UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

VARIAÇÃO DA VIDA DE FERRAM. DE METAL DURO COM REVEST. TRIPLO EM OPER. DE ACAB. NO PROC. DE TORNEAMENTO

Guaratinguetá
1997

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

HUMBERTO LOPES RODRIGUES

VARIAÇÃO DA VIDA DE FERRAMENTAS DE METAL DURO COM REVESTIMENTO TRIPLO EM OPERAÇÃO DE ACABAMENTO NO PROCESSO DE TORNEAMENTO

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Guaratinguetá, para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica (Área de Concentração: Projetos e Materiais).

Orientador: Prof. Dr. Sérgio João Crnkrovic

Guaratinguetá
1997

unesp

UNESP UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
Campus de Guaratinguetá

"VARIAÇÃO DA VIDA DE FERRAMENTAS DE METAL DURO COM REVESTIMENTO TRIPLO EM OPERAÇÃO DE ACABAMENTO NO PROCESSO DE TORNEAMENTO"

HUMBERTO LOPES RODRIGUES

CARO LEITOR NÃO RISQUE O LIVRO

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

ESPECIALIDADE: ENGENHARIA MECÂNICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: PROJETOS E MATERIAIS

APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO

Prof. Dr. Tomaz Manabu Hashimoto
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:

Prof. Dr. SERGIO JOÃO CRNKOVIC
Orientador / Unesp-Feg

Prof. Dr. TOMAZ MANABU HASHIMOTO
Unesp-Feg

359

TG21.9 (043)
696v

Prof. Dr. ROBERVAL RYMER DA SILVA CARVALHO
EFEI

359

Dezembro de 1997

FACULDADE DE ENGENHARIA DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA

DADOS CURRICULARES

HUMBERTO LOPES RODRIGUES

NASCIMENTO 18.1.1956 - SÃO PAULO/SP

FILIAÇÃO Humberto Rodrigues
Carmen Lopes Rodrigues

1988 Curso de Graduação
Faculdade de Tecnologia de São Paulo

1989 Técnico Especializado (nível superior) do Departamento de Materiais e Tecnologia, da Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - UNESP

unesp

Dedico este trabalho em memória de minha mãe **CARMEN LOPES RODRIGUES**, pelo amor com que me criou e por ter sempre acreditado em mim.

Ao meu pai **Humberto**, minha esposa **Fran** e aos meus filhos **Bruno**, **Diego**, **Marina** e **Higor** pelo apoio e compreensão.

unesp

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Dr. Sérgio João Crnkovic, pela orientação e dedicação na realização deste trabalho.

Aos técnicos do Departamento de Materiais e Tecnologia da FEG-UNESP, Manoel Francisco dos Santos Filho e Domingos Hasmann Neto pelo auxílio inestimável na execução dos ensaios e na coleta de dados, demonstrando estima e colaboração.

Ao técnico José Manoel Bernardes do mesmo departamento, pelo companheirismo demonstrado durante anos de trabalhos conjuntos, sem o qual seria muito mais dificil a realização deste trabalho.

A secretária do Departamento de Materiais e Tecnologia, Maria Aparecida Alkmin pela colaboração.

Aos alunos da pós-graduação em materiais da FEG-UNESP, Alfeu Saraiva Ramos e Érica Coaglia T. Ramos pela ajuda na execução das microscopias óticas.

Aos professores do Departamento de Materiais e Tecnologia, FEG-UNESP, Tomaz Manabu Hashimoto, Luis Rogério Hein, Marcelo dos Santos Pereira, Valdir Alves Guimarães e Angelo Caporalli pela experiência transmitida e o incentivo dado ao autor.

Ao aluno de graduação José Antonio Marques Neto, pela ajuda na preparação das figuras.

A empresa CONFAB, pela realização em seus laboratórios, da análise química do aço.

unesp

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS 10

LISTA DE TABELAS 14

LISTA DE ABREVIATURAS 17

Resumo 18

1 - INTRODUÇÃO 19

2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 22

2.1 - Geometria das Ferramentas de Corte 23

2.2 - Materiais para Ferramentas de Corte 24

2.3 - Desgastes 28

2.3.1 - Definições 28

2.3.2 - Processos de Desgastes 29

2.3.3 - Tipos de Desgastes das Ferramentas de Corte 32

2.3.4 - Influência da Velocidade de Corte 36

2.3.5 - Influência das Inclusões 37

2.3.6 - Mecanismos de Desgastes em Ferramentas de Corte 38

2.4 - Desgaste em Ferramentas de Corte Revestidas 44

3 - MATERIAL E MÉTODO 51

3.1 - Materiais 51

3.1.1 - Material dos corpos de prova 51

3.1.2 - Material das ferramentas 51

3.2 - Corpos de prova 52

3.3 - Análise de dureza do material dos corpos de prova 52

unesp

3.4 - Análise microscópica do material dos corpos de prova..... 53

3.5 - Análise química do material dos corpos de prova..... 53

3.6 - Procedimento experimental..... 54

3.6.1 - Dispositivo de ensaio..... 54

3.6.2 - Parâmetros de ensaio..... 55

3.6.3 - Medidas de Rugosidade..... 56

3.6.4 - Análise dos desgastes das ferramentas..... 57

4 - RESULTADO..... 58

4.1 - Comportamento da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1 e 2 da ferramenta F_1 e 3 e 4 da ferramenta F_2, para a velocidade de corte $V_1 = 350$ m/min..... 58

4.1.1 - Comportamento referente as arestas 1 e 2 da ferramenta F_1 58

4.1.2 - Comportamento referente as arestas 3 e 4 da ferramenta F_2 60

4.2 - Comportamento da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 5 e 6 da ferramenta F_3 e 7 e 8 da ferramenta F_4, para a velocidade de corte $V_2 = 403$ m/min..... 62

4.2.1 - Comportamento referente as arestas 5 e 6 da ferramenta F_3 62

4.2.2 - Comportamento referente as arestas 7 e 8 da ferramenta F_4 64

4.3 - Comportamento da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, para uma velocidade de corte $V_1 = 350$ m/min..... 67

4.4 - Comportamento da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4, para a velocidade de corte $V_2 = 403$ m/min... 69

4.5 - Comportamento médio da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas para a velocidade de corte $V_1 = 350$ m/min e $V_2 = 403$ m/min..... 71

unesp

4.6 - Apresentação dos resultados obtidos da caracterização do material de trabalho..... 72

4.6.1 - Composição química..... 72

4.6.2 - Dureza..... 73

4.6.3 - Inclusões..... 73

4.6.4 - Análise microestrutural..... 74

4 7 - Apresentação das superfícies desgastadas das ferramentas de corte nas condições finais de usinagem..... 76

4.7.1 - Desgastes nas ferramentas de corte F_1 e F_2 para a velocidade de corte $V_1 = 350$ m/min..... 77

4.7.2 - Desgaste nas ferramentas de corte F_3 e F_4 para a velocidade de corte $V_2 = 403$ m/min..... 81

4.8 - Apresentação das medidas dos desgastes das superfícies de incidência das ferramentas de corte nas condições finais de usinagem..... 85

4.9 - Apresentação da vida das ferramentas de corte..... 86

4.9.1 - Vida da ferramenta de corte em função da rugosidade superficial para uma velocidade de corte $V_1 = 350$ m/min..... 86

4.9.2 - Vida da ferramenta de corte em função da rugosidade superficial para uma velocidade de corte $V_2 = 403$ m/min..... 88

4.9.3 - Média das vidas das ferramentas de corte em função do critério de fim de vida adotado, para as velocidades de corte utilizadas $V_1 = 350$ m/min e $V_2 = 403$ m/min..... 90

4.10 - Apresentação das medidas da rugosidade das superfícies de incidência e de saída das pastilhas como recebidos..... 91

5 - COMENTÁRIOS E DISCUSSÃO..... 92

5.1 - Comentários..... 92

unesp

5.1.1 - Comportamento geral da rugosidade superficial em relação ao número de peças usinadas..... 92

5.1.2 - Variação da vida da ferramenta..... 93

5.1.2.1 - Variação da vida da ferramenta para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 93

5.1.2.2 - Variação da vida da ferramenta para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 94

5.1.2.3 - Considerações gerais da variação da vida da ferramenta..... 95

5.2 - Discussões..... 96

6 - CONCLUSÃO..... 102

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... 104

APÊNDICE A..... 109

ABSTRACT..... 123

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS..... 124

AUTORIZAÇÃO PARA REPRODUÇÃO..... 125

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Dispositivo mecânico de usinagem..... 20

Figura 2.1 - Representação simplificada de uma ferramenta de torneamento..... 24

Figura 2.2 - Representação em corte de uma pastilha de metal duro com revestimento triplo de TiC-Al_2O_3-TiN..... 28

Figura 2.3 - Ilustração esquemática dos processos de desgastes: 1 - Abrasivo, 2 - Difusivo, 3 - Oxidativo, 4 - Por Fadiga e 5 - Adesivo..... 30

Figura 2.4 - Desgastes de cratera e de flanco das ferramentas de corte..... 33

Figura 2.5 - Evolução do desgaste linear da superfície de folga e alteração da curva com o aumento da velocidade de corte..... 34

Figura 2.6 - Valores de Ra em função do desgaste de flanco VB para alguns testes de usinagem..... 36

Figura 2.7 - Localização de zonas oxidadas..... 41

Figura 2.8 - Representação esquemática da adesão nas superfícies de incidência e de saída..... 43

Figura 2.9 - Mapa de mecanismos de desgaste..... 47

Figura 3.1 - Corpo de prova..... 52

Figura 3.2 - Torno mecânico EMCO T-120 com CNC Emcotronic T1..... 54

Figura 3.3 - Ferramenta posicionada para início do corte..... 55

Figura 3.4 - Ilustração esquemática das regiões medidas da rugosidade superficial..... 56

Figura 3.5 - Dispositivo para medir a rugosidade superficial das peças usinadas..... 57

unesp

Figura 4.1 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 1 da ferramenta F_1, para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 59

Figura 4.2 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 2 da ferramenta F_1, para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 59

Figura 4.3 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas de corte 1 e 2 da ferramenta F_2, e média destas duas arestas para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 60

Figura 4.4 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 3 da ferramenta F_2 para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 61

Figura 4.5 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 4 da ferramenta F_2 para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 61

Figura 4.6 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas de corte 3 e 4 da ferramenta F_2, e média destas duas arestas para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 62

Figura 4.7 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 5 da ferramenta F_3 para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 63

Figura 4.8 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 6 da ferramenta F_3, para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 63

Figura 4.9 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas de corte 5 e 6 da ferramenta F_3, e média destas duas arestas para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 64

Figura 4.10 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 7 da ferramenta F_4, para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 65

Figura 4.11 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 8 da ferramenta F_4 para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 65

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

Figura 4.12 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas de corte 7 e 8 da ferramenta F_4, e média destas duas arestas para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 66

Figura 4.13 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 67

Figura 4.14 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas, relativos a cada aresta de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, bem como a média destes comportamentos para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.. 68

Figura 4.15 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 69

Figura 4.16 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas, relativos a cada aresta de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4, bem como a média destes comportamentos para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.. 70

Figura 4.17 - Média da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas para as velocidades de corte V_1 = 350 m/min e V_2 = 403 m/min..... 71

Figura 4.18 - Inclusões no aço ABNT-1050. Aumento 100x..... 74

Figura 4.19 - Microestrutura do aço ABNT-1050 ilustrando a presença das fases ferrítica e perlítica. Aumento 100x..... 75

Figura 4.20 - Ferramenta de corte F_1, como recebida. Aumento 25x..... 76

Figura 4.21 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_1, pela usinagem com a aresta de corte 1: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x..... 77

Figura 4.22 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_1, pela usinagem com a aresta de corte 2: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x..... 78

Figura 4.23 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_2, pela usinagem com a aresta de corte 3: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x..... 79

unesp

Figura 4.24 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_2, pela usinagem com a aresta de corte 4: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x..... 80

Figura 4.25 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_3, pela usinagem com a aresta de corte 5: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x..... 81

Figura 4.26 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_3, pela usinagem com a aresta de corte 6: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x..... 82

Figura 4.27 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_4, pela usinagem com a aresta de corte 7: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x..... 83

Figura 4.28 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_4, pela usinagem com a aresta de corte 8: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x..... 84

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

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 - Nomenclatura adotada para as ferramentas e arestas de corte.... 51

Tabela 4.1 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 1 da ferramenta F_1..... 109

Tabela 4.2 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 2 da ferramenta F_1..... 110

Tabela 4.3 - Valores médios da rugosidade superficial relativos a usinagem com cada uma das arestas de corte 1 e 2 da ferramenta F_1, e média dos valores destas duas arestas..... 111

Tabela 4.4 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 3 da ferramenta F_2..... 112

Tabela 4.5 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 4 da ferramenta F_2..... 113

Tabela 4.6 - Valores médios da rugosidade superficial relativos a usinagem com cada uma das arestas de corte 3 e 4 da ferramenta F_2, e média dos valores destas duas arestas..... 114

Tabela 4.7 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 5 da ferramenta F_3..... 115

Tabela 4.8 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 6 da ferramenta F_3..... 116

Tabela 4.9 - Valores médios da rugosidade superficial relativos a usinagem com cada uma das arestas de corte 5 e 6 da ferramenta F_3, e média dos valores destas duas arestas..... 117

Tabela 4.10 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 7 da ferramenta F_4..... 118

Tabela 4.11 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 8 da ferramenta F_4..... 119

Tabela 4.12 - Valores médios da rugosidade superficial relativos a usinagem com cada uma das arestas de corte 7 e 8 da ferramenta F_4, e média dos valores destas duas arestas..... 120

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

Tabela 4.13 - Rugosidade superficial média, obtida pela usinagem com as arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2..... 121

Tabela 4.14 - Rugosidade superficial média, obtida pela usinagem com as arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4..... 122

Tabela 4.15 - Composição química do aço nas amostras..... 72

Tabela 4.16 - Dureza Brinell das amostras selecionadas..... 73

Tabela 4.17 - Desgaste final de flanco e rugosidade superficial da última peça, para as arestas de corte 1, 2, 3 e 8..... 85

Tabela 4.18 - Vida da ferramenta de corte em função da rugosidade superficial para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 86

Tabela 4.19 - Variação percentual da vida de cada ferramenta F_1 e F_2 e variação percentual máxima entre as ferramentas F_1 e F_2 para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min, em função do critério de fim de vida adotado..... 87

Tabela 4.20 - Variação percentual da vida de cada uma das arestas de corte das ferramentas F_1 e F_2, em relação à média das vidas destas arestas, em função do critério de fim de vida adotado, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 87

Tabela 4.21 - Variação percentual entre as vidas médias das ferramentas F_1 e F_2, em função do critério de fim de vida adotado, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min..... 88

Tabela 4.22 - Vida da ferramenta de corte em função da rugosidade superficial para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 88

Tabela 4.23 - Variação percentual da vida de cada ferramenta F_1 e F_2 e variação percentual máxima entre as arestas destas, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min, em função da rugosidade superficial..... 89

Tabela 4.24 - Variação percentual da vida de cada uma das arestas de corte das ferramentas F_3 e F_4, em relação à média das vidas destas arestas, em função do critério de fim de vida adotado, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 89

Tabela 4.25 - Variação percentual entre as vidas médias das ferramentas F_3 e F_4, em função do critério de fim de vida adotado, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min..... 90

unesp

Tabela 4.26 - Média das vidas e variação percentual da média das vidas das ferramentas F_1 e F_2 em relação às ferramentas F_3 e F_4, respectivamente para as velocidades de corte $V_1 = 350$ m/min e $V_2 = 403$ m/min, em função do critério de fim de vida adotado. 90

Tabela 4.27 - Valores da rugosidade das superfícies de incidência e de saída das pastilhas como recebidos e suas médias..... 91

LISTA DE ABREVIATURAS

α - ângulo de folga

γ - ângulo de saída

θ_c - temperatura crítica

χ_r - ângulo de posição da aresta de corte principal

χ_r' - ângulo de posição da aresta de corte secundária

ap - profundidade de corte

f - avanço mm/rev.

HB - dureza Brinell

K_B - largura da cratera

KM - distância do centro da cratera à aresta de corte

KT - profundidade da cratera

n - velocidade de rotação (rpm)

N - número de peças

R_a - rugosidade superficial (média aritimética) referente à linha central

t - tempo

T - vida da ferramenta

VB - largura do desgaste de flanco

v_c - velocidade de corte

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

RODRIGUES, H. L. Variação da vida de ferramentas de metal duro com revestimento triplo em operação de acabamento no processo de torneamento. Guaratinguetá, 1997. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

RESUMO

A variação das vidas de ferramentas cortantes de metal duro, revestidas com nítreto de titânio e camadas intermediárias de carbeto de titânio e óxido de alumínio, foi identificada e analisada quando da usinagem de aço. Para isso, executou-se o processo de usinagem sob condições controladas de laboratório, fixando-se avanço e profundidade de corte. Procurando caracterizar a homogeneidade do material da peça de trabalho, realizou-se ensaio de dureza e análises micrográficas e químicas, que resultaram na identificação do metal como aço ABNT-1050. As vidas foram quantificadas por meio de métodos deterministas, adotando-se os valores da rugosidade superficial das peças usinadas como critério de fim de vida. Para cada velocidade de corte de 350 e 403 metros por minuto, usinou-se quatro lotes de 102 peças, sendo realizadas três medidas da rugosidade superficial por peça. Os resultados mostraram que os comportamentos da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas, quando comparados com o comportamento médio relativo a elas, apresentaram significativas variações. Concluiu-se que estas variações podem estar relacionadas a não homogeneidade e a períodos diferentes de vida dos revestimentos, a rugosidade inicial das superfícies da ferramenta e a alterações geométricas do pastilha causadas por avarias. Concluiu-se também, da similaridade entre os comportamentos do desgaste da superfície de incidência e da rugosidade superficial em função do tempo de usinagem das peças.

Palavras-chave: variação da vida de ferramenta; usinagem; revestimento; aresta de corte; rugosidade superficial.

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

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

"A ferramenta foi um dos primeiros instrumentos a ser utilizado pelo homem, desde eras pré-históricas. Fossem feitas de pedra ou de madeira, constituíam para o ser humano uma espécie de suplemento à força de suas mãos e de seus braços, de modo a permitir-lhe a realização de tarefas pacíficas, como lavrar a terra, cortar e conformar substâncias úteis à sua vida, ou de modo a conferir-lhe maior segurança para defender-se contra o meio que lhe era, de modo geral, adverso."[1]

A combinação deste quadro com a busca de conforto e aliado a necessidade de produzir vários destes utensílios, surgem aproximadamente a 3000 a.C., dispositivos mecânicos rudimentares caracterizados pelos fundamentos básicos dos tornos modernos, conforme ilustra a figura 1.1, onde o homem era a força motriz. Então, com o passar dos anos, as ferramentas e as máquinas são desenvolvidas com a ajuda da descoberta de novos materiais e com a utilização da força dos animais.[2, 3]

Com o advento da propulsão a vapor, o desenvolvimento das máquinas e de suas ferramentas ganham grande impulso, proporcionando a partir daí até nossos dias, condições de corte no processo de usinagem cada vez mais severas, ou seja, a velocidade relativa entre a peça e a ferramenta aumentam gradativamente elevando as pressões e temperaturas envolvidas na região de corte.[2,3]

O surgimento do aço rápido, do metal duro, dos materiais

unesp

cerâmicos, dos revestimentos de TiN, TiC, Al_2O_3 e etc., resultam da necessidade do aumento da velocidade de corte, de forma a melhorar a durabilidade da ferramenta, diminuindo o tempo gasto com a usinagem, exigência imposta pela alta produção a custos cada vez menores.[4]

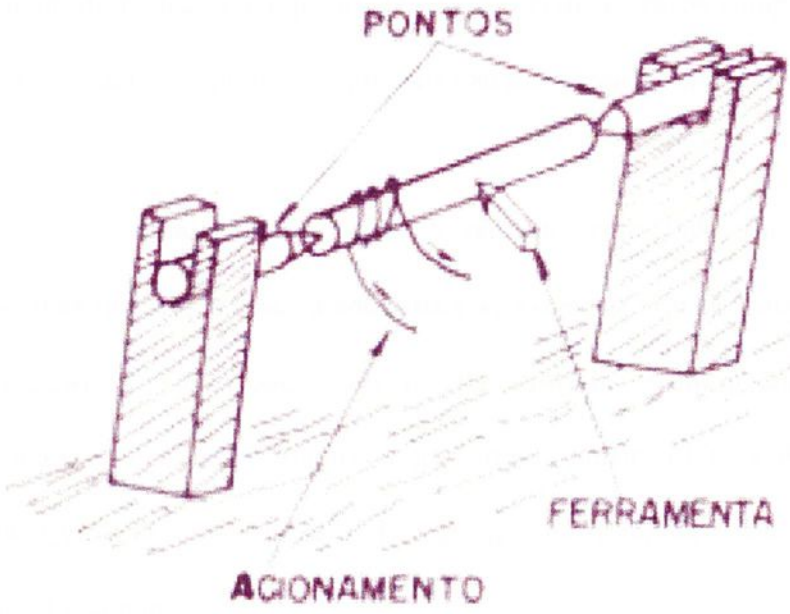


Figura 1.1 - Dispositivo mecânico de usinagem.[2]

Entretanto, apesar destes avanços proporcionarem o aumento da durabilidade da ferramenta de corte, ou seja, uma vida maior, estas continuam apresentando variações, pois, diversas ferramentas utilizadas nas mesmas condições de usinagem, dificilmente apresentarão valores idênticos de suas vidas.

Diversos fatores podem ser considerados responsáveis por estas variações, tais como, dureza da peça, inclusões, heterogeneidade do material da ferramenta e da peça, efeitos dinâmicos associados à freqüência natural e a flexibilidade dinâmica da máquina ferramenta e efeitos cinemáticos correlatos à geometria de corte da ferramenta. No entanto, nenhum destes fatores podem ser

unesp

considerados isoladamente como responsáveis pelas largas dispersões verificadas na vida da ferramenta de corte.[5,6,7]

Hoje, com as exigências geradas pela tendência crescente de globalização, as industrias para se manterem competitivas, necessitam mais do que nunca de produtividade com qualidade, custos baixos e prazos compatíveis[8]. Pode-se então, entender os prejuízos que são causados pelas variações das vidas das ferramentas.

Imaginando-se uma ferramenta com vida estimada em 15 minutos, mas que aos 13 não atende mais as exigências do projeto, e uma outra com a mesma estimativa, que ao ser trocada constatou-se que poderia usinar pelo menos mais 3 minutos. Portanto, a primeira produziu 13,33% de refugo e a segunda deixou de produzir 20%. É claro que estes números são fictícios, mas próximos à realidade.

