN, 2001-1).

3.3-Parâmetros de Corte

Existe uma enorme proposição de parâmetros de corte para torneamento de aços endurecidos por diversos fabricantes e pesquisadores no assunto. No tópico adiante sobre desgaste e vida das ferramentas serão apresentados alguns desses parâmetros adotados em estudos por alguns autores como: Bas, 2001; Diniz e Matsumoto, 1999; Cupini. et al., 1993; Almeida e Abrão, 2001; entre outros. A tabela 3.4 apresenta alguns parâmetros de corte extraídos de catálogos de fabricantes de ferramentas, onde são analisadas condições de acabamento e desbaste para ferramentas de cerâmica e PCBN para usinar aço endurecido. Analisando esta tabela nota-se que as velocidades de corte aplicadas às ferramentas de PCBNs são ligeiramente maiores que às utilizadas para ferramentas cerâmicas.

Tabela 3.4 – Parâmetros de corte para torneamento com ferramentas cerâmicas e de PCBN (NN, 2001-1; NN, 2000).

	Cerâmica			PCBN		
	Velocidade (m/min.)	Avanço (mm/v)	Profundidade (mm)	Velocidade (m/min.)	Avanço (mm/v)	Profundidade (mm)
Acabamento	75-150	0,05 0,20	0,1-0,4	80-180	0,05 0,25	0,1-0,4
Desbaste	100	0,15	0,2	150	0,1	0,2

3.4-Porta-ferramentas

Os porta-ferramentas devem ser rígidos e sempre que possível com fixação por grampo. As dimensões da seção transversal do cabo devem ser o mais robusto possível (é recomendado no mínimo 25 x 25 mm) e os calços empregados devem ser de metal duro. A superfície para apoio deve ser retificada para permitir uma maior área de contato com o inserto. O balanço do inserto em relação ao calço deve ser mínimo (aproximadamente de 0,3 mm). O grampo utilizado para fixar o inserto deve ser revestido com camadas duras ou através de brasagem de um metal duro, para evitar a abrasão dos cavacos. O balanço do porta-ferramentas, após sua fixação na torre da máquina deve ser o menor possível (Matsumoto, 1998).

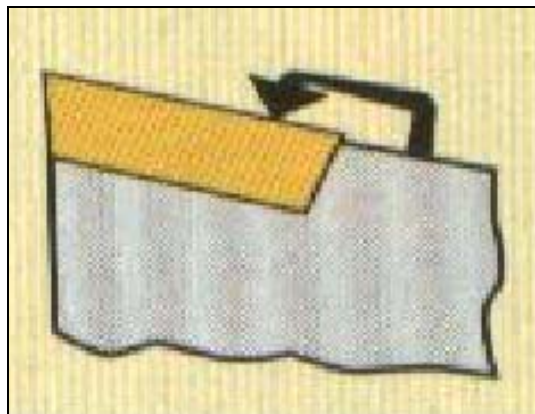


Figura 3.9 – Porta-ferramentas com fixação por grampo (NN, 2000).

3.5-Ferramentas modulares de troca rápida

Estes sistemas de ferramentas modulares de troca rápida estão sendo aplicados cada vez mais nas máquinas e equipamentos de usinagem. Consistem basicamente em um conjunto torre, porta-ferramenta e ferramenta, onde o porta-ferramenta possui um sistema de fixação preciso, rígido e de troca rápida na torre do equipamento de usinagem. Com isso

quando há necessidade de substituir uma ferramenta desgastada ou trocar esta por uma de geometria diferente, troca-se o conjunto ferramenta/porta-ferramenta e não só a ferramenta. Dessa forma o tempo de máquina parada é reduzido sensivelmente, devido à redução dos tempos de “setup”, pois a ferramenta é substituída em porta-ferramentas que não estão em operação, além disso esse sistema proporciona maior estabilidade e precisão. Com a globalização e a exigência pelo mercado no quesito qualidade, preço e tempo de entrega, a otimização dos processos de usinagens são indispensáveis e a utilização desse sistema é fundamental para se conseguir tais quesitos. A figura 3.10 a e 3.10 b mostram dois modelos do porta-ferramenta modular de troca rápida e sua troca em uma torre. Ambas são do sistema Capto da Sandvik Coromant. (NN, 2000)

Figura 3.10 a
Torre

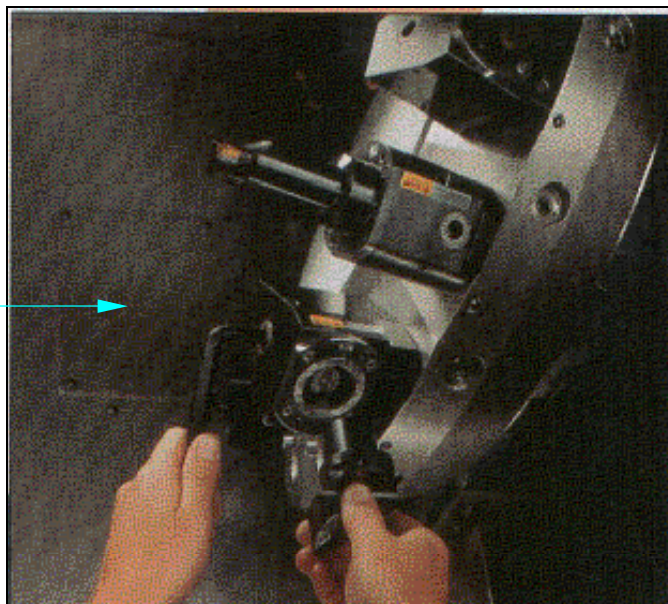


Figura 3.10 b
Porta-Ferramentas

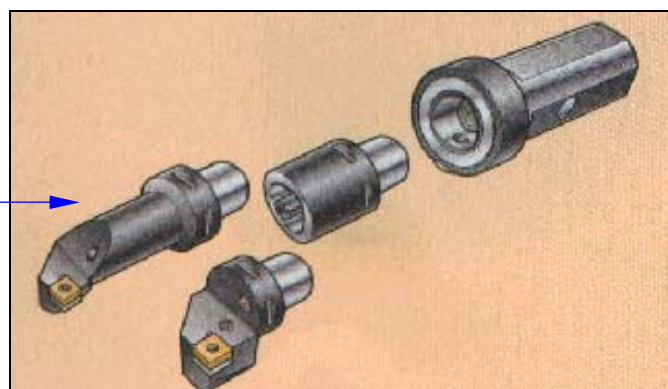


Figura 3.10 –Porta-ferramentas e torre do sistema Capto (NN, 2000).

A precisão desse sistema ocorre devido sua fixação à torre ser por meio de um polígono cônico único. Com um flange de encosto facial, ele é pré-tensionado em uma unidade de fixação com uma força extremamente alta. Essa união é altamente resistente à

torção e flexão. Essas características asseguram ao processo uma repetibilidade de $\pm 2 \mu\text{m}$ nos eixos x e y (transversal e longitudinal ao eixo da placa). A figura 3.11 mostra o polígono cônico único. Uma outra particularidade desse sistema é que alguns porta-ferramentas do sistema modular são equipados com orifício (canal) para fluido de corte (figura 3.12), o que, dependendo do material a ser usinado, é muito importante para o processo, pois além da eliminação dos tempos de ajuste dos tubos de refrigeração, a injeção efetiva e direta na aresta de corte prolonga a vida das ferramentas de corte.

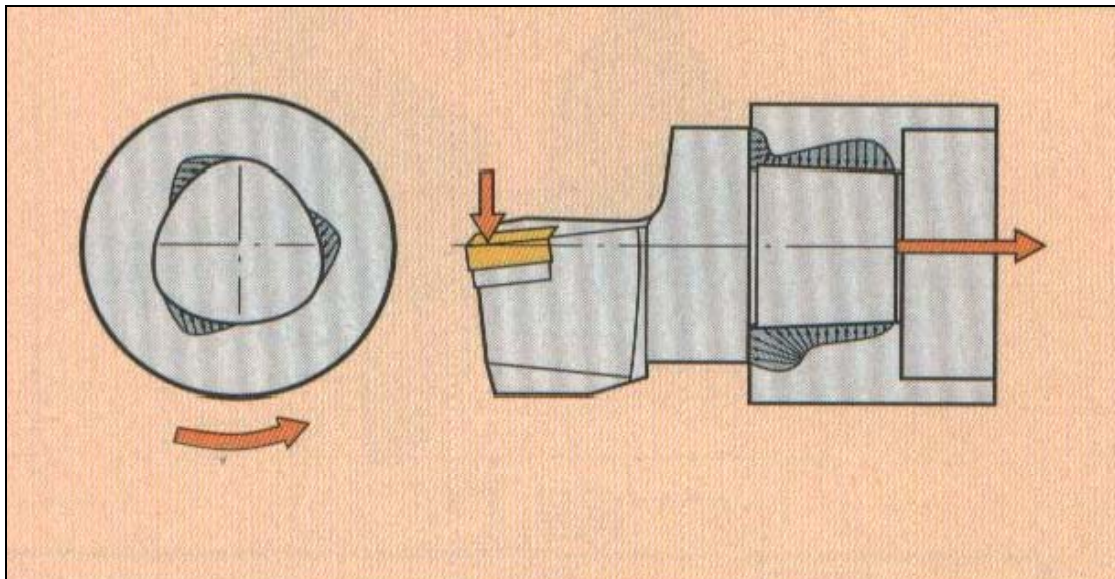


Figura 3.11 –Polígono cônico do sistema Capto (NN, 2000).

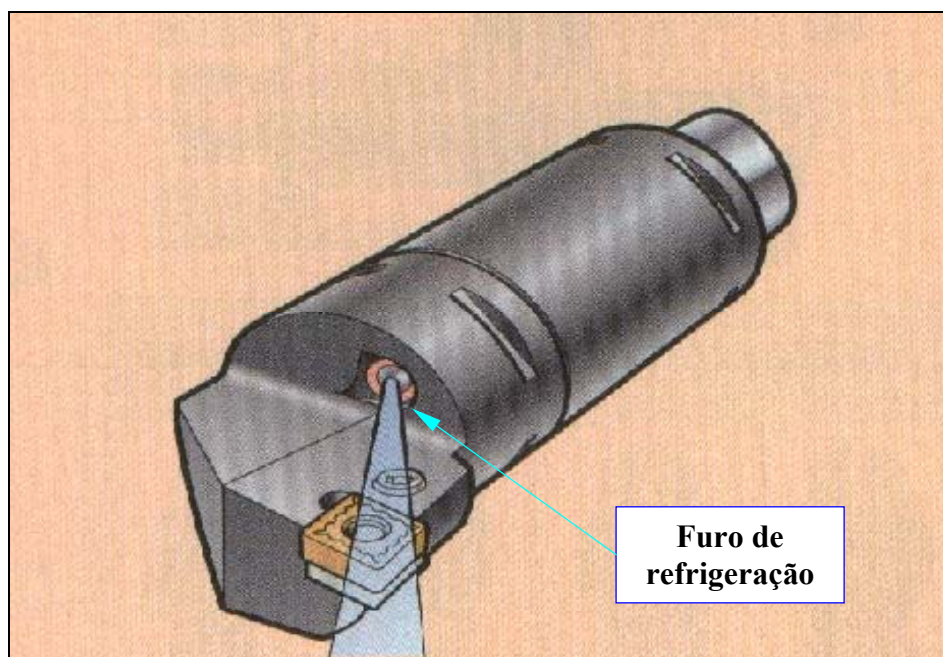


Figura 3.12 –Porta-ferramenta Capto com furo de refrigeração (NN, 2000).

3.6-Desgaste e vida das ferramentas de corte

O fim da vida de uma ferramenta de corte causado pelo aumento do desgaste que nela atuam é o tópico em usinagem que mais se estuda e o de maior importância, pois é ele que define a interrupção do processo. Para o melhor entendimento desse fenômeno serão apresentados os mecanismos de desgaste, os principais tipos de desgaste, avarias de ferramentas e alguns estudos realizados por vários autores sobre desgastes e vida de ferramentas em torneamento de aços endurecidos.

3.6.1-Mecanismos de desgaste

a-Desgaste por adesão

Devido às altas temperaturas geradas e elevadas cargas desenvolvidas durante a usinagem, ocorrem microssoldas entre a ferramenta, o cavaco e a peça que está sendo usinada. O desgaste por adesão pode ser reduzido pela fragilização do maior número possível de microssoldas, com um menor coeficiente de atrito possível da superfície da ferramenta de corte (recobrimento ou melhor acabamento) ou ainda, se for o caso, pelo uso de fluido de corte com características lubrificantes (Bas, 2001; Diniz¹, et. al., 2002).

b-Desgaste por abrasão

É uma das principais causas de desgaste das ferramentas de corte, sendo mais atuante no desgaste de flanco devido ao atrito entre a superfície de folga da ferramenta e a peça, mas também atua no desgaste de cratera (atrito do cavaco com a superfície de saída da ferramenta). É influenciado pelas altas temperaturas, que ocasionam a queda da dureza da ferramenta e pelo nível de partículas duras do material usinado, partículas estas que geralmente são formadas por alumina, carbonetos, carbonitretos, silicatos e outros. Por isso é importante a escolha de uma classe de ferramenta com excelente dureza a quente para usinagem de materiais com alto teor de partículas duras (Bas, 2001; Diniz¹, et. al., 2002; Cupini e Ferreira, 1993; Ohtani e Yokogawa, 1988).

c-Desgaste por difusão

Consiste basicamente na transferência de átomos de um material para outro, nesse caso especificamente entre o cavaco e a ferramenta de corte. Estas reações químicas são ativadas pelas altas temperaturas alcançadas na interface cavaco-ferramenta e sua intensidade dependem da afinidade química desses dois materiais. É o principal agente do desgaste de cratera sob altas velocidades de corte. Ao escolher uma determinada ferramenta deve-se verificar o grau de estabilidade química dela em relação ao material a ser usinado (Diniz¹, et. al., 2002; Klimenko, et. al., 1992).

d-Desgaste por oxidação

A oxidação ocorre em altas temperaturas, quando o material da ferramenta de corte tem afinidade química com o oxigênio que está no ar ou na água contida no fluido de corte quando este é utilizado, propiciando assim reações químicas que formam óxidos de baixa resistência ao desgaste. É um dos causadores do desgaste de entalhe devido ao contato do ar nas extremidades da interface cavaco-ferramenta. O que se pode fazer para amenizar tal situação é usar isolamentos inertes nas ferramentas de corte e/ou limitar a temperatura da interface, utilizando para isto fluido de corte e/ou diminuindo a velocidade de corte (Bas, 2001). A figura 3.13 mostra a ocorrência dos mecanismos de desgaste no desgaste da ferramenta em função da velocidade/temperatura de corte.

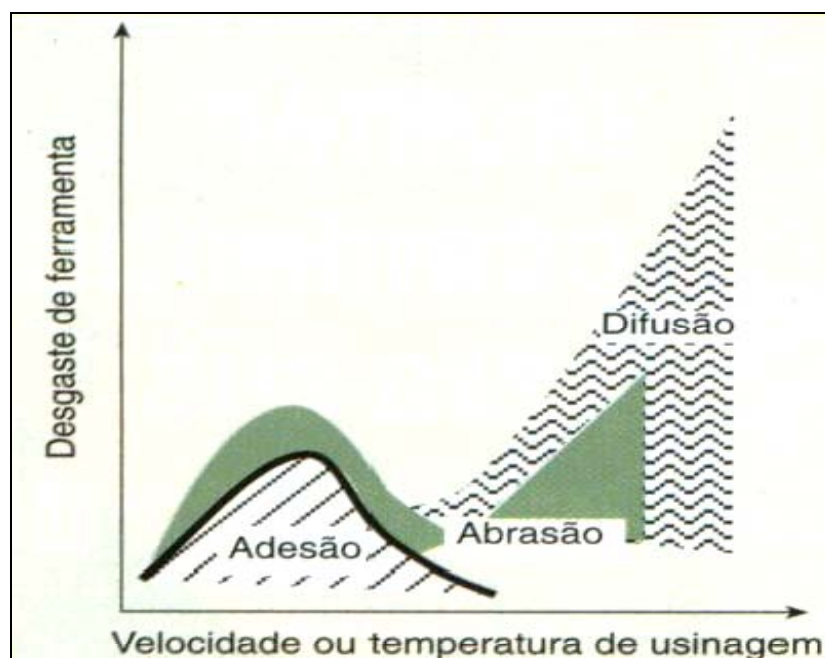


Figura 3.13—Influência da temperatura/velocidade de corte nos desgastes das ferramentas de corte (Bas, 2001).

3.6.2-Principais áreas de desgastes em ferramentas de corte

Os desgastes sofridos pelas ferramentas de corte são de entalhe, flanco e de cratera, conforme ilustrado na figura 3.14 e descritos a seguir.

a) Desgaste de flanco: esse tipo de desgaste é o mais comum, ocorre na superfície de folga da ferramenta e é causado pelo atrito entre a ferramenta e a peça (por exemplo desgaste por abrasão). O limite máximo permitido desse desgaste está ligado ao acabamento superficial da peça desejado, pois quanto maior o seu valor médio (VB_B) maior será a deterioração da aresta de corte. Com isso piores serão o acabamento superficial, a tolerância dimensional e os desvios de circularidade da peça;

b) Desgaste de cratera: Acontece na superfície de saída da ferramenta e é ocasionado pelo atrito ferramenta-cavaco, por exemplo desgaste por difusão, oxidação e adesão. Há certos casos em que a taxa de desgaste de cratera é baixa, um exemplo claro disto é quando são gerados cavacos curtos, porém quando ocorre o contrário deve-se ter cuidado, pois seu aumento pode provocar a quebra da ferramenta;

c) Desgaste de entalhe – Pode ocorrer tanto na interface das extremidades do contato cavaco-ferramenta na superfície de saída da ferramenta, como do contato ferramenta-peça na superfície de folga da ferramenta. Ele ocorre juntamente com o desgaste de cratera e flanco e é caracterizado por sulcos profundos que geralmente são provocados principalmente pelo mecanismo de desgaste de oxidação.

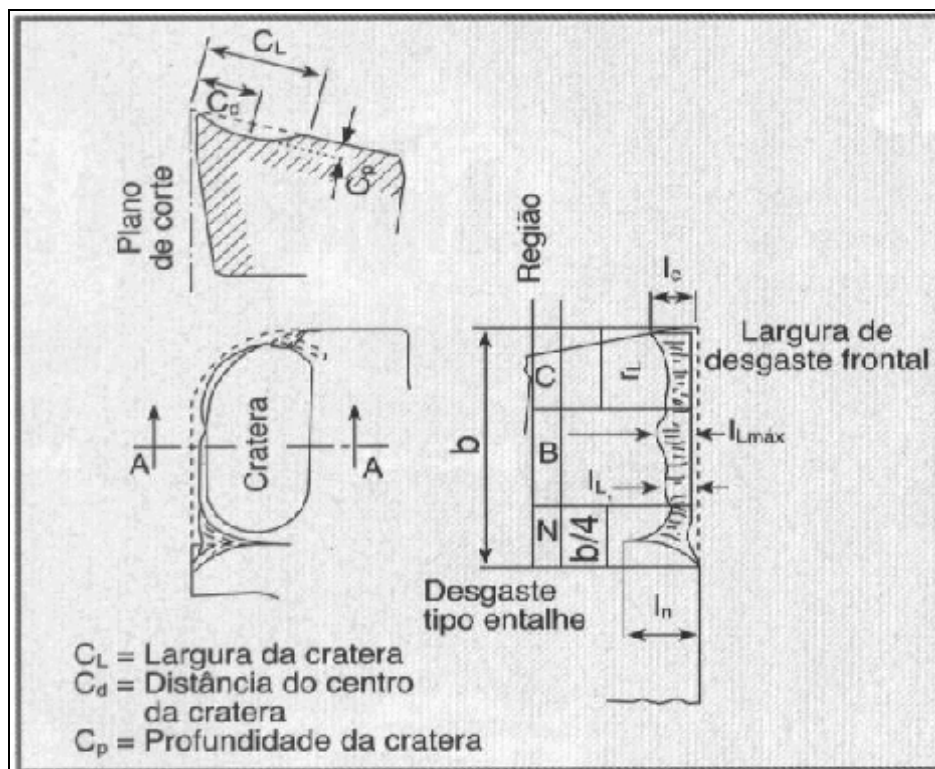


Figura 3.14—Principais áreas de desgastes das ferramentas de corte (Bas, 2001).

3.6.3-Avarias de ferramentas de corte

Além dos desgastes já mencionados, as ferramentas de corte também sofrem avarias. Estas avarias podem ser provocadas pelos próprios desgastes ou ainda por inúmeras outras causas, como choques térmicos e/ou mecânicos, defeitos microestruturais das ferramentas, força de corte excessiva, etc. As avarias podem causar muitos prejuízos em um processo de usinagem, pois às vezes não dão sinal que vão acontecer ou que estão acontecendo, como por exemplo a quebra súbita da aresta de corte da ferramenta (conhecida como falha catastrófica). Além de provocar prejuízos para a ferramenta e tempo de máquina parada, as mesmas podem também provocar a inutilização da peça que está sendo usinada. As figuras 3.15 e 3.16 mostram as avarias que geralmente ocorrem durante o torneamento de aços endurecidos.

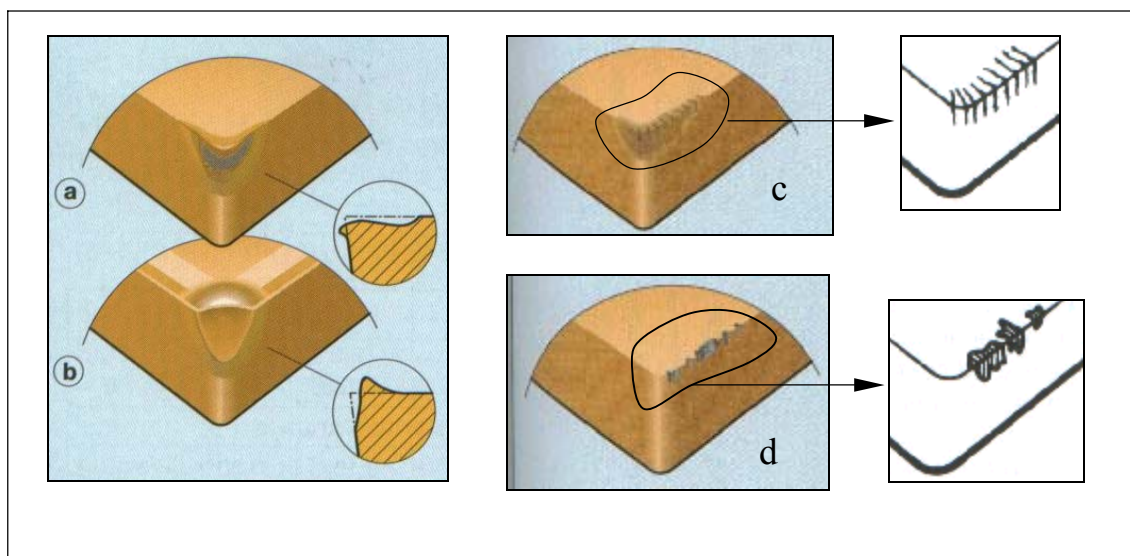


Figura 3.15—Avarias das ferramentas de corte (NN, 2000).

A figura 3.15 a e b mostram dois tipos de deformação plástica que ocorre na ponta da ferramenta (aresta de corte). São provocadas pela alta pressão aplicada à ponta da ferramenta em temperaturas elevadas. Seu aumento, além de causar imperfeições superficiais na peça usinada, pode provocar a quebra da aresta de corte. Quando há tendência de ocorrer essa avaria, deve-se escolher uma classe de ferramenta que tenha maior resistência à deformação plástica e maior dureza a quente. A figura 3.15 c ilustra a disposição das trincas térmicas sobre a aresta de corte (perpendicular à aresta de corte). Estas são provocadas pela variação de temperatura. O crescimento dessas trincas provoca a falha catastrófica. Um meio de se amenizar esse problema é evitar a variação de temperatura e escolher uma classe de ferramenta mais tenaz e de melhor resistência ao choque térmico. Finalizando, a figura 3.15 d destaca o lascamento, que é a retirada de

grandes partículas do material da ferramenta de uma só vez (contrário dos desgastes de flanco e cratera). Seu aumento também provoca a quebra da ferramenta, para diminuir tal avaria aconselha-se usar classes com maior tenacidade e com geometria mais robusta.

O processo de usinagem é muito complexo, pois existem várias combinações de parâmetros para várias situações, onde ocorre desgastes e avarias diferentes para cada classe de ferramenta usada na usinagem de diferentes materiais, devido a isso o conhecimento do conjunto de todas variáveis do processo de usinagem é importante para se evitar a falha catastrófica da ferramenta (figura 3.16-b). A trinca de origem mecânica (figura 3.16-a) origina-se paralelamente a aresta de corte, devido à variação de grandes esforços (ex.: corte interrompido em desbaste). Para evitar que isto ocorra deve-se escolher uma classe de ferramenta mais tenaz, evitar o contato brusco da ferramenta na peça e diminuir avanço.

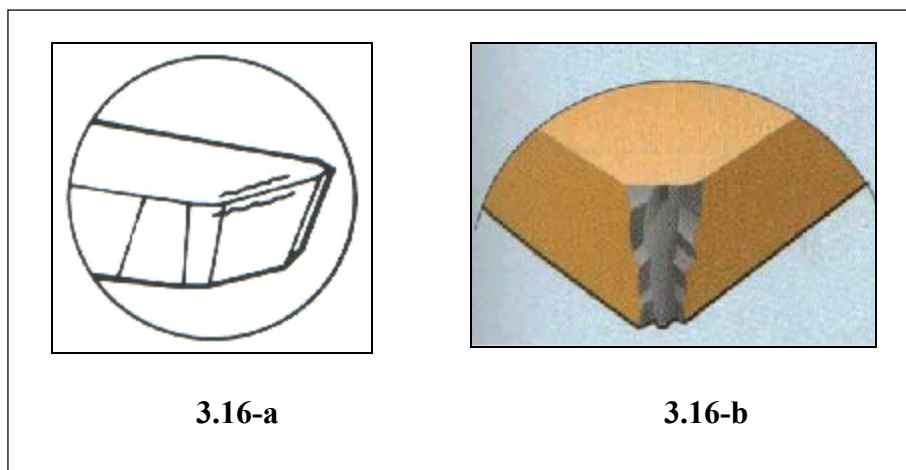


Figura 3.16–Trinca e quebra de origem mecânica da aresta de corte (NN, 2000).

3.6.4-Apresentação de trabalhos sobre desgastes de ferramentas

Nesse tópico serão apresentados alguns trabalhos de pesquisadores consagrados no desenvolvimento da usinagem moderna, focalizando o desgaste e os mecanismos de desgastes das ferramentas de corte.

a-Desgastes em ferramentas de corte de cerâmica mista e de PCBN

Em um estudo realizado por Almeida e Abrão, (2001) no torneamento do aço endurecido ABNT 5115 temperado e revenido, com dureza de 58-66 HRC para uma profundidade média usinada de 1 mm, foram testadas duas classes de cerâmicas mistas VNGA 160408 T082025 já previamente testadas, do fabricante Kyocera (A65 sem revestimento e A66N com revestimento de TiN) e uma classe de PCBN VNMA 160404 T01525 do fabricante Sumitomo (BNX20). Foi levantada a curva de vida e desgaste das ferramentas, onde o critério de fim de vida adotado foi um desgaste de flanco (VB_C) de 0,30 mm, conforme mostram as figuras 3.17, 3.18 e 3.19. A rugosidade média aritmética objetivada foi à mesma da retificação, que será discutida posteriormente no tópico sobre acabamento superficial.

A curva de vida apresentada na figura 3.17 afirma a superioridade da ferramenta A65 sobre a ferramenta A66N a medida que se eleva a velocidade de corte (acima de 220 m/min.), devido à pequena inclinação da curva de vida. A variação do desgaste de flanco em função do tempo de corte mostrado na figura 3.18 revela que inicialmente a ferramenta A66N comportou-se de maneira similar à BNX20, mas após um tempo de corte de aproximadamente 12 minutos veio a sofrer um maior desgaste, já a ferramenta A65 sofreu um excessivo desgaste após 20 minutos. O melhor comportamento de resistência ao desgaste de flanco ao longo do tempo foi notado na ferramenta de PCBN BNX20. Finalizando, a figura 3.19 mostra o aumento do desgaste de flanco VB_C em função do tempo de corte da classe de PCBN para duas velocidades de corte distintas (180 e 250 m/min.), onde é visível a maior inclinação da curva ao longo do tempo para a velocidade de corte de 250 m/min.

Com o aumento do desgaste de flanco, conseqüentemente também houve um aumento da rugosidade média superficial, variando de 0,33 a 0,85 μm para a amostra usinada com a ferramenta A65, de 0,28 a 0,90 μm para a amostra usinada com a ferramenta A66N e de 0,58 a 1,10 μm para a amostra usinada com a ferramenta BNX20; que são valores compatíveis com o processo de retificação.

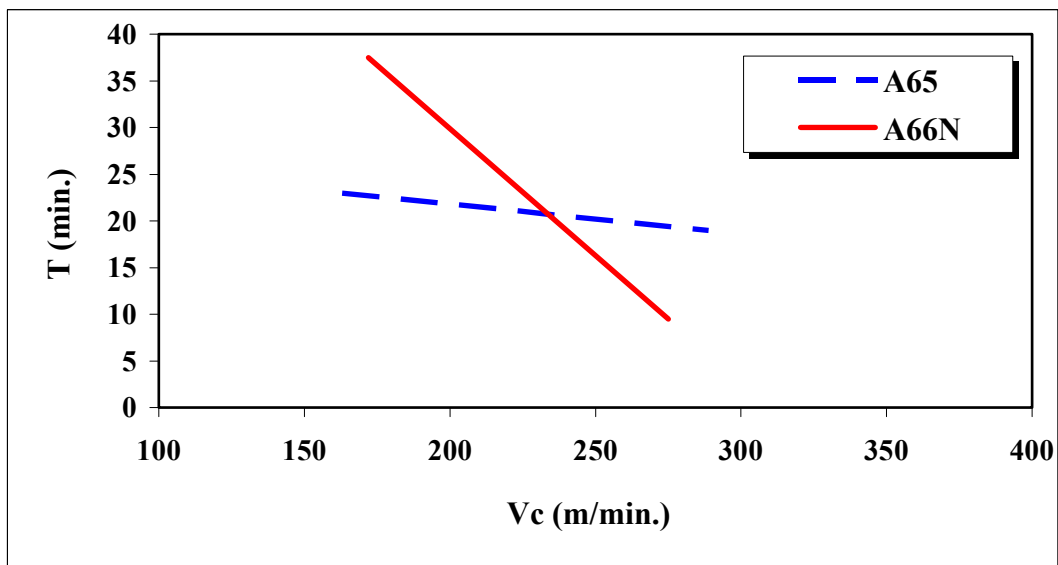


Figura 3.17–Curva de vida para as ferramentas A65 e A66N (Almeida e Abrão, 2001).