Os objetivos do presente trabalho são identificar e analisar as variações das vidas de ferramentas cortantes de metal duro, revestidas com TiN e camadas intermediárias de TiC e Al_2O_3, bem como, um estudo sobre as influências dos revestimentos, dos desgastes e do material da peça de trabalho nestas variações. Por isso, o processo de usinagem foi executado sob condições controladas de laboratório, utilizando métodos determinísticos de quantificação destas vidas. Assim, adotou-se os valores da rugosidade superficial das peças usinadas como critério de fim de vida.

unesp

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A realização do corte com remoção de cavaco gera desgastes e pode provocar avarias nas ferramentas de corte, pois as forças e tensões envolvidas neste processo, elevam a temperatura na região de contato peça/ferramenta. A geração destas conseqüências indesejáveis, obrigam a interrupções periódicas da usinagem para a reafiação ou substituição da ferramenta.

O intervalo entre duas destas interrupções, medido em tempo relativo ao corte, chama-se vida da ferramenta. No entanto, este tempo, correlato ao momento em que se deve providenciar a reafiação ou a substituição da ferramenta, é determinado pelo objetivo a ser alcançado com a usinagem, a qual denomina-se critério de fim de vida.

Os critérios determinantes da vida da ferramenta podem ser a rugosidade superficial ou alterações dimensionais das peças usinadas, aumento das forças de corte ou da potência consumida, quebras ou medidas do desgaste da ferramenta, etc. Entretanto, para qualquer um destes critérios a ferramenta sofre um desgaste crescente em função do tempo, ou até mesmo uma avaria catastrófica cujo comportamento é mais aleatório.

O aparecimento de uma avaria ou de um desgaste com uma determinada preponderância depende, entre outros parâmetros, do material e da geometria da ferramenta, das condições de corte, da relação entre a dureza dos materiais da peça e da ferramenta e das características metalúrgicas do material usinado. Todos estes fatores determinam a pressão e a temperatura na região de corte, influenciando assim os mecanismos de desgaste.[6,9]

unesp

2.1 - Geometria das Ferramentas de Corte

A escolha da geometria depende principalmente das propriedades do material a ser trabalhado e do material da ferramenta.

Todos os detalhes geométricos de uma ferramenta são importantes, mas serão ressaltados apenas os fundamentais para o entendimento deste trabalho[5,6,10], que tomando-se como referência a figura 2.1, são:

a - Superfície de folga - O aumento de sua inclinação, ou seja, quanto maior o ângulo "α_o" (visto no corte MM), maior será o volume de material removido da ferramenta para o mesmo valor medido do desgaste de flanco. Este aumento é limitado pelo conseqüente enfraquecimento da cunha corte.

b - Superfície de saída - A indicação do ângulo positivo "γ_o"(visto no corte MM), é a determinação da inclinação da superfície de saída. O aumento deste ângulo diminui a pressão e a temperatura de corte, prolongando a vida da ferramenta. Entretanto, este acréscimo diminui a resistência da cunha corte.

c - Aresta principal de corte ou aresta de corte - Intersecção das superfícies de saída e de incidência e determinada pelo ângulo de posição"χ_r". Quanto menor for este ângulo maior será o contato da aresta com o material de trabalho, proporcionando uma distribuição melhor da temperatura de corte, com uma dissipação do calor mais eficiente.

d - Aresta secundária de corte - Localizada na superfície de saída e determinada pelo ângulo secundário de posição" χ_r' ". Quando este ângulo é muito pequeno há o contato por completo desta aresta com a superfície usinada, concentrando o

calor que juntamente com resíduos do corte prejudicam o acabamento da peça.

e - Raio de ponta - Raio de concordância entre as arestas principal e secundária. O seu aumento proporciona a diminuição da pressão de corte melhorando o acabamento da rugosidade superficial da peça usinada, porém este aumento é limitado por prejudicar o acabamento.

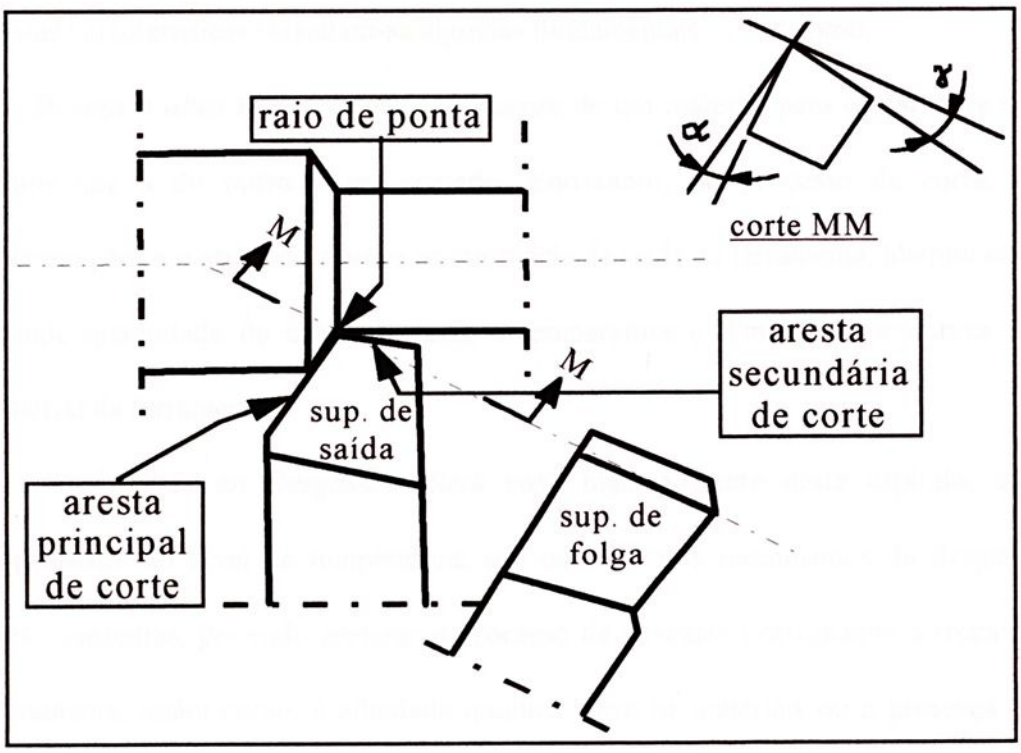


Figura 2.1 - Representação simplificada de uma ferramenta de torneamento.

2.2 - Materiais para Ferramentas de Corte

A seleção do material para ferramenta é uma tarefa extremamente difícil, pois não basta que o material escolhido possa trabalhar em altas velocidades de corte, objetivando tempos reduzidos de usinagem, mas

também deve-se analisar os custos das trocas ou reafiações da ferramenta. Portanto, a escolha deve ser fruto de um balanceamento entre o fator custo e a questão técnica.

A dificuldade de escolha do ponto de vista técnico, reside no fato da existência de um grande número de materiais com características próprias, onde destas características ressaltam-se algumas fundamentais[1,5], tais como:

a - Dureza a altas temperaturas - A dureza de um material para cortar deve ser maior que a do outro a ser cortado. Entretanto, no processo de corte, as deformações e o atrito do cavaco na superfície de saída da ferramenta, liberam uma grande quantidade de calor elevando a temperatura e diminuindo a dureza do material da ferramenta.

b - *Resistência ao Desgaste* - Será visto mais à frente neste capítulo, que dependente do nível da temperatura, um ou mais dos mecanismos de desgaste estão presentes, podendo acelerar o processo de desgaste ocasionando a troca da ferramenta, assim como, a afinidade química entre os materiais ou a presença de inclusões duras na peça usinada.

c - *Tenacidade* - Capacidade para absorver energia na região plástica. É necessária para evitar a ruptura da aresta de corte por fragilidade, aliada à boa capacidade de resistência ao desgaste e à dureza do material da ferramenta.

d - *Atrito* - Busca-se um baixo coeficiente de atrito, pois limitando-se esta fonte geradora de calor aumenta-se a durabilidade da ferramenta.

e - *Propriedades Térmicas* - O coeficiente de dilatação baixo é importante para a estabilidade dimensional da peça. A condutibilidade pode ajudar a evitar a

unesp

concentração de calor na região de corte.

O homem, consciente ou não destas características básicas necessárias para o material das ferramentas, tem conseguido através dos tempos, avançar na evolução destes materiais. TAYLOR e WHITE[11], por exemplo, em seus experimentos com aços carbono, conseguiram melhorar suas qualidades para a usinagem e também descobriram os aços rápidos. Materiais como ligas não ferrosas, cerâmicos (óxidos metálicos), carbetos metálicos (metal duro), substratos revestidos, nitreto cúbico de boro e diamantes policristalinos representam a continuidade do desenvolvimento dos materiais para ferramentas. Sendo hoje, o metal duro e o aço rápido, revestidos ou não, os responsáveis pela ampla maioria do corte de metais com remoção de cavaco.

Os carbetos cementados ou também chamados de carbetos sinterizados obtidos pelas técnicas da metalurgia do pó, tornaram-se mais utilizados a partir da Segunda Guerra Mundial por proporcionarem grandes aumentos nas velocidades de corte. Esta significativa contribuição à usinagem é devido a seus atributos de alta dureza a frio e a quente, boa estabilidade química, grande resistência ao desgaste e baixo atrito.[2,4]

Estes carbetos são apresentados na forma de pastilhas quadradas, triangulares, rômbicas (losangulares), redondas e outras, podendo ser retificados conforme necessidade do trabalho desejado. Compostos principalmente por carbetos metálicos de tungstênio (WC), titânio (TiC), tântalo (TaC) e nióbio (NbC), com a presença de um aglomerante que geralmente é o cobalto (Co). A variação percentual do cobalto juntamente à adição de um ou mais destes carbetos,

unesp

determina a sua faixa de uso, ou seja, qual o grupo de materiais a ser usinado.[2,4]

Ao final da década de 60, depositou-se uma fina camada de TiC da ordem de alguns micra sobre um substrato de metal duro, resultando em um aumento da velocidade de corte e da vida da ferramenta. Então, experimentou-se vários materiais como revestimento com resultados extremamente satisfatórios. Hoje, os mais aplicados são o nitreto de titânio, o óxido de alumínio (Al_2O_3), o carbeto de titânio e o carbonitreto de titânio (TiCN), sendo que a espessura da camada não ultrapassa 0,005 mm, pois camadas mais grossas não melhoram o desempenho da ferramenta.[5,12]

Revestimentos múltiplos também foram desenvolvidos onde cada camada contribui com suas próprias características, conforme figura 2.2. As combinações de melhores resultados são as de TiN-TiC-TiCN-TiN e TiC-Al_2O_3-TiN, onde a espessura total do recobrimento não deve ser superior à 12 μm, pois pode ocorrer uma fragilidade originando pequenos lascamentos nas camadas.[4,6]

As melhores propriedades dos elementos mais usados para o revestimento múltiplo de carbetos cementados[4,5,6], são as seguintes:

a - *Carbonitreto de titânio (TiCN)* - Excelente capacidade de aderência ao substrato e outras camadas de recobrimento e de resistência ao desgaste de flanco e também excelente tenacidade.

b - *Carbeto de titânio (TiC)* - Difere do TiCN apenas por apresentar excelente coeficiente de atrito.

c - *Óxido de alumínio ou alumina (Al_2O_3)* - Excelente resistência ao desgaste por craterização, como barreira às reações químicas e ao calor gerado no corte,

unesp

prejudiciais à pastilha.

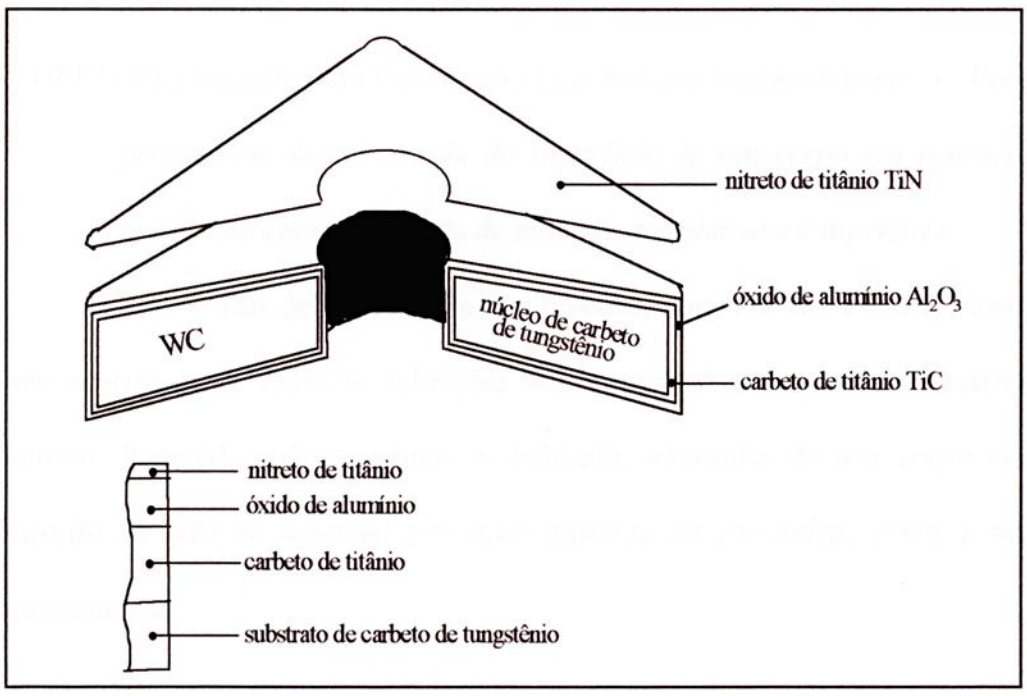


Figura 2.2 - Representação em corte de uma pastilha de metal duro com revestimento triplo de $TiC-Al_2O_3-TiN$.[6]

d - *Nitreto de titânio* - Excelente capacidade de aderência ao substrato e a outras camadas de recobrimento, como barreira às reações químicas e ao calor gerado no corte, prejudiciais à pastilha, possuindo também excelente coeficiente de atrito e tenacidade.

2.3 - Desgastes

2.3.1 - Definições

"Dentre as várias definições de desgaste[13] pode-se citar:

a - Dicionário - ***Enfraquecimento pelo uso***.

b - ASLE (Sociedade Americana de Engenheiros de Lubrificação) - ***Remoção de material por ação mecânica***.

c - OECD (Organização para Cooperação Econômica e Desenvolvimento) - ***Perda progressiva de substância da superfície de um corpo em operação, ocorrendo como resultado de movimento relativo na superfície***.

Tais definições, não são precisas, uma vez que o fluxo plástico pode ocorrer e que todas as definições são aproximadas e algumas imprecisões ocorrem. Para tal, pode-se adotar a definição, ***alteração de um corpo com remoção ou não de material por ação química ou mecânica***, como a mais representativa".

2.3.2 - Processos de Desgastes

Os processos de desgaste não têm sido claramente estabelecidos[13], mas várias versões são apresentadas na tentativa de explicá-los. Nenhuma delas é aceita plenamente por todos proponentes, mas todos concordam que uma superfície plana é constituída de asperezas com formas e distribuição irregulares. Então, quando dois corpos são colocados um sobre o outro, ocorrem deformações plásticas e elásticas destas asperezas até que a área real de contato seja suficiente para suportar a carga.

Entretanto, se uma força tangencial é aplicada a estes dois corpos, ocorre um processo de remoção de material, que pode ser maior ou menor dependendo das propriedades metalúrgicas destes corpos, temperatura e outros.

unesp

Cada interação destas propriedades resultará um determinado desgaste, conforme ilustrado na figura 2.3, e são classificados como:

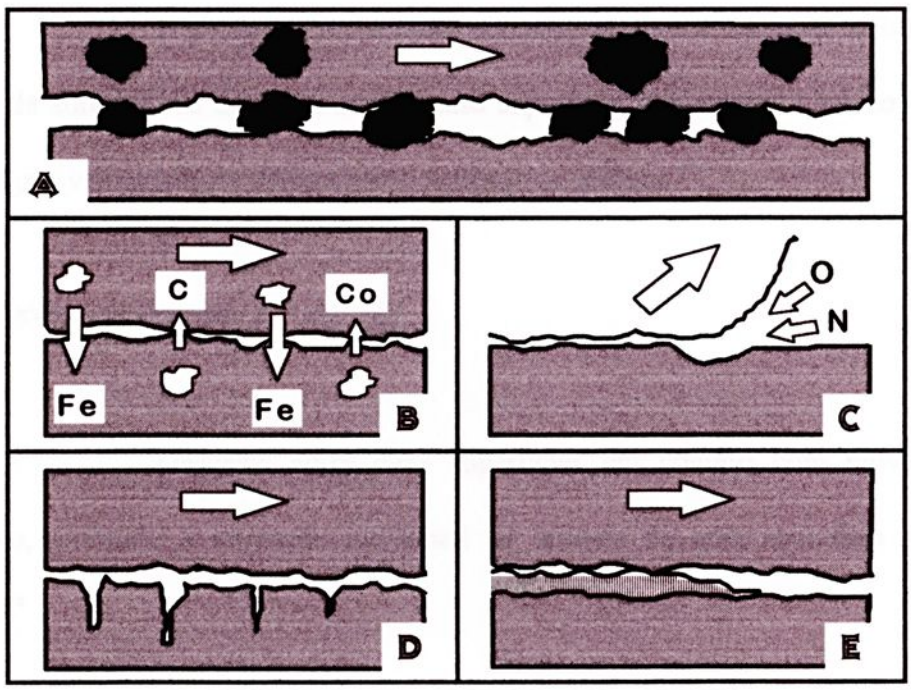


Figura 2.3 - Ilustração esquemática dos processos de desgastes: A - Por abrasão, B - Por difusão, C - Por oxidação, D - Por Fadiga e E - Por adesão.[12]

a - *Processo de desgaste por abrasão*

É definido como o desgaste por remoção de material, causado por protuberâncias duras ou partículas duras.[14]

O modelo básico do desgaste por abrasão, foi inicialmente proposto por KRUSHOV E BABICHEV[15], que identificaram dois processos que ocorrem quando uma partícula dura entra em contato com uma superfície de menor dureza. O primeiro é a formação de uma ranhura por deformação plástica

sem remoção de material, e no segundo a partícula funciona como uma micro-ferramenta removendo material.

O processo por abrasão depende da dureza, tamanho e forma da partícula abrasiva, da dureza e acabamento superficial dos materiais em contato e da carga e velocidade de deslizamento aplicado ao sistema.[16]

b - Processo de desgaste por difusão

Desgaste entre duas superfícies em contato com movimento relativo, atribuído a migração individual de átomos de uma superfície para a outra.[14]

A ocorrência do desgaste por difusão é extremamente dependente de altas temperaturas e da afinidade química entre os corpos em contato.[12]

c - Processo de desgaste Por oxidação

É o processo de desgaste na qual predominam reações químicas com o oxigênio ou o ambiente oxidante. Usualmente, desgaste por oxidação é uma forma moderada, mas pode algumas vezes ser sério.[14]

O desgaste por oxidação poderá ocorrer quando os corpos em contato forem submetidos a altas temperaturas e na presença de elementos oxidantes.[12]

unesp

d - Processo de Desgaste por Fadiga

Remoção de partículas destacadas por fadiga surgidas pelas variações cíclica de tensões. Estas partículas têm a forma de escamas (flakes) e são resultantes de micro trincas surgidas sob a superfície.[14]

O desgaste por fadiga é resultado freqüente da combinação termomecânica, ou seja, das flutuações de temperatura com o cíclo carregamento-descarregamento das forças de corte. Este processo é dependente direto da tenacidade e dureza das superfícies.[12]

e - *Processo de desgaste por adesão*

È o desgaste por transferência de material de uma superfície para outra durante o movimento relativo, devido a formação de junções na fase sólida. Estas junções adesivamente formadas, são cisalhadas e parte do material menos resistente é transferido ou pode permanecer entre as superfícies.[14]

O processo por adesão depende, essencialmente, da força normal e da velocidade aplicadas entre as superfícies, da temperatura, da afinidade química entre os corpos e suas durezas.[9,16]

2.3.3 - Tipos de Desgastes das Ferramentas de Corte[4,9,12]

Os desgastes das superfícies de saída e da superfície de folga, conforme ilustrado pela figura 2.4, ocorre geralmente em regiões adjacentes à

unesp

aresta de corte. Em muitos casos o desgaste da superfície de folga, designado por VB, não é regular ao longo de todo o comprimento da aresta, apresentando variações, geralmente com máximos no ponto correspondente à extremidade da aresta de corte e junto ao raio de ponta da ferramenta.

A remoção constante de partículas da superfície de saída na região do contato cavaco/ferramenta produz uma cavidade, conforme observado na figura 2.4, que é denominado desgaste de cratera e aparece geralmente no corte de materiais metálicos, como por exemplo aços em geral, ligas de níquel e ligas de cobalto.

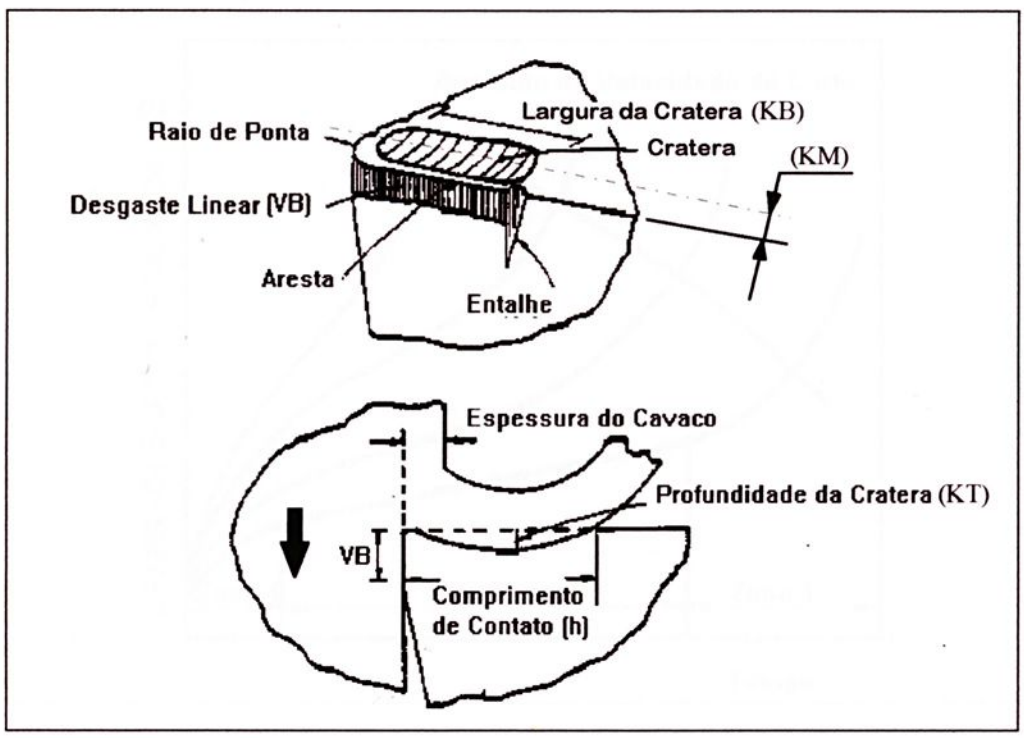


Figura 2.4 - Desgastes de cratera e de flanco das ferramentas de corte[9]

A caracterização do desgaste linear da superfície de folga é dado pelo valor médio VB ou valor máximo $VB_{máx}$, enquanto o desgaste em cratera leva

em consideração a profundidade máxima da cratera KT, a sua largura KB e a distância da aresta de corte principal ao centro da cratera KM.

O aumento destes desgastes é gradual com o tempo de corte, mas enquanto o desgaste em cratera varia linearmente, o desgaste na superfície de folga (desgaste de flanco) apresenta, por vezes, três zonas características, conforme ilustrado pela figura 2.5. Esta forma característica é modificada (podendo mesmo apresentar-se como uma linha reta) pela variação das condições de corte. São apresentadas a seguir, de maneira simplificada, estas três zonas e uma complementação será feita adiante, neste capítulo.

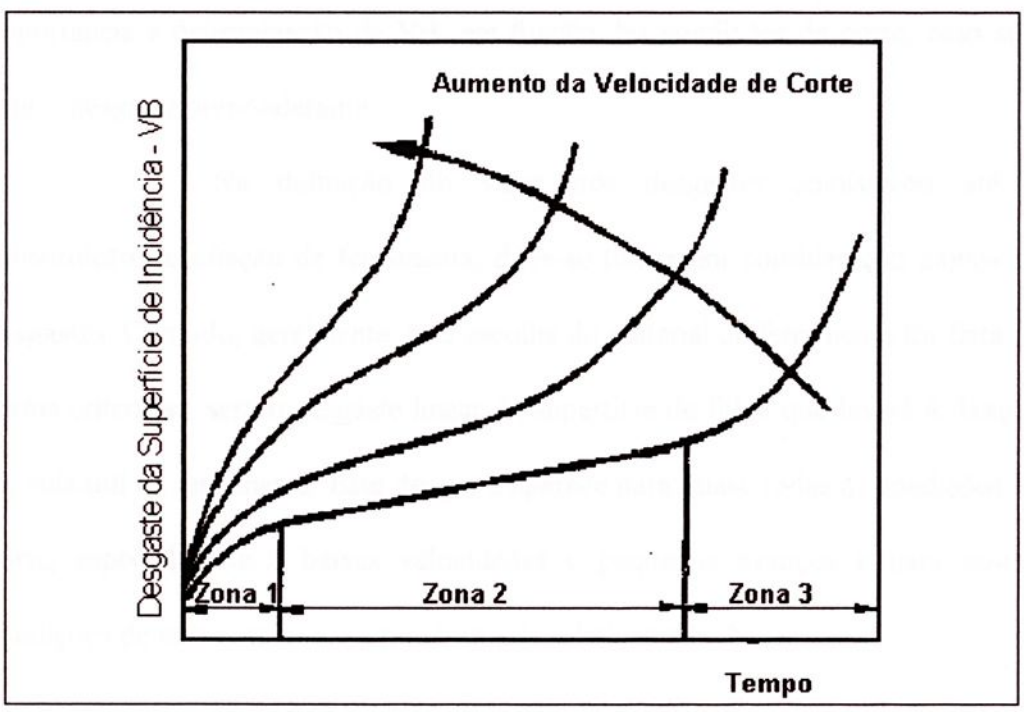


Figura 2.5 - Evolução do desgaste linear da superfície de folga e alteração da curva com o aumento da velocidade de corte.[9]

No início do corte, com uma ferramenta nova, há uma região denominada zona 1 ou "primária", onde o desgaste é muito rápido até que a aresta

fique arredondada, causada pela elevada tensão aplicada no gume de pequena seção. No final desta zona, o desgaste VB aumenta linearmente a uma taxa reduzida. Na zona 2, ou "secundária", o desgaste aumenta de uma forma gradual, controlável e previsível. Finalmente, na zona 3 - ou "terciária, quando VB for da ordem de grandeza de VBc (VB crítico) e, ao fim do tempo de corte t_c, o desgaste volta a aumentar muito rapidamente até a ruptura "catastrófica" da aresta de corte.

A ocorrência desta ruptura, poderá ter conseqüências imprevisíveis, tais como: deformação nas peças e forças exageradas no processo que poderão acarretar danos na máquina ferramenta. Portanto, é de particular importância a determinação de VB_c em função das condições de corte, caso seja este o desgaste preponderante.

Na definição do valor dos desgastes admissíveis até à substituição ou afiação da ferramenta, deve-se tomar em consideração ambos os desgastes. Contudo, geralmente, se a escolha do material da ferramenta for feita de forma criteriosa, será o desgaste linear da superficie de folga que levará à fixação da vida útil da ferramenta. Este desgaste aparece para quase todas as condições de corte, especialmente a baixas velocidades e pequenos avanços e para outras condições de corte, onde a temperatura seja relativamente baixa.

O crescimento do desgaste da superficie de folga da ferramenta de corte, tem influência direta no aumento da rugosidade superficial da peça usinada[4,10]. Wilkinson e outros[17], verificaram este comportamento em seus experimentos, mas observaram também que, as vezes, ocorrem reduções nos valores da rugosidade superficial, conforme ilustra a figura 2.6.

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

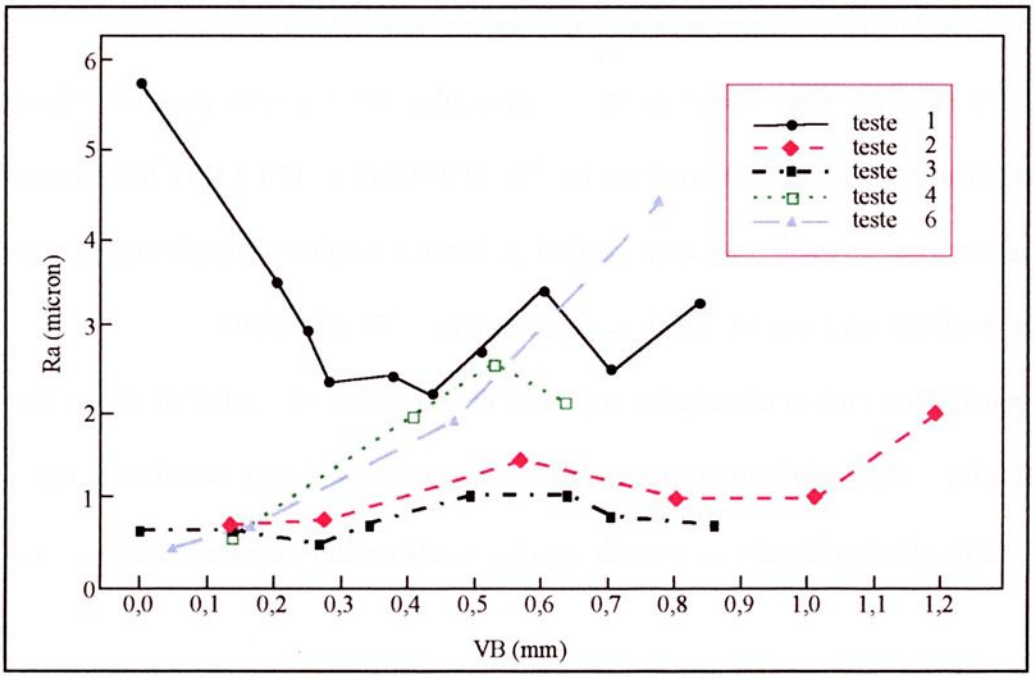


Figura 2.6 - Valores de Ra em função do desgaste de flanco V_b para alguns testes de fresamento frontal.[17]

2.3.4 - Influência da Velocidade de Corte

O processo de corte gera calor por deformação e por atrito, aquecendo a peça, o cavaco e a ferramenta e, quanto mais severas as condições impostas para a usinagem, como por exemplo, o aumento da velocidade de corte, maiores serão as temperaturas, que por sua vez influenciam nos tipos e mecanismos de desgaste.

A maior influência do aumento da velocidade é sentida no crescimento do desgaste de cratera, pois é na superfície de saída onde as temperaturas são máximas. Então, o desgaste de cratera geralmente terá um papel importante, quando da utilização de velocidades de corte elevadas.[9]

unesp

Outro fator influenciável é o acabamento superficial da peça usinada, ou seja, este é melhorado com um aumento da velocidade de corte. Segundo MICHELETTI[5] e FERRARESI[10], isto ocorre em função da diminuição do coeficiente de atrito entre o material de trabalho e as superfícies da ferramenta.

MERCHANT[18], utilizando os valores do grau de recalque do cavaco, pela facilidade de medí-lo e, devido a sua relação direta com o coeficiente de atrito, verificou grande melhoria no acabamento superficial das peças usinadas quando se reduz este grau de recalque, ou seja, diminui-se o coeficiente de atrito.

2.3.5 - Influência das Inclusões

As inclusões podem influenciar o processo de usinagem de maneira positiva, quando estas formam sobre as superfícies da ferramenta uma camada lubrificante, diminuindo o coeficiente de atrito e resultando em uma menor adesão. Influências negativas também podem ser sentidas, quando as inclusões são partículas duras, que deslizando na ferramenta agem como elementos por abrasãos, acelerando o processo de desgaste.[19]

Geralmente, os fatores benéficos à usinagem estão associados a algumas inclusões dos tipos sulfetos e óxidos (MnS, MnCaS, SiO_2, MnO, etc.) e os prejudiciais aos carbetos metálicos e alguns óxidos (CrC, Mn_3C, TiC, Al_2O_3).[20]

Entretanto, em contraposição ao exposto, Thoors e colaboradores[21], na usinagem de aços com pastilhas cermet de TiCN a altas temperaturas, verificaram que as camadas das inclusões de MnS e MnCaS reagem

unesp

com o Ti formando soluções sólidas moles e deste modo aumentam a taxa de desgaste.

2.3.6 - Mecanismos de Desgastes em Ferramentas de Corte

Os mecanismos responsáveis pelos desgastes nas superfícies de saída e de incidência, são os de abrasão, difusão, oxidação, fadiga e adesão. Estes mecanismos poderão atuar de uma forma isolada ou por combinações entre eles. Vários trabalhos realizados por pesquisadores[22,23,24] e por fabricante de ferramenta[4], têm concordância que, durante um processo de usinagem, normalmente estão envolvidos alguns mecanismos de desgaste, podendo haver predominância de um sobre os outros. Portanto, é difícil determinar qual mecanismo é o responsável pelo desgaste da ferramenta para uma dada condição de corte.

O crescimento do desgaste com o tempo e ou a variação das condições de corte, alteram o estado de tensões e o gradiente de temperatura nas superfícies de contato da ferramenta com o material de trabalho, que condicionam os mecanismos atuantes de desgaste.

A - Mecanismo de Abrasão[4,5,6,9,25]

A abrasão depende essencialmente da existência de inclusões duras na peça, do destacamento de partículas aderidas na ferramenta provenientes

unesp

da peça de trabalho e de partículas arrancadas da ferramenta, que deslizam sobre as suas superfícies. O processo de adesão, quando responsável por este tipo de desgaste, produz periodicamente fragmentos de material muito duro, que nas suas trajetórias de saída, promovem a abrasão nas superfícies por onde passam.

Estas partículas de elevada dureza, combinada às pressões de contato e, em conseqüência do seu movimento relativo à ferramenta, "riscam" suas superfícies, atuando como micro-arestas de corte. Portanto, quanto menor for a dureza do material da ferramenta, maior será a abrasão mecânica e, desta forma, a dependência da dureza do material da ferramenta com a temperatura é o fator com maior influência no desgaste do tipo por abrasão.

Levando-se em conta a dureza a quente, as ferramentas menos duras como por exemplo o aço rápido, se desgastam mais na zona de formação da aresta postiça, onde as velocidades de corte são relativamente baixas. Os cuidados com a abrasão mecânica no desgaste total da ferramenta deverá ser acentuado, quando da utilização de elevadas velocidades de corte, uma vez que todos os materiais para ferramenta exibem uma tendência à diminuição de dureza.

B - Mecanismo de Difusão

O mecanismo de difusão influencia o desgaste das superfícies das ferramentas de dois aspectos distintos. O primeiro, através da perda de átomos que difundem para a peça, ocasionando o enfraquecimento da estrutura da ferramenta. O segundo, pela formação de ligas com os elementos que difundiram da peça ou

unesp

do cavaco para a ferramenta.[5,9,12,25]

A difusão é um fenômeno que depende da afinidade química dos materiais envolvidos no processo de corte, e da temperatura. A combinação de uma alta afinidade química com temperaturas elevadas, levará este mecanismo a um alto nível de importância no desgaste das superfícies da ferramenta. Pois, segundo MESQUITA[9], o mecanismo de desgaste por difusão será tanto mais importante quanto maior for a temperatura, já que em relação a esta, a velocidade de difusão cresce exponencialmente.

Em relação à zona terciária, TRENT[26], conclui que: a elevada velocidade de escorregamento do material que adere à superfície de folga da ferramenta, cria condições para que a difusão química seja significativa nessa superfície, ainda que esta não esteja praticamente desgastada. O aumento da velocidade de corte promoverá uma preponderância ainda maior da difusão, e a taxa de desgaste aumentará.

C - Mecanismo da Oxidação[10,12,25]

O processo de usinagem em condições normais de corte, ou seja, altas temperaturas e o ar como meio, poderá gerar oxidações em algumas regiões da ferramenta, conforme ilustra a figura 2.7. Entretanto, nota-se que a oxidação está presente nas superfícies de saída e de incidência ao redor dos locais desgastados.

Na usinagem dos dias de hoje, a deterioração da ferramenta pelo

unesp

mecanismo por oxidação é um ocorrência relativamente incomum. Este tipo de desgaste atua de forma mais acentuada em altas velocidades de corte, ocasionando típicos entalhes nas arestas de corte, principalmente na secundária. Estes entalhes provocados pela oxidação, prejudicarão o acabamento superficial das peças, reduzindo assim a vida das ferramentas.

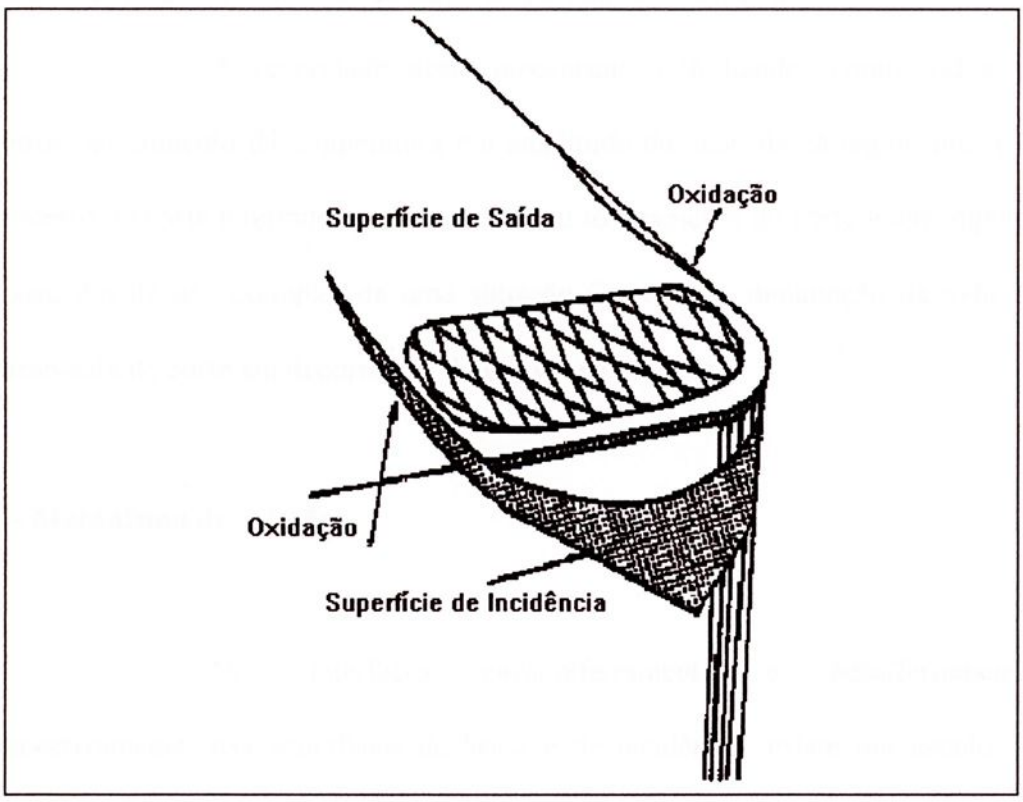


Figura 2.7 - Localização de zonas oxidadas[9]

D - Mecanismo da Fadiga[12,16,25]

A existência de carregamentos e descarregamentos, ou seja repetidos deslizamentos do material usinado nas superfícies de saída e de incidência da ferramenta, causam a geração de microtrincas freqüentemente abaixo destas

superfícies, em defeitos da microestrutura, como inclusões ou partículas de segunda fase.

Com a repetição destas condições as microtrincas se propagam e vazios coalescem. Este crescimento é controlado pelo estado de tensões existentes até a trinca atingir um valor crítico, quando muda sua direção e emerge na superfície, resultando no destacamento de partículas similares a lâminas.

A severidade deste mecanismo está ligado, como todos os outros, ao aumento da temperatura e a amplitude do cíclo de carregamento. Um processo de corte intermitente (fresamento ou torneamento de corte interrompido) é sem dúvida um exemplo, de uma situação favorável a diminuição da vida da ferramenta de corte em decorrência do desgaste por fadiga.

E - Mecanismo de Adesão

Nas interfaces cavaco/ferramenta e peça/ferramenta, respectivamente, nas superfícies de saída e de incidência, existe um estado de compressão e atrito tal que possibilita a formação de junções na fase sólida, chamadas de adesões entre o cavaco e a ferramenta, na superfície de saída e, entre a peça e a ferramenta na superfície de folga, conforme ilustrado na figura 2.8.

Estas junções na fase sólida rompem e uma parte pode seguir agregada às superfícies da ferramenta, por elas serem mais duras. À medida que este fato ocorre repetidas vezes, há um crescimento das camadas aderidas, que sãosubmetidas a altas tensões de compressão na região de contato. Esta dinâmica

unesp

gera agregados endurecidos por encruamento que, em um determinado momento, as junções se rompem, levando consigo pequenas partes das superfícies da ferramenta.[4,25,27,28]

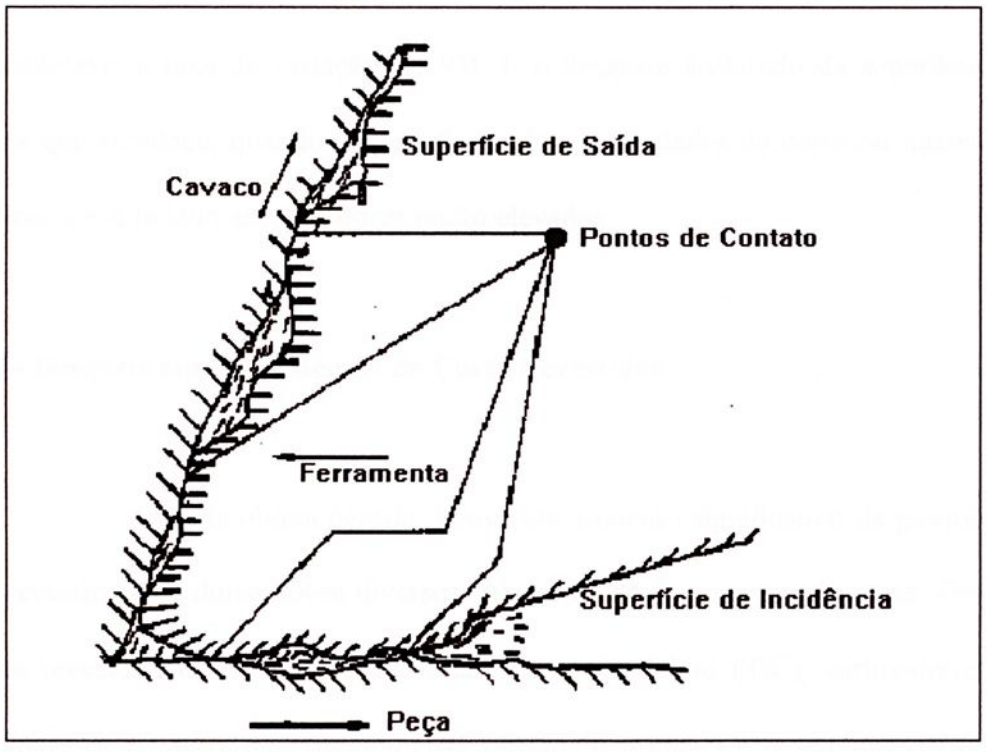


Figura 2.8 - Representação esquemática da adesão nas superfícies de incidência e de saída[9]

De acordo com BHATTACHARYYA e HAM[29], a temperatura na interface de contato aumenta proporcionalmente ao desgaste VB, existindo um valor crítico θ_c para esta temperatura, a partir da qual a taxa de desgaste aumenta subitamente até atingir a ruptura "catastrófica". É a zona terciária de desgaste acelerado conforme ilustrado pela figura 2.5.

Na zona de desgaste acelerado, citada anteriormente, atingida quando VB ultrapassa um valor crítico VB_c, o desgaste passa a depender

fortemente da temperatura e a taxa de desgaste aumenta abruptamente. Segundo COOK[30], a dependência do desgaste com a temperatura nesta região, não é linear e sim exponencial, pois um pequeno aumento de VB pode provocar um acréscimo da temperatura na zona desgastada, que por sua vez aumenta de forma considerável a taxa de variação de VB. É o desgaste acelerado da superfície de folga que acontece, quando se trabalha a altas velocidades de corte ou quando o desgaste acumulado atinge valores muito elevados.