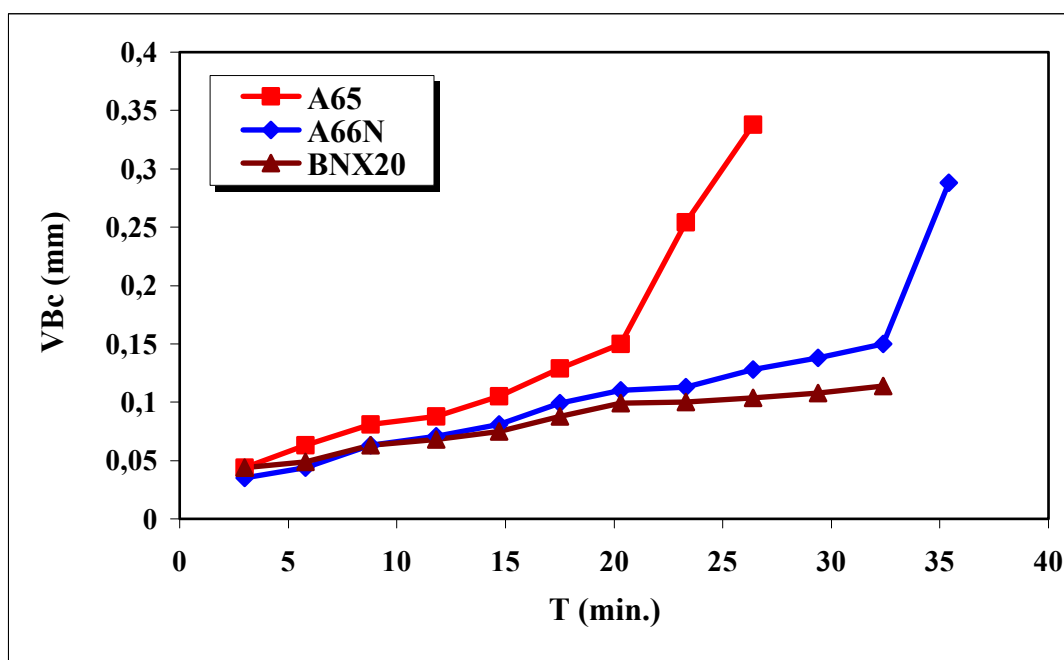


Figura 3.18–Curvas de desgaste para $V_c=180\text{m/min.}$, $f=0,08\text{ mm/v}$ e $a_p=0,15\text{ mm}$ (Almeida e Abrão, 2001).

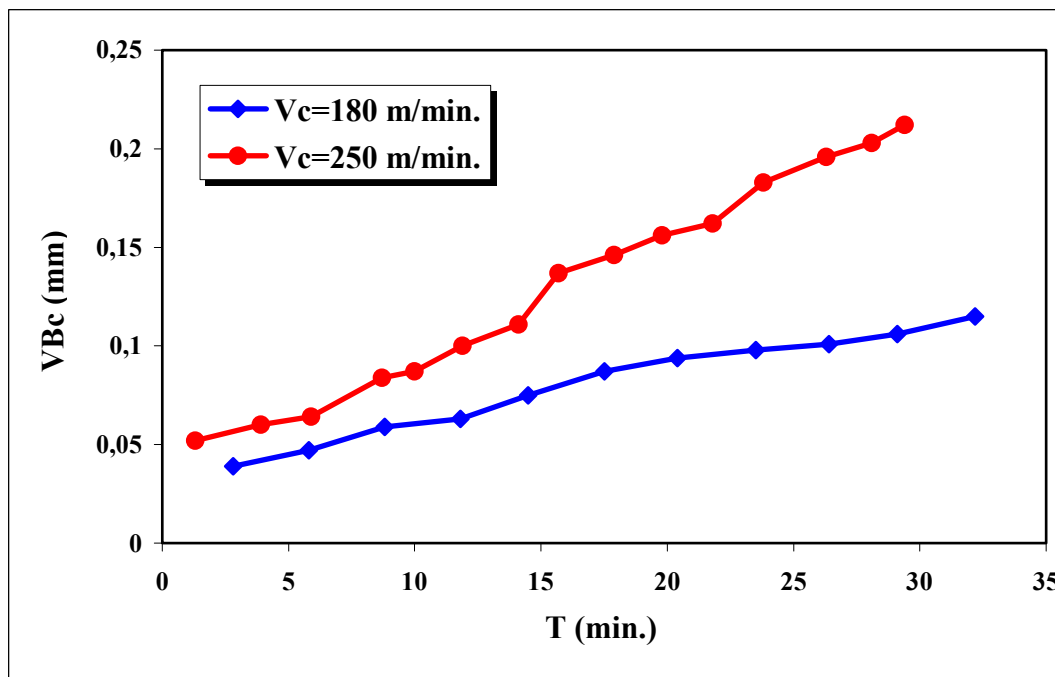


Figura 3.19—Curvas de desgaste para $V_c=180$ e 250 m/min., $f=0,08$ mm/v e $a_p=0,15$ mm para a classe BNX20 (Almeida e Abrão, 2001).

b-Rugosidade como critério de fim de vida de ferramentas de corte

Diniz e Matsumoto (1999) verificaram a possibilidade de obter uma qualidade de torneamento compatível com a retificação, onde o critério de fim de vida da ferramenta foi a rugosidade ($R_a \leq 0,6 \mu\text{m}$). Foram analisadas além da vida das ferramentas, a rugosidade da peça usinada e as formas de desgaste das ferramentas. Os corpos de prova torneados foram do aço ABNT 52100 (AISI E52100), temperados e revenidos com dureza na faixa de 58 a 62 HRC, foram utilizadas para o torneamento ferramentas de corte de PCBN classe BZN 8000 (General Electric), com 55% de CBN e de cerâmica mista classe CC 650 (Sandvik), ambas classes com geometria TNGA 160408 T01020. Todos testes foram realizados com profundidade de usinagem (a_p) de 0,4 mm, avanço (f) de 0,08 mm/volta e com velocidades de cortes (V_c) de 108, 130 e 150 m/min. Foi obtido no torneamento dimensões dentro da tolerância h5 ($-13 \mu\text{m}$ para diâmetro de 50 a 80 mm) com R_a abaixo de $0,6 \mu\text{m}$. A figura 3.20 faz um comparativo da vida das ferramentas em comprimento de corte (L_c) utilizadas, em função de 3 diferentes velocidades de corte, onde observou-se que para a V_c de 108 m/min. as ferramentas cerâmicas apresentaram melhores resultados do que as de PCBN, já nas velocidades de 130 e 150 m/min. embora ainda com resultados inferiores, as ferramentas de PCBN apresentaram uma menor diferença em relação a vida das ferramentas cerâmicas.

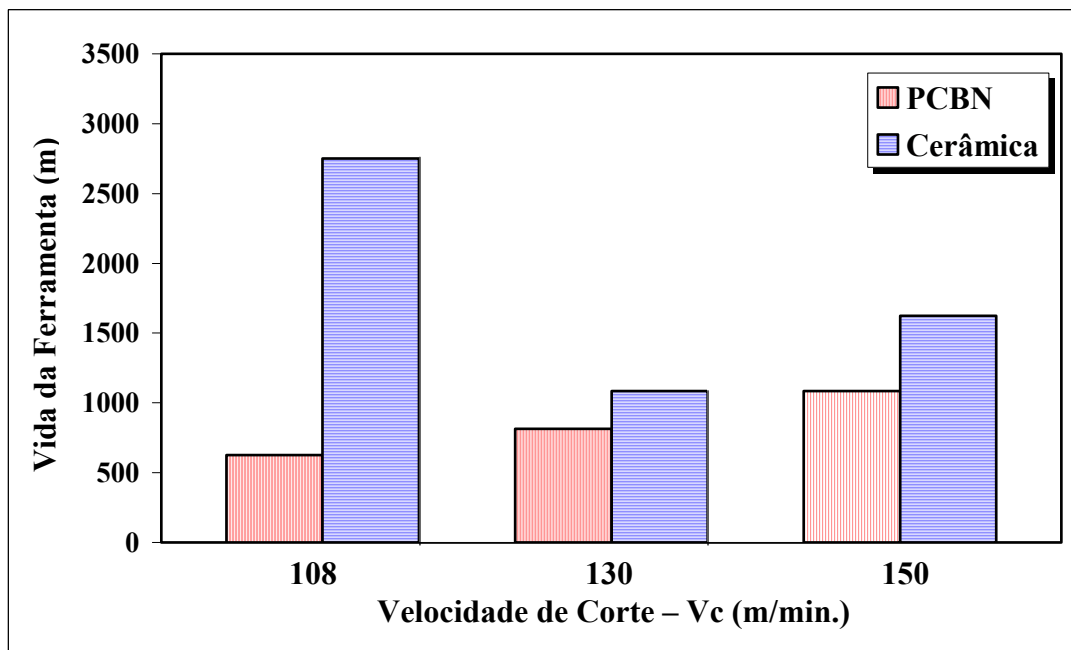


Figura 3.20–Vida das ferramentas em função das velocidades de corte (Diniz e Matsumoto, 1999).

Ainda analisando a figura 3.20 nota-se que houve uma grande dispersão na vida das ferramentas cerâmicas a medida em que se aumentava a velocidade de corte, dispersão essa que foi muito pequena nas ferramentas de PCBN. O melhor resultado das ferramentas cerâmicas sobre as de PCBN pode ser explicado pelo fato de que em baixas velocidades de corte a geração de calor é bem menor, com isso uma das principais propriedades das ferramentas de PCBN que é a dureza à quente fica inutilizada. Fica claro na figura 3.20 que à medida que se aumenta a velocidade de corte, também aumenta a vida das ferramentas de PCBN. A alta temperatura na região de corte facilita a deformação e cisalhamento do cavaco. Foi observado nas ferramentas cerâmicas que o principal agente do fim de vida foi o lascamento, que pode ser causado por choques da ferramenta com partículas duras da peça ou pela vibração momentânea, ocasionado pelo aumento da velocidade de corte, devido a menor tenacidade e resistência ao choque mecânico das cerâmicas. A figura 3.21 mostra essa avaria nas ferramentas cerâmicas. Já nas ferramentas de PCBN os principais agentes do fim de vida foram o desgaste de flanco VB_B e o desgaste de cratera, ambos bastantes acentuados (figura 3.22). O lascamento não foi evidenciado, o que é explicado pelo fato da excelente tenacidade e resistência ao choque mecânico dessa classe. Por outro lado essa classe não possui excelente estabilidade química como as cerâmicas, o que explica o excessivo desgaste de cratera, cujo principal mecanismo de desgaste é a difusão.

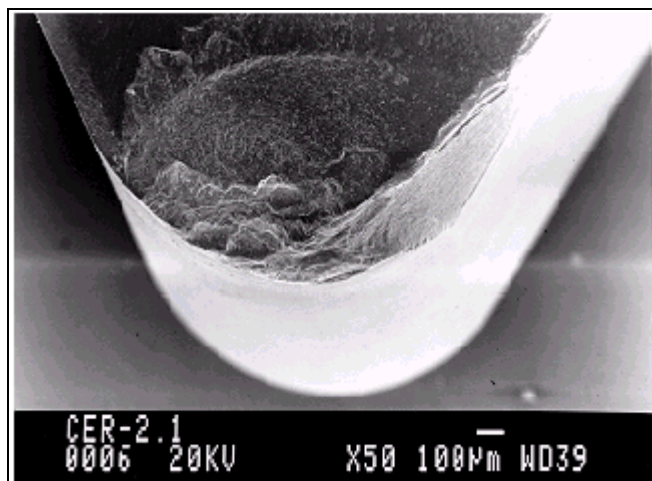


Figura 3.21–Agente do fim de vida nas ferramentas cerâmicas (lascamento) (Diniz e Matsumoto, 1999).

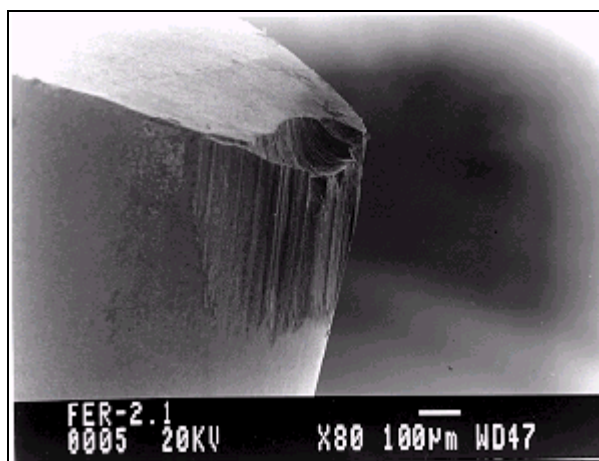


Figura 3.22–Agente do fim de vida nas ferramentas de PCBN (desgaste de flanco e cratera) (Diniz e Matsumoto, 1999).

c.1-Influência da composição química e estrutural do material usado nos desgastes das ferramentas de corte de cerâmica mista

O objetivo do trabalho (parte I) desenvolvido por Barry¹ e Byrne (2001) foi estudar a influência da composição química e estrutural dos aços endurecidos sobre os mecanismos de desgastes e os desgastes das ferramentas de cortes. Nessa primeira etapa foram realizados testes somente para ferramentas cerâmicas mistas (com teor de 71 % de Al_2O_3 + 28 % de TiC + 1 % MnO), posteriormente será discutido na parte II para ferramentas de PCBN. Nos testes foram usinados 5 amostras de composições diferentes do aço BS 817M40, que é similar ao aço AISI 4340 e uma amostra de um aço ferramenta baixa liga.

Ambos com 52 HRC de dureza. A geometria da ferramenta de corte adotada foi TNGA 160412 T01020 para uma profundidade de usinagem (a_p) de 0,2 mm, avanço de corte (f) de 0,1 mm/volta e velocidades de cortes (V_c) de 150 m/min. A tabela 3.5 apresenta a composição das amostras referentes aos dois aços.

Tabela 3.5 – Composição química dos aços usinados (Barry¹ e Byrne, 2001).

Nota: O e Ca em ppm.

Composição	Aço BS 817M40					Aço ferramenta
	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3	Amostra 4	Amostra 5	
C	0,40	0,38	0,44	0,44	0,41	0,797
Si	0,163	0,193	0,204	0,165	0,166	0,199
S	0,034	0,021	0,012	0,030	0,031	0,007
Cr	1,176	1,104	1,163	1,220	1,214	1,71
Ni	1,371	1,350	1,653	1,546	1,510	0,144
Mo	0,283	0,254	0,189	0,247	0,246	0,416
Al	0,029	0,035	0,004	0,026	0,023	0,026
Ti	0,003	0,003	0,006	0,003	0,003	0,004
O	30	50	20	-	-	20
Ca	25	3	6	19	25	24

A figura 3.23 mostra o volume de desgaste de flanco da ferramenta por unidade de comprimento (V_{α}) que equivale a $0,05(VB_c^2)$ e a largura do desgaste de flanco, ambos em função do comprimento de corte (l_c) para os 2 tipos de aço. A velocidade de corte (V_c) adotada foi de 150 m/min.

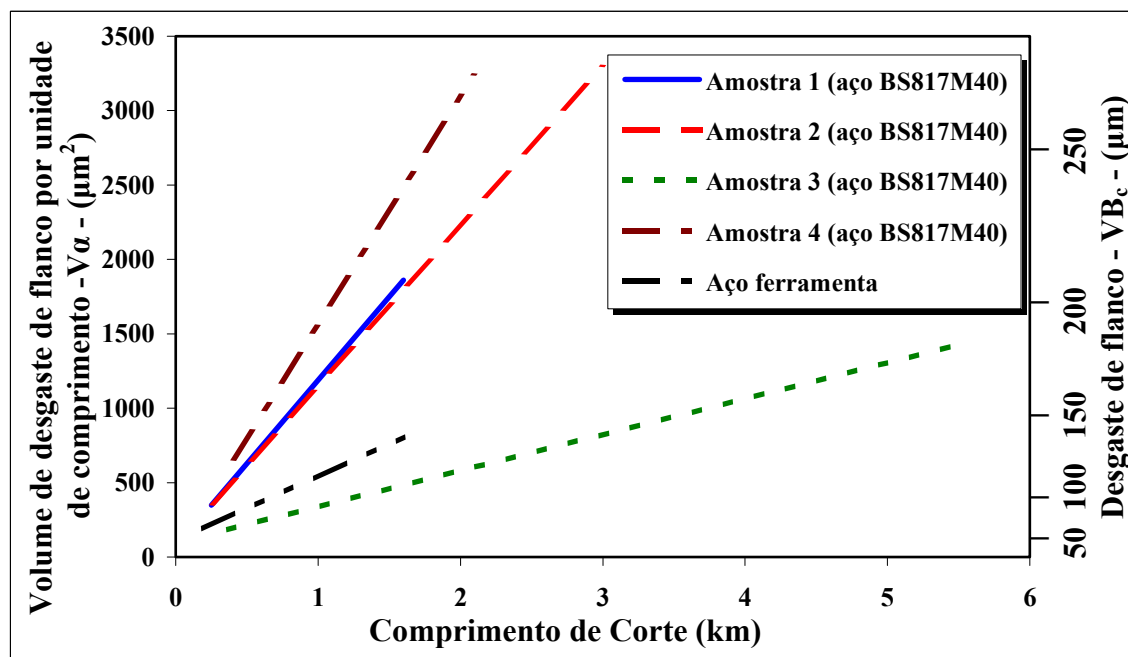


Figura 3.23–Desgaste de flanco e volume do desgaste de flanco por unidade de comprimento (Barry¹ e Byrne, 2001).

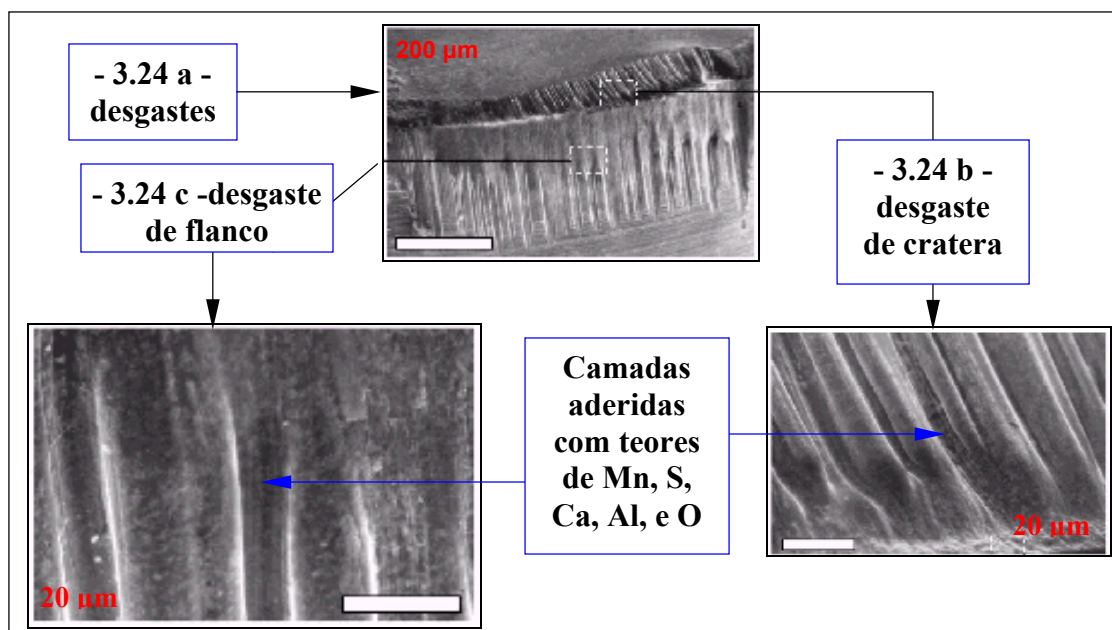


Figura 3.24—Morfologia dos desgastes na ferramenta de corte usada para usinar à amostra 1 do aço BS817M40, após um comprimento de corte (l_c) de 2,94 km (Barry¹ e Byrne, 2001).

A alta concentração de Ca foi responsável pelo principal mecanismo de desgaste (difusão), observado nas ferramentas de corte usadas para usinar às amostras 1, 4 e 5 do aço BS817M40. Verificou-se uma reduzida taxa de desgaste nas ferramentas usadas para usinar o aço ferramenta baixa liga com 24 ppm de Ca, se comparado às ferramentas usadas para usinar às outras amostras, o que se torna contraditório devido à afirmação anterior, porém essa contradição é facilmente compreendida, pois o teor de inclusões desse aço é bem menor (cerca de 1/7) do que o encontrado na amostra 1 do aço BS817M40 e também por essas inclusões serem em sua maioria de MnS (as quais são mais favoráveis a usinagem).

A rápida taxa de desgaste observado nas ferramentas usadas para usinar a amostra 2, também se torna contraditória devido ao fato dessa amostra possuir apenas 3 ppm de Ca, no entanto quando se refere aos desgastes provenientes do alto teor de Ca do material trabalhado, isso é válido para um mecanismo de desgaste específico, o que não impede de outros fatores influenciarem na maior ou menor taxa de desgaste, ocasionada por outros mecanismos. Dentre os fatores responsáveis pelas diferentes taxas de desgastes nas ferramentas utilizadas para a usinagem do aço ferramenta baixa liga e as amostras do aço BS817M40, podemos destacar: A composição química (ex.: teor de Ca); a deformação plástica que foi diferente em cada situação, devido a diferentes tensões na face de cada ferramenta; o teor de inclusões no material trabalhado e principalmente a dureza destas inclusões, que variou de uma amostra para outra. A amostra 2 apresentou um alto teor de

inclusões de alumina e de óxidos. Em sua composição essa amostra possui um elevado nível de Al e O.

c.2- Influência da composição química e estrutural do material usinado nos desgastes das ferramentas de corte de PCBN

Possui os mesmos objetivos da parte I, porém utilizando agora ferramentas de corte de PCBN (Barry^{II} e Byrne, 2001) na usinagem de 3 amostras do aço BS817M40, também com 52 HRC de dureza e com composição química descrita na tabela 3.6. As ferramentas de PCBN utilizadas para usinar essas 3 amostras continham um teor de 50% de CBN, 40% de TiC, 6% de WC e 4% de (AlN, AlB₂) e geometria ISO TNGA 160412 T02020. Os parâmetros de corte adotados foram velocidade de corte (Vc) de 150 m/min., profundidade de usinagem (a_p) de 0,2 mm e avanço de corte (f) de 0,1 mm/v. Ainda com o objetivo de analisar os desgastes e os mecanismos de desgastes nas ferramentas de corte descritas acima, os testes foram realizados em dois tornos diferentes, ambos CNC. A tabela 3.7 apresenta o volume da taxa de desgaste de flanco ($\Delta V\alpha/\Delta l_c$, em $\mu\text{m}^2/\text{m}$) observado nas ferramentas de PCBN usadas para usinar as amostras 1, 2 e 3 do aço BS817M40 e nas ferramentas de cerâmica mista usadas para usinar a amostra 3 do mesmo aço, em um torno Daewoo e em um torno Colchester.

Tabela 3.6 – Composição química do aço usinado BS817M40 (Barry^{II} e Byrne, 2001).

Nota: O e Ca em ppm.

Composição	Amostra 1	Amostra 2	Amostra 3
C	0,40	0,38	0,44
Si	0,163	0,193	0,204
S	0,034	0,021	0,012
Cr	1,176	1,104	1,163
Ni	1,371	1,350	1,653
Mo	0,283	0,254	0,189
Al	0,029	0,035	0,004
Ti	0,003	0,003	0,006
O	30	50	20
Ca	25	3	6

Tabela 3.7 – Volume da taxa de desgaste de flanco ($\Delta V\alpha/\Delta l_c$, em $\mu\text{m}^3/\text{m}$) (Barry^{II} e Byrne, 2001).

Ferramentas	Cerâmica mista	PCBN		
Torno /Amostras	3	1	2	3
Daewoo	0,25	0,32	0,26	-
Colchester	0,27	-	-	0,085

Ao analisarmos a tabela 3.7, nota-se que houve uma pequena variação na taxa de desgaste de flanco na ferramenta de cerâmica mista em relação aos 2 tornos empregados no teste. O alto teor de Ca aliado ao elevado teor de O (formação de óxidos) na amostra 1, são os principais agentes causadores da alta taxa de desgaste de flanco observado nas ferramentas de corte usadas para usinar esta amostra. A figura 3.25 mostra a superfície desgastada (flanco e cratera) de uma ferramenta de corte de PCBN, usada para usinar à amostra 1. O Al é considerado um dos principais elementos responsáveis pelo desgaste químico (difusão) da fase CBN da ferramenta de PCBN, o que justifica o baixo desgaste das ferramentas de corte usada para usinar à amostra 3. Notou-se que a fase CBN das ferramentas CBN/TiC é submetida a uma grande taxa de desgaste, o que não ocorre com a fase TiC. Muitos autores justificam essa resistência superior da fase TiC, devido à camada protetora contra a difusão/dissolução proporcionada por produtos reagidos entre a fase BN e certos depósitos inclusionários do material trabalhado.

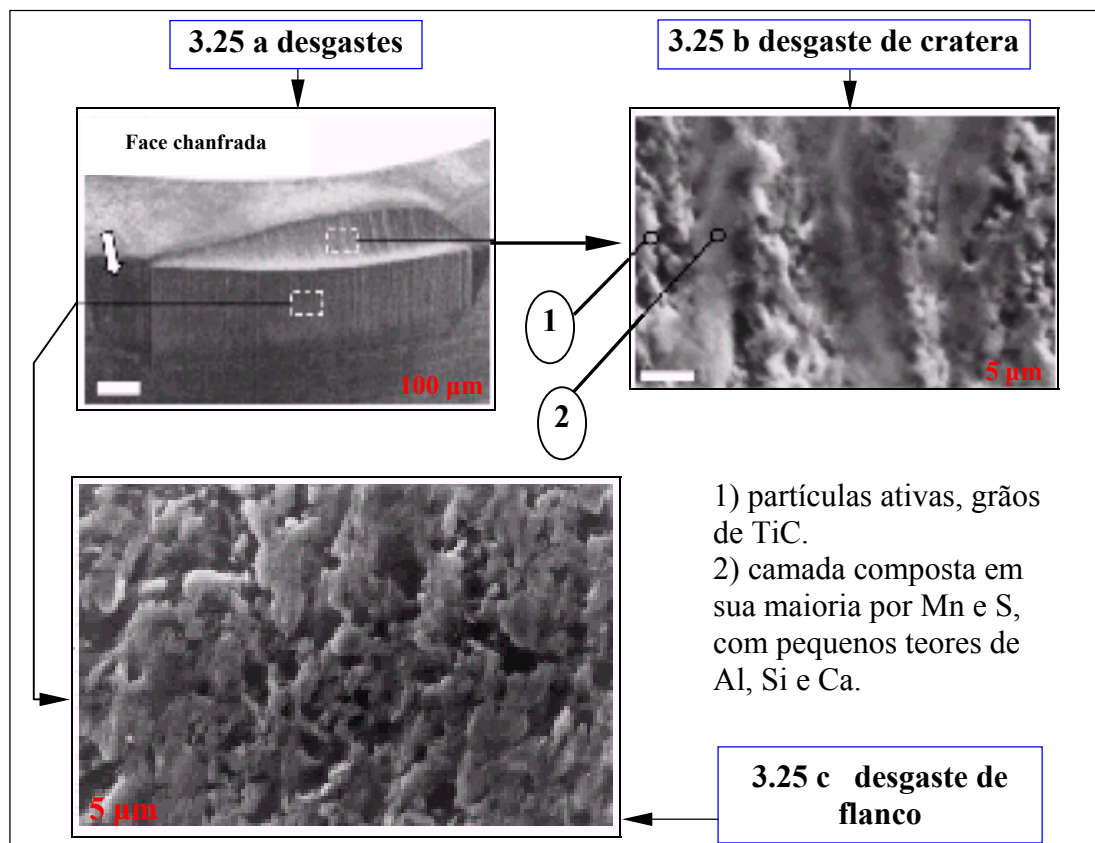


Figura 3.25—Morfologia dos desgastes na ferramenta de corte usada para usinar à amostra 1 do aço BS817M40, $V_c = 150$ m/min (Barry^{II} e Byrne, 2001).

3.7-Mecanismo de formação do cavaco

Vários fatores ligados à usinagem são influenciados diretamente pela formação do cavaco, por exemplo: desgaste da ferramenta de corte, esforços de corte, calor gerado, etc (Diniz¹, et. al., 2002). Os cavacos gerados na usinagem de aços endurecidos são denominados “dente de serra”, devido sua seção transversal ter esta forma (fig 3.26). Na usinagem de aços endurecidos utiliza-se ferramentas com ângulo de saída negativo, devido a isso aparecem na ferramenta e na peça grandes tensões de compressão. Sendo o material frágil, essa alta tensão de compressão induz à formação de trincas ao invés da deformação plástica do cavaco. Tal trinca inicia-se na superfície livre e aprofunda-se na direção da ponta da ferramenta, aliviando a energia armazenada e servindo como uma superfície deslizante para o segmento de material. Simultaneamente, ocorrem o aquecimento e deformação plástica do material, conseqüentemente após o segmento de cavaco ter deslizado a pressão de corte é renovada, iniciando uma nova trinca e reiniciando o ciclo (Matsumoto, 1998; Elbestawi, et. al., 1996).

Em testes de torneamento oblíquo e ortogonal realizados com o aço AISI 1550 com 60 HRC de dureza, utilizando ferramentas de corte com ângulo de saída de -6 e -26 graus e raio de ponta de 1,2 mm e adotando os seguintes parâmetros: velocidade de corte de 66 a 120 m/min.; avanço de corte de 0,025 a 0,2 mm/volta e profundidade de usinagem entre 0,5 a 2,0 mm (Elbestawi, et. al., 1996), observou-se que o ângulo de cisalhamento medido do cavaco foi sempre maior que 45° .

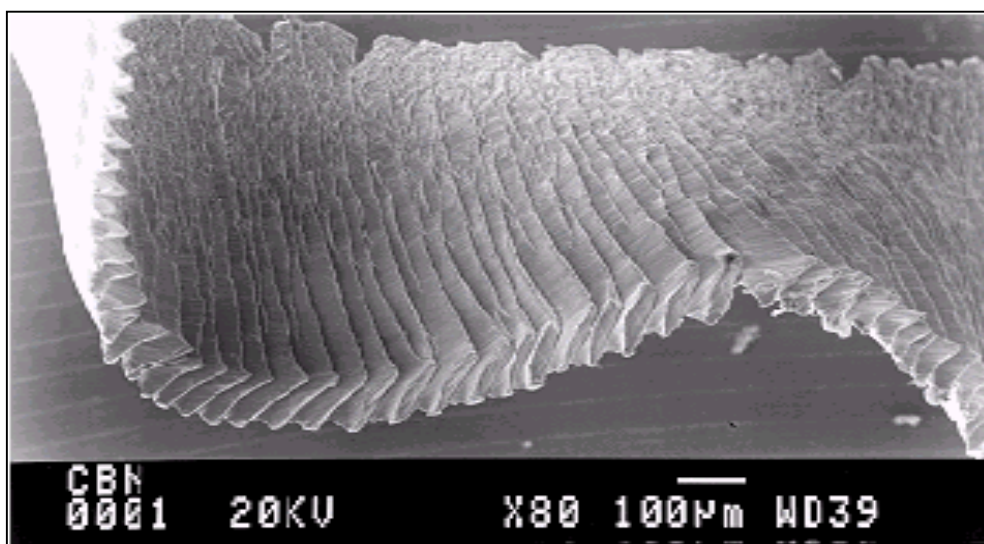


Figura 3.26–Cavaco obtido na usinagem do aço AISI 52100 com 58 HRC de dureza (Diniz e Matsumoto, 1999).