2.4 - Desgaste em Ferramentas de Corte Revestidas

Na última década, houve um aumento significativo da pesquisa[31] de revestimentos duros sobre diversos substratos de ferramentas de corte. Dentre estes revestimentos pode-se citar, o carboneto de titânio (TiC), carbonitreto de Titânio (TiCN), nitreto de titânio (TiN), nitreto de cromo (CrN), alumina (Al_2O_3) e outros, aplicados sobre substratos de ferramentas de metal duro e aços rápidos (HSS), pelas técnicas Deposição Física a Vapor (PVD) e Deposição Química a Vapor (CVD).[32]

O grande objetivo destes estudos é o desenvolvimento de um conjunto revestimento/substrato, que possua a melhor característica para uma melhor vida da ferramenta, ou seja, durabilidade a quente, aumentando sua resistência ao desgaste por meio do revestimento e uma boa tenacidade do substrato, para que a ferramenta possa aceitar determinadas deformações quando sujeita a choques e vibrações.

unesp

Destas pesquisas, algumas importantes observações feitas por pesquisadores em relação ao revestimento, serão citadas:

- O revestimento não proporciona apenas proteção mecânica, mas também age como uma barreira à difusão.[33]

- O aumento da espessura do revestimento até cerca de 6 μm, aumenta a resistência aos desgastes das superfícies de incidência (desgaste linear ou de flanco) e de saída (cratera), porém, além deste valor, pouca ou nenhuma melhora é observada.[34]

- O revestimento de TiN reduz a força de corte (ou seja, o atrito médio)[35], embora alguns neguem este efeito.[36]

- O revestimento de TiC é melhor do que os revestimentos de TiN e Al_2O_3, na proteção do desgaste da superfície de folga.[34]

- O revestimento de alumina Al_2O_3 age como uma barreira à difusão, protegendo o revestimento da peça e melhorando o desempenho da ferramenta.[37]

- O revestimento de TiN sobre TiC melhora a resistência ao desgaste da superfície de saída (cratera), mas não necessariamente a da superfície de folga.[35,38]

- O revestimento de Alumina Al_2O_3 sobre o de TiC melhora a resistência ao desgaste da superfície de saída (cratera) e de folga.[35,38]

- Carbonetos e nitretos, cuja condutividade térmica aumenta com a temperatura, oferecem vantagens em baixas velocidades de corte, uma vez que a condutividade térmica dos óxidos são melhores em altas velocidades.[39]

unesp

Estudos de RAMALIANGAM e VAN WYK[40] experimentaram ferramentas de corte somente revestidas de TiN na superfície de saída ou na de incidência, e observaram:

- O revestimento da superfície de folga reduz o desgaste nesta, mas na de saída não altera o desgaste normal.
- O revestimento da superfície de saída reduz o desgaste nesta e também um pouco o da superfície de folga.

Destas observações, concluíram que a diminuição do desgaste da superfície de saída, reduz a taxa de elevação das forças de corte, mantendo um atrito menor e, desta forma, um menor desgaste na superfície de folga.

Em relação ao mecanismo de desgaste destes revestimentos, muitos estudos foram conduzidos na tentativa de explicar como os mesmos se desenvolvem. Foi determinado que um mecanismo particular de desgaste é dependente da tensão de contato, velocidade relativa na interface de desgaste, temperatura e propriedades físicas e químicas dos materiais em contato. Para um conjunto particular de materiais em contato, mapas de mecanismos de desgaste têm sido usados para identificar o mecanismo particular de desgaste resultante, para uma faixa de pressão normal e velocidade de corte.[41]

A figura 2.9, ilustra a estrutura geral de um mapa, onde a temperatura não é plotada, pois a mesma é dependente da pressão normal e da velocidade de corte atuante.

As grandes classes de mecanismos de desgaste mostrados na figura 2.9, são: alta adesão (Seizure), fusão, predominante oxidação/difusão e

unesp

predominante plasticidade (abrasão).

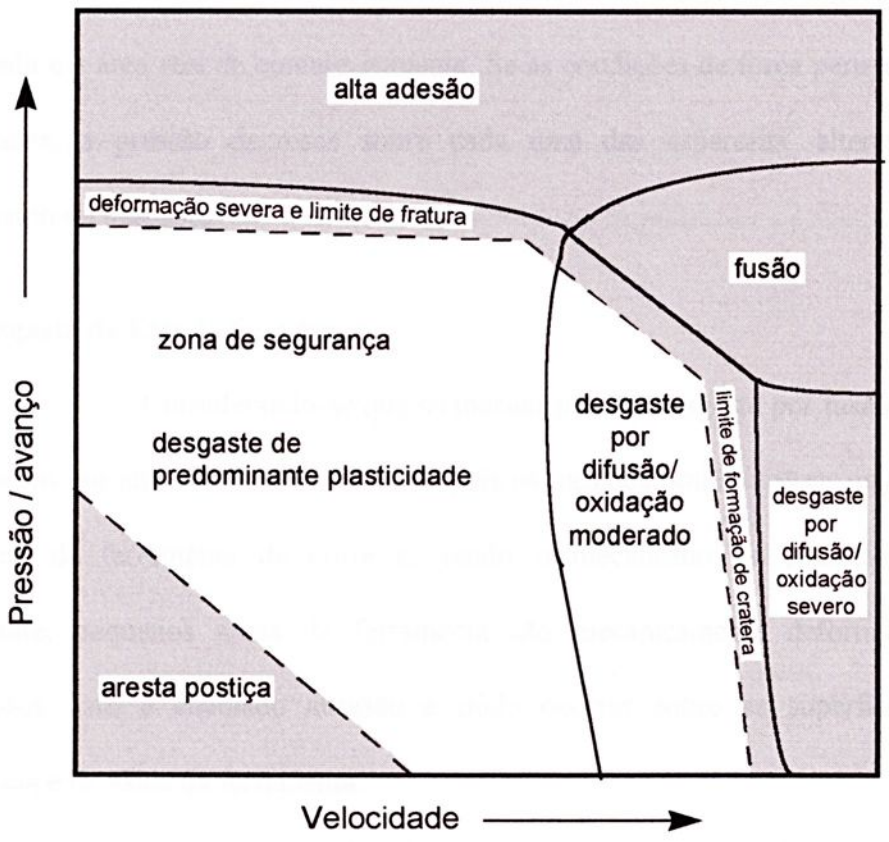


Figura 2.9 - Mapa de mecanismos de desgaste.[41]

Pode-se dividir o comportamento do desgaste de flanco com o tempo de corte em três fases, conforme figura 2.5, inicial, de crescimento constante e terciária:

a - Desgaste Inicial

Os dois materiais em contato possuem irregularidades superficiais na forma de protuberâncias ou asperezas. Na interface, as asperezas dos dois materiais se tocam, definindo uma minúscula área de contato. A tensão e o calor são intensificados nas asperezas e a remoção parcial pode ocorrer por suas

fraturas devido a adesão no processo de deslizamento.

Quando estas asperezas são removidas, a superfície rugosa inicial é alterada e a área real de contato aumenta. Se as condições de força permanecem inalteradas, a pressão decresce sobre cada uma das asperezas, alterando o mecanismo de desgaste.

b - Desgaste de Estado Constante

Considerando-se que os mecanismos de desgaste por fusão ou de travamento por alta adesão não ocorram, pois os mesmos podem causar uma falha completa da ferramenta de corte e, sendo o mecanismo de plasticidade o dominante, pequenos arcos da ferramenta são mecanicamente deformados e fraturados. Isto é chamado abrasão e pode ocorrer sobre as superfícies de incidência e de saída da ferramenta.

Como comentado anteriormente, a tensão normal varia sobre a superfície de desgaste, da seguinte forma, o mecanismo de plasticidade (abrasão) que domina em uma dada zona de desgaste, pode não ser o dominante em outra.

A máxima temperatura ocorre na ferramenta sobre a superfície de saída a uma pequena distância da aresta de corte. Nesta condição é como ocorre o desgaste em cratera, onde o mecanismo dominante é freqüentemente por difusão[42]. A alta temperatura e pressão causa um aumento do movimento dos átomos da superfície da ferramenta para o cavaco, enfraquecendo a mesma e aumentando, portanto, o desgaste nesta região de contato (cratera).

O desgaste pode também ocorrer por fragmentação da aresta, comumente observado no corte intermitente. Isto resulta em um impacto cíclico,

unesp

havendo variações térmicas sobre a ferramenta, levando a criação de trincas sobre a aresta e sua posterior fragmentação.

Estes mecanismos de abrasão, oxidação, difusão e fragmentação, ocorrem em operação dentro da zona de segurança (figura 2.9) e aumentam gradualmente com o tempo. Este período de vida da superfície é, freqüentemente, referido como estado constante.

c - Desgaste terciário

O desgaste terciário está relacionado ao aumento da pressão e temperatura sobre a região de contato, tal que uma condição rápida de oxidação/difusão e adesão ou fusão, causam a destruição da ferramenta.

Em ferramentas com revestimentos duros, resistentes ao desgaste, tal como o TiN, o desgaste deste ou a separação em pequenos volumes, expõe o material base, menos resistente, a uma condição de desgaste rápido.

Em altas temperaturas (elevadas velocidades de corte), o mecanismo de desgaste por abrasão torna-se menos importante e o por oxidação e difusão podem ser dominantes.

YAO e SU[43], no estudo da usinagem de metais ferrosos com pastilhas de metal duro (WC) revestidos com CrN e TiN, analisaram o desgaste destes revestimentos em condições reais de usinagem.

As camadas de material metálico aderidas sobre os revestimentos de TiN são significativamente menores do que as dos revestimentos de CrN, devido a menor adesão entre os mesmos e, portanto, a remoção de material é

unesp

retardada, melhorando consideravelmente a vida da ferramenta.

Segundo TAKEYAMA e MURATA[44] a variação brusca da taxa de desgaste que se dá ao fim de um determinado tempo de corte, está relacionado com a alteração do mecanismo de desgaste preponderante que, inicialmente, seria um desgaste do tipo por adesão com transferência de metal e depois passaria a ser fortemente dependente da temperatura envolvendo a difusão química, oxidação e outras reações químicas, além da adesão.

unesp

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 - Materiais

3.1.1 - Material dos corpos de prova

O material utilizado para a confecção dos corpos de prova foi o aço ABNT-1050, adquirido em um lote de 16 barras trefiladas de 6 m de comprimento e seção circular com diâmetro de 41,275 mm. Exigiu-se do fornecedor que este material fosse proveniente do mesmo lote de produção (corrida controlada), objetivando desta forma uma certa garantia de homogeneidade em sua microestrutura e composição química, diminuindo assim o universo de variáveis existentes no processo de usinagem.

3.1.2 - Material das ferramentas

As pastilhas positivas rômbicas de 55° da classe "P-20" ISO, de larga utilização industrial, são constituídas por um núcleo de metal duro WC, revestido com uma primeira camada de TiC, uma segunda de Al_2O_3, e por último TiN. Indicadas para acabamento de aços em geral no processo de torneamento.

Para um melhor entendimento deste trabalho, cada pastilha por ser constituída com duas arestas de corte, será denominada como **ferramenta de corte F**, e índices serão atribuídos às arestas e ferramentas, conforme tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Nomenclatura adotada para as ferramentas e arestas de corte

Ferramenta de Corte	F_1		F_2		F_3		F_4	
Aresta de Corte	1	2	3	4	5	6	7	8

unesp

3.2 - Corpos de prova

As barras de aço ABNT-1050 foram cortadas em cilindros de comprimento aproximado de 118 mm e posteriormente usinados na forma final do corpo de prova.

Os corpos de prova, foram torneados dentro de uma tolerância geral de ± 0,1 mm e dimensões conforme ilustradas na figura 3.1.

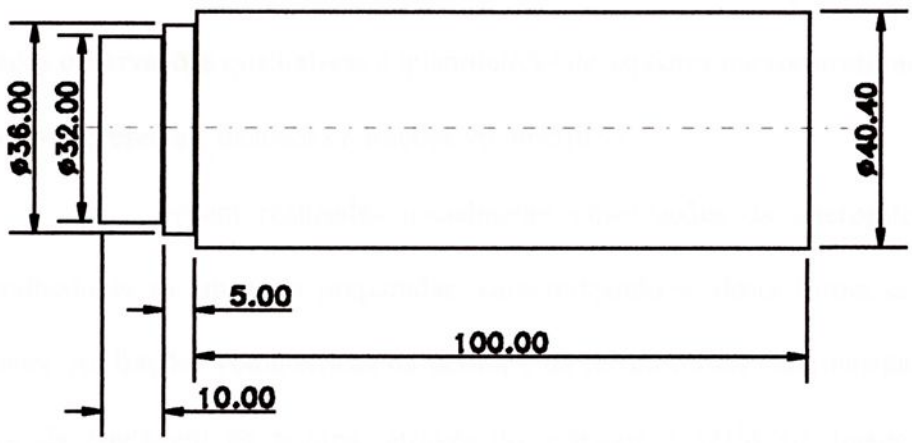


Figura 3.1 - Corpo de prova.

3.3 - Análise de dureza do material dos corpos de prova

As amostras do aço ABNT-1050 para os ensaios de dureza foram cortadas de 8 barras aleatoriamente no comprimento aproximado de 22 mm e posteriormente faceadas no torno para 20 mm.

As medidas de dureza em cada uma das oito amostras, foram realizadas em um durômetro da marca Otto Wolpert-Werke (Wtestor), do tipo Dia Testor 2Rc.

3.4 - Análise microscópica do material dos corpos de prova

A análise por microscopia ótica foi realizada em uma amostra selecionada aleatoriamente das barras, embutida a frio e lixada em uma seqüência granulométrica de 220, 320, 400 e 600, com posterior polimento em pasta de óxido de alumínio, e por último atacada com nital 2%, como recomendado para aços carbono.

Por intermédio de um banco metalográfico Neophot 30, foram efetuadas observações qualitativas e quantitativas de aspectos microestruturais, tais como fases presentes, inclusões e frações volumétricas.

Foram realizadas inicialmente observações da microestrutura, fotografando-se as amostras preparadas, caracterizando-se desta forma as fases presentes. As frações volumétricas da perlita e da ferrita foram determinadas pela técnica da contagem de pontos, através do software UTHSCSA Image Tool versão 1.27 e a identificação das inclusões dos tipos sulfetos finos e óxidos globulares, através de comparação com figuras padrões da norma E-45 da ASTM.

3.5 - Análise química do material dos corpos de prova

As análises químicas de quatro amostras do aço ABNT-1050 foram realizadas no "Laboratório de Análises Químicas - TPCQ" da Confab, através dos seguintes equipamentos: CS 125 - LECO, TC 436 - LECO, SPECTRO FLAME (ICP) SEQUÊNCIAL e SPECTRO CAST.

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

3.6 - Procedimento experimental

O procedimento experimental sob condições controladas dos parâmetros de usinagem, foi realizado como segue:

a - Quatro lotes de 102 corpos de prova foram torneados em operação de desbaste conforme figura 3.1.

b - O acabamento destes lotes foram realizados em um única passada, sendo que a cada um deles utilizou-se uma nova aresta, para uma velocidade de corte constante V_1 = 350 m/min. Acrescentando-se aproximadamente 15% a esta, uma segunda velocidade de corte V_2 = 403 m/min foi determinada e o procedimento foi novamente realizado.

3.6.1 - Dispositivo de ensaio

O ensaio de usinagem foi realizado em um Torno EMCO T-120 de potência útil de 2,6 Kw, e equipado com um Comando Numérico Computadorizado-Emcotronic T1, conforme ilustra a figura 3.2.

figura 3.2 - Torno mecânico EMCO T-120 com CNC Emcotronic T1.

A figura 3.3, ilustra a montagem da pastilha DCMT070204-F2 TP20 no porta pastilha SDJCL 1212 D07, quando do início da usinagem do corpo de prova.

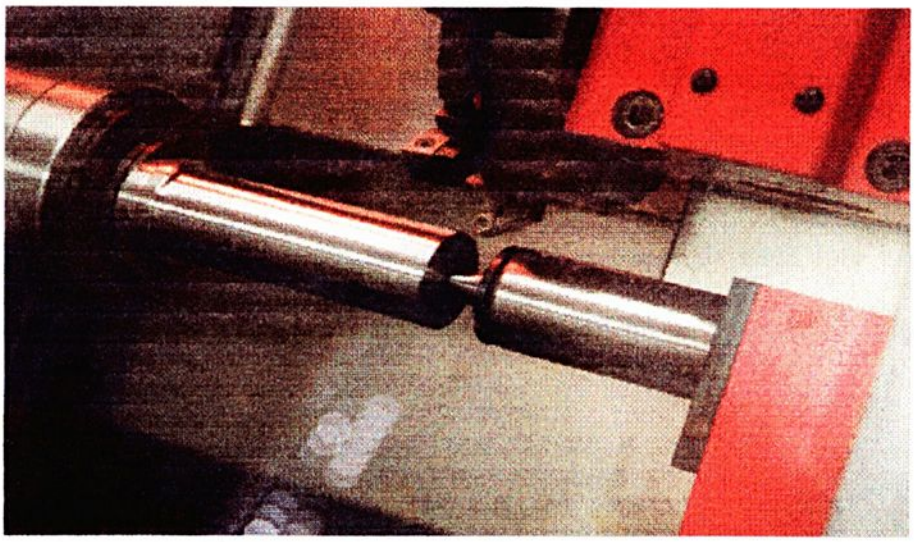


figura 3.3 - Ferramenta posicionada para início do corte.

3.6.2 - Parâmetros de ensaio

Todos os parâmetros de corte, exceto a velocidade V_2 obtida através de V_1, bem como critérios adotados no presente trabalho, foram escolhidos em função da utilização prática no "Chão de Fábrica". Então, os parâmetros de corte f, ap e v_{c1} foram obtidos através da combinação de cálculos e o manual eletrônico "CoroGuide". A vida da ferramenta, traduzida em número de peças usinadas, como sendo a última peça a qual nenhum dos três valores medidos de sua rugosidade superficial, fosse maior que o critério de fim de vida adotado.

Os parâmetros de ensaio adotados foram:

a - Profundidade de corte ap = 0,5 mm

unesp

b - Velocidade de avanço f = 0,15 mm

c - Velocidade de corte V_1 = 350 m/min

d - Velocidade de corte V_2 = 403 m/min

e - Fluido de corte não utilizado (à seco)

3.6.3 - Medidas de Rugosidade

Após a estabilização térmica das peças de cada lote usinado, foram realizadas três medidas da rugosidade superficial, conforme indicações na figura 3.4.

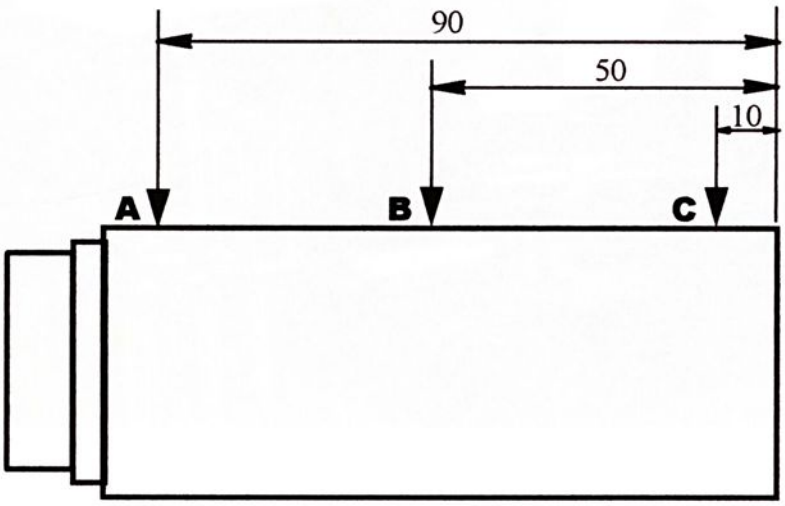


figura 3.4 - Ilustração esquemática das regiões medidas da rugosidade superficial.

Objetivando-se garantir a repetibilidade das medidas, elaborou-se um dispositivo específico para obtenção dos valores da rugosidade superficial, ilustrado na figura 3.5, onde o rugosímetro SURFTEST-301 (MITUTOYO), foi

ajustado com parâmetro de medição "Ra" (μm) e um comprimento de amostragem de 4 mm.

3.6.4 - Análise dos desgastes das ferramentas

Os desgastes das superfícies de saída e incidência de cada aresta de corte utilizada nos ensaios, foram observados e fotografados com aumento de 25 vezes no Microscópio Estereoscópico Óptico Leica GZ-6.

figura 3.5 - Dispositivo para medir a rugosidade superficial das peças usinadas.

unesp

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS

Este capítulo tem por objetivo apresentar os resultados experimentais obtidos da rugosidade superficial das peças usinadas pelo processo de torneamento, da caracterização do material da peça trabalho, da observação das superfícies das ferramentas de corte e determinação da vida destas.

4.1 - Comportamento da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1 e 2 da ferramenta F_1 e 3 e 4 da ferramenta F_2, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min

4.1.1 - Comportamento referente as arestas 1 e 2 da ferramenta F_1

As figuras 4.1, 4.2 e 4.3, ilustram respectivamente o comportamento da rugosidade superficial e da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1 e 2 da ferramenta F_1. Os valores experimentais da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 do apêndice A.

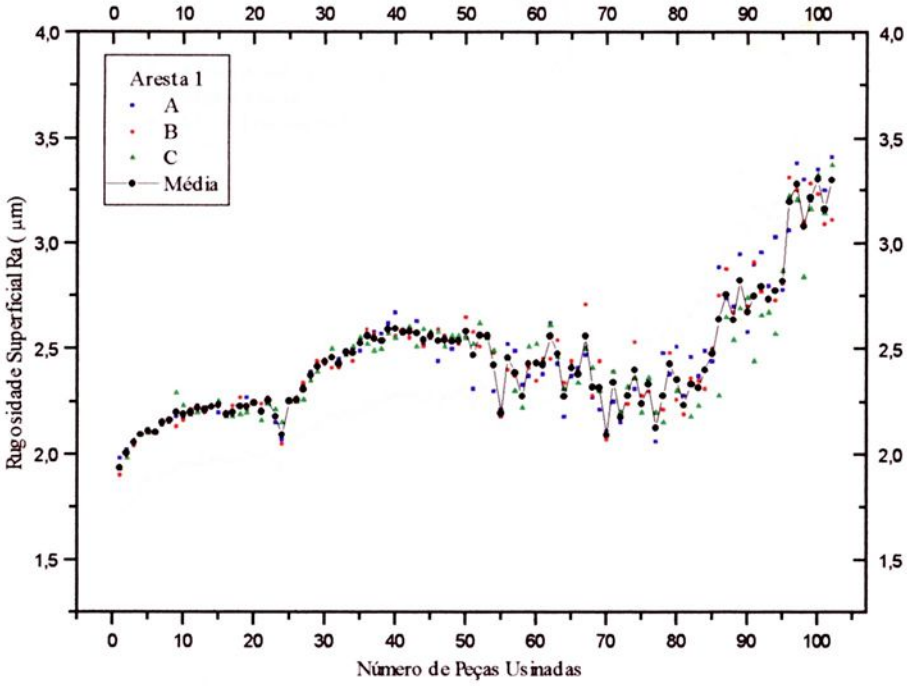


Figura 4.1 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 1 da ferramenta F_1, para uma velocidade de corte $V_1 = 350$ m/min.

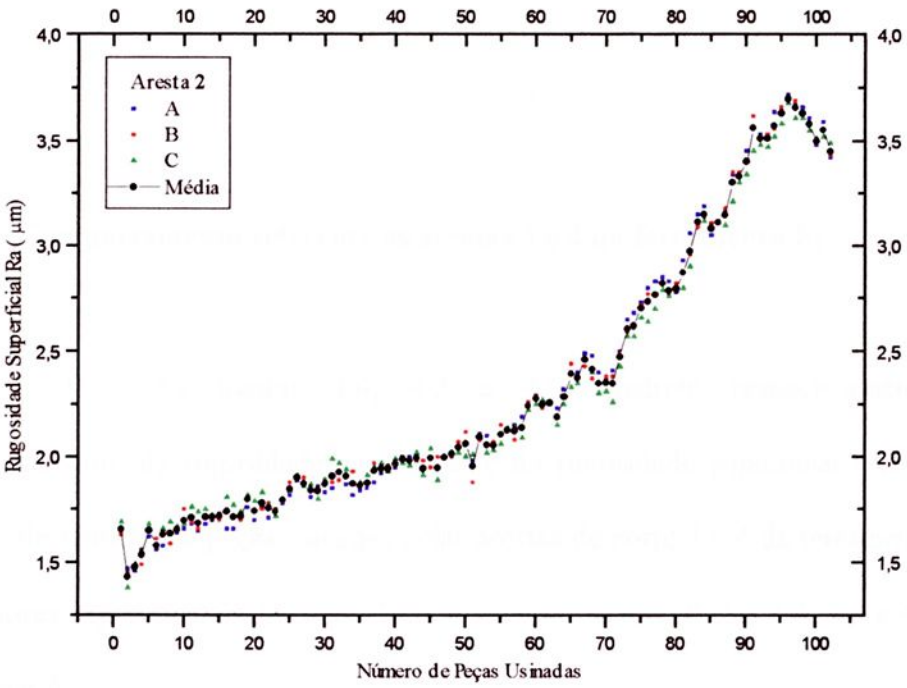


Figura 4.2 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 2 da ferramenta F_1, para uma velocidade de corte $V_1 = 350$ m/min.

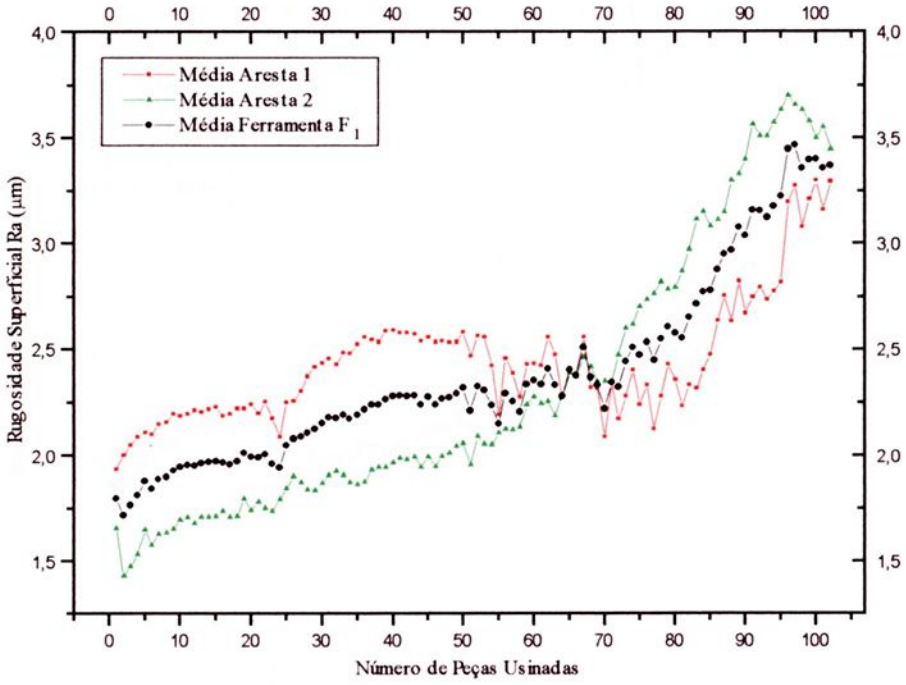


Figura 4.3 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas de corte 1 e 2 da ferramenta F_1, e média destas duas arestas para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

4.1.2 - Comportamento referente as arestas 3 e 4 da ferramenta F_2

As figuras 4.4, 4.5 e 4.6, ilustram respectivamente o comportamento da rugosidade superficial e da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 3 e 4 da ferramenta F_2. Os valores experimentais da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6 do apêndice A.

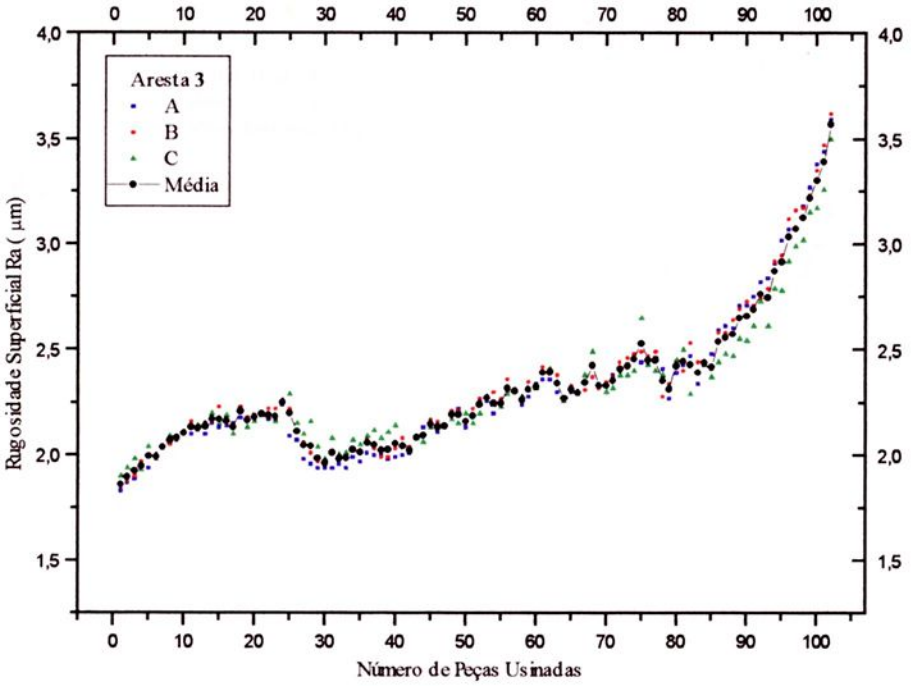


Figura 4.4 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 3 da ferramenta F_2 para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

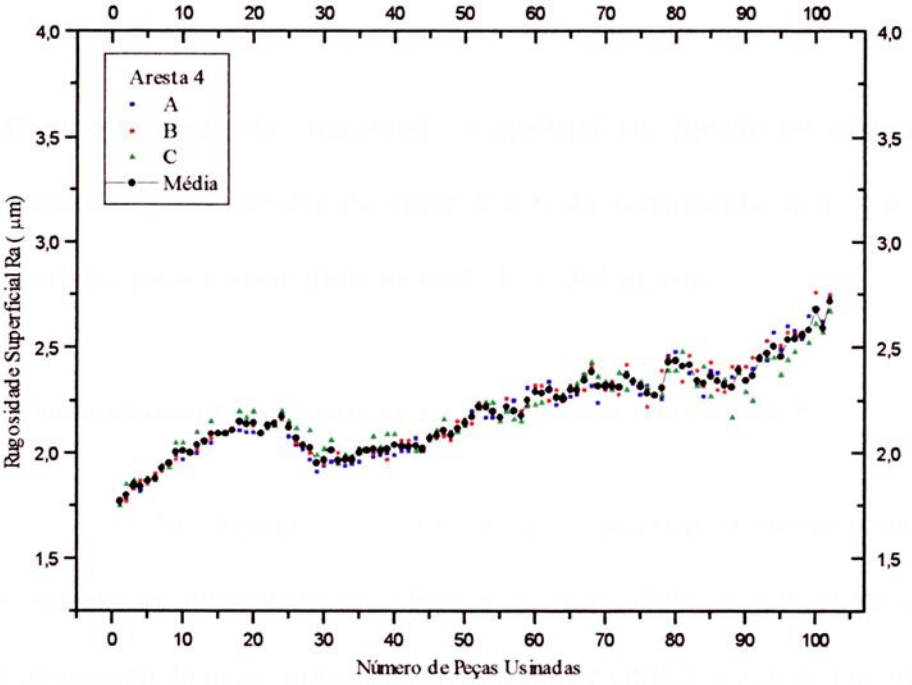


Figura 4.5 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 4 da ferramenta F_2 para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

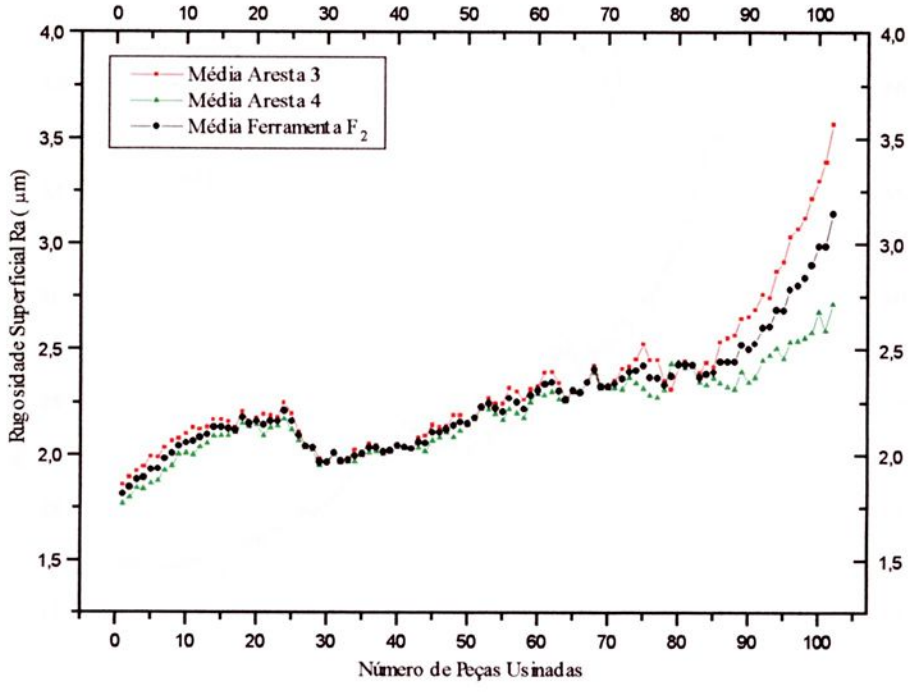


Figura 4.6 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas de corte 3 e 4 da ferramenta F_2, e média destas duas arestas para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

4.2 - Comportamento da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 5 e 6 da ferramenta F_3 e 7 e 8 da ferramenta F_4, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min

4.2.1 - Comportamento referente as arestas 5 e 6 da ferramenta F_3

As figuras 4.7, 4.8 e 4.9, ilustram respectivamente o comportamento da rugosidade superficial e da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 5 e 6 da ferramenta F_3. Os valores experimentais da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.7, 4.8 e 4.9 do apêndice A.

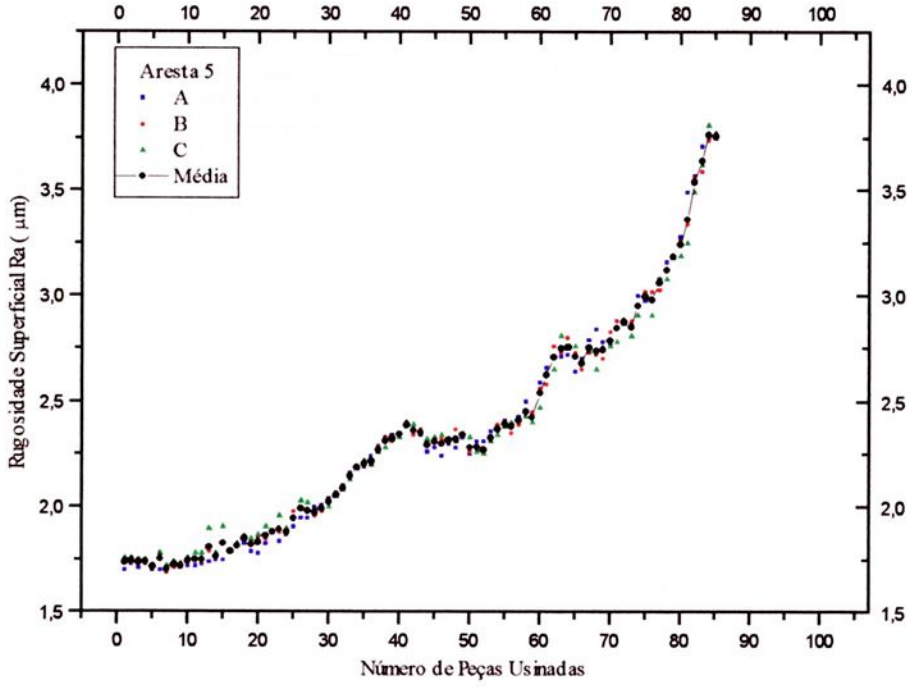


Figura 4.7 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 5 da ferramenta F_3 para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

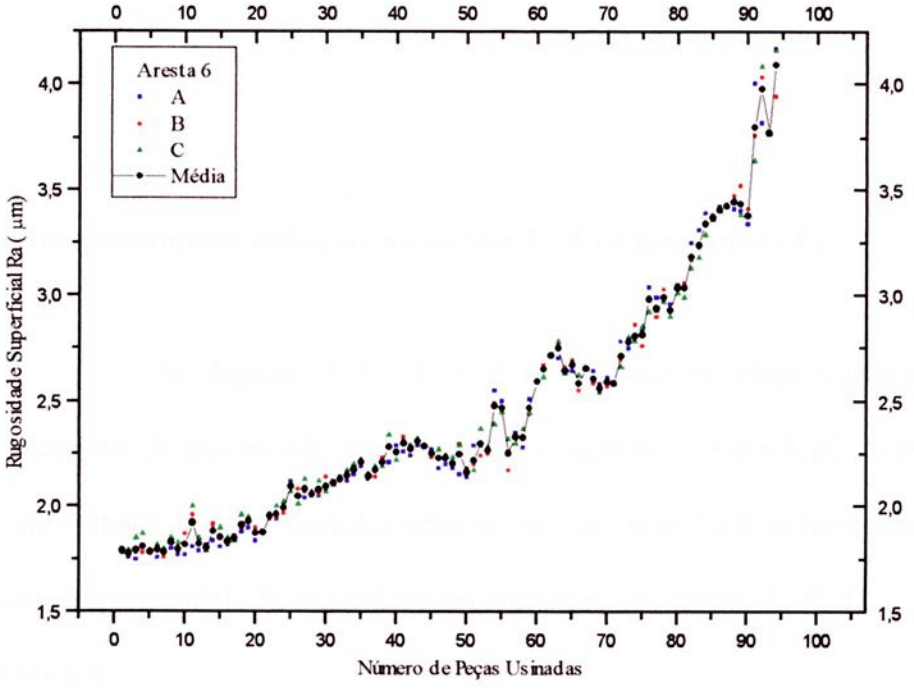


Figura 4.8 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 6 da ferramenta F_3, para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

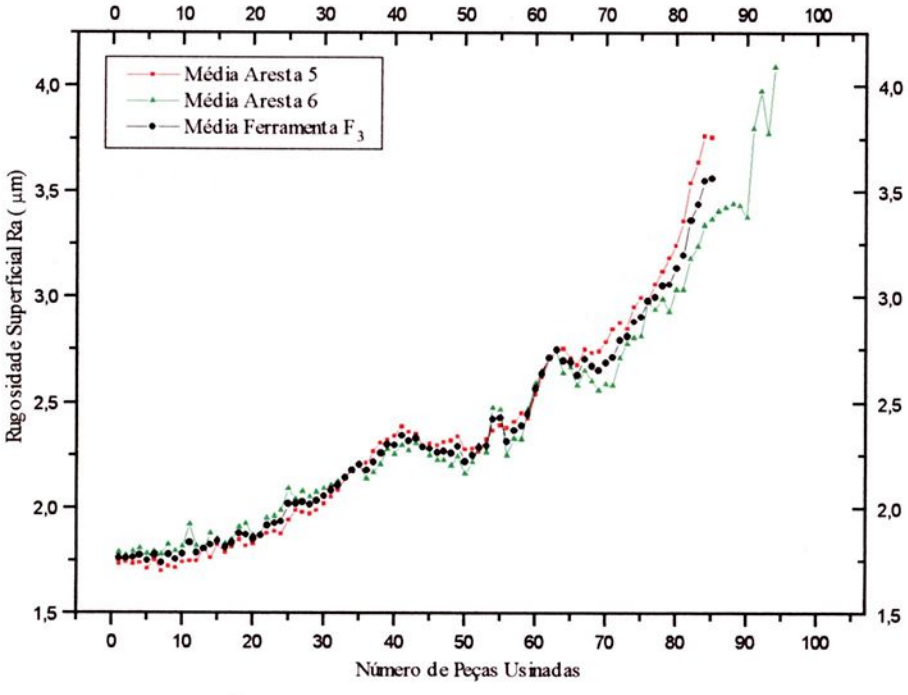


Figura 4.9 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas de corte 5 e 6 da ferramenta F_3, e média destas duas arestas para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

4.2.2 - Comportamento referente as arestas 7 e 8 da ferramenta F_4

As figuras 4.10, 4.11 e 4.12, ilustram respectivamente o comportamento da rugosidade superficial e da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 7 e 8 da ferramenta F_4. Os valores experimentais da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.10, 4.11 e 4.12 do apêndice A.

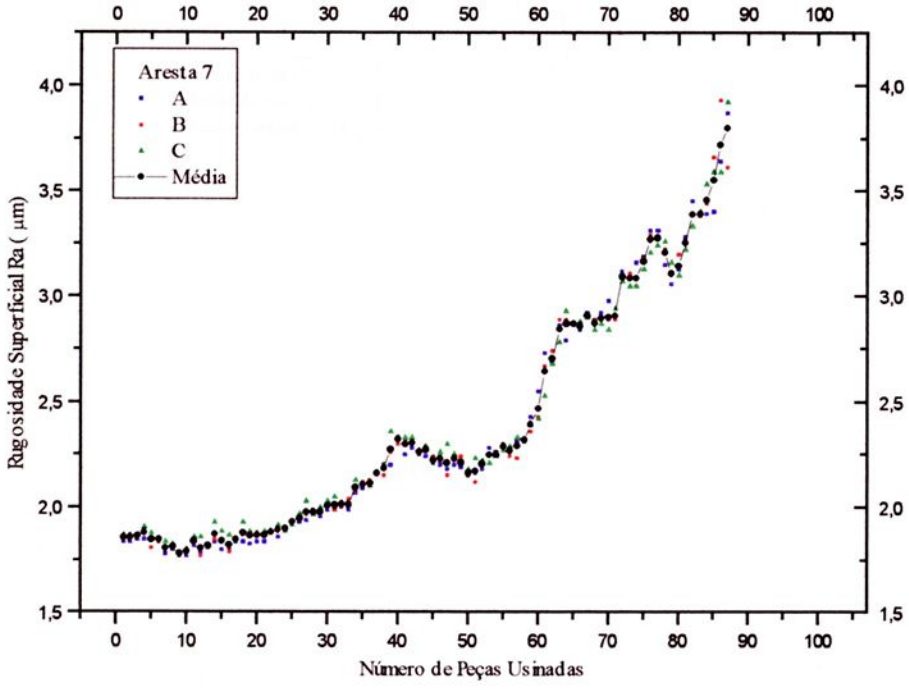


Figura 4.10 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 7 da ferramenta F_4, para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

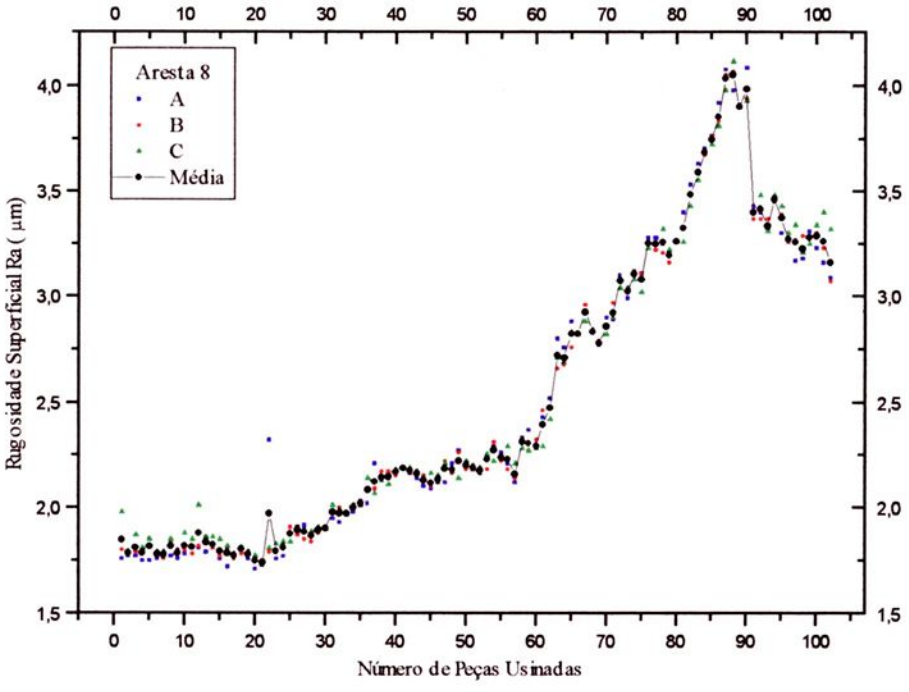


Figura 4.11 - Rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pela aresta de corte 8 da ferramenta F_4 para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

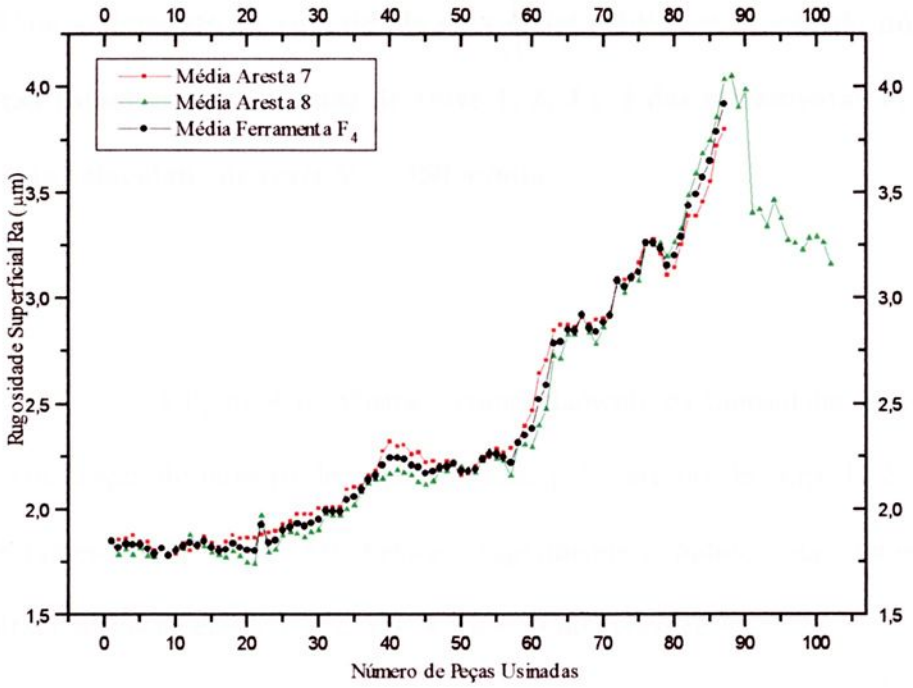


Figura 4.12 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas para cada uma das arestas de corte 7 e 8 da ferramenta F_4, e média destas duas arestas para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

4.3 - Comportamento da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min

A figura 4.13, ilustra o comportamento da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2. Os valores experimentais obtidos da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.1, 4.2, 4.4, 4.5 e 4.13 do apêndice A.