3.8-Características da superfície usinada

3.8.1-Rugosidade superficial

A rugosidade superficial é caracterizada pela forma em que é feita sua medição. No Brasil foi adotado pela Norma ABNT-Associação Brasileira de Normas Técnicas, através da P-NB-13 (1963), o sistema da “Linha Média” (M). Que é o sistema mais utilizado em todo o Mundo. No sistema “M” todas grandezas de medição são definidas a partir de uma linha paralela à direção geral do perfil, no comprimento de amostragem, linha esta que é a média entre os picos e reentrâncias de irregularidades. Os sistemas de medição baseados na linha média são divididos em 3 classes:

- Fundamentados na medida da profundidade da rugosidade;
- Fundamentados em medidas horizontais;
- Fundamentados em medidas proporcionais.

Será visto somente os sistemas fundamentados na medida da profundidade da rugosidade, por ser este o critério de medição de rugosidade dos corpos de prova usinados neste trabalho. Esse sistema subdivide-se em 5 parâmetros, que serão descritas a seguir.

a-Desvio médio aritmético (R_a)

É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média num comprimento de amostragem. A Norma brasileira adota “ R_a ” como método de medição. A figura 3.27 mostra como é feito o cálculo de R_a .

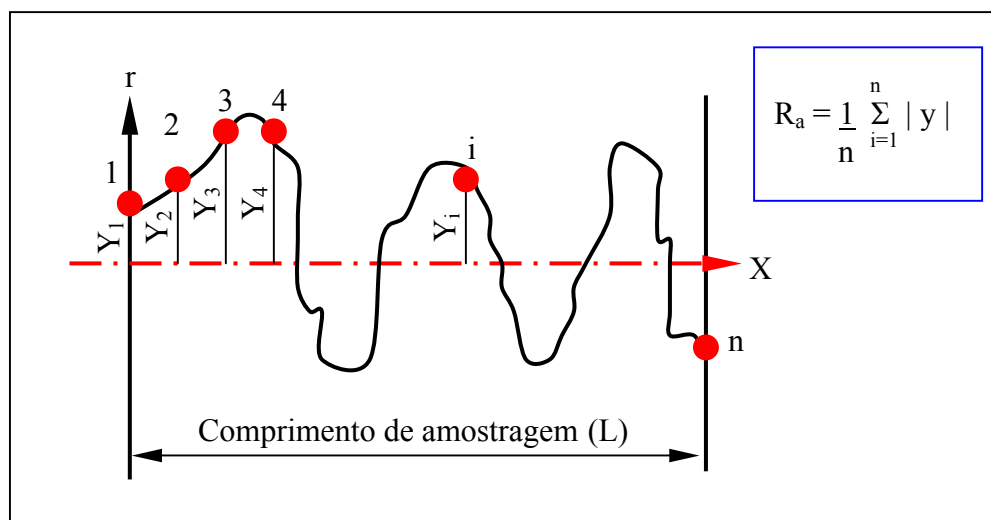


Figura 3.27–Desvio médio aritmético R_a (Agostinho, et. al., 1990).

b-Desvio médio quadrático (R_q)

Defini-se como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas do perfil efetivo (medido) em relação à linha média em um comprimento de amostragem. Seu valor é cerca de 11% maior que o valor medido em R_a , pois a elevação ao quadrado amplifica o efeito das irregularidades. É calculado pela seguinte fórmula:

$$R_q = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n Y_i^2}{n}}$$

c-Altura das irregularidades dos 10 pontos (R_z)

É definida pela diferença entre o valor médio dos cinco maiores picos de irregularidades e as cinco maiores reentrâncias de irregularidades, medidas a partir de uma linha paralela a linha média e no comprimento de amostragem, conforme mostrado na figura 3.28.

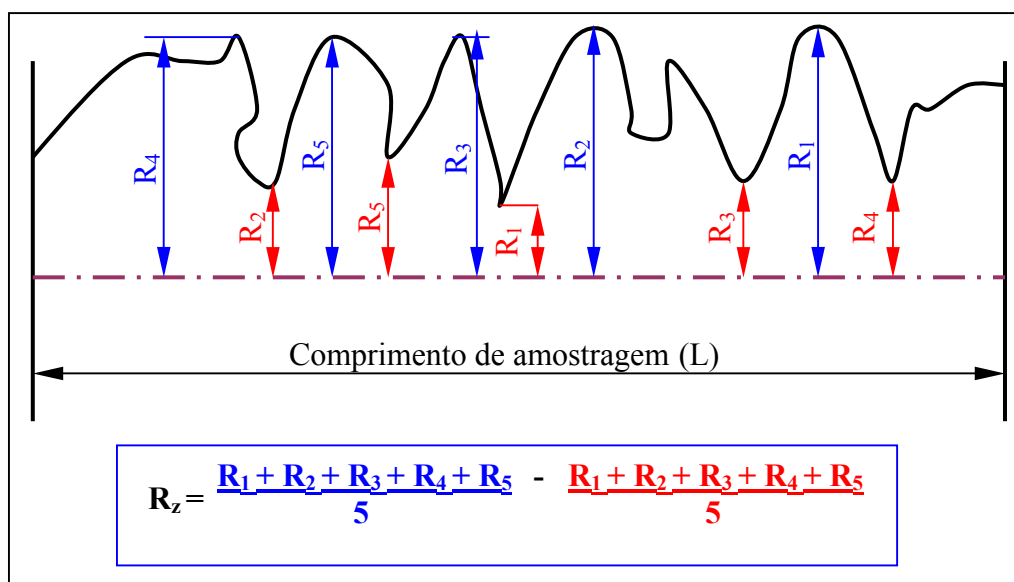


Figura 3.28—Altura das irregularidades dos 10 pontos “ R_z ” (Agostinho, et. al., 1990).

d-Altura máxima das irregularidades (R_{\max})

Defini-se como a distância entre o maior pico de irregularidade e a maior reentrância de irregularidade, medida no comprimento de amostragem. Para tal medição utiliza-se aparelhos traçadores de perfil (perfilógrafos). A figura 3.29 mostra como é realizado a medição em R_{\max} .

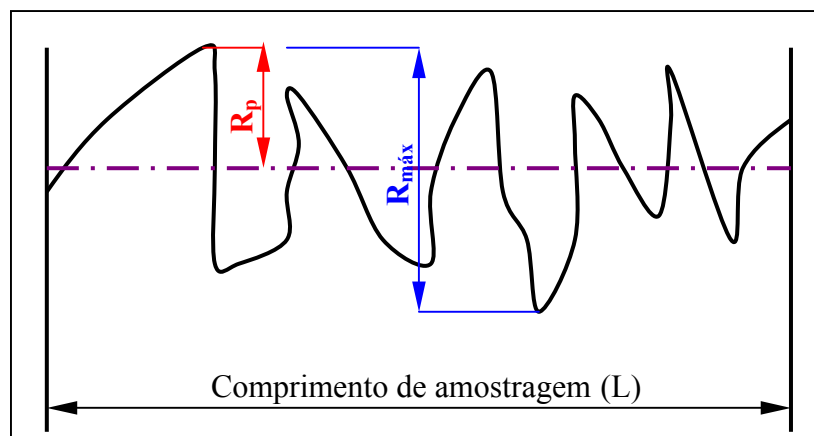


Figura 3.29–Altura máxima das irregularidades “ R_{\max} ” e profundidade média “ R_p ” (Agostinho, et. al., 1990).

e-Profundidade média (R_p)

É a ordenada do maior pico de irregularidade com a linha média, no comprimento de amostragem, conforme mostrado na figura 3.29 (Agostinho, et. al., 1990). Em se tratando de torneamento de aços endurecidos, os dois principais fatores que influenciam na rugosidade da peça são o valor do raio de ponta da ferramenta “ r_e ” e o avanço de corte “ f ” (Shaw, 1986). A fórmula que é citada por vários autores $R_{\max \text{ teórico}} = f^2 / 8 r_e$ (figura 3.7 e 3.8), onde f é o avanço de corte e r_e o raio de ponta da ferramenta de corte; significa o menor valor possível de R_{\max} que se pode obter, cujo o valor real (medido) é quase sempre maior e pode superar absurdamente o valor teórico. Essa divergência entre o valor teórico e real se deve a rigidez do sistema máquina-ferramenta-dispositivo de fixação da peça (vibrações), deformação do cavaco e fluxo lateral do cavaco. Nem sempre o ganho que se tem quando aumentado o raio de ponta da ferramenta de corte (contribuição geométrica) se traduz em um melhor acabamento superficial da peça, pois ao aumentar o valor do raio de ponta da ferramenta também se aumenta às vibrações de todo o sistema (Diniz^{II} e Noritomi, 2002; Sata, 1985).

Um estudo realizado sobre a influência dos parâmetros de corte na rugosidade dos corpos de prova do aço liga ABNT 4340, torneados com ferramentas de corte de metal

duro, recoberta com nitreto de titânio (classe GC 435), cuja geometria escolhida foi ISO TNMG 160404-61, revelou que (Diniz^{II} e Noritomi, 2002):

- Com o aumento do avanço, ao contrário do que é abordado na literatura, a rugosidade permaneceu praticamente constante, sendo que para valores de avanço mais altos a rugosidade real foi menor que a teórica (figura 3.30);
- Em geral a profundidade de usinagem teve pouca influência sobre os valores de rugosidade, porém notou-se para o caso específico experimentado, que a partir de uma profundidade de usinagem de 0,8 mm a rugosidade decresceu, o que é explicado pelo fato da diminuição da força passiva. A diminuição desta força está ligada a porção reta da aresta de corte da ferramenta que fica em contato com a peça, ou seja, a partir do momento em que não só o raio de ponta da ferramenta teve contato com a peça, a força caiu e conseqüentemente também os níveis de vibração (figura 3.30);
- Com o aumento da velocidade de corte o valor da rugosidade caiu (figura 3.30).

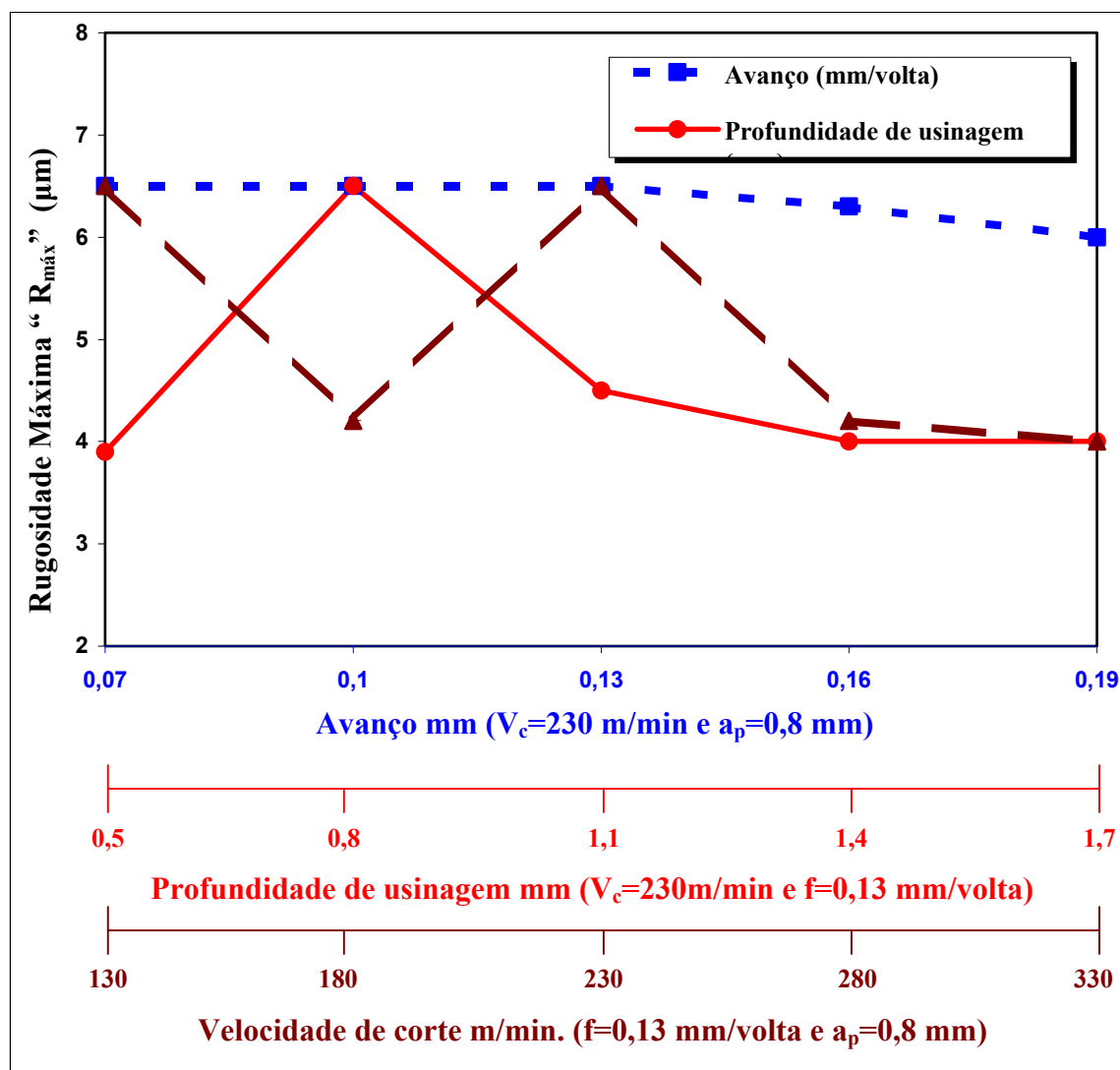


Figura 3.30—Variação da $R_{máx}$ em função dos parâmetros de usinagem (Diniz^{II} e Noritomi, 2002).

Lima, et al (2000) realizaram um trabalho na Empresa EATON (Valinhos-SP), em torneamento de engrenagens com 58-63 HRc de dureza. Para tal operação de acabamento foram utilizados insertos de CBN classe 7020 (Sandvik) com as seguintes geometrias: CNGA 120408S1020 e CNGA 120412S1020. Os parâmetros adotados foram $V_c=165$ m/min., $f=0,08$ mm/volta e $a_p=0,05$ mm e o cujo critério de fim de vida da ferramenta de corte foi R_a de 0,4 mm (exigência de projeto da peça). Especificamente nesse estudo, quando comparados os resultados obtidos com ferramentas com raios de ponta de 1,2 e 0,8 mm, para uma mesma velocidade de corte adotada no acabamento, conseguiu-se usinar uma maior quantidade de peças com R_a igual ou menor a 0,4 mm, ao se adotar a ferramenta com raio de ponta de 1,2 mm (Lima, et. al., 2000; Donnangelo, et. al., 2000).

CAPÍTULO 4

CONDIÇÕES ECONÔMICAS DE USINAGEM

4.1-Introdução

Este capítulo foi baseado no tópico sobre condições econômicas de usinagem dos livros “Fundamentos da Usinagem dos Metais” (Ferraresi, 1977) e “Tecnologia da Usinagem dos Materiais” (Diniz¹, et al., 2002) Basicamente serão abordados neste capítulo a velocidade de corte de mínimo custo (V_{co}) e velocidade de corte de máxima produção (V_{cmxp}), que nada mais é que uma análise de custo X benefício da velocidade de corte (maior ou menor). Em uma célula produtiva de usinagem, sempre existe a necessidade de alta produção (muitos pedidos) ou redução de custos em épocas de pouca demanda (poucos pedidos). Esta ferramenta de otimização possibilita adequar a célula de usinagem a melhor condição custo X benefício. Também será discutido neste capítulo sobre o intervalo de máxima eficiência (IME), que é o intervalo entre a V_{co} e V_{cmxp} , onde se consegue o melhor resultado custo-produção. É importante ressaltar que juntamente com toda essa metodologia de otimização das condições econômicas de usinagem estão as condições físicas do processo, que são: os equipamentos de usinagem, setup de troca de ferramentas, rigidez do sistema, etc.; e as condições de contorno, que são: o acabamento exigido da peça, a profundidade de usinagem, o avanço de corte e o tipo de operação (acabamento ou desbaste). Os assuntos citados acima e que serão descritos a seguir são explicações simples e resumidas, sem entrar em teorias aprofundadas e complexas, pois ao final da parte experimental deste trabalho, este será analisado de forma prática e objetivo dentro das condições econômicas de usinagem.

4.2-Tempos de usinagem

Os tempos de usinagem são os tempos gastos em todas etapas de usinagem de uma peça ou de um lote (passivos e ativos), que são divididos em:

- t_t = tempo total de usinagem de uma peça;
- t_c = tempo de corte (ativo);
- t_s = tempo secundário, que compreende o tempo gasto para colocação e fixação da peça, posicionamento e aproximação da ferramenta, corte, afastamento da ferramenta e inspeção e retirada da peça usinada;
- t_a = tempo de aproximação e afastamento da ferramenta;
- t_p = tempo de preparo da máquina;
- t_{ft} = tempo de troca da ferramenta.

As equações 4.1 a 4.5 definem o tempo total de usinagem de uma peça, dentro de um lote “Z” de peças. Onde N_t é o número de trocas da ferramenta na usinagem do lote “Z”, T tempo de vida da ferramenta e Z_t é o número de peças usinadas durante a vida T da ferramenta.

$$t_t = t_c + t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} + \frac{N_t}{Z} \cdot t_{ft} \quad (4.1)$$

$$Z = (N_t + 1)Z_t = (N_t + 1) \frac{T}{t_c} \quad (4.2)$$

$$N_t = Z \frac{t_c}{T} - 1 \quad (4.3)$$

$$t_t = t_c + (t_s + t_a + \frac{t_p}{Z}) + (\frac{t_c}{T} - \frac{1}{Z}) \cdot t_{ft} \quad (4.4)$$

$$t_t = t_c + (t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} \cdot t_{ft}) + \frac{t_c}{T} \cdot t_{ft} \quad (4.5)$$

4.3-Velocidade de corte de máxima produção (V_{cmxp})

Como já foi relatado anteriormente, é aquela velocidade de corte onde se consegue o menor tempo de usinagem de uma peça. Em um torneamento cilíndrico temos o seguinte equacionamento:

$$l_f = V_f \cdot t_c = f \cdot n \cdot t_c \quad (4.6)$$

$$n = \frac{1000 \cdot V_c}{\pi \cdot d} \quad (4.7)$$

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} \quad (4.8)$$

Onde:

l_f = percurso de avanço em mm;

d = diâmetro da peça em mm;

f = avanço em mm/volta;

V_c = velocidade de corte.

OBS: Para os casos em que a velocidade de avanço não é constante (copiagem, faceamento, etc) o tempo de corte é conseguido com cronometragem e/ou deduzindo a equação do tempo de corte em função da velocidade e comprimento de avanço, usando integração. Substituindo a equação 4.8 na 4.5, temos:

$$t_t = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + (t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{1}{Z} \cdot t_{ft}) + \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c \cdot T} \cdot t_{ft} \quad (4.9)$$

$$T = \frac{k}{V_c^x} \rightarrow \text{Fórmula de Taylor} \quad (4.10)$$

Onde: K e x são constantes do material para determinadas condições de usinagem, obtidos em tabelas ou no próprio processo produtivo. Substituindo a equação 4.10 na 4.9, tem-se:

$$t_t = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + (t_s + t_a + \frac{t_p}{Z}) + (\frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot k} - \frac{1}{Z}) t_{ft} \quad (4.11)$$

A figura 4.1 mostra os tempos de produção de uma peça em função da velocidade de corte para os tempos t_c , t_1 e t_2 , que são representados pelas equações 4.12, 4.13 e 4.14 e onde o valor da velocidade de máxima produção representa o mínimo tempo de produção.

$$t_c = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} \rightarrow \text{tempo de corte, ativo} \quad (4.12)$$

$$t_1 = t_s + t_a + \frac{t_p}{Z} - \frac{t_{ft}}{Z} \rightarrow \text{tempo passivo, é todo tempo envolvido no processo (4.13) que não tem ligação com a velocidade de corte.}$$

$$t_2 = \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot k} \cdot t_{ft} \rightarrow \text{é o tempo relacionado com troca de ferramenta} \quad (4.14)$$

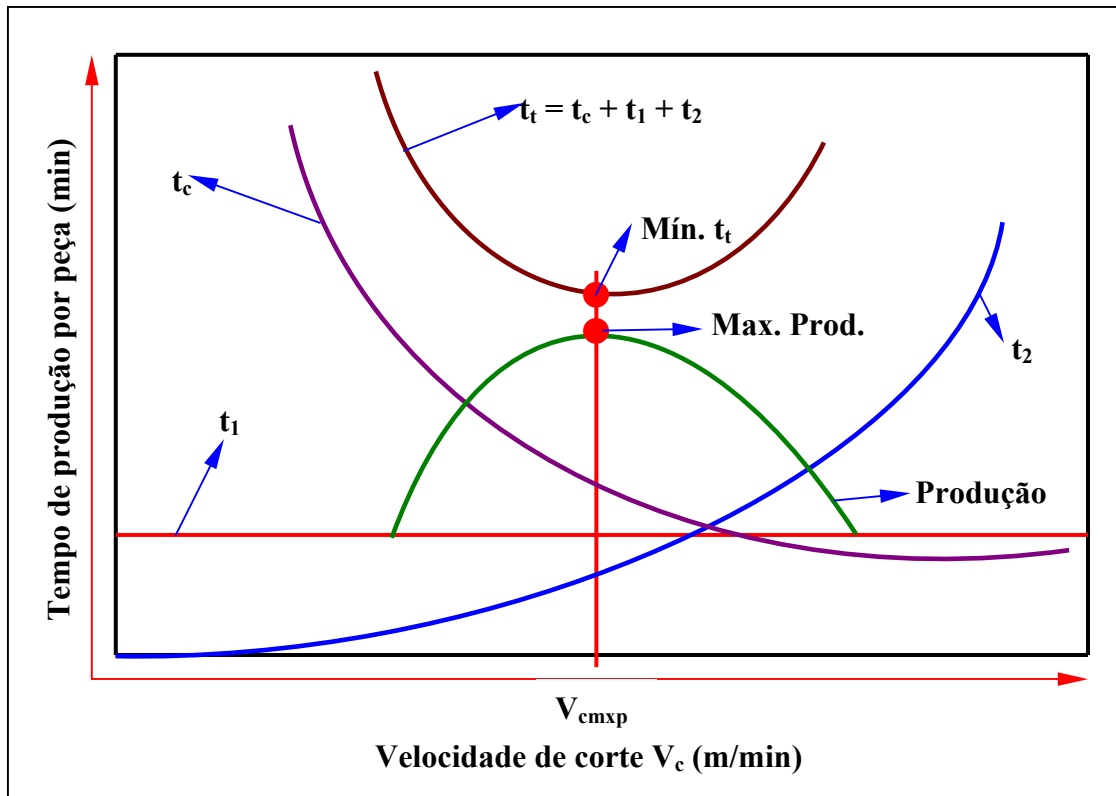


Figura 4.1–Tempo de produção por peça X velocidade de corte (Diniz¹, et. al., 2002).

Adotando avanço e profundidade de usinagem constantes, faz-se o seguinte equacionamento para se obter o mínimo da função 4.11.

$$\frac{dt_t}{dv_c} = - \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{1000 \cdot f \cdot V_c} + \frac{(x-1) \cdot l_f \cdot d \cdot V_c^{x-2}}{1000 \cdot f \cdot k} \cdot t_{ft} \quad (4.15)$$

Para $\frac{dt_t}{dv_c} = 0$, tem-se:

$$- \frac{1}{V_{cmxp}^2} + \frac{(x-1) \cdot V_{cmxp}^{x-2}}{k} \cdot t_{ft} = 0 \quad (4.16)$$

Logo, a velocidade de máxima produção é dada por:

$$V_{cmxp} = x \sqrt{\frac{k}{(x-1) \cdot t_{ft}}} \quad (4.17)$$

Agora com o valor de V_{cmxp} obtido na equação 4.17 e substituindo-o na equação de Taylor (4.10), tem-se a vida da ferramenta para a máxima produção (equação 4.18).

$$T_{\text{mxp}} = (x - 1) \cdot t_{\text{ft}} \quad (4.18)$$

4.4-Custos de produção

Para a análise da velocidade econômica de usinagem neste trabalho serão considerados somente os custos diretamente envolvidos no processo, que são:

- k_p = custo de produção por peça;
- k_{us} = custo da mão-de-obra de usinagem;
- k_{uf} = custo das ferramentas (depreciação, troca, afiação, etc.);
- k_{um} = custo da máquina (depreciação, manutenção, espaço ocupado, energia consumida, etc). Onde:

$$k_p = k_{us} + k_{um} + k_{uf} \quad (4.19)$$

$$k_{us} = t_t \cdot \frac{Sh}{60} \quad (\text{R\$/peça}) \quad (4.20)$$

$$k_{um} = \frac{t_t}{H \cdot 60} \left[(V_{mi} - V_{mi} \cdot \frac{m}{M}) \cdot j + \frac{V_{mi}}{M} + k_{mc} + E_m \cdot k_e \cdot j \right] \quad (\text{R\$/peça}) \quad (4.21)$$

$$k_{um} = \frac{t_t}{60} \cdot S_m \quad (4.22)$$

Onde:

t_t = tempo total de manufatura da peça em minutos;

Sh = salário e encargos do operador em R\$/hora;

V_{mi} = valor inicial de aquisição da máquina em R\$;

M = vida prevista para a máquina em anos;

m = idade da máquina em anos;

j = taxa de juros por ano;

k_{mc} = custo anual de manutenção da máquina em R\$/ano;

E_m = espaço ocupado pela máquina em R\$/m².ano;

S_m = custo total da máquina em R\$/hora;

H = número de horas de trabalho por ano.

Quando são utilizadas pastilhas intercambiáveis, o custo da ferramenta por vida e por peça é dado por:

$$K_{ft} = \frac{V_{si}}{N_{fp}} + \frac{k_{pi}}{N_s} \quad (\text{R\$/vida da ferramenta}) \quad (4.23)$$

$$K_{uf} = \frac{K_{ft}}{Z_t} \quad (\text{R\$/peça}) \quad (4.24)$$

Onde:

N_{fp} = vida média do porta-ferramentas, em quantidade de arestas de corte, até sua possível inutilização;

V_{si} = custo de aquisição do porta-ferramenta;

N_s = número de arestas de corte da pastilha intercambiável;

K_{pi} = custo de aquisição da pastilha intercambiável;

Z_t = número de peças usinadas por vida T da ferramenta.

4.4.1-Vida econômica da ferramenta

Substituindo as equações 4.20, 4.22 e 4.24 na equação 4.19, chegamos na seguinte formulação:

$$K_p = t_t \cdot \frac{Sh}{60} + t_t \cdot \frac{Sm}{60} + \frac{K_{ft}}{Z_t} = \frac{t_t}{60} \cdot (Sh + Sm) + \frac{t_{tc}}{60} \cdot K_{ft} \quad (4.25)$$

Desse modo substituindo a equação 4.11 na equação 4.25 tem-se:

$$K_p = \left(\frac{t_t}{60} - \frac{1}{Z} \right) \cdot (Sh + Sm) + \frac{t_c}{60} \cdot (Sh + Sm) + \frac{t_c}{T} \cdot \left(K_{ft} + \frac{t_{ft}}{60} \cdot (Sh + Sm) \right) \quad (4.26)$$

ou

$$K_p = C_1 + \frac{t_c}{60} \cdot C_2 + \frac{t_c}{T} \cdot C_3, \text{ onde} \quad (4.27)$$

C_1 = constante independente da velocidade de corte em R\$/peça;

C_2 = soma das despesas com mão-de-obra e com máquina em R\$/hora;

C_3 = constante de custo relativo à ferramenta.

Para torneamento cilíndrico e pela equação de Taylor tem-se:

$$K_p = C_1 + \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{60000 \cdot f \cdot V_c} \cdot C_2 + \frac{l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-1}}{1000 \cdot f \cdot k} \cdot C_3 \quad (4.28)$$

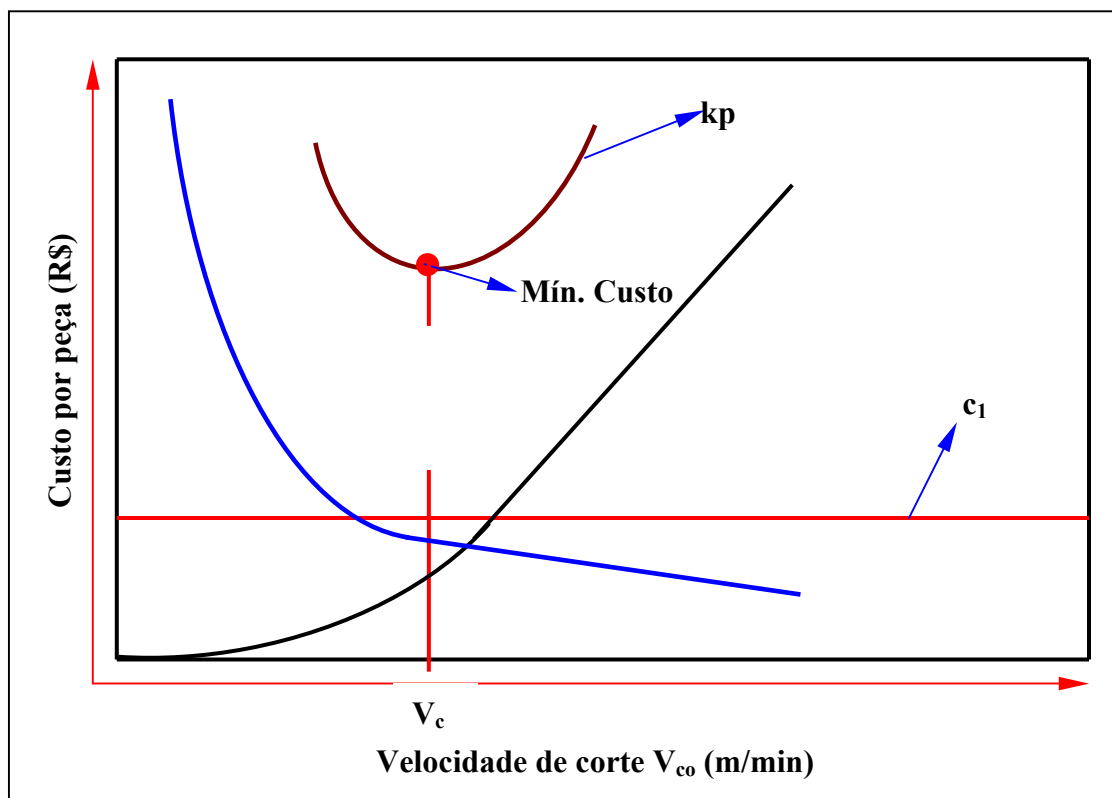


Figura 4.2–Custo por peça produzida X velocidade de corte (Diniz¹, et. al., 2002).