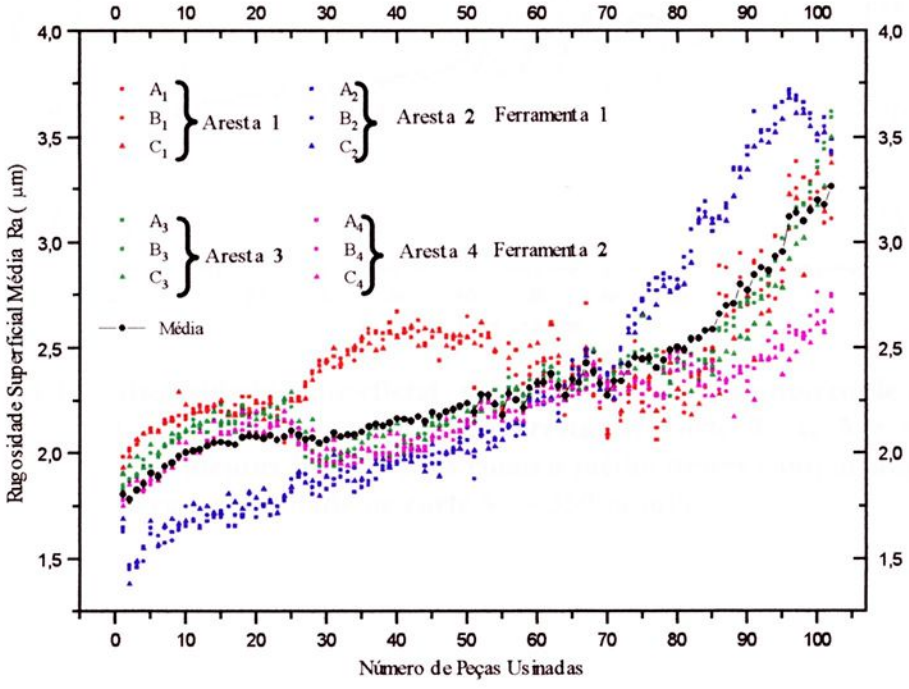


Figura 4.13 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

A figura 4.14, ilustra o comportamento da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas, relativos a cada uma das arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, assim como a média de todas estas arestas. Os valores experimentais obtidos da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.3, 4.6 e 4.13 do apêndice A.

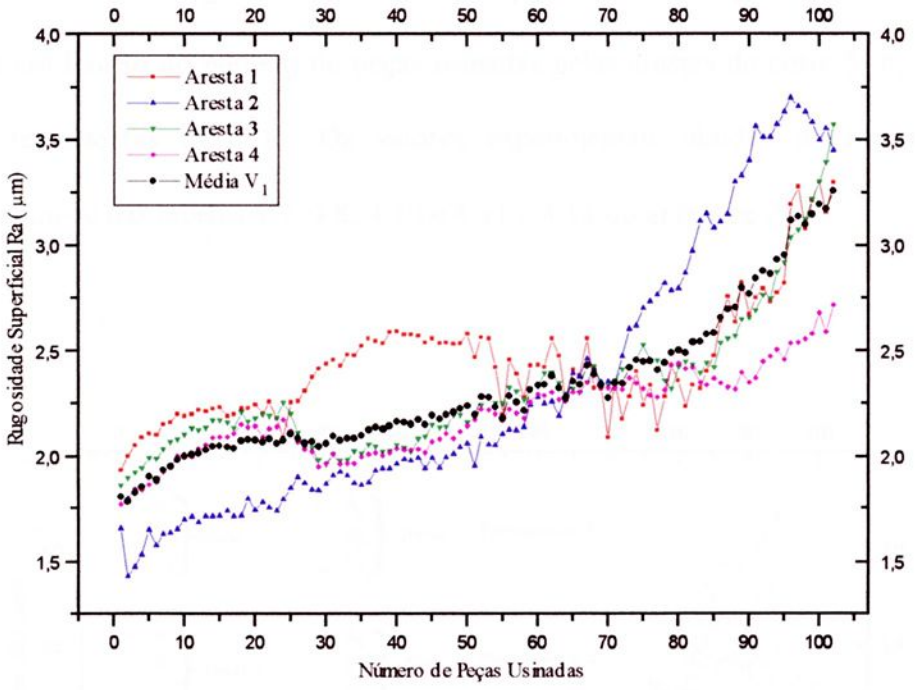


Figura 4.14 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas, relativos a cada aresta de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, bem como a média destes comportamentos para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

4.4 - Comportamento da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min

A figura 4.15, ilustra o comportamento da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4. Os valores experimentais obtidos da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.7, 4.8, 4.10 e 4.11 e 4.14 do apêndice A.

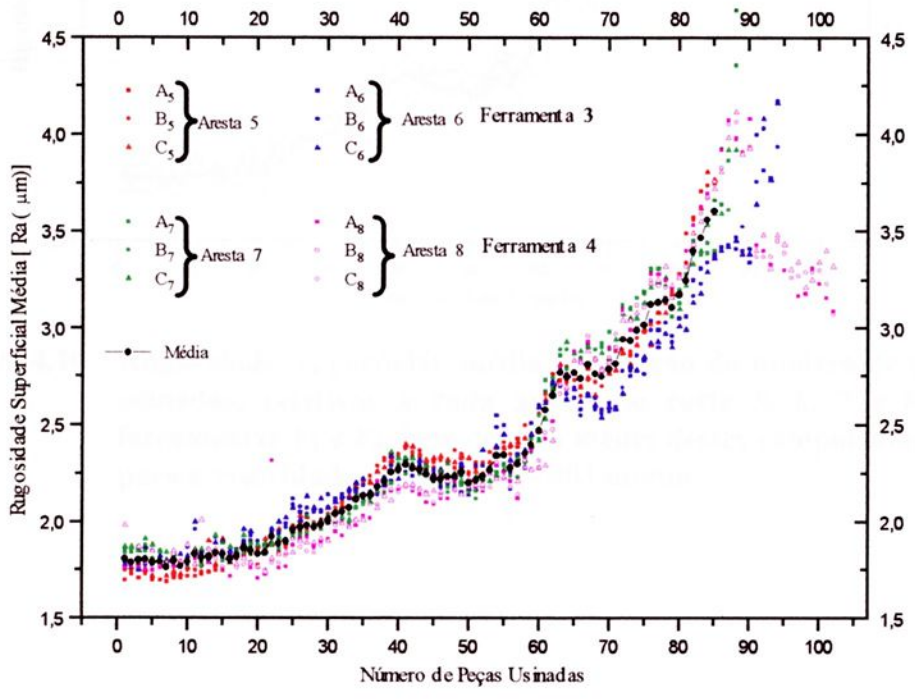


Figura 4.15 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

A figura 4.16, ilustra o comportamento da rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas, relativos a cada uma das arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4, assim como a média de todas estes comportamentos. Os valores experimentais obtidos da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.9, 4.12 e 4.14 do apêndice A.

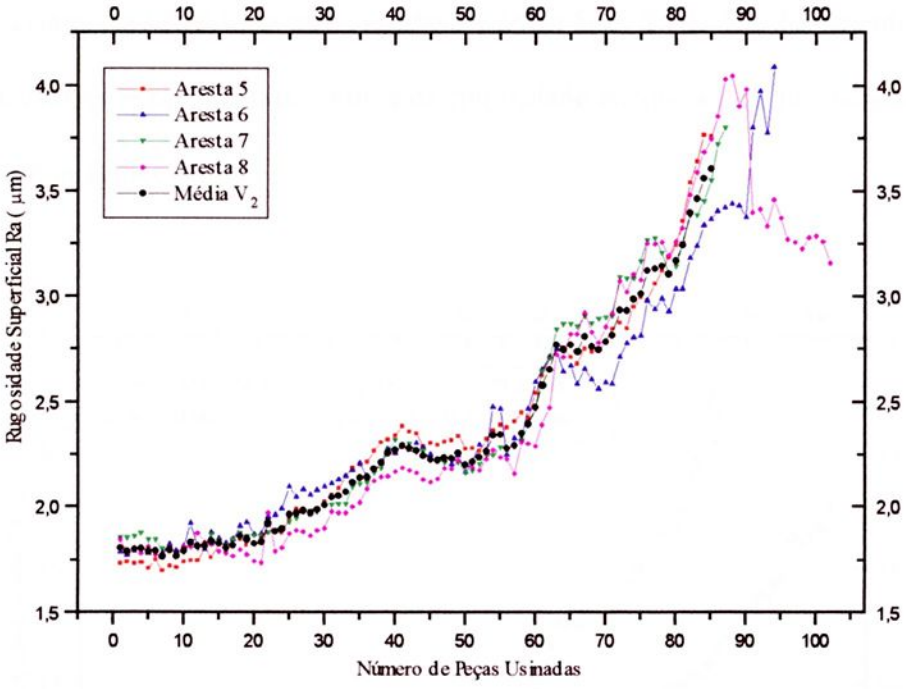


Figura 4.16 - Rugosidade superficial média em função do número de peças usinadas, relativos a cada aresta de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4, bem como a média destes comportamentos para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

4.5 - Comportamento médio da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min e V_2 = 403 m/min

A figura 4.17, ilustra o comportamento médio da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas pelas arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, e pelas arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4. Os valores experimentais obtidos da rugosidade encontram-se nas tabelas 4.13 e 4.14 do apêndice A.

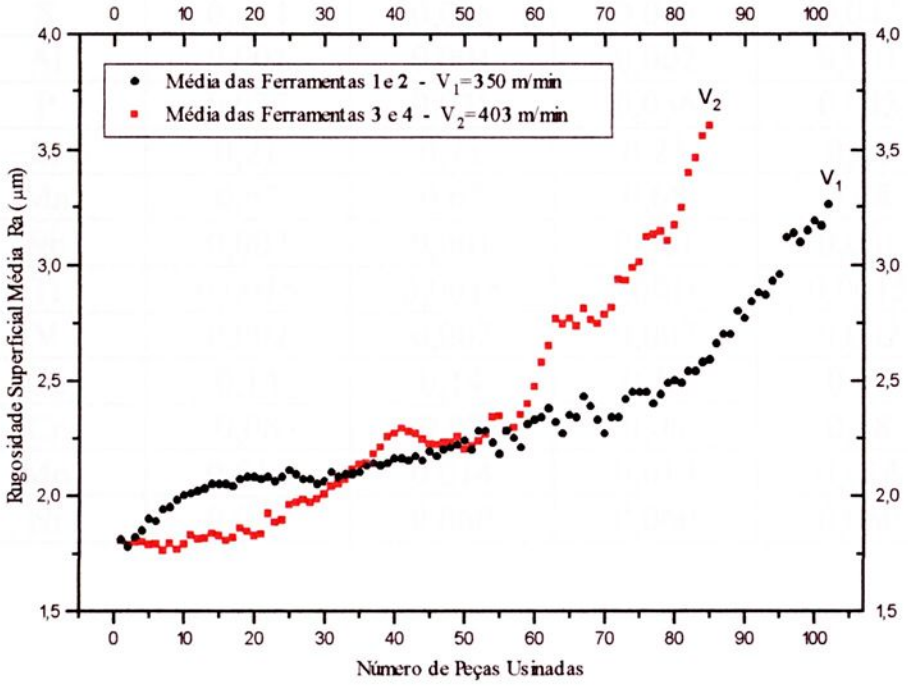


Figura 4.17 - Média da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas para as velocidades de corte V_1 = 350 m/min e V_2 = 403 m/min.

4.6 - Apresentação dos resultados obtidos da caracterização do material de trabalho

4.6.1 - Composição química

As barras de aço de seção circular, apresentaram em 04 amostras analisadas a composição química em peso, conforme indicado pela tabela 4.15.

Tabela 4.15 - Composição química do aço nas amostras

Elementos	% em peso na Amostra			
	1	2	3	4
C	0,50	0,49	0,49	0,49
S	0,044	0,045	0,045	0,042
Al	0,001	0,001	0,002	0,001
P	0,037	0,036	0,036	0,033
Si	0,21	0,21	0,21	0,21
Mn	0,67	0,67	0,68	0,68
Nb	0,002	0,001	0,001	0,001
Ti	0,0015	0,0015	0,0016	0,0015
V	0,002	0,002	0,002	0,002
Cu	0,14	0,14	0,14	0,14
Cr	0,08	0,08	0,08	0,08
Mo	0,014	0,014	0,014	0,014
Ni	0,056	0,060	0,060	0,060

Conforme indicado na tabela 4.15, não há variações significativas nos percentuais em peso dos elementos químicos presentes nas amostras, caracterizando o material de trabalho como um aço ABNT 1050.

4.6.2 - Dureza

A tabela 4.16, apresenta os resultados de três medidas de dureza Brinell em cada uma das oito amostras selecionadas.

Tabela 4.16 - Dureza Brinell das amostras selecionadas

amostra	Dureza Brinell(HB)		
	1	2	3
1	228	228	228
2	234	234	234
3	234	234	236
4	210	216	210
5	228	228	228
6	210	210	210
7	216	228	228
8	216	228	216

Conforme indicado na tabela 4.16, não há variações significativas das medidas de dureza Brinell nas amostras selecionadas do aço a ser usinado, estando os valores limitados de 210 a 236 HB.

4.6.3 - Inclusões

A figura 4.18, ilustra a presença de inclusões no aço ABNT-1050 na amostra selecionada.

Analisando-se a densidade e a forma das inclusões presentes no aço, conforme ilustrado na figura 4.18, por comparação com a norma E-45 (Plate I) da ASTM, podemos caracterizar as inclusões como:

a) Inclusões alongadas, assemelhadas a pequenos riscos, são do tipo Sulfetos finos

unesp

do número 2.

b) Inclusões pontuais, tal qual pequenos pontos, são do tipo Óxidos globulares finos do número 1.

Figura 4.18 - Inclusões no aço ABNT-1050. Aumento 100x.

4.6.4 - Análise microestrutural

A figura 4.19, ilustra a microestrutura do aço ABNT-1050, evidenciando as fases presentes.

Analisando-se a microestrutura do material, conforme ilustra a figura 4.19, verificamos a presença de ferrita (campos claros) e de perlita (campos escuros), com frações volumétricas aproximadamente iguais. A constatação desta composição de fases caracteriza o material como um aço ao carbono hipoeutetóide.

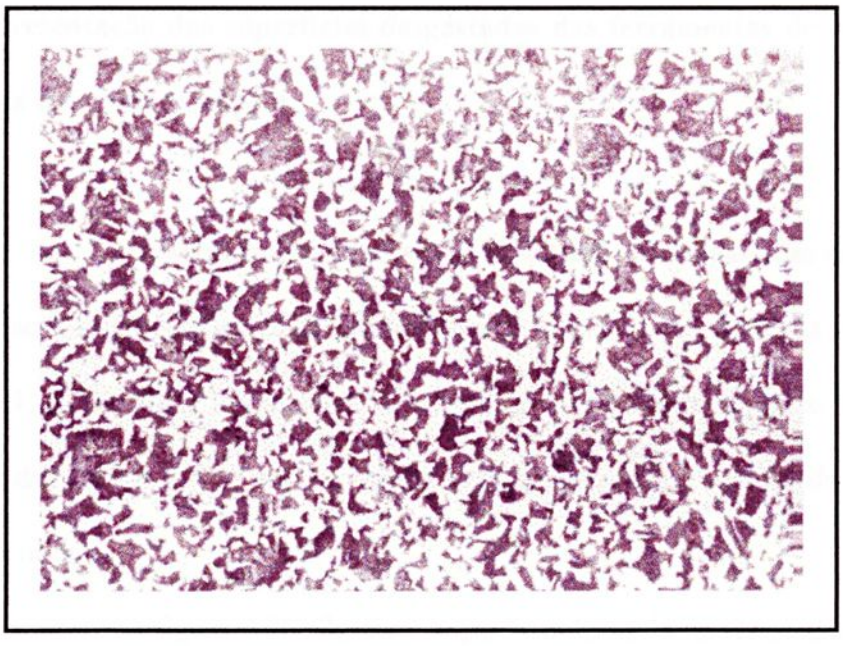


Figura 4.19 - Microestrutura do aço ABNT-1050 ilustrando a presença das fases ferrítica e perlítica. Aumento 100x.

4.7 - Apresentação das superfícies desgastadas das ferramentas de corte nas condições finais de usinagem

Serão apresentadas a seguir as superfícies desgastadas de saída e de incidência nas condições finais de usinagem do lote de peças, relativas as arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min, e das arestas 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

A figura 4.20, ilustra a superfície de saída da ferramenta F_1 nas condições de recebimento, para que esta sirva de referência em relação aos desgastes apresentados nas superfícies de saída e incidência das ferramentas desgastadas.

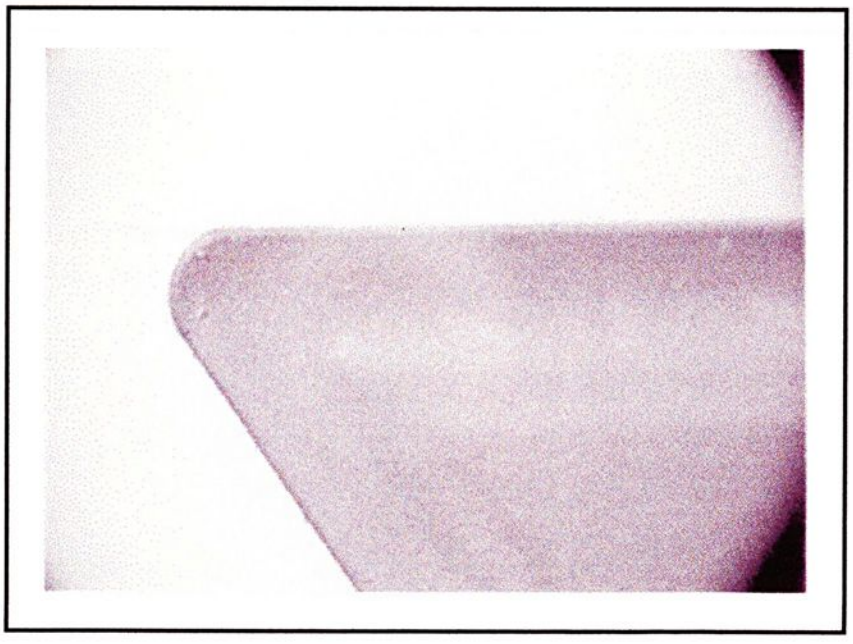
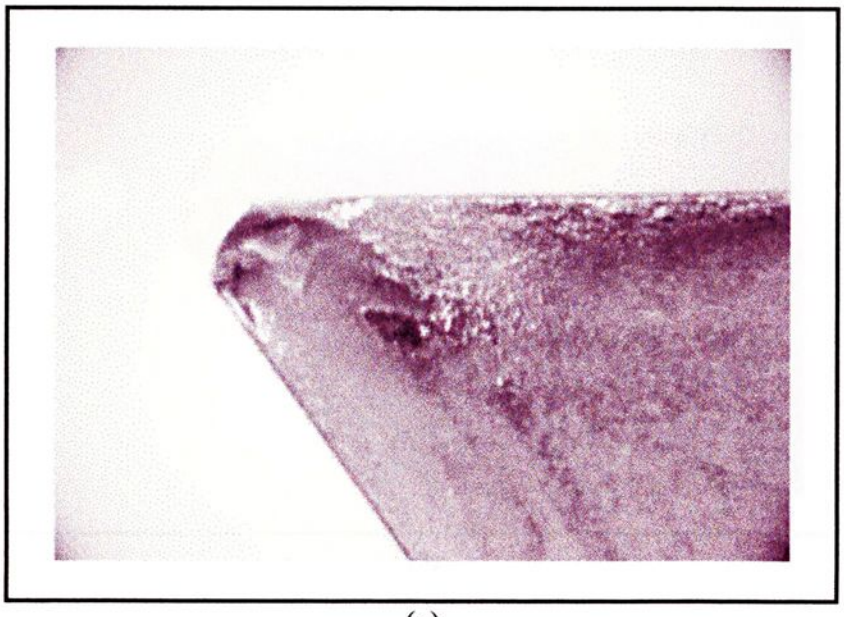


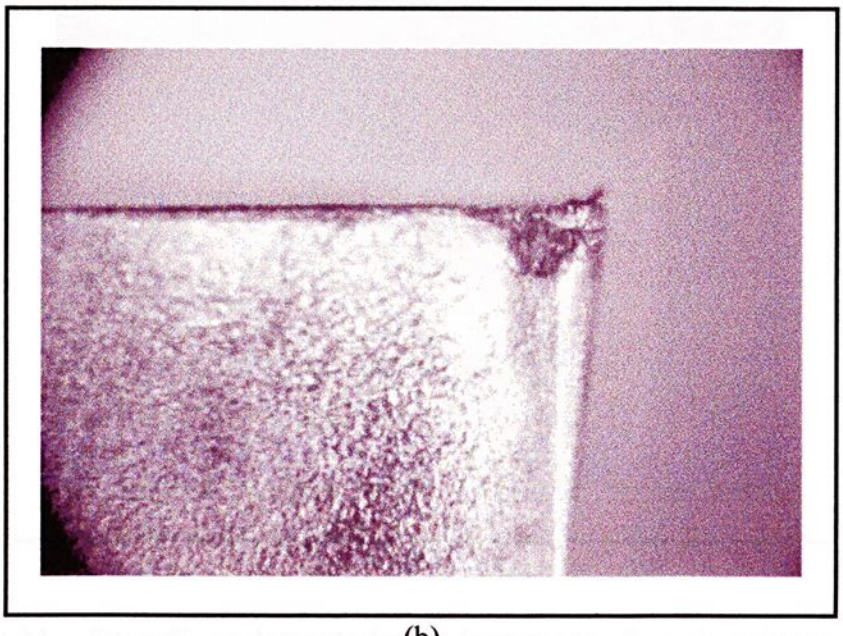
Figura 4.20 - Ferramenta de corte F_1, como recebida. Aumento 25x.

4.7.1 - Desgastes nas arestas das ferramentas de corte F_1 e F_2 para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

A figura 4.21 (a) e (b), ilustra as superfícies desgastadas de saída e de incidência da ferramenta F_1, resultado da usinagem com a aresta de corte 1.



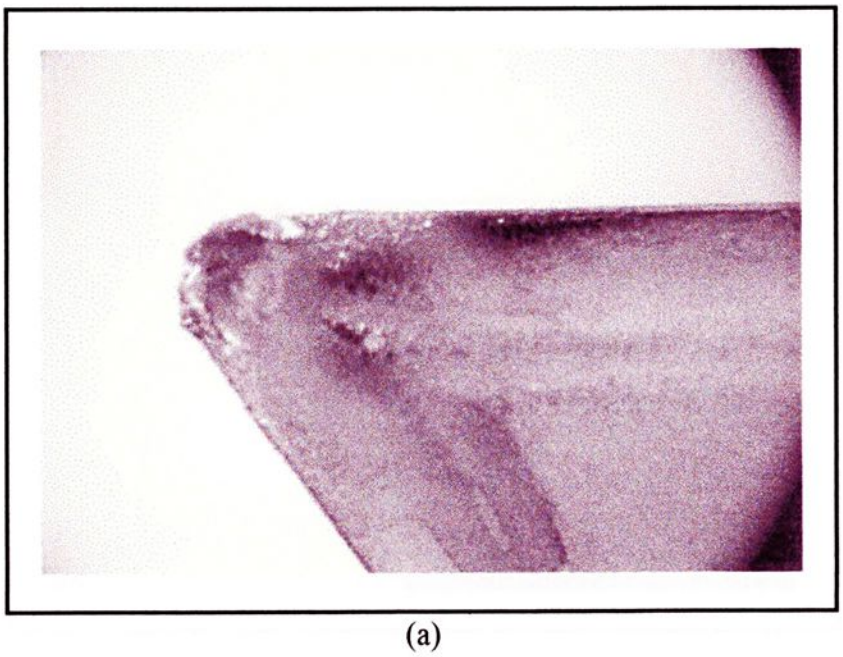
(a)



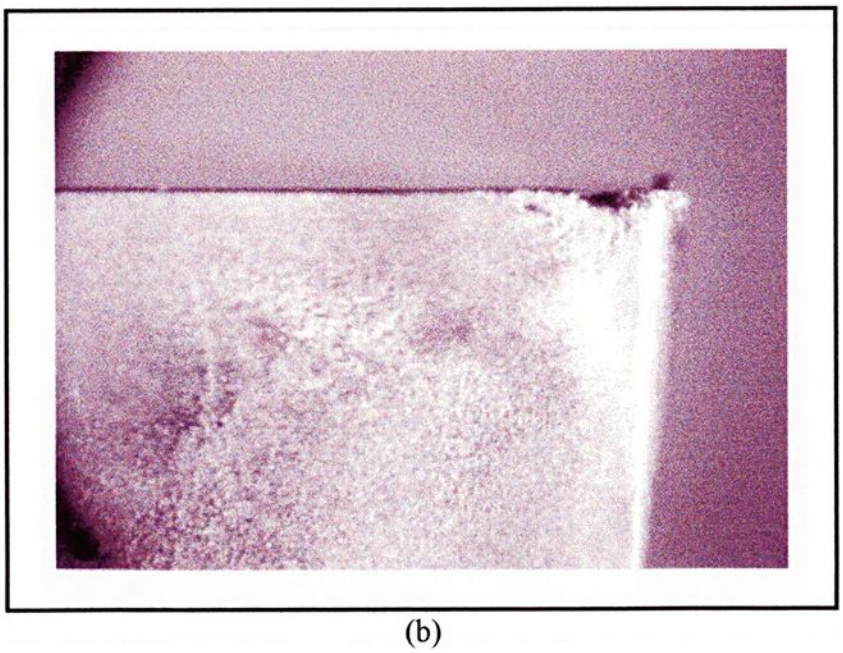
(b)

Figura 4.21 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_1, pela usinagem com a aresta de corte 1: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x.

A figura 4.22 (a) e (b), ilustra as superfícies desgastadas de saída e de incidência da ferramenta F_1, resultado da usinagem com a aresta de corte 2.



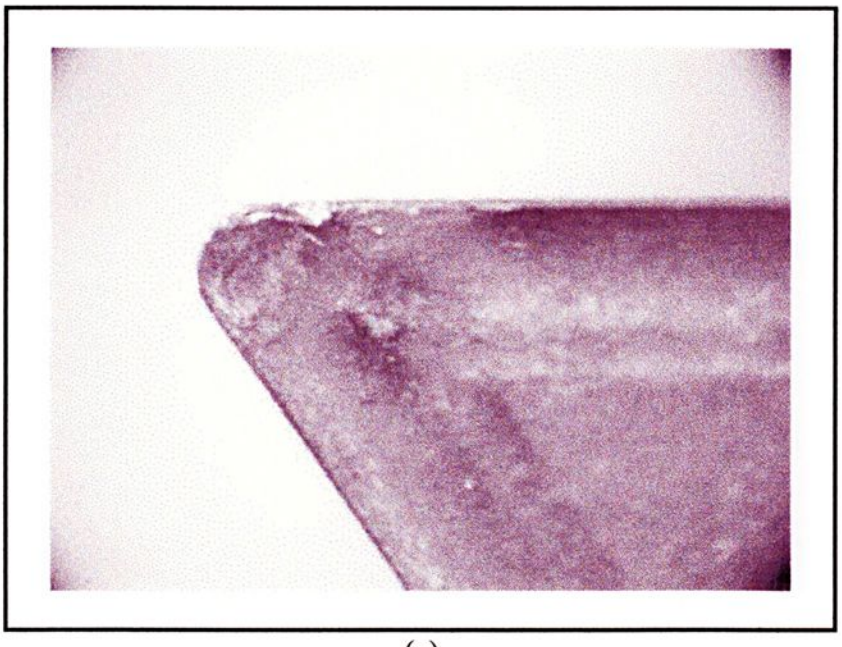
(a)



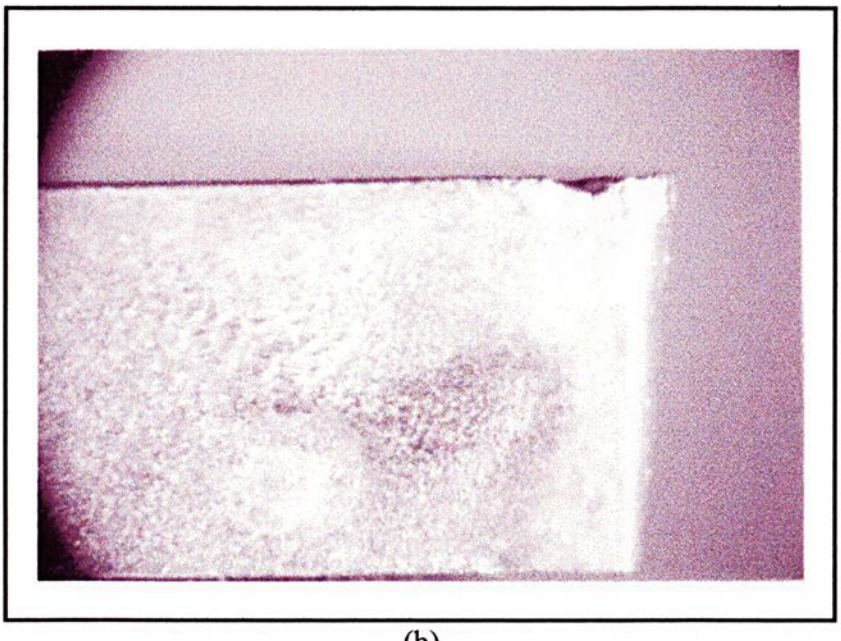
(b)

Figura 4.22 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_1, pela usinagem com a aresta de corte 2: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x.

A figura 4.23 (a) e (b), ilustra as superfícies desgastadas de saída e de incidência da ferramenta F_2, resultado da usinagem com a aresta de corte 3.



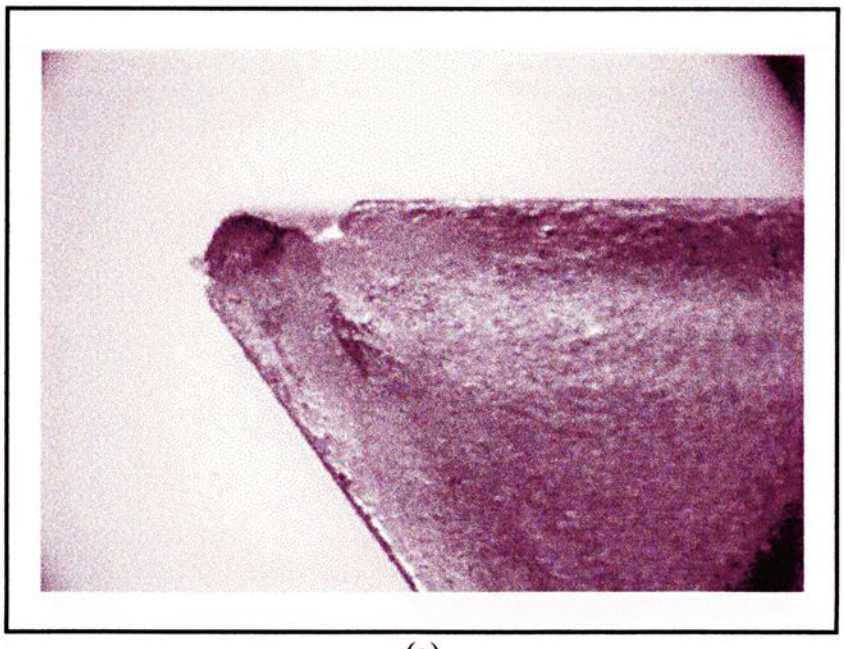
(a)



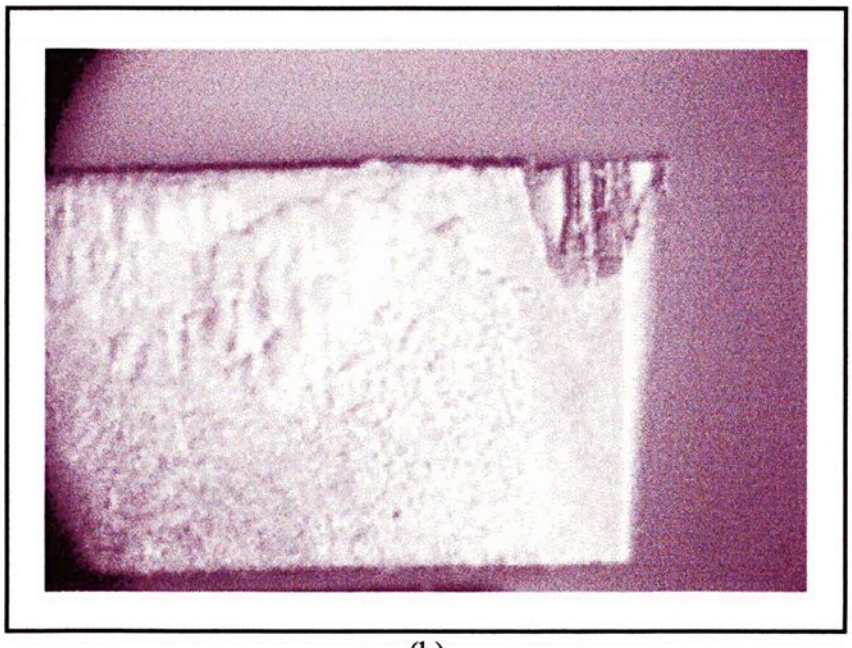
(b)

Figura 4.23 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_2, pela usinagem com a aresta de corte 3: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x.

A figura 4.24 (a) e (b), ilustra as superfícies desgastadas de saída e de incidência da ferramenta F_2, resultado da usinagem com a aresta de corte 4.



(a)

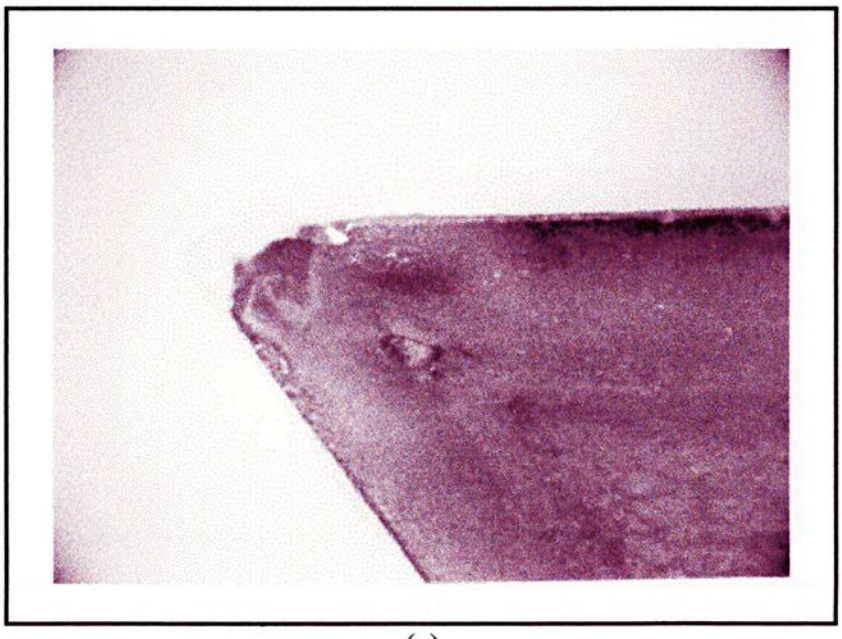


(b)

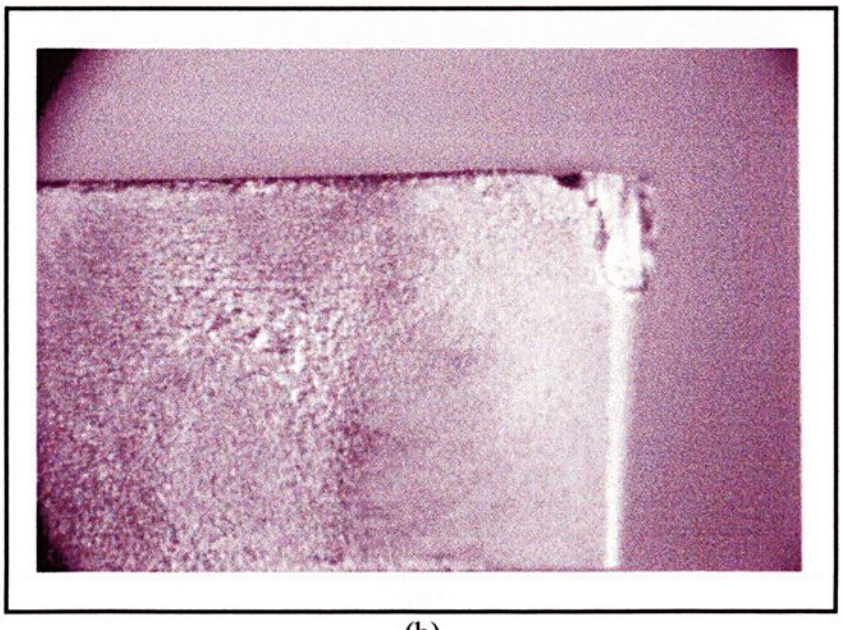
Figura 4.24 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_2, pela usinagem com a aresta de corte 4: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x.

4.7.2 - Desgaste nas ferramentas de corte F_3 e F_4 para a velocidade de corte $V_2 = 403$ m/min.

A figura 4.25 (a) e (b), ilustra as superfícies desgastadas de saída e de incidência da ferramenta F_3, resultado da usinagem com a aresta de corte 5.



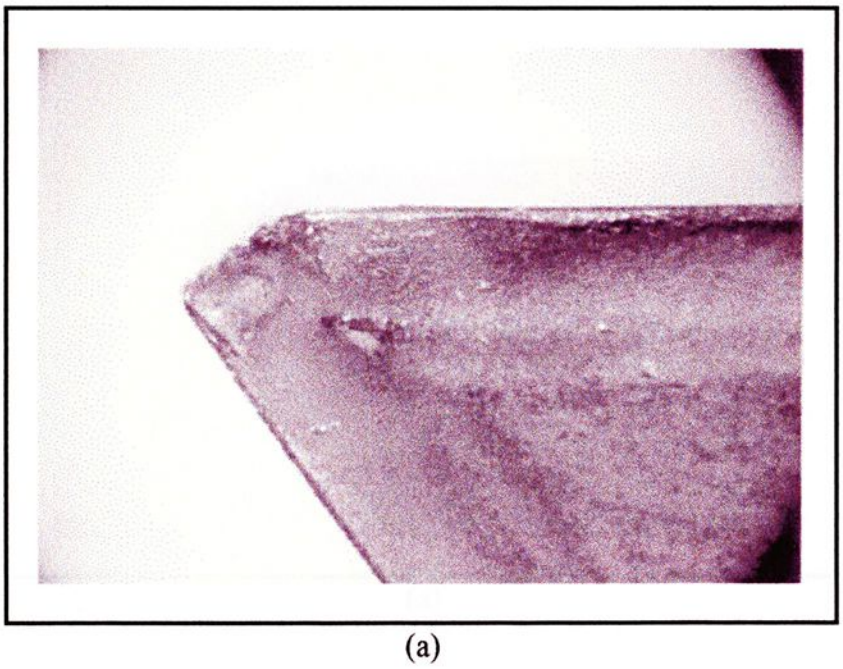
(a)



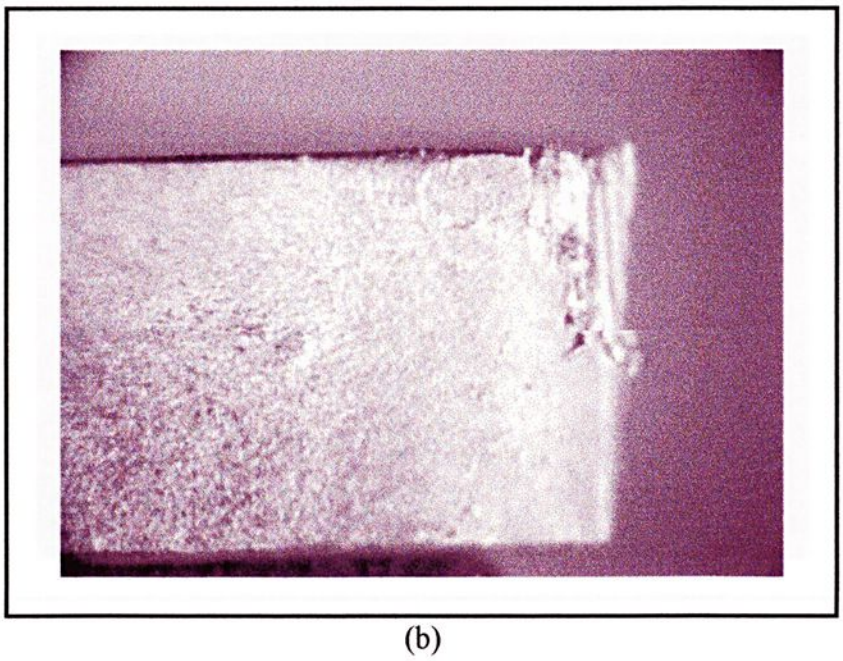
(b)

Figura 4.25 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_3, pela usinagem com a aresta de corte 5: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x.

A figura 4.26 (a) e (b), ilustra as superfícies desgastadas de saída e de incidência da ferramenta F_3, resultado da usinagem com a aresta de corte 6.