Ao analisarmos a figura 4.2 e admitindo-se f_n e a_p constantes obtem-se o valor mínimo de k_p , para tanto a derivada da equação abaixo em função da velocidade de corte deve ser nula:

$$\frac{dk_p}{dv_c} = - \frac{l_f \cdot \pi \cdot d}{60000 \cdot f \cdot V_c^2} \cdot C_2 + \frac{(x-1) \cdot l_f \cdot \pi \cdot d \cdot V_c^{x-2}}{1000 \cdot f \cdot k} \cdot C_3 \quad (4.29)$$

Já a velocidade de corte de mínimo custo será:

$$V_{co} = \sqrt[x]{\frac{C_2 \cdot k}{60 \cdot (x-1) \cdot C_3}} \quad (4.30)$$

Ao substituirmos a equação 4.30 na equação de Taylor encontramos a vida da ferramenta para a condição de mínimo custo, conforme mostrado na equação 4.31.

$$T_0 = \frac{60 \cdot (x - 1) \cdot C_3}{C_2} = \frac{60 \cdot (x - 1) \cdot k_{ft}}{Sh + Sm} + (x - 1) \cdot t_{ft} \quad (4.31)$$

4.5-Intervalo de máxima eficiência

Intervalo de máxima eficiência (IME), é o intervalo compreendido entre as velocidades de mínimo custo (V_{co}) e de máxima produção (V_{cmxp}). Alguns estudos já realizados, demonstraram que quase sempre se deve trabalhar o mais próximo possível da velocidade de máxima produção, pois a diferença entre os custos é pequena. A figura 4.3 mostra o intervalo de máxima eficiência.

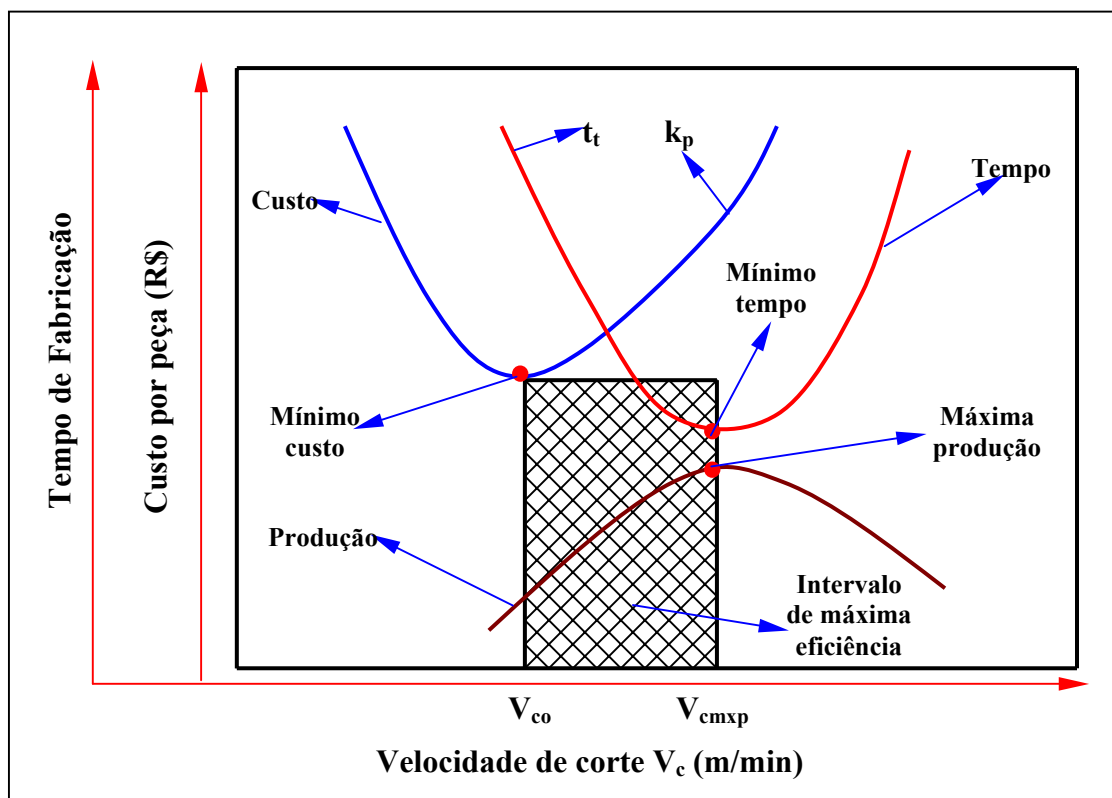


Figura 4.3—Intervalo de máxima eficiência (Diniz¹, et. al., 2002).

CAPÍTULO 5

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

5.1-Máquinas e ferramentas

5.1.1- Máquinas

Para este trabalho foram utilizados dois tornos CNC. Os ensaios preliminares (qualitativos) e os ensaios finais (quantitativos) foram realizados num torno CNC Nardini Logic 175, conforme mostrado na figura 5.1 e com as seguintes características:

- ⇒ Potência máxima no eixo de 7,5 CV
- ⇒ Rotação máxima de 4000 rpm
- ⇒ Torre com oito posições
- ⇒ Torque máximo de 200 Kgf.m



Figura 5.1– Torno CNC Nardini Logic 175 (LAM/UNIFEI, 2003).

Também foram realizados experimentos qualitativos em um torno CNC Romi Multiplic 35D, conforme mostrado na figura 5.2 e 5.3 e com as seguintes características:

- ⇒ Potência máxima no eixo de 13,0 CV
- ⇒ Rotação máxima de 3000 rpm
- ⇒ Torre com oito posições
- ⇒ Torque de 400 kgf.m



Figura 5.2– Torno CNC Romi Multiplic 35D (oficina de usinagem da Alcoa Alumínio em Poços de Caldas, 2003).

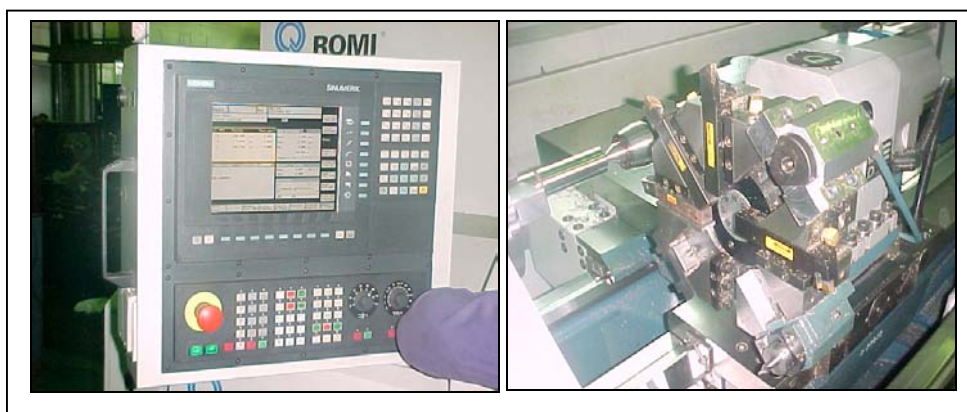


Figura 5.3– Painel de controle e torre do Torno CNC Romi Multiplic 35D (oficina de usinagem da Alcoa Alumínio em Poços de Caldas, 2003).

5.1.2- Ferramentas utilizadas

Foram utilizadas neste trabalho ferramentas de corte de cerâmica mista e PCBN, onde para cada uma destas foram testados ferramentas de geometrias convencionais e alisadoras. A seguir segue as características de cada inserto utilizado no procedimento experimental.

- ⇒ Ferramenta de cerâmica mista ($Al_2O_3 + TiC$) classe Sandvik Coromant CC 650 com geometria convencional. Esta ferramenta é indicada para operações de acabamento em aços endurecidos, ferro fundido, ferros fundidos endurecidos e superligas resistentes ao calor, onde a combinação de resistência ao desgaste e boas propriedades térmicas são necessárias. Inserto com geometria ISO CNGA 120408 T01020;
- ⇒ Ferramenta de cerâmica mista ($Al_2O_3 + TiC$) classe Sandvik Coromant CC 650 com geometria alisadora. Esta ferramenta é indicada para operações de acabamento em aços endurecidos, ferro fundido, ferros fundidos endurecidos e superligas resistentes ao calor, onde a combinação de resistência ao desgaste e boas propriedades térmicas são necessárias. Inserto ISO CNGA 120408 T01020WG. A particularidade desta ferramenta é a geometria diferenciada no raio de ponta, onde possibilita acabamentos melhores para um mesmo avanço e igual para avanços superiores (comparação com geometrias convencionais);
- ⇒ Ferramenta de CBN ($CBN + TiN$) classe Sandvik Coromant CB 7020 com geometria convencional. Esta ferramenta é indicada para operações de acabamento em aços e ferros fundidos endurecidos, por ser resistente ao desgaste e reações químicas. Inserto ISO CNGA 120408 S01020A;
- ⇒ Ferramenta de CBN ($CBN + TiN$) classe Sandvik Coromant CB 7020 com geometria alisadora. Esta ferramenta é indicada para operações de acabamento em aços e ferros fundidos endurecidos, por ser resistente ao desgaste e reações químicas. Inserto ISO CNGA 120408 T01020AWH.

5.1.3-Portas-ferramentas utilizados

No torno CNC Nardini foi utilizado um suporte Sandvik Coromant PCLNL 1616H12 e no torno Romi foi utilizado um suporte Sandvik Coromant DCLNR 2020K12.

5.2- Material usinado

O material dos corpos de prova utilizados nos ensaios de usinagem foi o aço 300M (descrito no Capítulo 2), conforme composição química ASTM mostrada na tabela 2.1. Este material foi tratado termicamente (temperado e revenido) para obter uma dureza de 50 HRC, dureza média observada nos ensaios até uma profundidade de 1,5 mm. A figura 5.4 mostra o croqui dos corpos de prova utilizados, com as dimensões iniciais destes e a figura 5.5 mostra um corpo de prova sendo usinado.

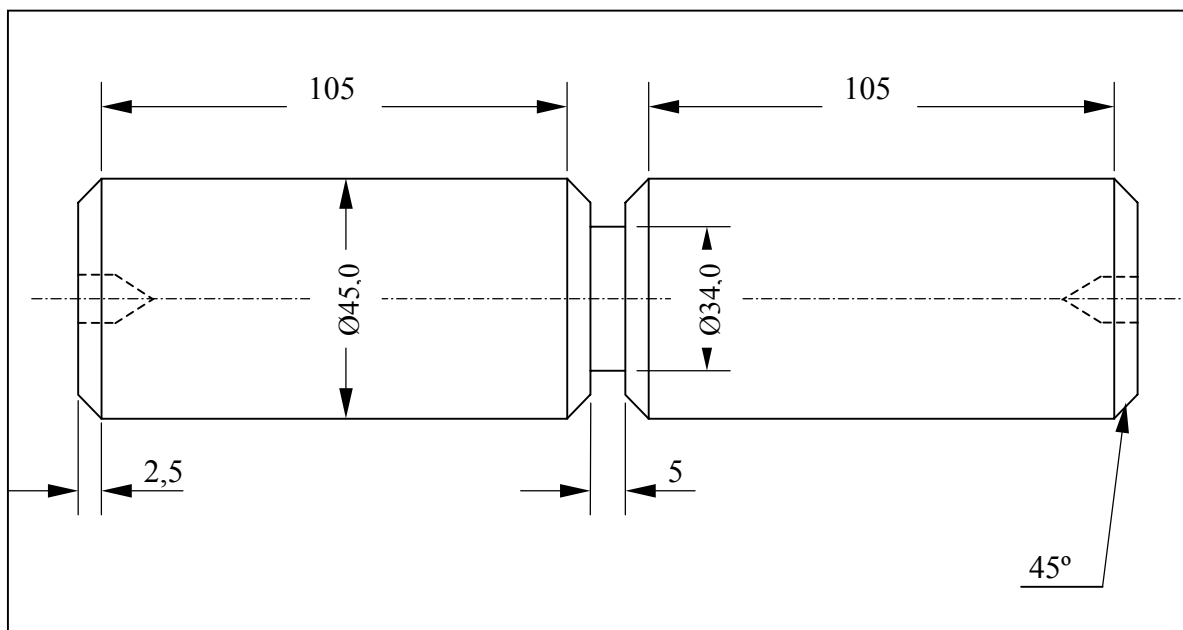


Figura 5.4– Croqui dos corpos de prova do aço 300M utilizados nos ensaios de usinagem.

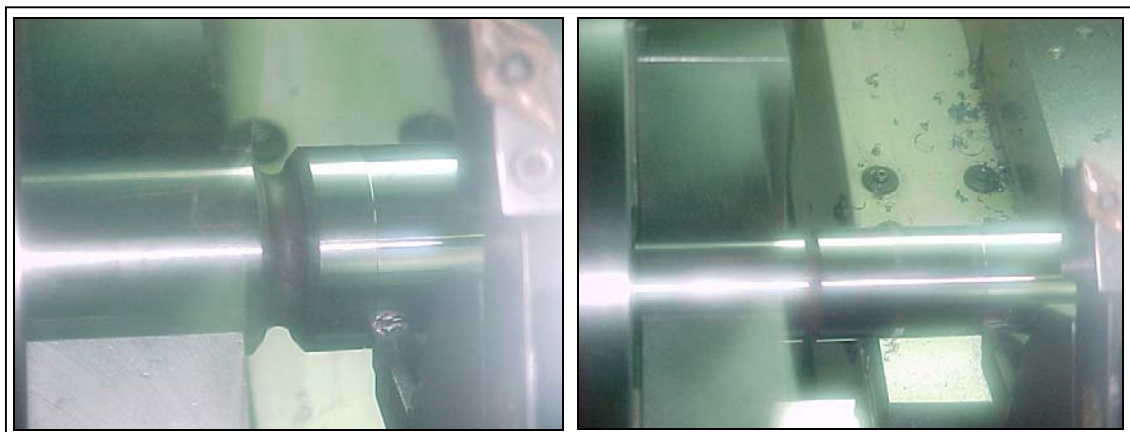


Figura 5.5– Corpo de prova do aço 300M sendo torneado no Torno Romi.

5.3-Ensaio preliminares (qualitativos)

Para realização deste trabalho inicialmente foram testadas várias condições de usinagem, nas quais alguns parâmetros como velocidade e avanço de corte tiveram seus valores alterados com o propósito de se conseguir um acabamento superficial equivalente ao de retificação e a maior vida possível para a ferramenta de corte. Os parâmetros iniciais de corte para os ensaios preliminares foram definidos com base na revisão bibliográfica e na especificação técnica do fabricante da ferramenta. Além dos parâmetros de corte, também foi variada a geometria das ferramentas.

5.3.1-Torno CNC Nardini Logic 175

a) Condições de usinagem

Para esta etapa do trabalho foram adotados os seguintes parâmetros de corte para as geometrias convencional e alisadora:

- ⇒ Velocidade de corte de 150 e 200 m/min;
- ⇒ Avanço de corte de 0,08-0,16-0,2-0,25-0,3-0,4 e 0,5 mm/v;
- ⇒ Profundidade de corte de 0,2 mm.

Para cada velocidade de corte de 150 e 200 m/min foram realizados testes com todos os avanços citados, sempre mantendo-se a profundidade de corte constante ($a_p=0,2$ mm). Para cada avanço adotado neste ensaio de usinagem, foi medido após de cada passe o valor da rugosidade superficial do corpo de prova em R_a e R_t . Também foram analisados os desgastes e avarias de cada ferramenta de corte e o tipo e formato dos cavacos gerados.

5.3.2-Torno CNC Romi Multiplic 35D

a) Condições de usinagem

Para esta etapa do trabalho foram adotados os seguintes parâmetros de corte para as geometrias convencional e alisadora:

- ⇒ Velocidade de corte de 150 m/min;
- ⇒ Avanço de corte de 0,08-0,16-0,2-0,25-0,3-0,4 e 0,5 mm/v;

⇒ Profundidade de corte de 0,2 mm.

Para os ensaios realizados neste torno CNC, somente foi adotado a velocidade de corte de 150 m/min., pois devido aos problemas de rigidez do equipamento, (acredita-se provocado pela fixação irregular da base do equipamento ao solo), o nível de vibração foi altíssimo, provocando a quebra prematura da aresta de corte principal da ferramenta de corte. Os demais parâmetros e procedimentos experimentais foram idênticos aos utilizados no torno CNC Nardini.

5.4-Ensaio definitivos (quantitativos)

Para realização desta fase do trabalho somente foi utilizado o torno CNC Nardini, por este ter apresentado nos ensaios preliminares os melhores resultados de acabamento superficial. Qualidade esta conseguida por este torno, devido sua maior rigidez do conjunto máquina-ferramenta-dispositivo de fixação da ferramenta de corte, se comparado com o outro torno utilizado no experimento (Romi). O objetivo agora nesta fase é estudar a vida de cada ferramenta de corte, para tanto o critério de fim de vida será rugosidade $R_a \leq 0,6 \mu\text{m}$.

5.4.1-Condições de usinagem

Com base e direcionamento dos ensaios preliminares, foram adotados os seguintes parâmetros de corte para as ferramentas de cerâmica mista e PCBN convencional e alisadora.

- ⇒ Velocidade de corte de 150, 200 e 250 m/min;
- ⇒ Avanço de corte de 0,08 mm/v para as ferramentas de geometria convencional;
- ⇒ Avanço de corte de 0,15, 0,2 e 0,3 mm/v para as ferramentas de geometria alisadora;
- ⇒ Profundidade de corte de 0,2 mm.

Para cada velocidade de corte de 150, 200 e 250 m/min foram realizados testes com todas ferramentas de corte (cerâmica mista e PCBN, conforme citado acima), onde para cada geometria foi adotado um avanço de corte em particular, sempre com a profundidade de corte constante ($a_p=0,2$ mm). Ao longo de cada condição de usinagem diferente, foi acompanhado a vida da ferramenta em função do acabamento superficial ($R_a \leq 0,6 \mu\text{m}$), os principais desgastes e avarias das ferramentas de corte e o processo de formação do cavaco.

5.5-Instrumentos de medição

- 1 – Rugosímetro Taylor Hobson, modelo Surtronic 3⁺;
- 2 – Durômetro Ottowolpert Werke, modelo Testor HT 1^a;
- 3 – Microscópio Leica, modelo MZ 12;
- 4 – Micrômetro Mitutoyo de 25-50 mm e 50-75 mm.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÃO

6.1-Ensaio preliminares (qualitativos)

6.1.1-Torno CNC Nardini Logic 175

a) Acabamento superficial

Para cada condição testada foram medidos os valores de rugosidade (R_a e R_t) dos corpos de prova. As figuras 6.1 e 6.2 comparam os valores de rugosidade em R_a e R_t , respectivamente entre as ferramentas CC 650 de raio de ponta convencional e alisadora. Neste ensaio variou-se o avanço e manteve-se fixa a velocidade de corte em 150 m/min e a profundidade de corte em 0,2 mm. A diferença de rugosidade entre os corpos de prova usinados com ferramentas de geometria alisadora e convencional é extremamente alta, principalmente com avanços maiores. Ao analisar o comportamento da rugosidade (R_a) na figura 6.1, nota-se que para ferramenta de geometria alisadora os valores praticamente se mantiveram constantes até o avanço de 0,3 mm/v, com um valor mínimo de 0,14 μm ($f=0,08$ mm/v) e máximo de 0,21 μm ($f=0,3$ mm/v). A partir do avanço de 0,3 mm/v, verificou-se uma tendência ascendente de rugosidade R_a , com valores crescente de 0,21 μm ($f=0,3$ mm/v), 0,35 μm ($f=0,4$ mm/v) e 0,61 μm ($f=0,5$ mm/v), porém com exceção do avanço de 0,5 mm/v que excedeu em 0,01 μm o limite de rugosidade para os padrões de retificação (máximo de 0,60 μm), segundo Diniz e Matsumoto (1999), todos outros ficaram bem abaixo do limite aplicável. Já para os corpos de prova usinados com ferramenta

convencional, os valores de rugosidade são diretamente proporcionais ao aumento do avanço, numa escala bastante ascendente até 0,3 mm/v. O menor valor obtido de rugosidade foi de 0,32 μm ($f = 0,08$ mm/v) e para os avanços de 0,4 e 0,5 mm/v os valores de rugosidade foram de 3,82 e 3,95 μm respectivamente. Como visto, com a ferramenta de raio de ponta convencional, somente conseguiu-se acabamento comparável com o de retificação para o avanço de 0,08 mm/v.

No caso das ferramentas de geometria alisadora, o efeito alisador de sua geometria se mostrou muito eficiente no acabamento superficial dos corpos de prova, onde o efeito danoso do aumento do avanço de corte para a rugosidade foi claramente amortizado, ficando igual aos valores conseguidos no processo de retificação. Na figura 6.2, o comportamento da rugosidade R_t foi muito similar ao comportamento da rugosidade R_a , com alguns pontos em maior evidência para os corpos de provas usinados com a ferramenta convencional, o que se deve ao fato da R_t trabalhar com valores amplificados (medida realizada entre o maior pico e a maior reentrância), onde quanto maior a rugosidade mais evidente os pontos ficam.

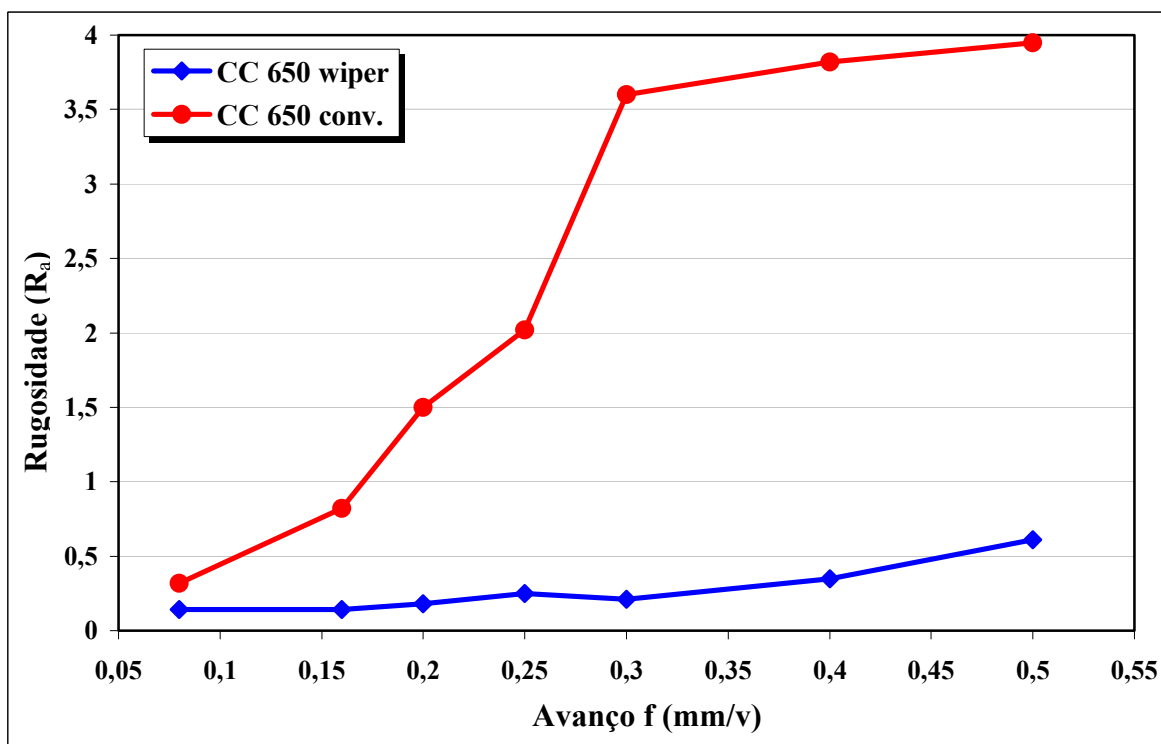


Figura 6.1– Rugosidade R_a ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).

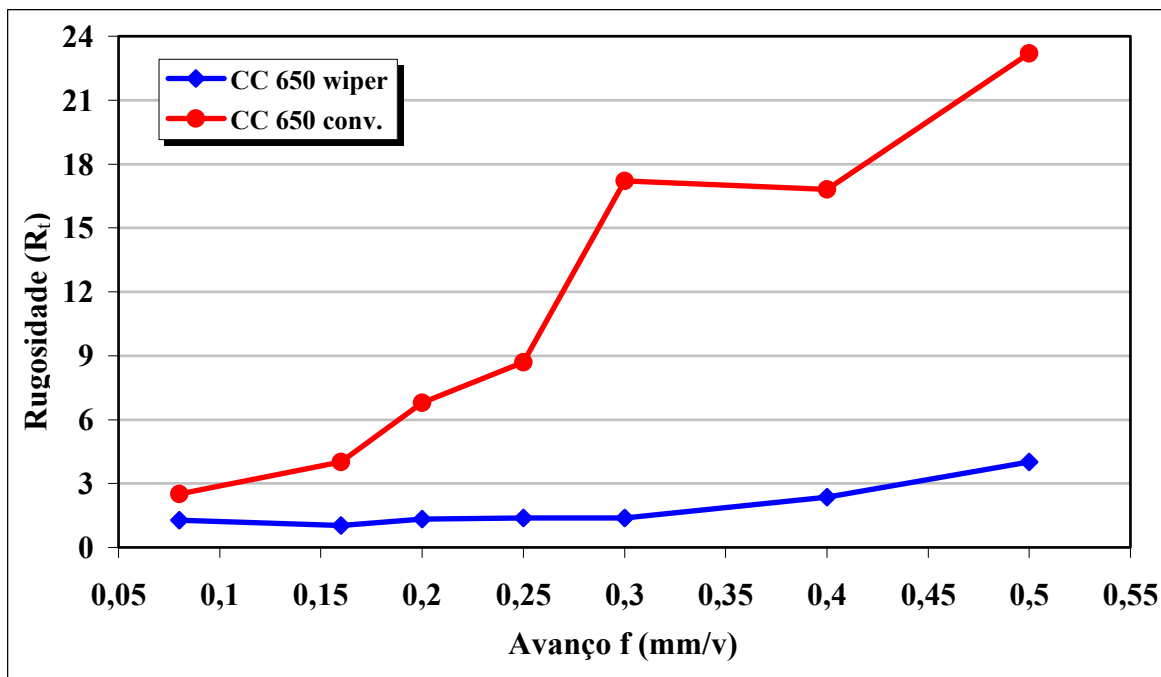


Figura 6.2– Rugosidade R_t ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).

Conforme mostrado nas figuras 6.3 e 6.4 o aumento da velocidade de corte para 200 m/min na usinagem dos corpos de provas com ferramenta alisadora, não teve grande impacto na rugosidade para os avanços de corte até 0,3 mm/v, onde os valores em R_a foram respectivamente:

- ⇒ 0,15 μm ($f = 0,08$ mm/v);
- ⇒ 0,22 μm ($f = 0,16$ mm/v);
- ⇒ 0,18 μm ($f = 0,20$ mm/v);
- ⇒ 0,25 μm ($f = 0,25$ mm/v);
- ⇒ 0,23 μm ($f = 0,30$ mm/v).

Para os avanços de 0,4 e 0,5 mm/v, os valores de rugosidade conseguidos foram maiores do que os encontrados nos ensaios anteriores com velocidade de corte de 150 m/min (0,46 e 1,24 μm). Tal fenômeno ocorreu devido a vibração do conjunto máquina-ferramenta, provocado pela maior força de corte, resultado do alto avanço e velocidade de corte. Já o comportamento da rugosidade dos corpos de prova usinados com ferramenta de corte convencional e velocidade de corte de 200 m/min, foi bastante aleatório em função do avanço. Somente para o avanço de 0,08 mm/v obteve acabamento similar ao de retificação, porém este valor foi no limite máximo permissível (0,60 μm), pois os valores de rugosidade R_a encontrados para os avanços de 0,08 e 0,16 mm/v foram maiores do que os encontrados anteriormente ($V_c = 150$ m/min), comportamento já esperado, devido ao fenômeno já mencionado no início deste parágrafo. Porém observou-se que os valores de rugosidade conseguidos na faixa de avanço entre 0,25 e 0,3 mm/v foi menor quando

adotado velocidade de corte de 200 m/min do que quando adotado 150 m/min. Uma explicação plausível para tal fenômeno é que a combinação da velocidade de corte de 200 m/min com os valores de avanços citados acima, proporcionou uma condição ideal para o cisalhamento do cavaco, sendo assim diminuindo um pouco o efeito da vibração no acabamento superficial, se comparado com a velocidade de corte de 150 m/min.

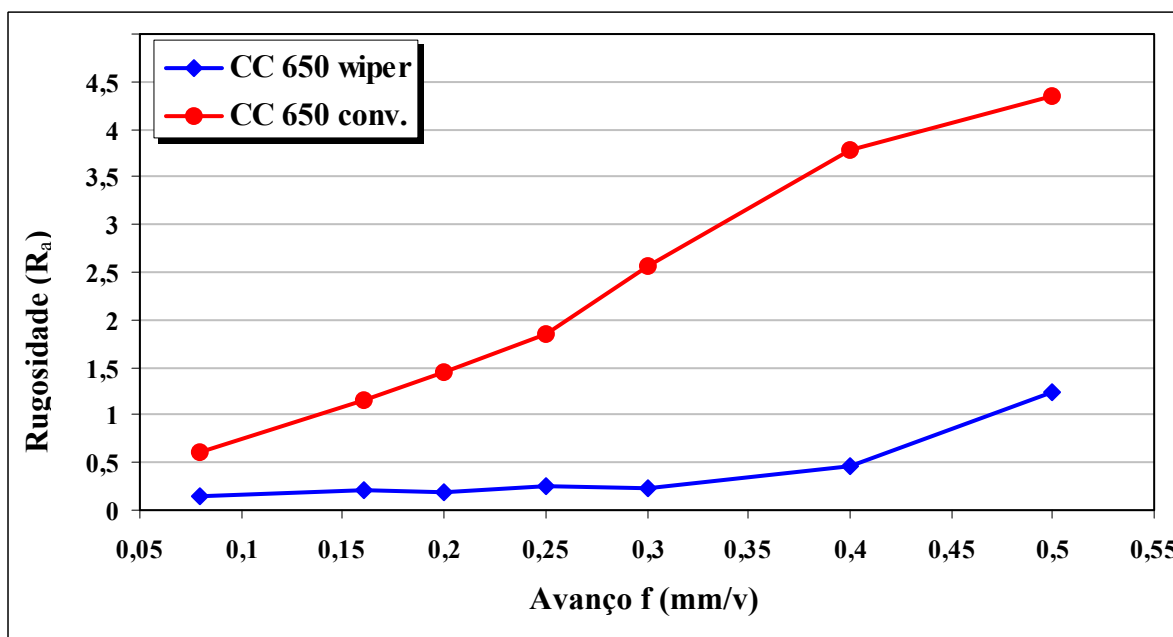


Figura 6.3– Rugosidade R_a ($V_c=200\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).

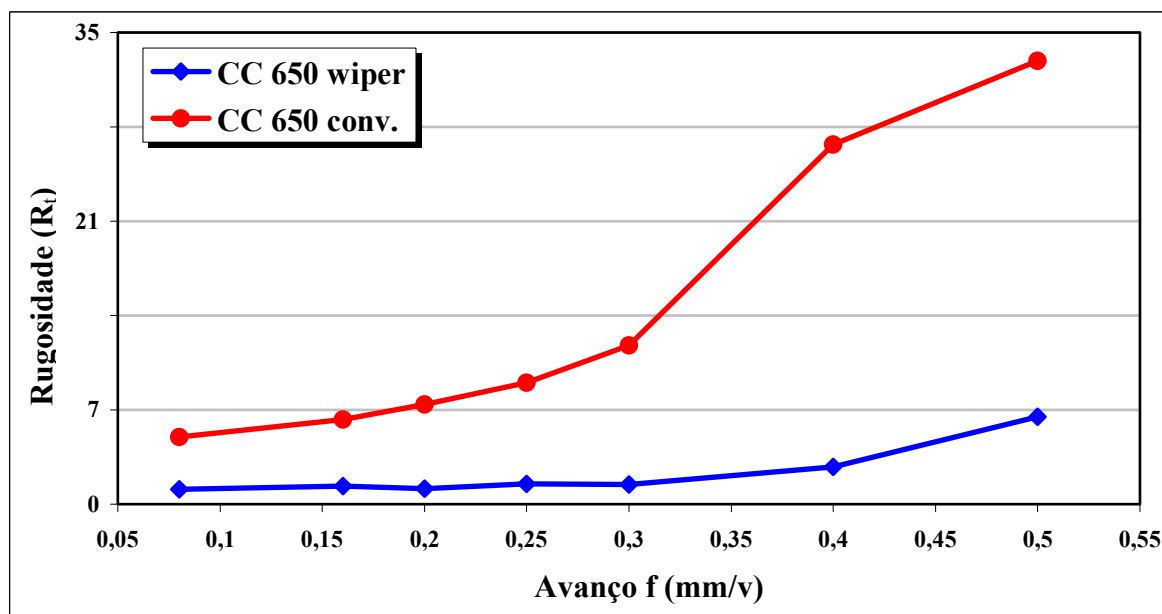


Figura 6.4– Rugosidade R_t ($V_c=200\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).

A figura 6.5 mostra os valores de rugosidade encontrados para velocidades de corte de 150 e 200 m/min e ferramentas com geometria convencional e alisadora. Evidenciou-se que as ferramentas de geometria alisadora são muito superiores as ferramentas de geometria convencional no que se refere ao acabamento superficial. Um outro aspecto bastante forte e positivo observado na ferramenta alisadora, foi a total indiferença quanto a variação da velocidade de corte (150 e 200 m/min) e o avanço entre 0,08 e 0,3 mm/v, como agentes impactadores na rugosidade, ou seja mesmo variando estes parâmetros a rugosidade R_a não sofreu grandes variações.

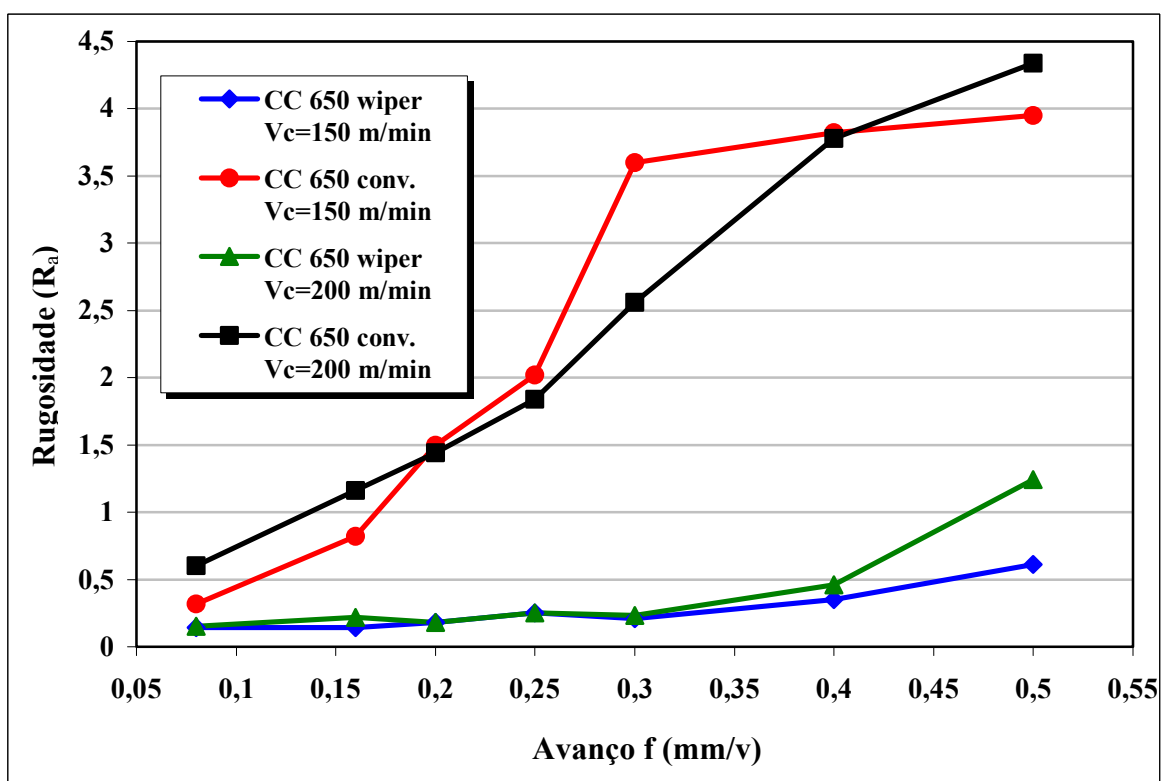


Figura 6.5– Rugosidade R_a ($V_c=200$ e 150 m/min, $a_p=0,2$ mm, ferramenta convencional e alisadora).

b) Formação do cavaco

Conforme já demonstrado e explicado no capítulo 3 deste trabalho, o cavaco originado do torneamento de aços endurecidos tem como principal característica ser do tipo dente de serra. Neste trabalho confirmou-se tal afirmação, pois todo cavaco produzido foi do tipo dente de serra, independentemente das condições de usinagem adotadas. Entretanto, o formato do cavaco se mostrou bastante sensível a variação do avanço que juntamente com a profundidade de corte, são os principais parâmetros de corte que influenciam diretamente no formato do mesmo cavaco. Como a profundidade de corte

adotada foi constante ($a_p = 0,2$ mm, operação de acabamento), somente conseguiu-se o cavaco ideal (em forma de vírgula) para avanços superiores a $0,3$ mm/v tanto para velocidade de corte de 150 ou 200 m/min. As figuras 6.6 e 6.7 mostram cavacos em forma de fita e helicoidais, produzidos durante a usinagem dos corpos de provas do aço 300 M, sendo que os avanços aplicados durante a formação destes cavacos foram $0,2$ mm/v (figura 6.6) e $0,3$ mm/v (figura 6.7). Não se observou nenhum impacto da geometria da ferramenta no formato do cavaco. Para avanços superiores a $0,3$ mm/v o cavaco passou a ter a forma de vírgula (formato ideal), conforme mostrado na figura 6.8.

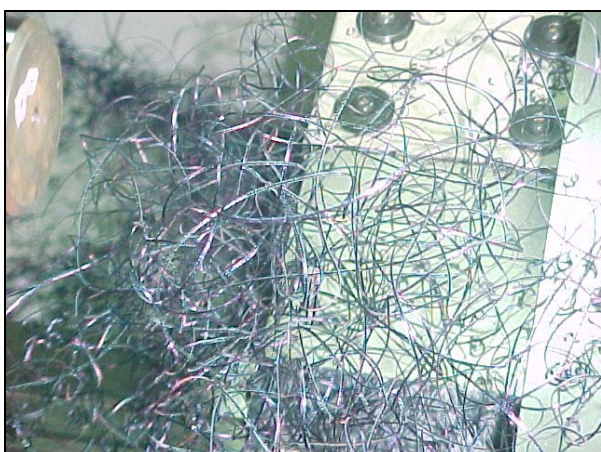


Figura 6.6– Cavaco dente de serra formato de fita ($f = 0,2$ mm/v).

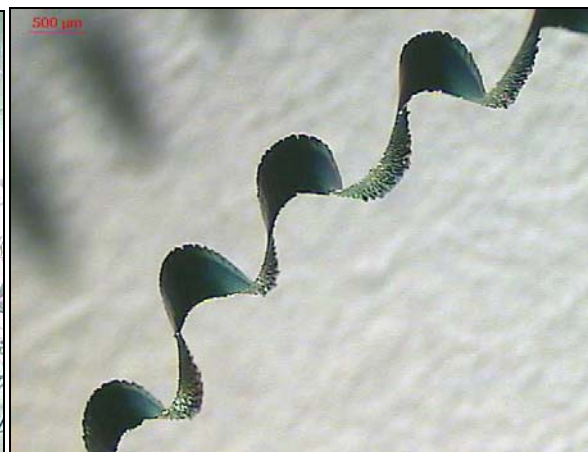


Figura 6.7– Cavaco dente de serra formato helicoidal ($f = 0,3$ mm/v).

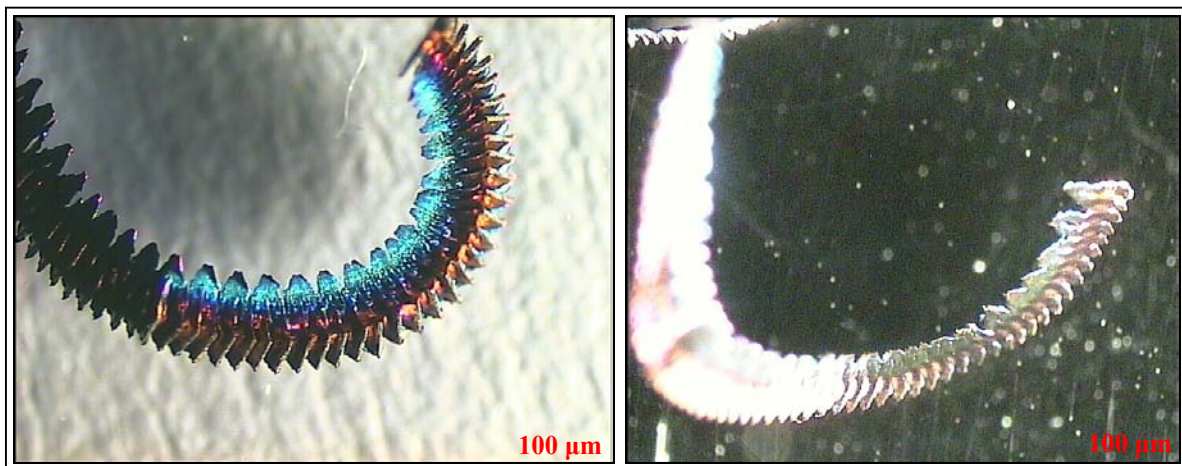


Figura 6.8– Cavacos dente de serra formato de vírgula (avanço de corte de $0,4$ mm/v).

c) Desgaste da ferramenta de corte

As ferramentas de cerâmica mista CC 650 de geometria convencional não sofreram nenhuma avaria nos ensaios qualitativos realizados no torno CNC Nardini. Conforme se

verifica a seguir nas figuras 6.9 e 6.10, houve desgaste de flanco e cratera nesses insertos. O principal agente do desgaste de flanco foi à abrasão entre a peça e a superfície de folga da ferramenta de corte, fato agravado devido à alta dureza do corpo de prova (dureza média de 50 HRC) e elevada velocidade de corte ($V_c = 200$ m/min). Já o desgaste de cratera além da abrasão (atrimento) do cavaco com a superfície de saída da ferramenta de corte, (cavaco em fita e helicoidal), acredita-se também ter ocorrido devido a difusão. Mesmo a cerâmica mista tendo boas propriedades químicas, principalmente no que se refere a difusão, a quantidade de elementos de liga constituintes do aço 300 M somado a alta temperatura de usinagem, é uma combinação perfeita para tal fenômeno ocorrer (assunto apresentado no capítulo 3 deste trabalho). Este aspecto químico, que envolve os desgastes das ferramentas de corte aplicadas neste trabalho não será estudado a fundo, devido não ser este o enfoque principal do trabalho.

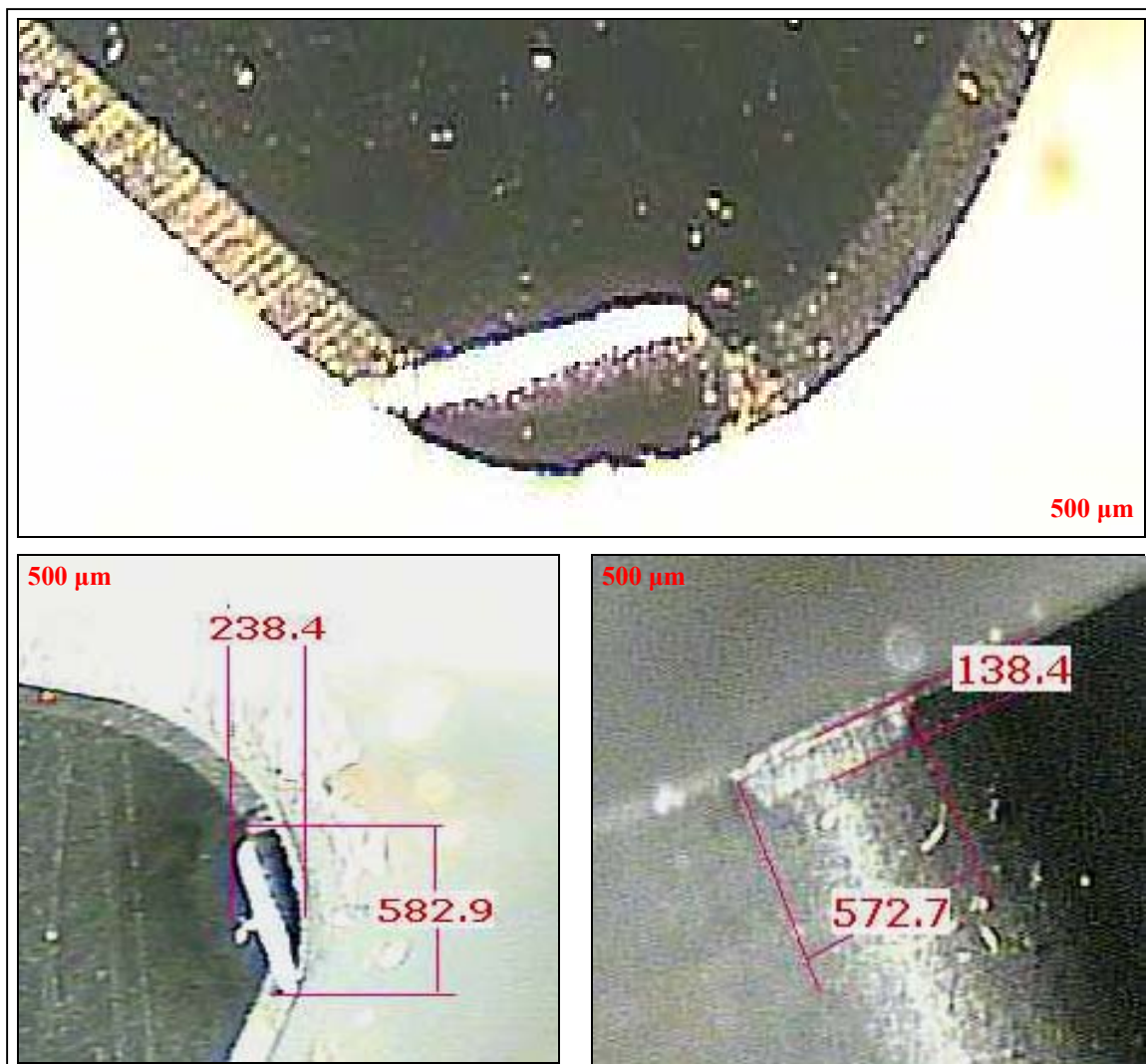


Figura 6.9–Desgaste de flanco e cratera na ferramenta CC 650 convencional. (cotas em µm)



Figura 6.10–Desgaste de flanco e cratera na ferramenta CC 650 convencional.

O comportamento das ferramentas de cerâmica mista CC 650 alisadora foi totalmente diferente das ferramentas de geometria convencional. Praticamente não se observou qualquer tipo de desgaste, somente avarias. Estas avarias foram constituídas de pequenos e grandes lascamentos na ponta da ferramenta, principalmente na aresta de corte e na superfície de saída, conforme mostrado nas figuras 6.11 e 6.12. Como esta fase do trabalho é somente qualitativa, fica difícil definir a causa destas avarias (fatores que serão analisados nos ensaios quantitativos, vida da ferramenta), contudo se comparado com a ferramenta convencional, este problema está diretamente ligado com os três raios que compõe a ponta da ferramenta alisadora.



Figura 6.11–Avarias (lascamento) na ferramenta CC 650 alisadora (cotas em μm).



Figura 6.12–Avarias (lascamento) na ferramenta CC 650 alisadora.

6.1.2-Torno CNC Romi Multiplic 35D

a) Acabamento superficial

Como já citado no capítulo anterior, foi impossível realizar os ensaios neste torno adotando velocidade de corte de 200 m/min, pois em todas tentativas as ferramentas de corte quebraram instantaneamente, sejam estas de geometria convencional ou alisadora. A causa para tal situação foi o excesso de vibração do equipamento durante a usinagem dos corpos de prova. Acredita-se que a principal causa de tamanha vibração sejam problemas na base e fixação do torno ao solo, pois não foi identificado nenhum problema de placa, rolamentos do eixo principal e/ou problemas na torre. Entretanto não foi feita uma análise detalhada para identificar qual a real origem do excesso de vibração do torno Romi Multiplic 35D de propriedade da Alcoa Fábrica de Alúmio SA.

Perante esta situação, somente foram realizados ensaios para velocidade de corte de 150 m/min. Neste caso então o único parâmetro variável foi o avanço, pois a velocidade e a profundidade de corte foram constantes para todas condições testadas. As figuras 6.13 e 6.14 comparam os valores de rugosidade em R_a e R_t , respectivamente entre as ferramentas cerâmicas CC 650 de raio de ponta convencional e alisadora. A diferença de rugosidade entre os corpos de prova usinados com ferramentas de geometria alisadora e convencional ainda continuou bastante alta, sendo indiferente ao torno utilizado, conforme mostrado nas

figuras 6.13 e 6.14. Ao analisar o comportamento da rugosidade (R_a) na figura 6.13, nota-se que para ferramenta alisadora os valores possuem uma leve tendência ascendente até o avanço de 0,3 mm/v, com um valor mínimo de 0,32 μm ($f=0,08$ mm/v) e máximo de 0,45 μm ($f=0,3$ mm/v). A partir do avanço de 0,3 mm/v, verificou-se uma tendência ascendente mais acentuada de rugosidade R_a , com valores crescente de 0,68 μm ($f=0,4$ mm/v) e 0,97 μm ($f=0,5$ mm/v). Somente para os avanços de 0,4 e 0,5 mm/v não se conseguiu acabamento dentro dos padrões de retificação (máximo de 0,60 μm , segundo Diniz e Matsumoto, 1999),

Nos corpos de prova usinados com ferramenta de geometria convencional, todos valores de rugosidade encontrados foram maiores que o limite de 0,60 μm do processo de retificação. Tal resultado é explicado devido ao fato do acabamento superficial de peças usinadas com ferramentas de geometria convencional ser diretamente proporcional ao avanço e raio de ponta da ferramenta, neste caso agravado pelo excesso de vibração do torno. O menor valor obtido de rugosidade foi de 0,62 μm ($f=0,08$ mm/v) e o máximo de 4,7 μm ($f=0,5$ mm/v).

Como visto, mesmo em um equipamento com sérios problemas de rigidez, as ferramentas de geometria alisadora foram bem superiores no quesito acabamento superficial, em relação às ferramentas de raio de ponta convencional.

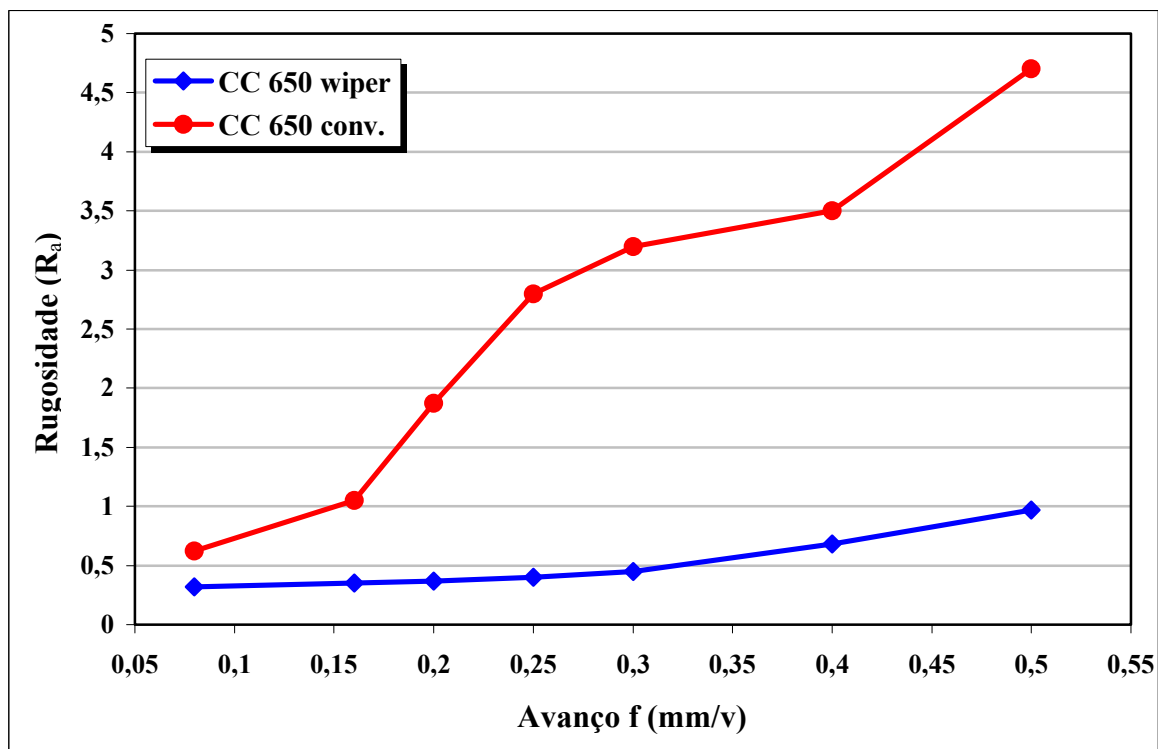


Figura 6.13– Rugosidade R_a ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).

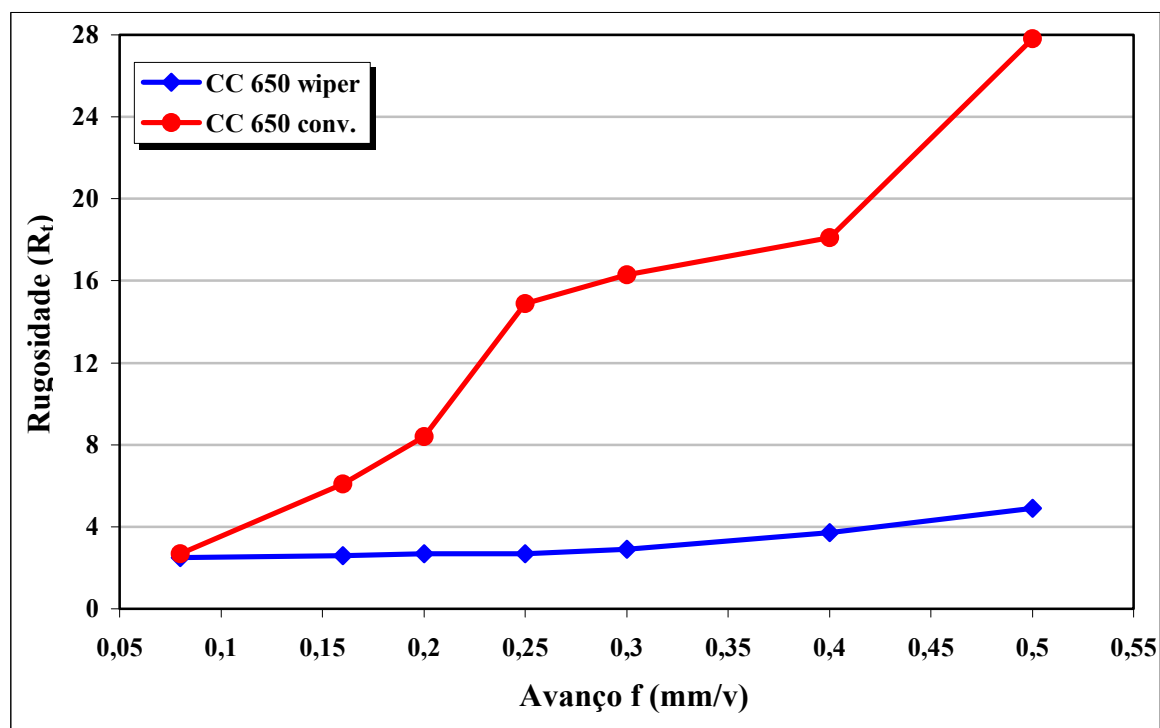


Figura 6.14– Rugosidade R_t ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora).

A figura 6.15 compara os valores de rugosidade encontrados para os ensaios realizados nos tornos Romi e Nardini, com velocidade e profundidade de corte constante ($V_c=150\text{ m/min}$ e $a_p=0,2\text{mm}$) e para ferramentas com geometria convencional e alisadora. Confirmou-se nesta (mesmo com vibração no torno Romi) que as ferramentas de geometria alisadora são muito superiores as ferramentas de geometria convencional, no que se refere ao acabamento superficial, porém no torno Romi o acabamento obtido foi bem pior, do que o observado no torno Nardini. A qualidade no acabamento obtido no torno Romi foi prejudicada pelo excesso de vibração deste. Ao contrário do que se observou nos corpos de prova usinados com ferramenta alisadora no torno Nardini, a rugosidade R_a dos corpos de prova usinados com a mesma ferramenta no torno Romi apresentaram desde o primeiro avanço testado $0,08\text{ mm/v}$, uma tendência crescente da rugosidade. Sendo que esta iniciou-se com o valor de $0,32\text{ }\mu\text{m}$ ($f = 0,08\text{ mm/v}$) e terminou com $0,97\text{ }\mu\text{m}$ ($f = 0,5\text{ mm/v}$), tendência esta que no torno Nardini só se tornou crescente após o avanço de $0,3\text{ mm/v}$. Com isso verificou-se que o excesso de vibração do torno Romi alterou numa escala bastante acentuada, todo comportamento do acabamento superficial dos corpos de prova, mediante a variação do avanço.

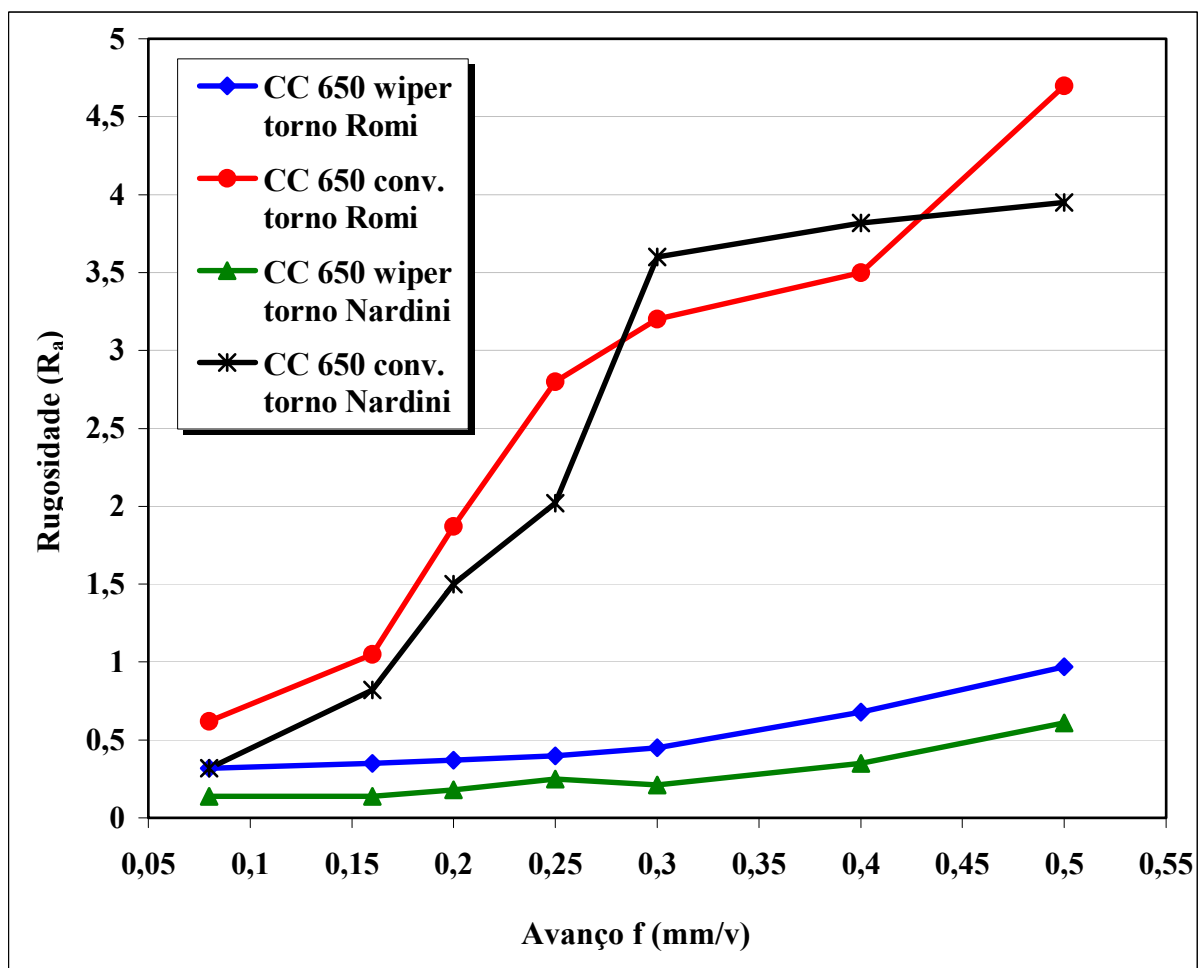


Figura 6.15– Rugosidade R_a ($V_c=150\text{m/min}$, $a_p=0,2\text{mm}$, ferramenta convencional e alisadora), usinagem nos tornos Nardini e Romi.

b) Formação do cavaco

O cavaco produzido durante os ensaios no Torno Romi, foi praticamente idêntico ao observado nos ensaios no torno Nardini. Ou seja, cavaco do tipo dente de serra e dependendo do avanço este originou-se no formato de fita, helicoidal ou vírgula (formato ideal), conforme já mostrado nas figuras 6.6, 6.7 e 6.8.

c) Desgaste da ferramenta de corte

As ferramentas de cerâmica mista CC 650 de geometria convencional neste ensaio passaram a não só sofrer desgastes de flanco e cratera como também avarias. Conforme se verifica a seguir na figura 6.16, o desgaste de flanco foi praticamente encoberto pelo

desgaste de cratera e pelo lascamento. Tal avaria (lascamento) e desgaste de cratera foi tão acentuado que chegou a alterar totalmente o raio de ponta da ferramenta. Esse fator novo (lascamento) observado nos ensaios no torno Romi com as ferramentas convencionais, até então não verificado no torno Nardini é influenciado pelo excesso de vibração, pois a carga de fadiga (choques) na ferramenta (especialmente na aresta de corte) foi extremamente alta e frequente. Como citado na revisão bibliográfica, as ferramentas de cerâmica mistas não possuem boa resistência ao choque (tenacidade).



Figura 6.16– Lascamento e desgaste de cratera na ferramenta CC 650 convencional (torno Romi, cotas em μm).

O comportamento das ferramentas de cerâmica mista CC 650 alisadora foi pior que o das ferramentas CC 650 convencional. Se comparado às avarias observadas nesta ferramenta durante os ensaios no torno Nardini com o torno Romi, novamente o excesso de vibração do torno Romi foi fator preponderante, destruindo completamente a ponta da ferramenta. As figuras 6.17 e 6.18 mostram claramente a gravidade das avarias, que começam com pequenos lascamentos, somado ao desgaste de cratera originado da abrasão e difusão (figura 6.17) e termina com grandes lascamentos e quebra da ferramenta (figura 6.18). Não se conseguiu usar mais que oito corpos de prova com cada aresta de corte nesta situação, sendo que quando maior era o avanço, mais rápido a ferramenta alisadora chegava num estado de falha catastrófica (quebra).

Também nestes ensaios ainda não foi possível definir a causa destas avarias acentuadas nas ferramentas alisadora, causas estas que serão analisadas nos ensaios quantitativos, vida da ferramenta.



Figura 6.17– Lascamento e desgaste de cratera na ferramenta CC 650 alisadora (torno Romi).

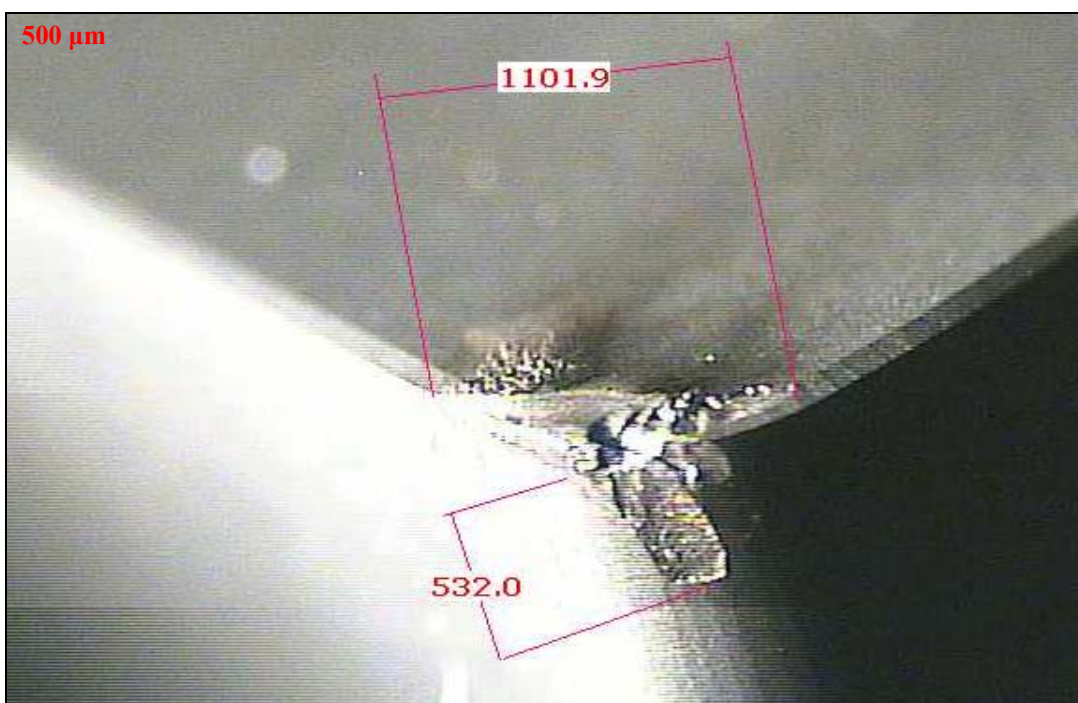


Figura 6.18– Lascamento e quebra na ferramenta CC 650 alisadora (torno Romi, cotas em μm).

6.2-Ensaio definitivos (quantitativos)

O objetivo nesta fase final do trabalho foi verificar a produtividade de cada ferramenta de corte, onde o critério de fim de vida foi $R_a \leq 0,6 \mu\text{m}$. As condições de usinagens adotadas foram as que apresentaram o melhor desempenho nos ensaios qualitativos, são elas:

- ⇒ Velocidade de corte $V_c = 150, 200$ e 250 m/min;
- ⇒ Avanço para ferramentas alisadoras $f = 0,15, 0,2$ e $0,3$ mm/v;
- ⇒ Avanço para ferramentas convencionais $f = 0,08$ mm/v;
- ⇒ Profundidade de corte $a_p = 0,2$ mm

O principal aspecto a ser verificado será a relação custo x benefício de cada condição e ferramenta de corte testada, onde o tempo total de corte por peça e vida da ferramenta serão os principais impactadores. Também serão analisadas outras peculiaridades do processo, como desgaste, avarias e formação do cavaco.

6.2.1-Ferramentas cerâmicas (CC 650)

a) Número de peças usinadas e acabamento superficial

Para esta classe de ferramentas foram testados os modelos com geometrias convencionais e alisadoras, para velocidades de cortes de 150 e 200 m/min. A figura 6.19 mostra o comportamento da rugosidade R_a em função do número de peças usinadas, pelas ferramentas de raio de ponta alisador e convencional para uma velocidade de corte de 150 m/min. A ferramenta alisadora foi muito superior a ferramenta de geometria convencional, tanto no número de peças usinadas como nos valores de rugosidade obtidos, pois a partir da 19ª peça usinada com a ferramenta de raio de ponta convencional o limite de rugosidade ficou fora do proposto (R_a máximo de $0,60 \mu\text{m}$), atingindo um valor de $R_a = 0,61 \mu\text{m}$. Já o resultado obtido com a ferramenta de raio de ponta alisadora, em nenhum momento ultrapassou o limite máximo de rugosidade, onde para o avanço de $f = 0,3$ mm/v o valor da rugosidade da última peça usinada antes do fim de vida da ferramenta (avaria) foi $R_a = 0,44 \mu\text{m}$ na 36ª peça e para o avanço de $f = 0,2$ mm/v o valor foi $R_a = 0,34$ na 56ª peça. Como notado nos ensaios qualitativos o principal agente do fim de vida das arestas de corte das ferramentas de corte foi o excesso de vibração (falta de rigidez do torno), provocando em sua grande maioria pequenos e grandes lascamentos nas ferramentas de corte. Isto explica a diferença do número de peças usinadas e da rugosidade obtida até a falha das ferramentas alisadoras entre os avanços de corte de 0,2 e 0,3 mm/v. Para o avanço $f = 0,2$ mm/v

observou-se menores níveis de vibração (menor força de corte), isto além de influenciar também na rugosidade foi motivo principal para o alto desempenho (nº peças usinadas) da aresta de corte nesta condição.

Um outro fato notado no comportamento das curvas da figura 6.19 é a oscilação dos valores de rugosidade a medida que se usina mais peças, principalmente na ferramenta de geometria convencional. Isto pode ser explicado pelo fato dos pequenos lascamentos, onde constantemente a aresta de corte era afiada e assim voltando a uma condição ideal de corte. Devido a isso houve uma preocupação quanto ao aspecto dimensional das peças usinadas, porém a variação não foi expressiva. A cada quatro peças usinadas verificou-se um aumento no diâmetro de 5 μm .

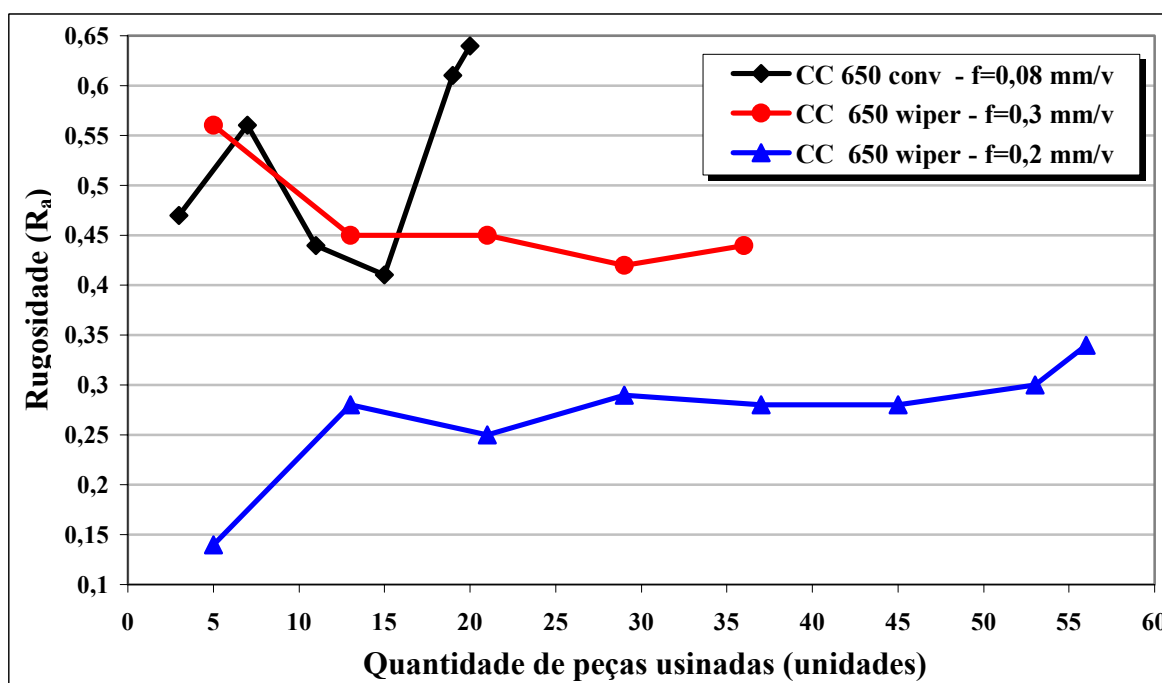


Figura 6.19– Rugosidade R_a em função do número de peças usinadas no torno Nardini ($V_c = 150\text{m/min}$).

A figura 6.20 apresenta o comportamento da rugosidade R_a em função do número de peças usinadas, pelas ferramentas de raio de ponta alisador e convencional para uma velocidade de corte de 200 m/min. Embora o valor da rugosidade obtido com a ferramenta de geometria alisadora, foi muito superior a ferramenta de geometria convencional ($R_a = 0,25 \mu\text{m}$), esta teve uma vida extremamente baixa. Durante a usinagem da sexta peça com a ferramenta alisadora, ocorreu falha catastrófica na aresta de corte (quebra). Foram realizados alguns testes com velocidades de corte menores (165 e 180 m/min.), porém a combinação dessas velocidades de corte elevadas, mais os altos avanços (0,2 e 0,3 mm/v) e

a falta de rigidez do torno Nardini, proporcionaram elevados níveis de vibração. Como a tenacidade desta classe de ferramenta não é uma de suas principais propriedades (baixa resistência ao choque), os lascamentos e quebras foram inevitáveis para as condições citadas acima. Já para a ferramenta de raio de ponta convencional a vida da aresta de corte foi bem superior a ferramenta alisadora, porém também foi afetada pela vibração provocada pela alta velocidade de corte. O fim de vida ocorreu por excesso de avarias (lascamentos), durante a usinagem da 18ª peça, onde a rugosidade medida na última peça usinada (17ª) foi $R_a = 0,38 \mu\text{m}$.

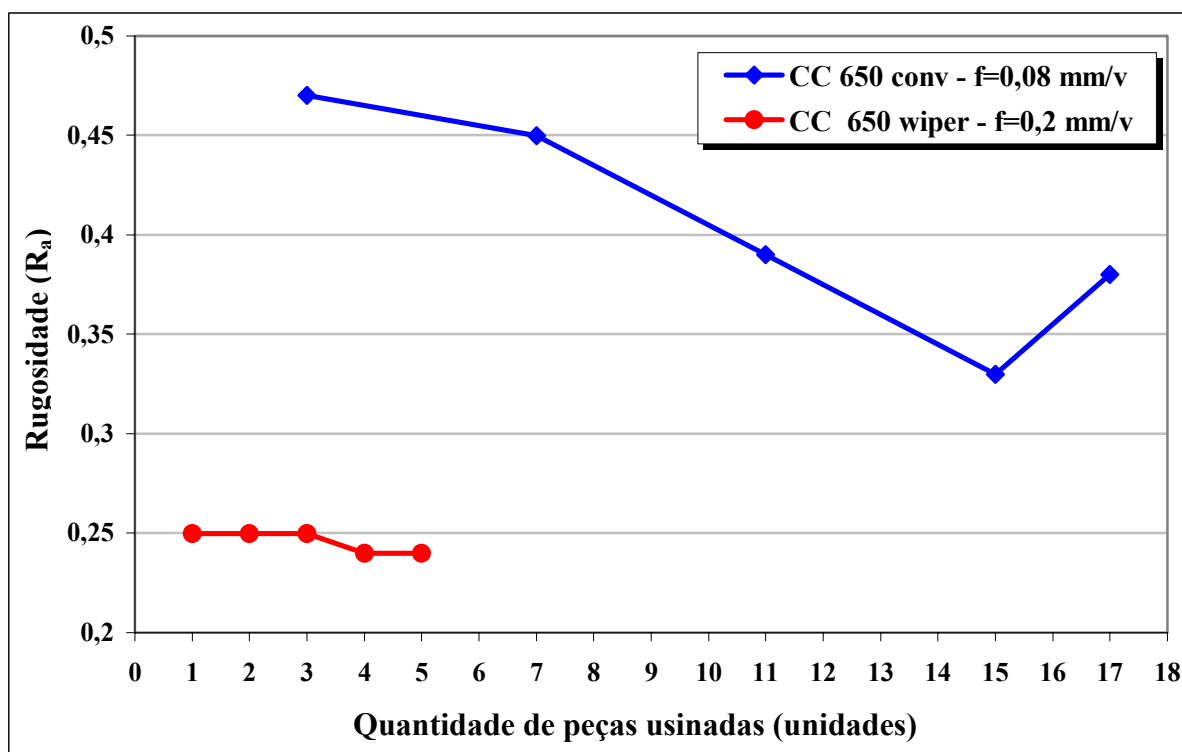


Figura 6.20– Rugosidade R_a em função do número de peças usinadas no torno Nardini ($V_c = 200 \text{ m/min}$).

As figuras 6.21 e 6.22 mostram, respectivamente, a quantidade de peças usinadas para cada ferramenta e condição de usinagem citada anteriormente e o tempo gasto para usinar cada peça (tempo de corte). Esses aspectos serão fundamentais para definir a melhor condição econômica de usinagem a ser estudada no próximo capítulo.

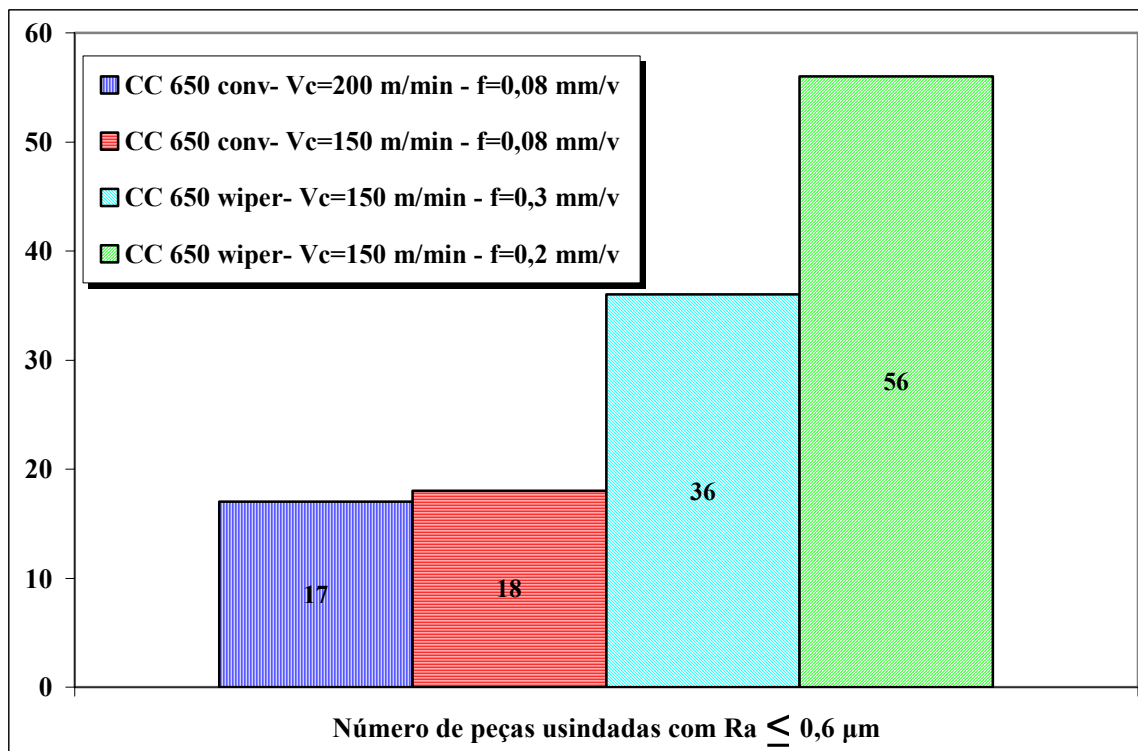


Figura 6.21– Número de peças usinadas para cada condição de usinagem e geometria das ferramentas cerâmicas CC 650.

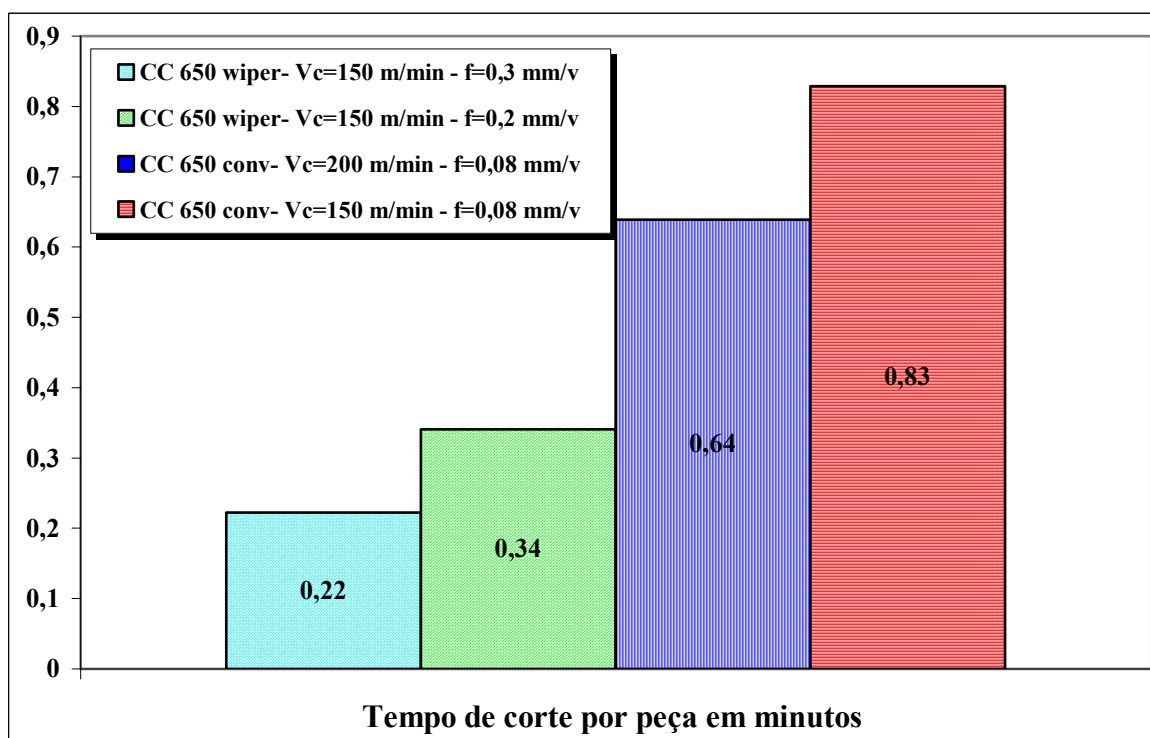


Figura 6.22– Tempo de corte por peça para cada condição de usinagem aplicada nas ferramentas cerâmicas CC 650.

b) Formação do cavaco

O cavaco produzido durante os ensaios quantitativos não foi diferente do observado nos ensaios qualitativos. Dentre os cavacos dente de serra produzidos durante estes ensaios finais, ou seja, no formato de fita, helicoidal ou vírgula (formato ideal); estes foram influenciados pela variação do avanço de cada condição de corte. As figuras 6.23, 6.24 e 6.25 mostram os três formatos de cavacos.

Observou-se no decorrer de cada ensaio, à medida que se avançava no número de peças usinadas que o cavaco embora não mudasse completamente seu formato, este variava a região de choque para quebra (quebra do cavaco). No ensaio com a ferramenta de geometria alisadora, para uma velocidade de corte $V_c=150$ m/min e um avanço de corte $f=0,2$ mm/v, verificou-se a formação de um cavaco helicoidal que inicialmente estava quebrando na superfície da peça ainda não usinada (à frente da ferramenta) e a partir da 12ª peça passou a quebrar na superfície de saída da ferramenta de corte (quebra ideal). Tal variação deve-se ao desgaste de cratera e aos pequenos lascamentos ocorridos na aresta de corte. Numa outra condição de usinagem, que difere da citada acima apenas no avanço de corte ($f=0,3$ mm/v), o cavaco originado foi em forma de vírgula (formato ideal), incandescente e não atritava com a peça.

Já o cavaco produzido nos ensaios com as ferramentas de geometria convencional para uma velocidade de corte $V_c=150$ e 200 m/min e um avanço de corte $f=0,08$ mm/v foi em forma de fita.

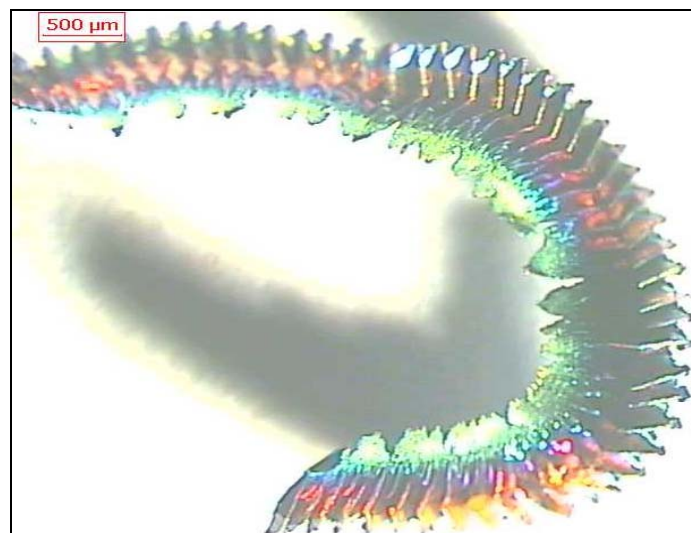


Figura 6.23– Cavaco dente de serra em forma de vírgula.



Figura 6.24– Cavaco dente de serra em forma de fita.



Figura 6.25– Cavaco dente de serra em no formato helicoidal.

c) Desgaste e avarias da ferramenta de corte

O desgaste de cratera e o lascamento foram predominantes em todas ferramentas, independentemente da velocidade de corte e avanço utilizado. A figura 6.26 mostra a ponta da ferramenta de corte totalmente destruída (quebrada) e um grande desgaste de cratera, da ferramenta de geometria convencional, utilizada para usinar o corpo de prova do aço 300M com uma velocidade de corte $V_c=200$ m/min. e avanço de corte $f=0,08$ mm/v. Tal gravidade da avaria foi provocada pelos altos níveis de vibração, resultante da alta velocidade de corte e baixa rigidez do torno Nardini, utilizado nos ensaios.

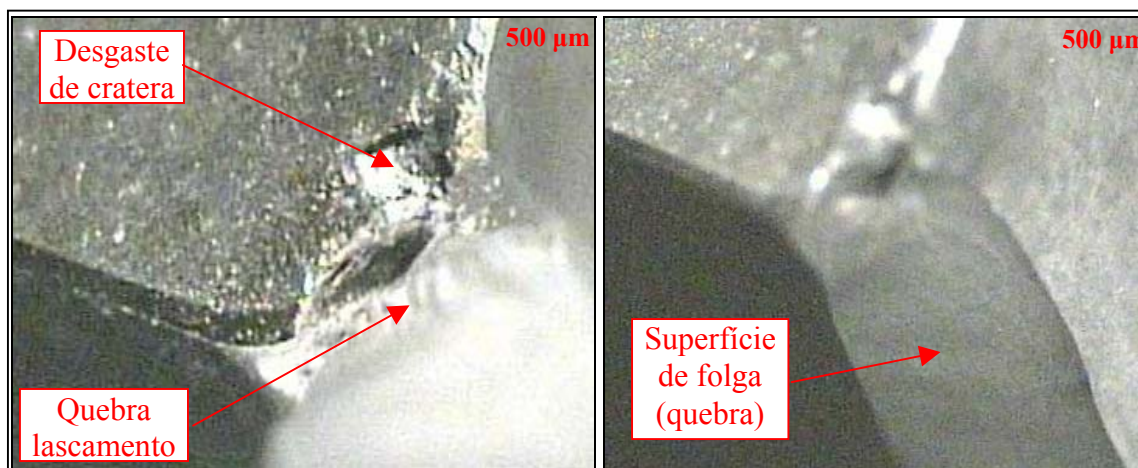


Figura 6.26– Desgaste de cratera e avaria na ferramenta de geometria convencional, para uma vida de 17 peças ($V_c=200$ m/min. e $f=0,08$ mm/v).

Na ferramenta de corte de geometria convencional, onde adotadas as condições de usinagem $V_c=150$ m/min. e avanço de corte $f=0,08$ mm/v, verificou-se inicialmente um pequeno desgaste de cratera e algumas avarias na aresta secundária de corte (figura 6.27). Acredita-se que estas pequenas avarias na aresta secundária de corte foram provocados por choques e atrito do cavaco gerado. Porém à medida que o ensaio prosseguia notou-se além do desgaste de cratera também desgaste de flanco, que ficou ofuscado (encoberto) pela grande região frontal onde ocorreu inúmeros lascamentos (figura 6.28).

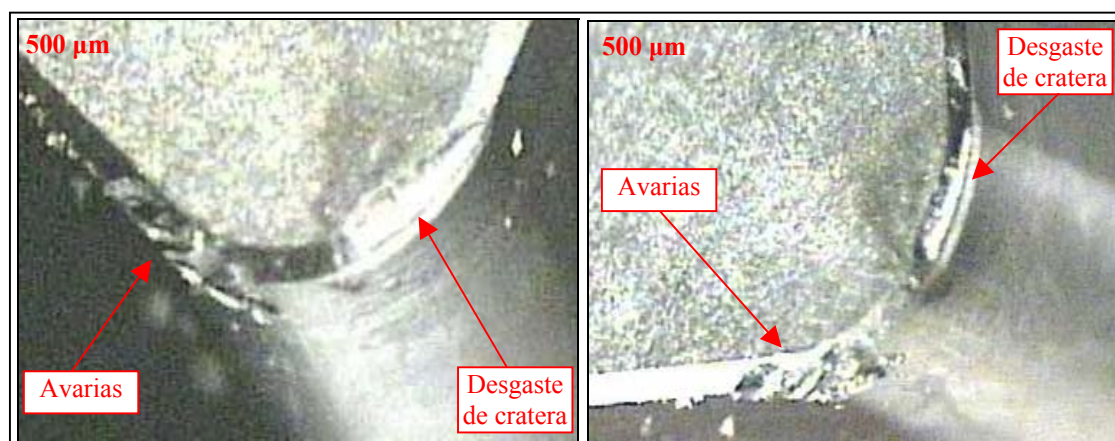


Figura 6.27– Desgaste de cratera e avaria na (aresta secundária) ferramenta de geometria convencional ($V_c=150$ m/min. e $f=0,08$ mm/v).

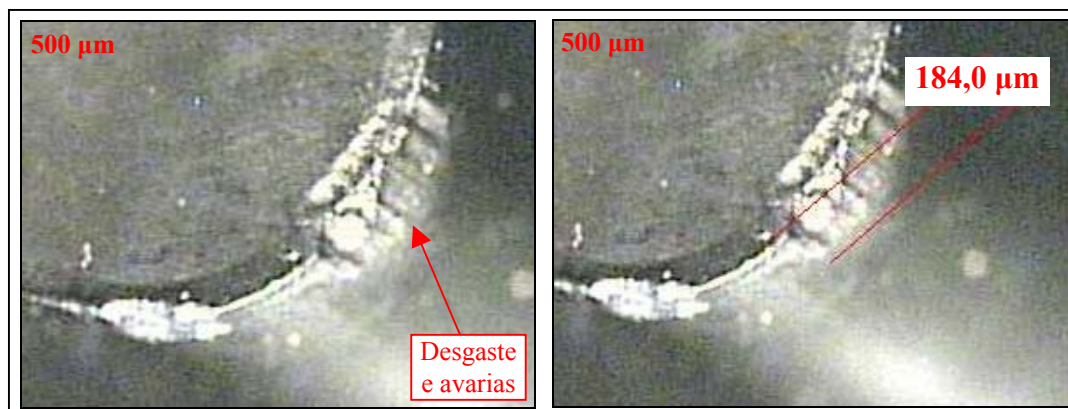


Figura 6.28– Desgaste de cratera, franco e avaria na (lascamento) ferramenta de geometria convencional, para uma vida de 20 peças ($V_c=150$ m/min e $f=0,08$ mm/v).

Nas ferramentas de corte de geometria alisadora, os lascamentos e quebras foram mais intensos e danosos do que nas ferramentas de geometria convencional. Igualmente como observado nas ferramentas convencionais o fator ocasional dessas avarias (lascamentos e quebras) foram os altos níveis de vibração, que nestes ensaios foram agravados pelas altas taxas de avanço de corte ($f=0,2$ e $0,3$ mm/v). Em todos os ensaios com as ferramentas alisadoras, devido a grande capacidade de acabamento superficial, o limitante para o fim de vida da aresta de corte foi a alta concentração de lascamentos e/ou quebra da aresta de corte. A figura 6.29 mostra a ponta da ferramenta de corte bastante danificada e um grande desgaste de cratera (parcialmente encoberto pelos lascamentos), da ferramenta de geometria alisadora utilizada para usinar o corpo de prova do aço 300M com uma velocidade de corte $V_c=150$ m/min. e avanço $f=0,2$ mm/v.

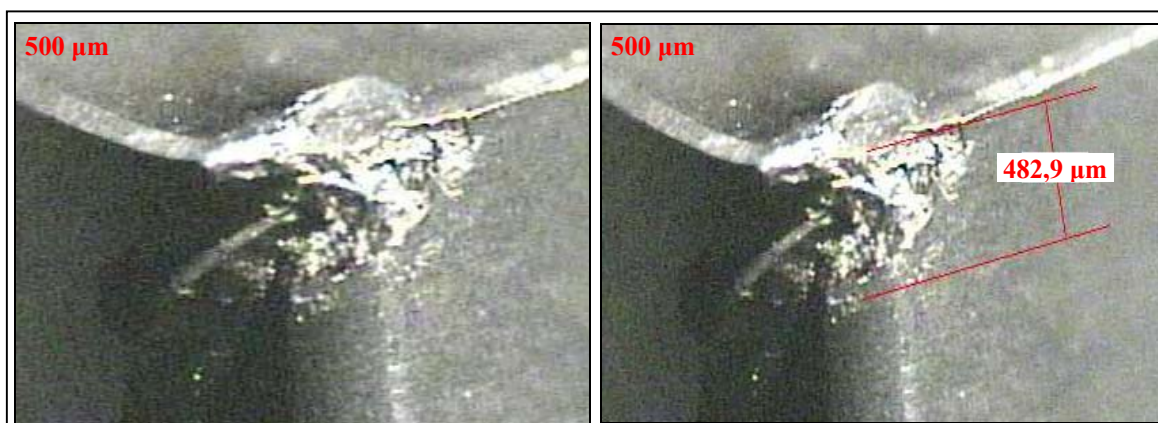


Figura 6.29– Desgaste de cratera e avaria na (lascamento) ferramenta de geometria alisadora, para uma vida de 56 peças ($V_c=150$ m/min. e $f=0,2$ mm/v).

Na ferramenta de geometria alisadora utilizada para usinar o aço 300M com uma velocidade de corte $V_c=150$ m/min. e avanço de corte $f=0,3$ mm/v. praticamente observou-se a mesma característica de avarias (lascamentos). O aumento do avanço de corte de 0,2 para 0,3 mm/v, impactou num menor número de peças usinadas (**36 peças**); o não aparecimento do desgaste de cratera devido a predominância de lascamentos na superfície de saída do cavaco e lascamentos maiores e com menor tempo de usinagem. A figura 6.30 mostra as avarias descritas acima, ocorridas na ferramenta de geometria alisadora, usada nos ensaios de usinagem do aço 300M.

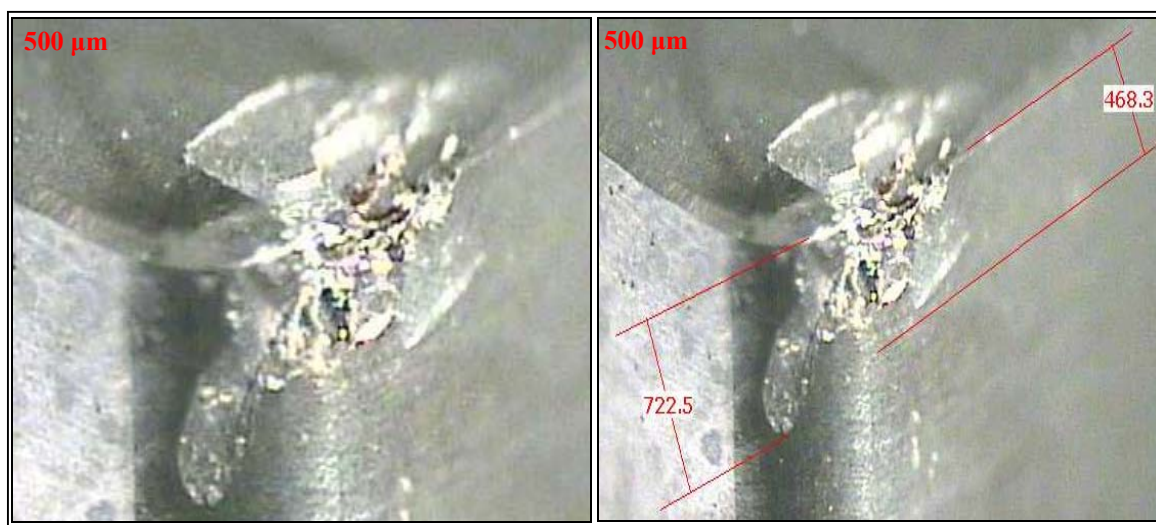


Figura 6.30– Avaria (lascamento) na ferramenta de geometria alisadora, para um vida de 36 peças ($V_c=150$ m/min, $f=0,3$ mm/v e cotas em μm).

As figuras 6.31, 6.32 e 6.33 mostram as pontas das ferramentas de corte de geometria alisadora totalmente destruídas, as quais foram usadas nas tentativas de se usinar os corpos de provas do aço 300M com velocidades acima de 150 m/min. A combinação do alto avanço de corte ($f=0,2$ e $0,3$ mm/v), das altas velocidades de corte ($V_c=165, 180$ e 200 m/min.) e a pouca rigidez do torno Nardini, associado a baixa tenacidade do material da ferramenta de corte (cerâmica), foram responsáveis pela quebra e grandes lascamentos prematuros da ferramenta de corte. Em nenhuma das tentativas conseguiu-se usinar mais de seis peças sem quebra do inserto.

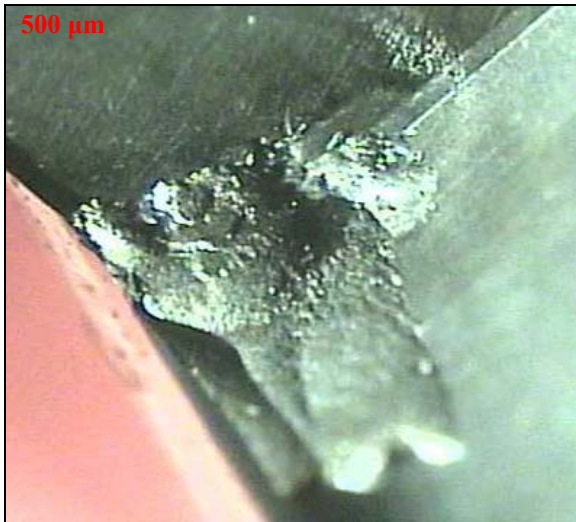


Figura 6.31– Quebra da ferramenta de geometria alisadora ($V_c=165$ m/min. e $f=0,2$ mm/v).

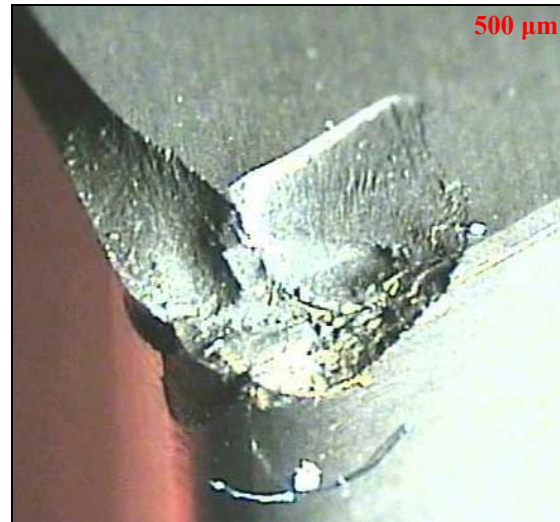


Figura 6.32– Quebra da ferramenta de geometria alisadora ($V_c=180$ m/min. e $f=0,3$ mm/v).



Figura 6.33– Quebra da ferramenta de geometria alisadora ($V_c=200$ m/min. e $f=0,2$ mm/v).

6.2.2-Ferramentas de PCBN (7020)

a) Número de peças usinadas e acabamento superficial

Para esta classe de ferramentas foram testados os modelos com geometrias convencionais e alisadoras, para velocidades de cortes de 150, 200 e 250 m/min. A figura 6.34 mostra o comportamento da rugosidade R_a em função do número de peças usinadas, pelas ferramentas de raio de ponta alisadora e convencional para uma velocidade de corte

de 150 (alisadora) e 200 (convencional) m/min. No caso da ferramenta de raio de ponta convencional, optou-se por uma velocidade de corte inicial de 200 m/min ao invés de 150 m/min, devido à otimização dos ensaios e do próprio objetivo do trabalho (melhor relação custo benefício), pois como é conhecido na literatura, quanto menor a velocidade de corte maior a vida da ferramenta e conseqüentemente maior o tempo de usinagem. A ferramenta alisadora quando adotado avanço de corte $f = 0,15$ mm/v foi muito superior à mesma, quando adotado avanço de corte $f = 0,20$ mm/v, tanto nos aspectos de rugosidade como do número de peças usinadas. Já em comparação à ferramenta de geometria convencional, o grande diferencial imposto pela ferramenta de geometria alisadora para o avanço de corte $f = 0,15$ mm/v foi o número de peças usinadas para um R_a máximo de $0,60$ μm . Com esta ferramenta para esta condição foram usinadas 68 peças, onde a rugosidade R_a na 68ª usinada foi $0,24$ μm . O teste foi suspenso na 68ª peça devido ao alto desgaste de flanco (maior que $0,20$ mm) e ao elevado nível de desgaste de cratera. Já na mesma ferramenta alisadora, porém para o avanço de $f = 0,2$ mm/v o comportamento do valor da rugosidade foi totalmente arbitrário e inesperado, pois após a 7ª peça usinada o valor da rugosidade R_a já era superior ao limite de $0,6$ μm . O comportamento da curva também foi muito ascendente quanto ao aumento dos valores de rugosidade em função do número de peças usinadas. O teste foi suspenso na 21ª peça devido ao lascamento e quebra da aresta de corte. Nos ensaios com a ferramenta de raio de ponta convencional conseguiu-se usinar 38 peças dentro do limite de rugosidade antes da quebra/lascamento da aresta de corte, provocado pelo desgaste de flanco (aproximadamente $0,2$ mm) e desgaste de cratera (aproximadamente $0,3$ mm). A rugosidade da última peça usinada antes do fim de vida da ferramenta (avaria) foi $R_a = 0,22$ μm . Nestes primeiros ensaios quantitativos com as ferramentas de PCBN, o excesso de vibração (pouca rigidez do torno), também teve grande impacto nos resultados das rugosidades obtidas e na vida das arestas de corte, porém notou-se uma maior amplitude dos valores de desgaste de flanco e principalmente de cratera se comparado com os resultados dos ensaios com as ferramentas cerâmicas.

Como nas ferramentas cerâmicas, a oscilação dos valores de rugosidade a medida que se usina mais peças, é explicada pelo fato dos pequenos lascamentos e desgaste de cratera, onde constantemente a aresta de corte era afiada e assim voltando a uma condição ideal de corte. Foi verificado os mesmos valores de alteração no aspecto dimensional das peças usinadas nos ensaios com ferramentas cerâmicas, ou seja: a cada quatro peças usinadas um aumento no diâmetro de $0,005$ mm.

No final deste capítulo será debatido a grande diferença dos resultados obtidos com as ferramentas de geometria alisadora cerâmicas e de PCBN, onde os valores de rugosidade foram muito distantes. Devido a isso não se usinou com a ferramenta de PCBN 7020 para um avanço de corte $f = 0,30$ mm/v e sim com $f = 0,15$ mm/v e $f = 0,20$ mm/v. Tais diferenças são causadas pela geometria alisadora (raio de ponta) denominada WG

(cerâmica) que apresentou um melhor resultado e WH (PCBN) que demonstrou pior acabamento superficial.

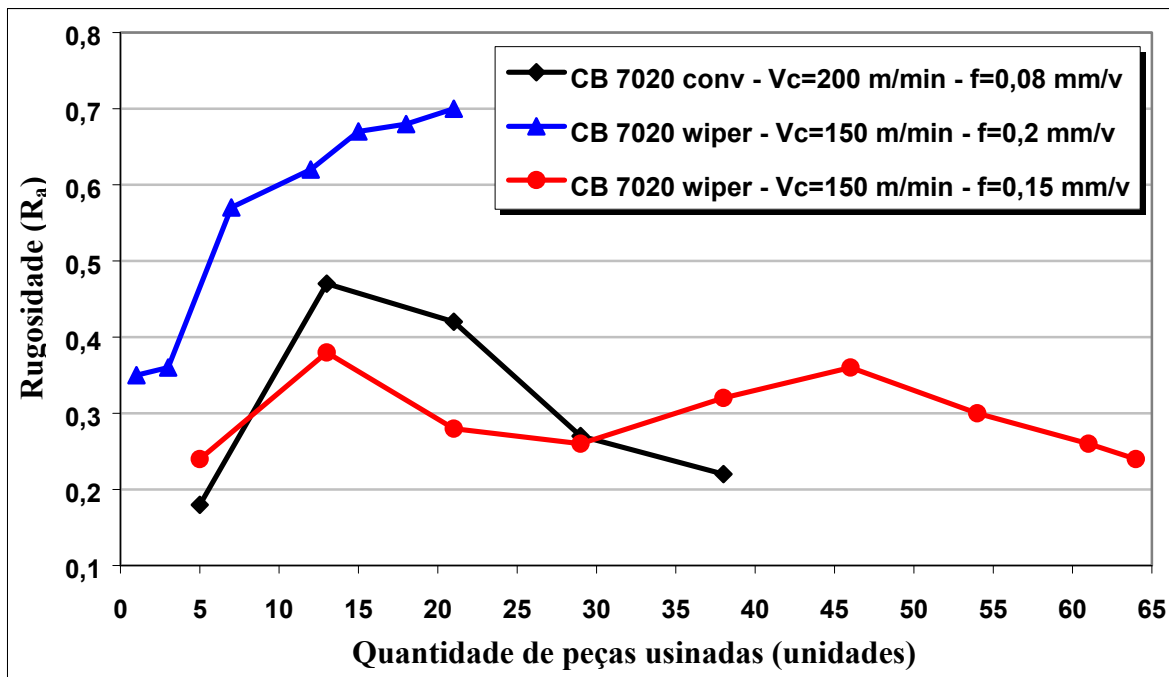


Figura 6.34– Rugosidade R_a em função do número de peças usinadas no torno Nardini ($V_c = 150$ e 200 m/min).

A figura 6.35 apresenta o comportamento da rugosidade R_a em função do número de peças usinadas, pelas ferramentas de raio de ponta alisador e convencional para velocidades de corte de 200 e 250 m/min. Pelo mesmo motivo de otimização dos ensaios e foco do trabalho (melhor relação custo benefício) já citado anteriormente, utilizou-se para a ferramenta de geometria convencional uma velocidade de corte de 250 m/min e não de 200 m/min. Diferentemente do que ocorreu nos ensaios com as ferramentas cerâmicas, o valor da rugosidade obtido com a ferramenta de geometria alisadora, foi muito inferior a ferramenta de geometria convencional, tanto no aspecto do número de peças usinadas quanto no acabamento superficial. Conseguiu-se rugosidade de $R_a = 0,39 \mu\text{m}$ na última peça usinada (18ª peça), para a ferramenta de geometria convencional e uma péssima rugosidade ($R_a = 0,63$) prematuramente após a quinta peça usinada com a ferramenta de geometria alisadora. Tal comportamento está diretamente ligado a geometria WH da ferramenta alisadora de PCBN, a qual será estudada posteriormente. O ensaio com a ferramenta alisadora foi interrompido na 14ª peça usinada devido ao elevado nível do desgaste de cratera (maior que 0,3 mm, risco de quebra da aresta de corte), já o ensaio com

a ferramenta de geometria convencional foi finalizado, devido o lascamento (quebra) da ponta da ferramenta durante a usinagem da 18ª peça.

Mesmo com uma melhor tenacidade da classe de PCBN se comparado com as cerâmicas, esta não foi suficiente para amortizar as avarias (lascamentos e quebras) provocadas pelos elevados níveis de vibração observados nestes dois últimos testes, cuja alta velocidade e avanço de corte aliado a baixa rigidez do conjunto máquina-ferramenta foi preponderante para a menor vida da ferramenta e pior acabamento superficial.

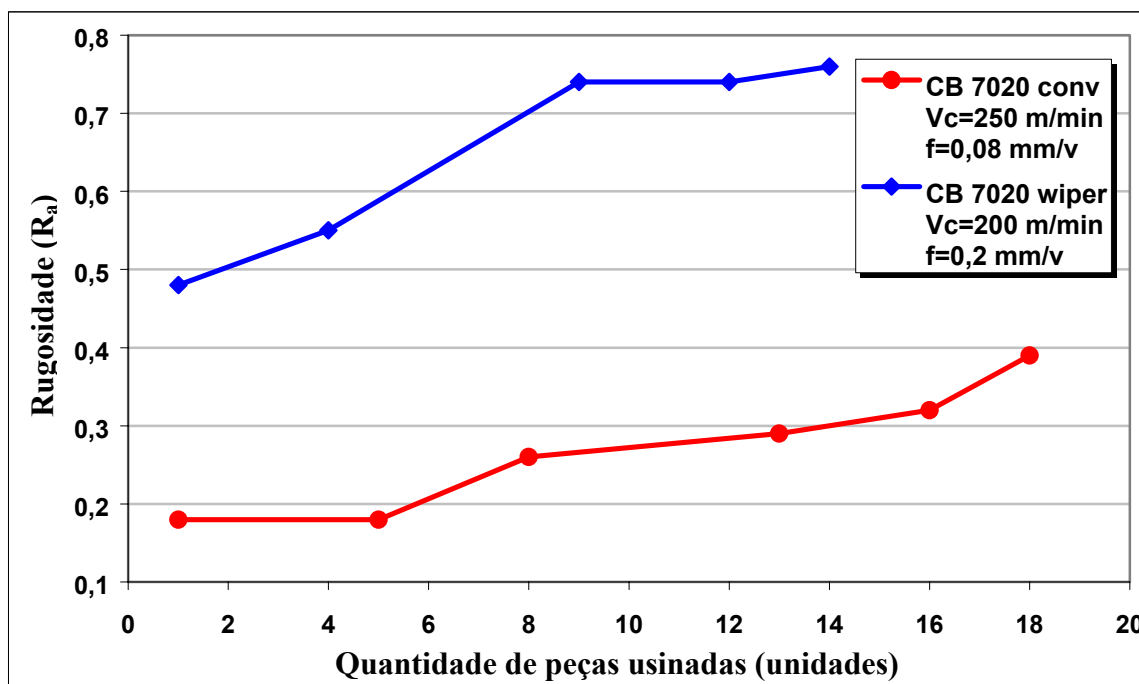


Figura 6.35– Rugosidade R_a em função do número de peças usinadas no torno Nardini ($V_c = 200$ e 250 m/min).

As figuras 6.36 e 6.37 mostram respectivamente a quantidade de peças usinadas para cada ferramenta e condição de usinagem citada anteriormente e o tempo gasto para usinar cada peça (tempo de corte). Esses aspectos serão fundamentais para definir a melhor condição econômica de usinagem a ser estudada posteriormente.

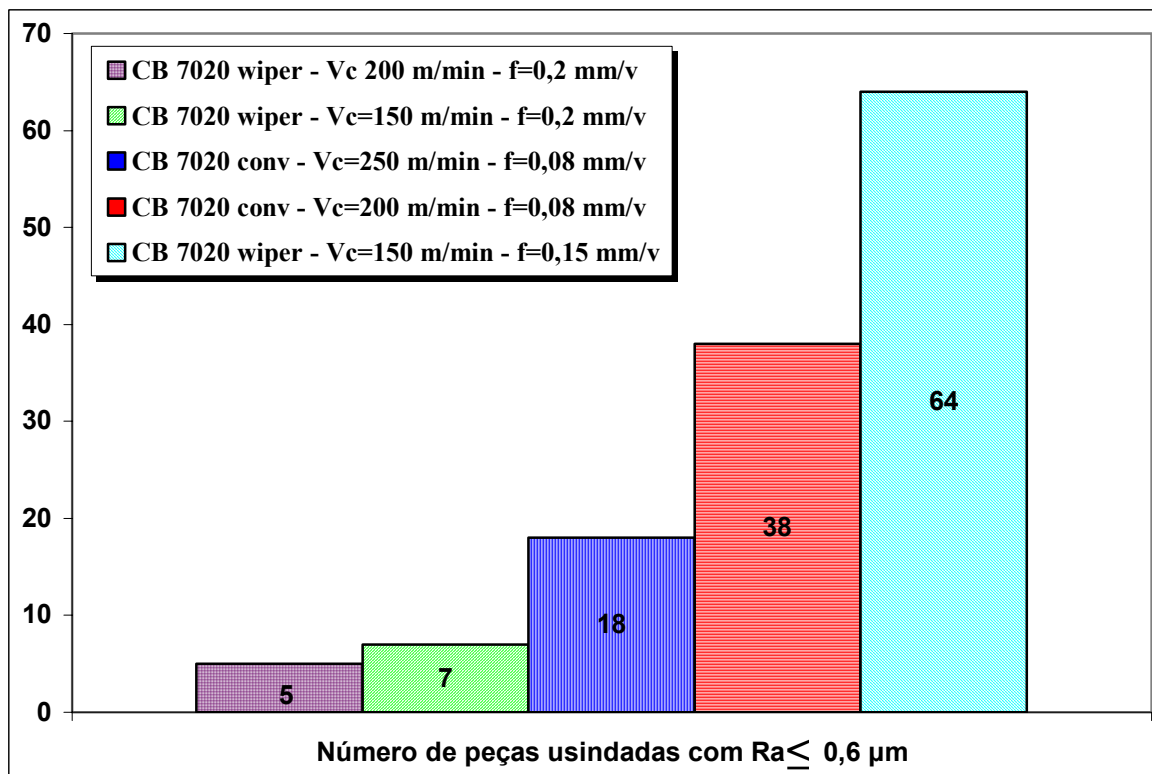


Figura 6.36– Número de peças usinadas para cada condição de usinagem e geometria das ferramentas de PCBN 7020.

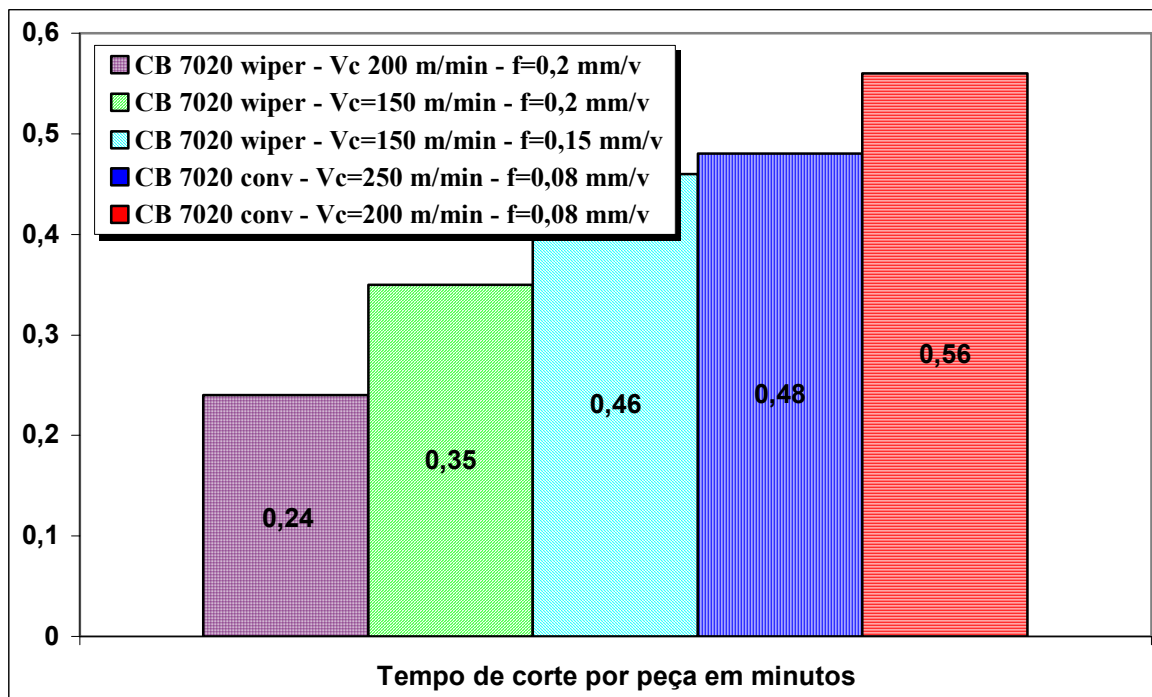


Figura 6.37– Tempo de corte por peça para cada condição de usinagem aplicada nas ferramentas de PCBN 7020.

b) Formação do cavaco

O cavaco produzido durante os ensaios com as ferramentas de PCBN obedeceram o mesmo formato e tipo dos observados durante a usinagem com as ferramentas cerâmicas. Ou seja, foram observados cavacos dente de serra no formato de fita, helicoidal ou vírgula, onde a variação destes dependia dos parâmetros de usinagem empregados e também do nível de desgaste/avarias da ponta da ferramenta de corte, principalmente da superfície de saída do cavaco.

c) Desgaste e avarias da ferramenta de corte

Diferentemente das ferramentas cerâmicas, nas ferramentas de PCBN foram mais evidenciados os desgastes de cratera e flanco e não os freqüentes e pequenos lascamentos. Nas condições mais desfavoráveis de usinagem (alto avanço e velocidade de corte) também ocorreram lascamentos e quebras nas ferramentas de PCBN, porém com uma intensidade e freqüência muito menor, do que observado nas ferramentas cerâmicas. A figura 6.38 e 6.39 mostram respectivamente a ponta da ferramenta de corte avariada, onde nota-se um pequeno lascamento somado a um grande desgaste de flanco/cratera (6.38) e quebra/grande lascamento (6.39) das ferramentas de geometria convencional CB 7020, utilizadas para usinar o corpo de prova do aço 300M com uma velocidade de corte $V_c=200$ e 250 m/min. e avanço de corte $f=0,08$ mm/v. Tal gravidade do desgaste e avaria foram provocados pelos altos níveis de vibração, resultante da alta velocidade de corte e baixa rigidez deste torno Nardini, utilizado nos ensaios. Observou-se que mesmo sob efeito dos altos níveis de vibração, as avarias ocorreram com menor intensidade e somente após um elevado desgaste de cratera e flanco.



Figura 6.38– Desgaste de cratera, flanco e avaria na ferramenta de geometria convencional que usinou 38 peças ($V_c=200$ m/min. e $f=0,08$ mm/v)



Figura 6.39– Desgaste de cratera e avaria na ferramenta de geometria convencional, que usinou 18 peças ($V_c=250$ m/min. e $f=0,08$ mm/v)

As ferramentas de PCBN com geometria alisadora, também tiveram uma menor incidência de lascamentos/quebras se comparado com as ferramentas cerâmicas. Isto se explica devido não só a maior tenacidade desta classe, mas também pelo fato da utilização de faixa de avanços menores, o que proporcionou menores níveis de vibrações. Foi necessário reduzir as faixas de avanços para obter o acabamento superficial dentro do limite pré determinado ($R_a \leq 0,60 \mu\text{m}$), isto por causa da deficiência da geometria alisadora WH das ferramentas de PCBN. A figura 6.40 mostra a ponta da ferramenta de corte quebrada, a qual foi utilizada para usinar o corpo de prova do aço 300M com uma velocidade de corte $V_c=150 \text{ m/min.}$ e avanço de corte $f=0,2 \text{ mm/v.}$ Neste caso ficou bastante evidente que o elevado nível do desgaste de cratera fragilizou a ponta da ferramenta, deixando esta mais sensível às vibrações geradas durante o ensaio e conseqüentemente mais susceptível a lascamentos e quebras.



Figura 6.40– Desgaste de cratera e avaria na (quebra) ferramenta de geometria alisadora, que usinou 21 peças ($V_c=150 \text{ m/min.}$ e $f=0,20 \text{ mm/v}$)

Na ferramenta de geometria alisadora utilizada para usinar o aço 300M com uma velocidade de corte $V_c=200 \text{ m/min.}$ e avanço de corte $f=0,20 \text{ mm/v.}$ observou-se um rápido aparecimento do desgaste de cratera (figura 6.41) e flanco (figura 6.42). Tal aparecimento prematuro e intenso do desgaste de cratera é explicado devido à alta velocidade de corte utilizada e que é o principal agente deste desgaste neste inserto para esta condição. Devido a isto e ao elevado nível de vibração observado durante a realização do ensaio (bem superior do que quando utilizado $V_c = 150 \text{ m/min.}$), o teste foi suspenso no 14º passe para se evitar o lascamento/quebra da ponta da ferramenta de corte.



Figura 6.41 – Desgaste de cratera na ferramenta alisadora que usinou 14 peças ($V_c=200$ m/min. e $f=0,20$ mm/v).

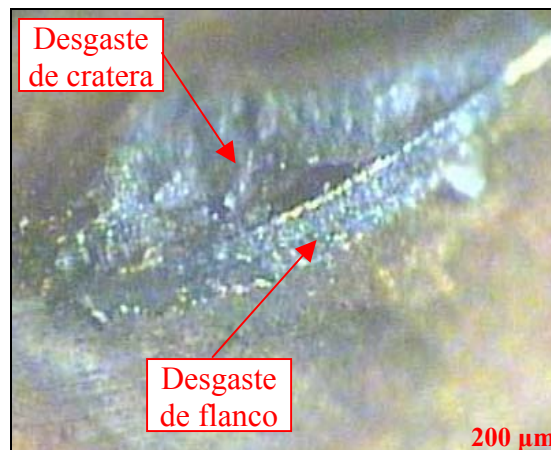


Figura 6.42 – Desgaste de flanco na ferramenta alisadora, que usinou 14 peças ($V_c=200$ m/min. e $f=0,20$ mm/v).

A maior durabilidade da ferramenta de geometria alisadora utilizada para usinar o aço 300M quanto aos desgastes de cratera e flanco, foi observado ao se adotar uma velocidade de corte $V_c=150$ m/min. e avanço de corte $f=0,15$ mm/v. Pois devido a menor velocidade de corte, a formação do desgaste de cratera foi mais morosa e de menor intensidade do que nos outros ensaios. Outro fator de extrema relevância para o prolongamento da vida da ferramenta nesta condição de usinagem, foi o baixo nível de vibração observado durante a realização dos ensaios, aspecto favorável influenciado pelo baixo avanço e velocidade de corte. A figura 6.43 mostra a ponta da ferramenta de PCBN com desgaste de cratera após a usinagem da 64ª peça.



Figura 6.43– Desgaste de cratera na ferramenta alisadora que usinou 64 peças ($V_c=150$ m/min. e $f=0,15$ mm/v).

6.3-Geometria alisadora *wiper* WG e WH

Durante os ensaios quantitativos foi notada uma divergência muito grande nos valores de rugosidade obtidos entre os corpos de prova usinados com as ferramentas cerâmicas alisadora (WG) e os corpos de provas usinados com ferramentas de PCBN alisadora (WH). Para um mesmo avanço, a superioridade quanto ao acabamento superficial dos corpos de prova usinados com a ferramenta cerâmica de geometria alisadora WG foi muito melhor do que os valores obtidos ao se usar com a ferramenta de PCBN de geometria alisadora WH. A tabela 6.1 mostra a comparação entre os valores médios de rugosidade entre os corpos de prova usinados com as ferramentas cerâmicas de geometria alisadora WG e as ferramentas de PCBN de geometria alisadora WH para diversos avanços até a interrupção dos ensaios por avarias ou desgastes excessivos. A diferença é tão grande que em alguns casos supera 100%. Devido a essa discrepância e para não exceder limite da rugosidade superficial requerida “ $R_a \leq 0,60 \mu\text{m}$ ” neste trabalho, ao se utilizar a ferramenta de PCBN de geometria alisadora WH adotou-se faixa de avanços menores.

Tabela 6.1 – Comparativo dos valores de rugosidade (R_a) obtido entre os corpos de prova usinados com ferramentas cerâmicas WG e de PCBN WH.

	$V_c=150\text{m/min}$ e $f=0,15 \text{ mm/v}$	$V_c=150 \text{ m/min.}$ e $f=0,20 \text{ mm/v}$	$V_c=150 \text{ m/min.}$ e $f=0,30 \text{ mm/v}$	$V_c=200 \text{ m/min.}$ e $f=0,20 \text{ mm/v}$
Cerâmica WG	Não ensaiado	$R_a = 0,25 \mu\text{m}$	$R_a = 0,48 \mu\text{m}$	$R_a = 0,25 \mu\text{m}$
PCBN WH	$R_a 0,33$	$R_a = 0,56 \mu\text{m}$	Não ensaiado	$R_a = 0,65 \mu\text{m}$

Não foi encontrada na literatura nenhuma explicação sobre tais diferenças entre as geometrias alisadoras WG e WH. O fabricante das ferramentas também não informou porque não existe a geometria alisadora WG para a classe de PCBN CB 7020 utilizada neste ensaio. Perante a estas dúvidas tentou-se através de análise em um microscópio óptico eletrônico descobrir qual a real diferença entre as duas geometrias. Analisando a figura 6.44, nota-se que a ponta da ferramenta cerâmica (WG) é mais pontiaguda do que a ponta da ferramenta de PCBN (WH).

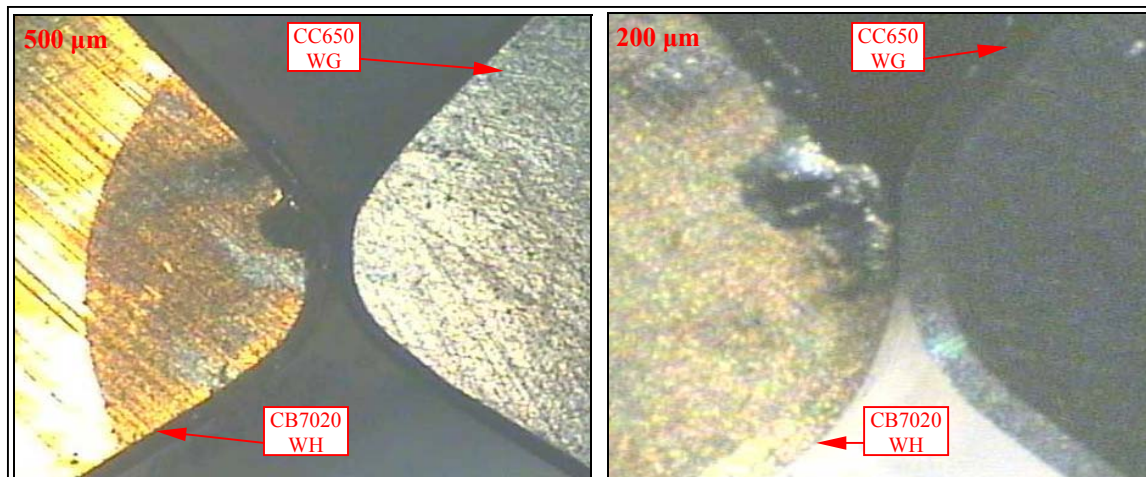


Figura 6.44– Comparativo entre as pontas das ferramentas cerâmicas (WG e chanfro T) e de PCBN (WH e chanfro S), ambas com raio de ponto 0,8 mm.

A diferença entre o formato das pontas das duas ferramentas fica muito mais visível nas figuras 6.45 e 6.46, onde existe uma cota aproximada entre a interseção das duas linhas laterais (aresta principal e secundária de corte) e a ponta da ferramenta. Com objetivo de chegar a uma conclusão sobre estas variações e suas influências no resultado da rugosidade, foram levantadas algumas hipóteses:

Quanto ao objetivo da variação no formato da ponta da ferramenta de PCBN, deduz-se que o fabricante quis proporcionar a ponta da ferramenta uma geometria com maior efeito alisador e maior resistência mecânica, com uma ponta menos pontiaguda (mais achatada). Aliando esta a maior tenacidade da ferramenta de PCBN, o inserto seria mais resistente às condições de corte mais agressivas e desfavoráveis, como altas velocidades de corte combinadas com altos avanços. Para tanto, em um mesmo raio de ponta, presume-se que variou-se a distância entre os centros dos círculos circunscritos na ponta da ferramenta de corte, alterando assim o efeito alisador destes e distinguindo uma geometria WG de uma WH.

Quanto ao efeito desta diferença na ponta da ferramenta de corte à rugosidade da peça usinada, a principal explicação está na disposição dos círculos circunscritos da geometria alisadora que proporciona o efeito alisador, que no caso da geometria WG é muito mais eficiente do que a geometria WH. Um outro aspecto que também teve uma certa influência nos resultados foi o nível de vibração observado, onde este foi mais acentuado ao se usinar os corpos de prova com as ferramentas de PCBN de geometria alisadora WH se comparado com as ferramentas cerâmicas WG (rigidez insuficiente do conjunto máquina-ferramenta).

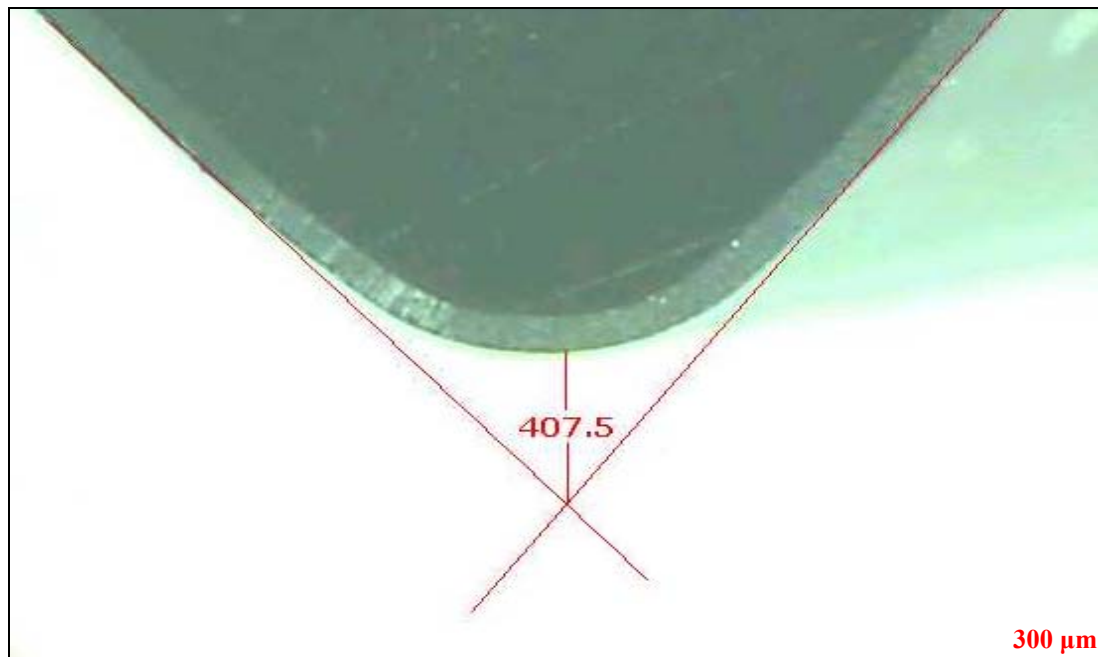


Figura 6.45– Distância da ponta da ferramenta cerâmica CC 650 WG até a interseção das linhas das arestas laterais.

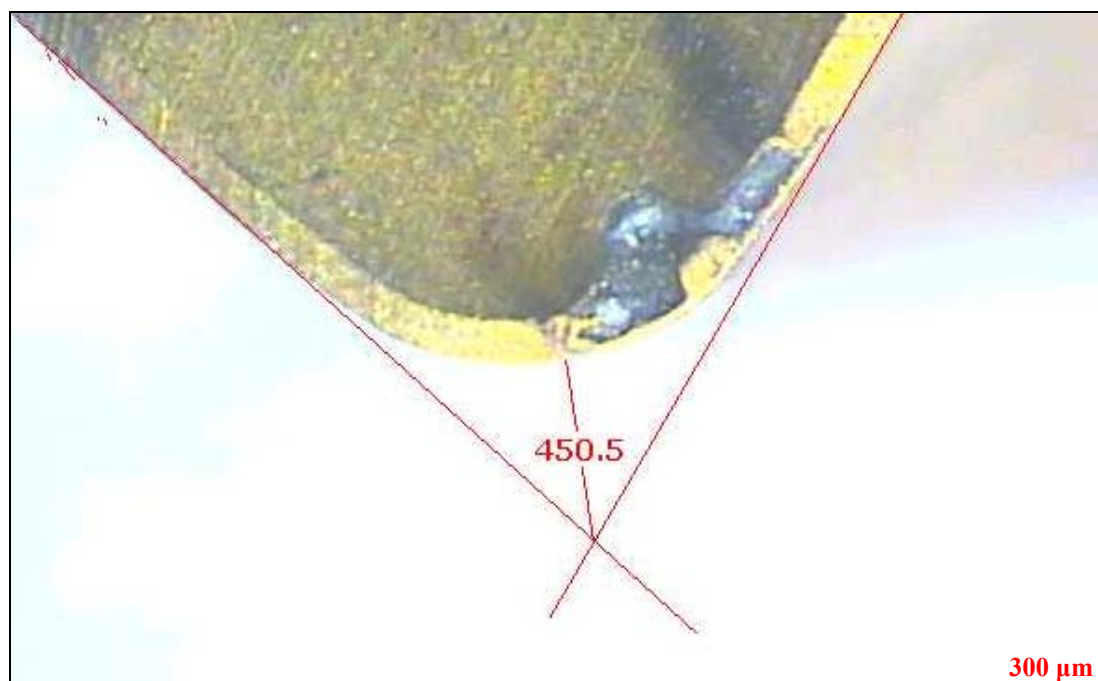


Figura 6.46– Distância da ponta da ferramenta de PCBN CB 7020 WH até a interseção das linhas das arestas laterais.

6.4-Condições econômicas de usinagem

Nesta última etapa deste trabalho serão analisados e comparados entre si, os resultados de cada ferramenta e parâmetros de usinagem utilizados durante os ensaios de torneamento dos corpos de prova do aço 300M. O objetivo final será apontar dentre todas condições qual é a que apresenta o melhor custo benefício. Foi adotado para efeito de cálculo um lote de 1000 peças.

6.4.1-Tempos de usinagem

Na tabela 6.2 são mostrados todos tempos passivos referentes às fases do ciclo de usinagem dos corpos de prova do aço 300M.

Tabela 6.2–Tempos passivos dos ciclos de usinagem dos corpos de prova do aço 300M.

Descrição do tempo do ciclo analisado/levantado	Tempo (minutos)
Colocação e fixação da peça	0,667
Aproximação e posicionamento da ferramenta	0,167
Afastamento da ferramenta	0,217
Retirada da peça	0,167
Remoção da ferramenta para sua substituição	1,0
Recolocação e ajustagem da nova ferramenta	2,5
Troca da ferramenta “total” (t_{ft})	3,5
Preparo da máquina (t_p)	15,0
Aproximação e afastamento da ferramenta (t_a)	0,384
Secundário (t_s)	0,834

Ao analisar a tabela 6.3 nota-se que o tempo de corte foi predominante na determinação do tempo total de usinagem do lote de 1000 peças em todas condições, mesmo nas situações onde a vida da ferramenta foi muito pequena. Este fato foi verificado claramente na condição 8, onde com uma vida de apenas 05 peças por aresta de corte, esta apresentou o terceiro melhor tempo de usinagem por lote (27,50 horas). O menor tempo de usinagem por lote foi conseguido na condição 4 com 24,38 horas, esta condição foi a que apresentou a quarta melhor vida da ferramenta (36 peças por aresta). De todas condições testadas a que apresentou a melhor combinação entre tempo de usinagem e vida da

ferramenta foi a condição 3, pois foi o segundo menor tempo de usinagem do lote com 26,17 horas e a que apresentou a segunda melhor vida da ferramenta com 56 peças por aresta.

Tabela 6.3—Tempos ativos de usinagem e vida da ferramenta de corte para cada condição e ferramenta ensaiada (lote de 1000 peças).

Condição	Ferramenta/parâmetro utilizada	t_c /peça (min.)	Vida "T" (peças)	t_t /peça (min.)	t_t /lote (horas)
1	CC 650 conv. ($f = 0,08$ mm/v e $V_c = 150$ m/min.)	0,800	18	2,185	36,42
2	CC 650 conv. ($f = 0,08$ mm/v e $V_c = 200$ m/min.)	0,600	17	1,953	32,55
3	CC 650 wiper ($f = 0,20$ mm/v e $V_c = 150$ m/min.)	0,320	56	1,570	26,17
4	CC 650 wiper ($f = 0,30$ mm/v e $V_c = 150$ m/min.)	0,213	36	1,463	24,38
5	CB 7020 conv. ($f = 0,08$ mm/v e $V_c = 200$ m/min.)	0,600	38	1,885	31,42
6	CB 7020 conv. ($f = 0,08$ mm/v e $V_c = 250$ m/min.)	0,480	18	1,803	30,05
7	CB 7020 wiper ($f = 0,20$ mm/v e $V_c = 150$ m/min.)	0,320	07	1,710	28,50
8	CB 7020 wiper ($f = 0,20$ mm/v e $V_c = 200$ m/min.)	0,240	05	1,638	27,30
9	CB 7020 wiper ($f = 0,15$ mm/v e $V_c = 150$ m/min.)	0,427	64	1,680	28,00

6.4.2-Custos de produção

Na tabela 6.4 são mostrados os custos fixos referentes ao processo de usinagem dos corpos de prova do aço 300M, estes foram estimados com base nos custos atuais praticados no mercado.

Tabela 6.4–Custos fixos referentes ao processo de usinagem dos corpos de prova do aço 300M (Nota: 1US\$ = R\$ 3,00).

Descrição do custo	Custo (US\$)
Ferramenta CC 650 (geometria convencional)	18.06
Ferramenta CC 650 (geometria alisadora “wiper”)	20.71
Ferramenta CB 7020 (geometria convencional)	175.43
Ferramenta CB 7020 (geometria alisadora “wiper”)	217.03
Salários e encargos do operador (Sh)	5,00/peça
Custo operacional total da máquina (Sm)	8.33/hora
Custo de aquisição do porta-ferramenta (Vsi). Obs: Foi adotada uma vida média para o porta-ferramenta de 6000 arestas.	100,00

Tabela 6.5–Custos totais de usinagem por peça e para o lote de 1000 peças em cada condição e ferramenta ensaiada (Nota: 1US\$ = R\$ 3,00).

Condição	Ferramenta/parâmetro utilizada	Kp/peça (US\$)	Kp /lote (US\$)
1	CC 650 conv. (f = 0,08 mm/v e Vc = 150 m/min.)	0.74	740.00
2	CC 650 conv. (f = 0,08 mm/v e Vc = 200 m/min.)	0.70	700.00
3	CC 650 wiper (f = 0,20 mm/v e Vc = 150 m/min.)	0.44	440.00
4	CC 650 wiper (f = 0,30 mm/v e Vc = 150 m/min.)	0.47	470.00
5	CB 7020 conv. (f = 0,08 mm/v e Vc = 200 m/min.)	1.57	1,570.00
6	CB 7020 conv. (f = 0,08 mm/v e Vc = 250 m/min.)	2.84	2,840.00
7	CB 7020 wiper (f = 0,20 mm/v e Vc = 150 m/min.)	8.13	8,130.00
8	CB 7020 wiper (f = 0,20 mm/v e Vc = 200 m/min.)	11.22	11,220.00
9	CB 7020 wiper (f = 0,15 mm/v e Vc = 150 m/min.)	1.22	1,220.00

A tabela 6.5 mostra os custos finais de usinagem para todas condições ensaiadas neste trabalho, onde as condições 3 e 4 apresentaram os menores custos finais de usinagem para todo lote. A diferença entre os custos de usinagem com ferramentas cerâmicas e de PCBN foram extremamente altas, diferença essa impactada principalmente pelo elevado custo de aquisição das ferramentas de PCBN, tempo total de usinagem e em menor intensidade pela maior vida das ferramentas cerâmicas. Para relação custo x benefício a condição 3 foi de longe a que apresentou o melhor desempenho, pois foi entre todas a que

proporcionou o segundo menor tempo total de usinagem do lote (26,17 horas), a segunda maior vida por aresta (56 peças) e o menor custo final de usinagem do lote (US\$ 440.00).

Comparando as condições 3 e 4, verificou-se que o impacto negativo no custo final de usinagem causado pela menor vida da condição 4 (36 peças/aresta), sobrepõe o impacto positivo causado pelo menor tempo total de usinagem por peça (1,463 minutos).

CAPÍTULO 7

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

7.1-Conclusões

A seguir serão apresentadas as principais conclusões sobre o trabalho que foi discutido e apresentado nos capítulos anteriores:

- ⇒ O acabamento superficial alcançado nos corpos de prova do aço 300M, durante os ensaios de torneamento com as ferramentas cerâmicas CC 650 alisadoras WG superaram todas expectativas, sendo que os valores de rugosidade conseguidos foram melhores do que os valores informados pela literatura e as taxas de avanços de corte utilizadas foram superiores as recomendadas no catálogo do fabricante da ferramenta de corte;
- ⇒ As ferramentas cerâmicas CC 650 alisadoras WG proporcionaram acabamento superficial extremamente fino, na ordem de $R_a = 0,20 \mu\text{m}$ e se mostraram pouco sensíveis ao aumento do avanço de corte, o que resultou em curva de rugosidade em função do avanço de corte bastante regular (pouco ascendente e sem picos);
- ⇒ As ferramentas de PCBN CB 7020 alisadoras WH, apresentaram resultados muito inferiores aos conseguidos com as ferramentas cerâmicas CC 650 alisadoras WG, no que se refere ao acabamento superficial para uma mesma faixa de avanço de corte e quantidade de peças usinadas por aresta de corte (vida). Tal resultado negativo está diretamente ligado a sua geometria alisadora WH, a qual não proporcionou o mesmo efeito alisador das ferramentas cerâmicas alisadoras WG, sob as condições testadas;

- ⇒ O principal agente do fim de vida em todas ferramentas de corte utilizadas nos ensaios foi o excesso de vibração do conjunto máquina-ferramenta, onde este provocou avarias nas ferramentas como pequenos e grandes lascamentos e até mesmo a quebra da ponta da ferramenta. Este fenômeno foi mais intenso e visível nas condições mais severas de corte, como em altas velocidades de corte ($V_c = 200$ e 250 m/min.) e elevadas taxas de avanço de corte ($f = 0,20$ e $0,30$ mm/v);
- ⇒ Como as avarias (lascamentos e quebras) foram predominantes nas ferramentas de corte para todas situações ensaiadas e os desgastes de flanco e cratera apareceram de forma bastante discreta, acredita-se que os resultados obtidos quanto a produtividade de cada aresta de corte (vida) e o acabamento superficial possam ser maximizados, principalmente nas ferramentas com geometria alisadora, ao se utilizar um conjunto máquina-ferramenta com maior rigidez;
- ⇒ As ferramentas de PCBN não apresentaram os resultados esperados quanto a sua maior resistência ao efeito danoso das vibrações (tenacidade) do conjunto máquina-ferramenta, sobre as ferramentas cerâmicas CC 650;
- ⇒ A grande supremacia da geometria alisadora sobre a geometria convencional das ferramentas de corte e sobre o próprio processo de retificação para operações de torneamento em aços endurecidos foi conseguir torneiar peças com tempo muito reduzido, com excelente acabamento superficial e controle dimensional. O que em células produtivas resultará num produto final com menor custo de produção;
- ⇒ As ferramentas cerâmicas CC 650 alisadoras WG foram as que apresentaram a melhor relação custo x benefício. Os benefícios observados são extremamente grandes, pois conseguiu unir qualidades do processo de retificação (excelente acabamento superficial), flexibilidade do processo de torneamento, menor tempo de usinagem por peça e menor custo de usinagem, em relação as ferramentas de PCBN alisadora e convencional e as ferramentas cerâmicas de geometria convencional.

7.2-Sugestões para trabalhos futuros

- ⇒ Repetir os ensaios utilizando as mesmas ferramentas e parâmetros adotados neste trabalho em um conjunto máquina-ferramenta de alta rigidez, que proporcione baixíssimos níveis de vibração para observar o comportamento dos desgastes, avarias e vida das ferramentas de corte e rugosidade R_a das peças torneadas;
- ⇒ Verificar juntamente ao fabricante da ferramenta de PCBN CB 7020 alisadora WH, a possibilidade do fornecimento do mesmo inserto, porém com a geometria alisadora WG (não disponível no mercado). Conseguindo esta ferramenta realizar os mesmos testes e analisar a relação custo x benefício final;
- ⇒ Realizar testes comparativos entre as ferramentas de geometria convencional e alisadora WG no torneamento de aços com dureza inferior a 45 HRC. O objetivo desta comparação é verificar se também haverá superioridade das ferramentas com geometria alisadora sobre as ferramentas de geometria convencional no torneamento de aços de baixa dureza;
- ⇒ Repetir os ensaios na mesma máquina-ferramenta utilizando uma ferramenta de PCBN de geometria convencional e alisadora mais tenaz. O objetivo é verificar se o nível de avarias (pequenos e grandes lascamentos) será atenuado em função da maior tenacidade da ferramenta de corte;
- ⇒ Realizar novos ensaios utilizando as mesmas condições e materiais (ferramentas de corte e corpos de prova), analisando o desgaste de cratera das ferramentas de cerâmica e PCBN quanto a ocorrência de difusão, devido a grande quantidade de elementos de liga na composição química do Aço 300M.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abrão, A. M.; Aspinwall, D. K.; Wise, M. L. H., 1995. Tool wear, cutting forces and temperature evaluation when turning hardened bearing steel using PCBN and ceramic materials. Proceeding of the thirty-first International Machine Tool Conference, Manchester, p. 209-16.

Abrão, A. M.; Aspinwall, D. K.; Wise, M. L. H., 1996. A vida de ferramentas e a integridade das peças no torneamento de aços temperados. Máquinas e Metais, p. 200-17, Abril-1996.

Agostinho, O. L.; Rodrigues, A. C. S.; Lirani, J., 1990. Tolerâncias, ajustes, desvios e análise de dimensões. 5ª reimpressão, Editora Edgard Blücher Ltda, 295 p., São Paulo.

Almeida, C. H. D.; Abrão, A. M., 2001. A utilização de ferramentas cerâmicas e PCBN no torneamento de peças endurecidas. COBEF-Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, Curitiba (Pr), Abril-2001.

ASM – Metals Handbook, 1978. Ultrahigh-strength steels, in: Properties and selection: Irons and steels, v. 1, 9ª ed., Metals Park, Ohio, p. 421-43.

Baldoni, J. G.; Buljan, S. J. T., 1988. Ceramics for machining. Ceramic Bulletin, v. 67, nº 2, p. 381-7.

Barry¹, J.; Byrne, G., 2001. Cutting tool in the machining of hardened steels. Part I: alumina/TiC cutting tool wear. Wear 247 (Elsevier), p. 139-51.

- Barry^{II}, J.; Byrne, G.**, 2001. Cutting tool in the machining of hardened steels. Part II: PCBN cutting tool wear. *Wear* 247 (Elsevier), p. 152-60.
- Bas, J.**, 2001. Aços especiais de usinabilidade melhorada. *Máquinas e Metais*, nº 422, p. 96-113, Março-2001.
- Billman, E. R.; Mehrotra, P. K.; Shuster, A. F.; Beeghly, G. W.**, 1988. Machining with $Al_2O_3 + SiC$ – whiskers cutting tools. *Ceramic Bulletin*, v. 67, nº 6, p. 1016-9.
- Boehs, L.**, 1987. Resultados atraentes com ferramentas cerâmicas. *Máquinas e Metais*, p. 24-7, Maio-1987.
- Brandt, G.**, 1986. Flank and crater wear mechanisms of alumina-based cutting tools when machining steel, *Wear*, 112, p. 29-56.
- Brisksmeir, E.; Bartsch, S.**, 1988, Ceramic tools – material characteristics and load types determine wear mechanisms. *Annals of the CIRP*, v. 37/1, p. 97-100.
- Chiaverini, V.**, 1990. Aços e ferros fundidos. Associação brasileira de metalurgia e materiais, 6^a Ed., 2^a impressão, São Paulo, p. 443-6.
- Chou, Y. S.; Barash, M. M.**, 1995. Review on hard turning and CBN cutting tool. *Proceedings of the 1st International Machining and Grinding Conference*, p. 951-62. (paper MR95-214).
- Costa, D. D.**, 1993. Análise dos parâmetros de torneamento de aços endurecidos, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 110 p., Dissertação de mestrado.
- Cupini, N. L.; Ferreira, J. R.** Turning of carbon and glass fiber hybrid cloth composite material. *NIST-Special Publication*, nº 847, p. 447-53, Junho-1993.
- Daumen, J.**, 2001. Nitreto cúbico de boro policristalino para usinar materiais endurecidos. *Máquinas e metais*, nº 423, p. 30-7, Abril-2001.

Diniz^I, A. E.; Coppini, N. L.; Marcondes, F. C., 2002. Tecnologia da Usinagem dos Materiais, 3^a ed., Artliber Editora Ltda, 244 p., São Paulo.

Diniz, A. E.; Matsumoto, H., 1999. Análise da vida das ferramentas no torneamento de aços endurecidos. XV COBEM-Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, Águas de Lindóia (SP), Novembro-1999.

Diniz^{II}, A. E.; Noritomi, P. Y., 2002. Influência dos parâmetros de corte na rugosidade de peças torneadas. Departamento de Engenharia de Fabricação-Faculdade de Engenharia Mecânica - UNICAMP, Campinas.

Donnangelo, F.; Georgetti, A. D.; Junior, R. J. S., 2000. Torneamento duro em engrenagens furo liso. Usinagem 2000-Feira e Congresso, 12 p. São Paulo.

Elbestawi, M. A.; Srivastava, A. K.; El-Wardany, T.I., 1996. A model for chip formation during machining of hardened steel. Annals of the CIRP, v. 45/1, p. 71-6.

Ezugwu, E. O.; Wallbank, J., 1987. Manufacture e properties of ceramic cutting tools: a review. Materials Science and Technology, v. 3, p. 881-7.

Ferraresi, D., 1977. Fundamentos da Usinagem dos Metais. Editora Edgard Blucher, São Paulo.

Gruss, W. W., 1988. Ceramic tools improve cutting performance. American Ceramic Society Bulletin, v. 67-6, p. 993-6.

Hepworth, M. A., 1991. Nonoxide engineering ceramics. Manufacturing Technology.

Jack, D. H., 1986. Ceramic cutting tool materials. Materials & Design, v. 7, nº 5, p. 267-73.

Jawaid, A.; Bhattacharyya, S. K., 1981. Syalon ceramics in meta cutting. International journal of production and research, v. 19, nº 5, p. 589-94.

Klimenko, S. A.; Mukovoz, Y. A.; Lyashko, V. A.; Vashchenko, A. N.; Ogorodnik, V. V. On the wear mechanism of cubic boron nitride base cutting tools. *Wear*, v. 157, nº 1, p. 1-7, Agosto-1992.

Komanduri, R.; Samanta, K., 1989. *Ceramics. Metals Handbook*, v. 16, p. 98-103, nona edição.

König, W., Komandui, R., Tönshoff, H. K., Ackerschott, G., 1984. Machining of hard materials. *Annals of the CIRP*, v. 33/2, p. 417-27.

König, W., Klinger, M., Link, R., 1990. Machining hard materials with geometrically defined cutting edges field of applications and limitations. *Annals of the CIRP*, v. 39/1, p. 61-4.

Lima, F. E.; Novaski, O.; Lorca, M. C. A.; Guarnieri A.; Paranho, E.; Dezordi, R.; Nóbrega, L.; Gibson, G., 2000. *Usinagem de materiais endurecidos. Usinagem 2000-Feira e Congresso*, 11 p. São Paulo.

Matsumoto, H., 1998. Uma contribuição ao estudo do processo de torneamento de aços endurecidos, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 148 p., Tese de doutorado.

Meyer, L.; Strassburger, C.; Schneider, C., 1984. Effects and present application of the microalloying elements Nb, V, Ti, Zr and B in HSLA steels – in: *HSLA Steels technology e applications. Proceedings of international conference, AMS, Philadelphia*, p. 29-44.

Monteiro, S. N.,1990. Aços para necessidades emergentes. *Metalurgia – ABM*, vol. 46, nº 386, p. 55-9, Janeiro-1990.

Nakayama, K.; Arai, M.; Kanda, T., 1988. Machining characteristics of hard materials. *Annals of the CIRP*, v.37/1, p. 89-92.

NN, 2000. Catálogo técnico do fabricante de ferramentas, Sandvik Coromant

NN, 2000-01. Catálogo técnico do fabricante de ferramentas, Sandvik Coromant.

NN, 2001-01. Catálogo técnico do fabricante de ferramentas, Sandvik Coromant.

NN, 1987. Tabela de composição química dos aços utilizados pelo IAE (.Instituto de aeronáutica e espaço).

Ohtani, T.; Yokogawa, H. The effects of workpiece hardness on tool wear characteristics. Bulletin Os The Japan Society of Precision Engineering, v. 22, nº 3, p. 229-31, Setembro-1988.

Orton, J.P., 1990. Advanced materials and processes, da ASM International, v. 137, nº 1, janeiro, 1990, tradução e adaptação de Miguel Siegel. Metalurgia – ABM, v. 46, nº 391, p. 411-412, Agosto/Setembro-1990.

Padilha, A. F., 1990. Materiais, Ciências dos materiais e engenharia dos materiais. Metalurgia – ABM, v. 46, nº 391, p. 454-7, Agosto/Setembro-1990.

Pagano, Carlos A. G., 1990. Materiais metálicos para tecnologia de ponta. (Materiais metálicos para a indústria aeroespacial). Metalurgia – ABM, v. 46, nº 386, p. 46-51, Janeiro-1990.

Pipkin, N. J.; Robert, D. C.; Wilson, W. I., 1987. Amborite – A remarkable new material from de beers. Industrial Diamond Review, v. 40/6, p. 203-6.

Sandvik Coromant do Brasil, 2001. O Mundo da Usinagem, p. 32.

Sata, T., 1985. Analysis of surface roughness generation in turning operation and its applications. Annals of The CIRP, v. 34, p. 473-6

Shaw, M. C., 1986. Metal Cutting Principles. Oxford University Press, New York.

Silva, A. L. C.; Mei, P. R., 1988. Aços e ligas especiais, 2^a Ed., Sumaré –São Paulo, Eletrometal S. A. Metais especiais, p. 390-457.

Sorrell, C. C.; McCartney, E. R., 1986. Engineering nitrogen ceramics: silicon nitride, β' -sialon and cubic boron nitride. *Materials Forum*, v. 9/3, p.148-61.

Souza, S. A., 1989. Composição química dos aços. Ed. Edgard Blucher Ltda, São Paulo – SP, p. 75-81.

Suarez, J. C. M., 1990. Materiais metálicos para tecnologia de ponta. (Materiais metálicos para indústria bélica). *Metalurgia – ABM*, v. 46, nº 386, p 51-4, Janeiro-1990.

Teixeira Filho, F., 2000. Estudo da influência da refrigeração/lubrificação no torneamento do aço ABNT 52100 endurecido. Itajubá, Escola Federal de Engenharia de Itajubá (EFEI), 106 p., Dissertação de mestrado.

Tokimatsu, R. C., 1995. Influência dos parâmetros microestruturais e procedimentos de ensaio, no comportamento mecânico de um aço de ultra-alta resistência e baixa liga. Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, UNICAMP, 440 p. Tese de doutorado.

Tomita, Y., 1991. Development of fracture toughness of ultrahigh strength low alloy steels for aircraft and aerospace applications. *Materials Science and Technology*, v. 7, p. 481-9, Junho-1991.

Wise, M., 1992. Material apresentado em palestra na Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual de Campinas. UNICAMP. Abril-1992

Youngblood, J. L., Raghavan, M., 1977. Correlation of Microstructure With Mechanical Properties of 300M Steel. *Metall. Trans. A*, v. 8A, p. 1439-48, Sept.