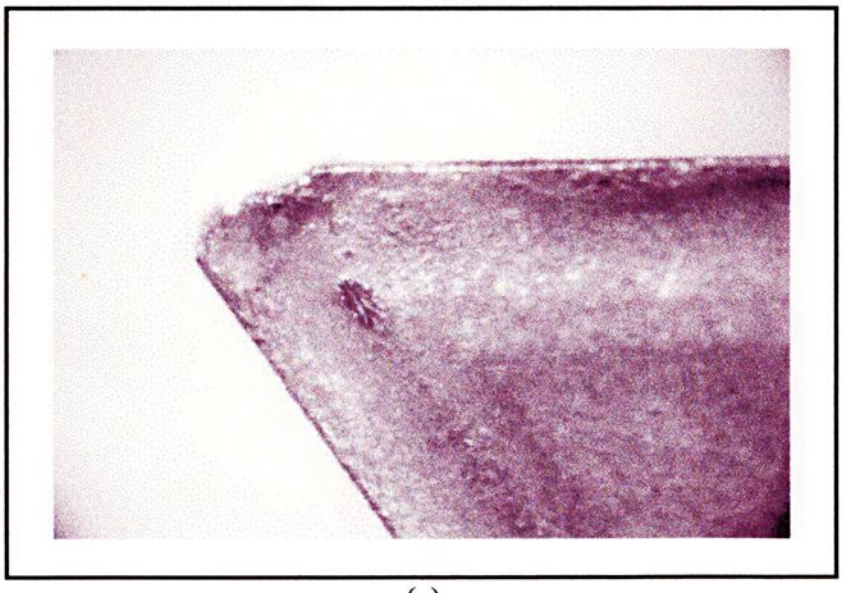
(a)



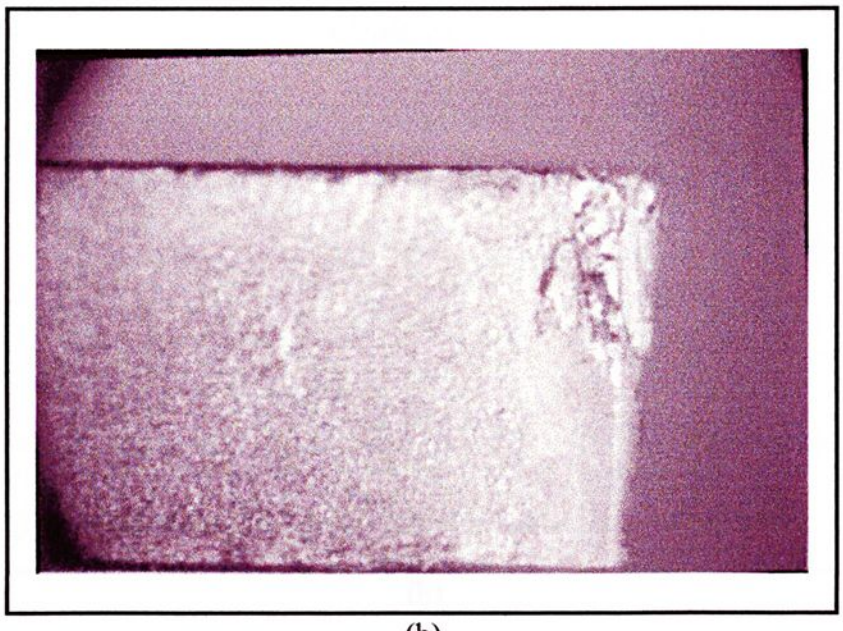
(b)

Figura 4.26 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_3, pela usinagem com a aresta de corte 6: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x.

A figura 4.27 (a) e (b), ilustra as superfícies desgastadas de saída e de incidência da ferramenta F_4, resultado da usinagem com a aresta de corte 7.



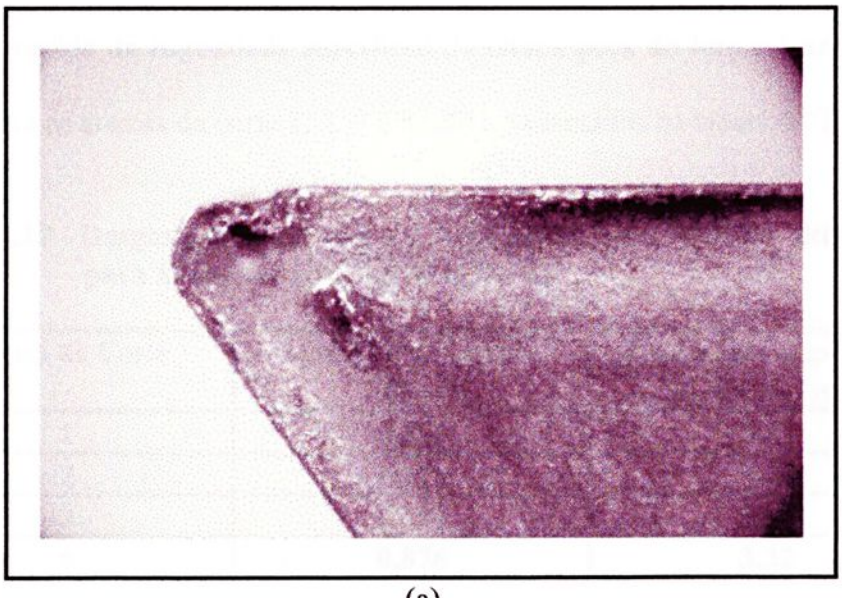
(a)



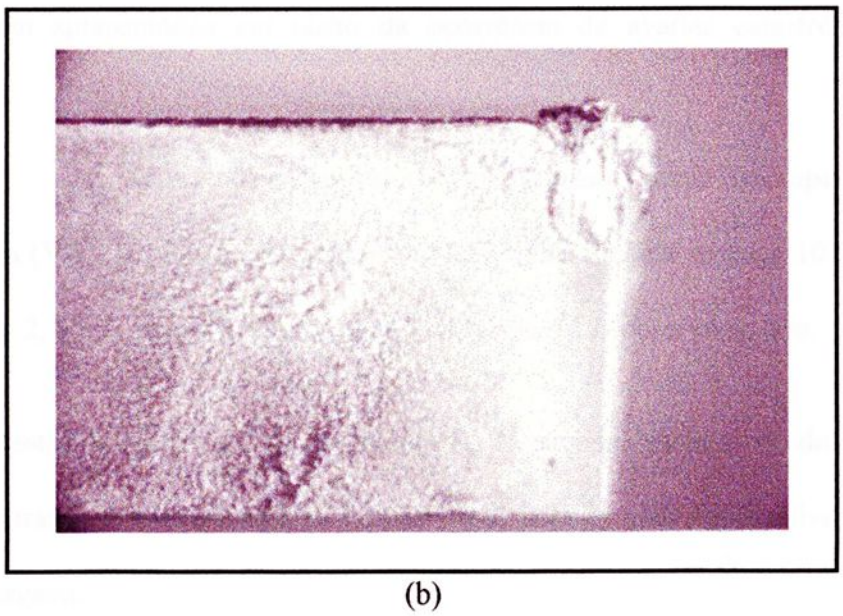
(b)

Figura 4.27 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_4, pela usinagem com a aresta de corte 7: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x.

A figura 4.28 (a) e (b), ilustra as superfícies desgastadas de saída e de incidência da ferramenta F_4, resultado da usinagem com a aresta de corte 8.



(a)



(b)

Figura 4.28 - Superfícies desgastadas da ferramenta F_4, pela usinagem com a aresta de corte 8: (a) saída, (b) incidência. Aumento 25x.

4.8 - Apresentação das medidas dos desgastes das superfícies de incidência das ferramentas de corte nas condições finais de usinagem

O valor dimensional do desgaste final (VB) da superfície de folga, a medida da rugosidade superficial da última peça do lote usinado de 102 peças, para as arestas de corte 1, 2, 3 e 8, são apresentados na tabela 4.17.

Tabela 4.17 - Desgaste final de flanco e rugosidade superficial da última peça, para as arestas de corte 1, 2, 3 e 8.

Aresta de Corte	Medida do Desgaste VB(mm)	Rugosidade Superficial Média Ra (μm)
1	**0,456**	**3,41**
2	**0,475**	**3,49**
3	**0,384**	**3,59**
8	**0,876**	**3,32**

Obs. - Os valores do desgaste da superfície de folga referente às arestas 4, 5, 6 e 7, não foram apresentados em razão da ocorrência de avarias catastróficas das mesmas.

Analisando-se os valores dos desgastes finais das superfícies de incidência (VB), em função da rugosidade superficial medida na peça 102, para as arestas 1, 2, 3 e 8, conforme apresentado na tabela 4.17, observa-se que:

a) Nas arestas de corte 1 e 2 da ferramenta F_1, há pequena variação do desgaste.

b) Comparando a aresta 3 com as arestas 1 e 2, nota-se uma significativa variação do desgaste.

c) Para rugosidades superficiais similares o desgaste é significativamente maior para a velocidade de corte $V_2 = 403$ m/min.

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

4.9 - Apresentação da vida das ferramentas de corte

Serão apresentadas e analisadas a vida da ferramenta de corte, adotando para a mesma:

a - A vida da aresta de corte

b - A vida média da ferramenta de corte

c - A média das vidas das ferramentas de corte

A vida das arestas de corte serão determinadas pela contagem do número de peças usinadas, tomando-se como critério de fim de vida da ferramenta a rugosidade superficial.

4.9.1 - Vida da ferramenta de corte em função da rugosidade superficial para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

A tabela 4.18, ilustra a vida da ferramenta de corte, tomando-se como critério de fim de vida as rugosidades superficiais de 2.5, 3.0 e 3.4 μm.

Tabela 4.18 - Vida da ferramenta de corte em função da rugosidade superficial para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

Rugosidade Superficial Ra (μm)	Número de peças para a velocidade de corte V_1						
	Ferramenta F_1			Ferramenta F_2			média
	A_1	A_2	média	A_3	A_4	média	F_1 F_2
2,5	**33**	**72**	**52**	**74**	**92**	**83**	**68**
3,0	**93**	**81**	**87**	**94**	**109**	**101**	**94**
3,4	**101**	**89**	**95**	**100**	**119**	**109**	**102**

A tabela 4.19, ilustra a variação percentual da vida entre as arestas de corte da ferramenta F_1, entre as arestas de corte da ferramenta F_2, bem como, a variação percentual máxima entre as arestas de corte das ferramentas F_1 e F_2, para cada um dos critérios de fim de vida adotado.

Tabela 4.19 - Variação percentual da vida de cada ferramenta F_1 e F_2 e variação percentual máxima entre as ferramentas F_1 e F_2 para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min, em função do critério de fim de vida adotado.

Rugosidade Superficial Ra (μm)	Variação da Vida da Ferramenta (%)		
	F_1	F_2	F_1 e F_2
2,5	**118**	**24**	**179**
3,0	**15**	**16**	**35**
3,4	**13**	**19**	**34**

A tabela 4.20, ilustra a variação da vida de cada uma das arestas de corte da ferramenta, tomando-se como referência a média das vidas das ferramentas F_1 e F_2.

Tabela 4.20 - Variação percentual da vida de cada uma das arestas de corte das ferramentas F_1 e F_2, em relação à média das vidas destas arestas, em função do critério de fim de vida adotado, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

Rugosidade Superficial Ra (μm)	Variação da Vida da Ferramenta (%)			
	Ferramenta F_1		Ferramenta F_2	
	A_1	A_2	A_3	A_4
2,5	**-51**	**6**	**9**	**35**
3,0	**-1**	**-14**	**0**	**16**
3,4	**-1**	**-13**	**-2**	**17**

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

A tabela 4.21, ilustra a variação percentual entre as vidas médias das ferramentas F_1 e F_2, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

Tabela 4.21 - Variação percentual entre as vidas médias das ferramentas F_1 e F_2, em função do critério de fim de vida adotado, para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min.

Rugosidade Superficial Ra (μm)	Variação da Vida Média da Ferramenta (%)
2,5	**60**
3,0	**16**
3,4	**15**

4.9.2 - Vida da ferramenta de corte em função da rugosidade superficial para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

A tabela 4.22, ilustra a vida da ferramenta de corte tomando-se como critério de fim de vida as rugosidades superficiais de 2.5, 3.0 e 3.4 μm.

Tabela 4.22 - Vida da ferramenta de corte em função da rugosidade superficial para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

Rugosidade Superficial Ra (μm)	Número de peças para a velocidade de corte V_2						
	Ferramenta F_3			Ferramenta F_4			média
	A_5	A_6	média	A_7	A_8	média	F_3 F_4
2,5	**59**	**58**	**58**	**59**	**61**	**60**	**59**
3,0	**74**	**75**	**74**	**71**	**71**	**71**	**73**
3,4	**80**	**85**	**82**	**81**	**81**	**81**	**82**

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

A tabela 4.23, ilustra as variações da vida da ferramenta entre as arestas de corte da ferramenta F_3, entre as arestas de corte da ferramenta F_4, bem como, a variação percentual máxima entre as arestas de corte das ferramentas F_3 e F_4, para cada um dos critérios de fim de vida adotados.

Tabela 4.23 - Variação percentual da vida de cada ferramenta F_1 e F_2 e variação percentual máxima entre as arestas destas, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min, em função da rugosidade superficial.

Rugosidade Superficial Ra (μm)	Variação da Vida da Ferramenta (%)		
	F_3	F_4	F_3 e F_4
2,5	**2**	**3**	**5**
3,0	**1**	**0**	**6**
3,4	**6**	**0**	**6**

A tabela 4.24, ilustra a variação percentual da vida de cada uma das arestas de corte da ferramenta, tomando-se como referência a média das vidas das ferramentas F_3 e F_4.

Tabela 4.24 - Variação percentual da vida de cada uma das arestas de corte das ferramentas F_3 e F_4, em relação à média das vidas destas arestas, em função do critério de fim de vida adotado, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

Rugosidade Superficial Ra (μm)	Variação da Vida da Ferramenta (%)			
	Ferramenta F_3		Ferramenta F_4	
	A_5	A_6	A_7	A_8
2,5	**0**	**2**	**0**	**-3**
3,0	**-1**	**-3**	**3**	**3**
3,4	**2**	**-3**	**1**	**1**

A tabela 4.25, ilustra a variação percentual entre as vidas médias das ferramentas F_3 e F_4, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

Tabela 4.25 - Variação percentual entre as vidas médias das ferramentas F_3 e F_4, em função do critério de fim de vida adotado, para a velocidade de corte V_2 = 403 m/min.

Rugosidade Superficial Ra(μm)	Variação da Vida Média da Ferramenta (%)
2,5	**3**
3,0	**4**
3,4	**1**

4.9.3 - Média das vidas das ferramentas de corte em função do critério de fim de vida adotado, para as velocidades de corte utilizadas V_1 = 350 m/min e V_2 = 403 m/min.

A tabela 4.26, Ilustra as médias das vidas para as velocidades de corte V_1 e V_2, e a variação percentual entre estas.

Tabela 4.26 - Média das vidas e variação percentual da média das vidas das ferramentas F_1 e F_2 em relação às ferramentas F_3 e F_4, respectivamente para as velocidades de corte V_1 = 350 m/min e V_2 = 403 m/min, em função do critério de fim de vida adotado.

Rugosidade Superficial Ra (μm)	Média das Vidas		
	Velocidades		Variação (%)
	V_1	V_2	
2,5	**68**	**59**	**15**
3,0	**94**	**73**	**29**
3,4	**102**	**82**	**24**

4.10 - Apresentação das medidas da rugosidade das superfícies de incidência e de saída das pastilhas como recebidas

A tabela 4.27, ilustra os valores da rugosidade das superfícies de incidência e de saída de ferramentas de corte novas e suas correspondentes médias.

Tabela 4.27 - Valores da rugosidade das superfícies de incidência e de saída das pastilhas como recebidas e suas médias.

ARESTA	RUGOSIDADE DA SUPERFÍCIE DA PASTILHA [Ra (μm)]									
	INCIDÊNCIA			Média	SAÍDA					Média
1	0,20	0,19	0,32	0,24	0,25	0,38	0,20	0,22	0,36	0,28
2	0,31	0,36	0,36	0,34	0,65	0,61	0,37	0,43	0,41	0,49
3	0,22	0,21	0,30	0,24	0,49	0,31	0,32	0,26	0,42	0,36
4	0,40	0,35	0,33	0,36	0,59	0,74	0,45	0,41	0,54	0,55
5	0,23	0,32	0,35	0,30	0,47	0,92	1,03	0,77	0,78	0,79
6	0,37	0,26	0,30	0,31	0,38	0,28	0,69	0,57	0,54	0,49
7	0,28	0,45	0,39	0,37	0,31	0,53	0,35	1,12	0,95	0,65
8	0,33	0,26	0,28	0,29	0,40	0,34	0,57	0,39	0,51	0,44

CAPÍTULO 5 - COMENTÁRIOS E DISCUSSÕES

Serão tratados neste capítulo os comentários e discussões relativos ao comportamento da média dos valores da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas com quatro arestas de corte, sendo realizadas para duas velocidades de corte, sendo V_1 = 350 m/min e V_2 = 403 m/min, referentes as similaridades, dispersões, desvios e fatores que influenciaram as variações ocorridas nas vidas das ferramentas de corte.

5.1 - Comentários

5.1.1 - Comportamento geral da rugosidade superficial em relação ao número de peças usinadas

Para as velocidades de corte V_1 = 350 m/min e V_2 = 403 m/min analisadas, verifica-se, conforme ilustram as figuras 4.13 e 4.14, que o comportamento geral da rugosidade superficial em relação ao número de peças usinadas pode ser caracterizado por:

a - Três intervalos distintos de comportamento, na seguinte ordem: crescimento, decréscimo ou estabilidade e crescimento.

b - Três gradientes de crescimento, sendo que o maior encontra-se no intervalo final.

c - Ocorre grande variação dos valores da rugosidade superficial em relação ao

número de peças usinadas, entre arestas de uma mesma ferramenta.

d - Ocorrem quedas significativas dos valores da rugosidade superficial em relação ao número de peças usinadas, ao final do lote usinado para algumas das arestas de corte.

e - Ocorrem comportamentos discrepantes relativos a algumas das arestas de corte, quando comparadas com o comportamento geral, definido nos ítens a e b.

5.1.2 - Variação da vida da ferramenta

5.1.2.1 - Variação da vida da ferramenta para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min

De acordo com os resultados apresentados no ítem 4.9.1, verifica-se que:

a - A maior variação ocorre para o critério de fim de vida de 2,5 μm, devido ao discrepante comportamento referente à aresta de corte 1.

b - As variações para os critérios de fim de vida 3,0 e 3,4 μm são praticamente similares para todas as considerações.

c - A maior variação ocorrida entre arestas de corte de uma mesma ferramenta, para todos os critérios de fim de vida adotados, foi de 118,2%.

d - A maior variação ocorrida entre arestas de corte de duas ferramentas, para todos

os critérios de fim de vida adotados, foi de 178,8%.

e - A maior variação ocorrida entre as vidas médias das duas ferramentas F_1 (média das vidas das arestas 1 e 2) e F_2 (média das vidas das arestas 3 e 4), para todos os critérios de fim de vida adotados, foi de 59,6%.

f - A maior variação ocorrida entre uma aresta de corte e a média das vidas das ferramentas F_1 e F_2 (média das vidas das arestas de corte 1, 2, 3 e 4), para todos os critérios de fim de vida adotados, foi de 51,5%.

5.1.2.2 - Variação da vida da ferramenta para a velocidade de corte $V_2 = 403$ m/min

De acordo com os resultados apresentados no ítem 4.9.2, verifica-se que:

a - A maior variação, ocorre para o critério de fim de vida de 3,4 μm.

b - A maior variação ocorrida entre arestas de corte de uma mesma ferramenta, para todos os critérios de fim de vida adotados, foi de 6,3%.

c - A maior variação ocorrida entre arestas de corte de duas ferramentas, para todos os critérios de fim de vida adotados, foi de 6,3%.

d - A maior variação ocorrida entre as vidas médias das duas ferramentas F_1 (média das vidas das arestas 1 e 2) e F_2 (média das vidas das arestas 3 e 4), para todos os critérios de fim de vida adotados, foi de 4,2%.

unesp

e - A maior variação ocorrida entre uma aresta de corte e a média das vidas das ferramentas F_1 e F_2 (média das vidas das arestas 1, 2, 3 e 4), para todos os critérios de fim de vida adotados, foi de 3,5%.

5.1.2.3 - Considerações gerais da variação da vida da ferramenta

Levando-se em consideração os comentários anteriores, pode-se sintetizar:

a - Ocorreu uma grande variação da vida da ferramenta para a velocidade de corte $V_1 = 350$ m/min, dependendo do critério de fim de vida adotado.

b - Ocorreu uma pequena variação da vida da ferramenta para a velocidade de corte $V_2 = 403$ m/min, para todos os critérios de fim de vida adotados.

c - Ocorreu uma grande variação entre as vidas das arestas de corte de uma mesma ferramenta dependendo do critério de fim de vida adotado e da velocidade de corte.

d - Considerando a média das vidas das ferramentas como a mais representativa, pode ocorreu uma significativa variação da vida de uma aresta em relação a esta média, dependendo do critério de fim de vida adotado e da velocidade de corte.

unesp

5.2 - Discussões

Estudos realizados, constataram que o aumento da rugosidade está relacionado ao crescimento do desgaste da superfície de folga e ao raio de ponta da ferramenta[5,10] e, que o desenvolvimento deste desgaste em função do tempo é definido em três estados[6,42], conforme figura 2.5, sendo um estado de desgaste inicial seguido de um estado com crescimento praticamente constante, e por último, um estado de desgaste acelerado.

Wilkinson e outros[7], tomando como parâmetro a rugosidade superficial das peças usinadas em relação ao desgaste de flanco da ferramenta, observaram a tendência do aumento de Ra com o desgaste, mas que as vezes ocorrem reduções destes valores da rugosidade.

Levando-se em consideração o exposto, pode-se supor que deve ocorrer uma similaridade entre os comportamentos, com relação ao tempo, da rugosidade superficial das peças usinadas e do desgaste da superfície de folga que se desenvolve na ferramenta.

Considerando-se que o comportamento da média dos valores da rugosidade superficial em função do tempo, obtida pela usinagem com 4 arestas de corte, seja o mais representativo, conforme ilustrado na figura 4.17, identifica-se uma similaridade deste comportamento com o do desgaste da superfície de folga.

No entanto, no comportamento para a velocidade V_2 são notados

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

alguns desvios em regiões com pequenos decréscimos, que provavelmente estão associados ao desgaste consecutivo dos revestimentos de TiN, Al_2O_3, TiC e do substrato de WC. Entretanto, para a velocidade V_1 esta ocorrência não é claramente notada, pelo fato de que estes decréscimos no comportamento relativo a cada aresta, não são síncronos com referência ao número de peças usinadas, produzindo uma curva média que ocultam estas inflexões.

Portanto, devido aos desgastes de cada um dos revestimentos ocorrerem em períodos relativamente diferentes, estes ocasionam uma variação da vida da ferramenta quando considera-se o valor médio da rugosidade como critério de fim de vida.

No estado de desgaste inicial, analisando-se o comportamento da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas, com cada uma das arestas de corte das ferramentas F_1 e F_2 para uma velocidade de corte V_1 = 350 m/min, conforme figura 4.13, observa-se um crescimento desta rugosidade com posterior decréscimo, para grande parte das arestas de corte.

Este comportamento está de acordo com os estudos de Schallbroch e Bethmann[45], onde verificaram que enquanto o desgaste da superfície de folga aumenta progressivamente, ocorre um polimento, isto é, uma diminuição da rugosidade nas superfícies da ferramenta devido ao deslizamento do material usinado. Este polimento altera as forças de corte, originando uma recuperação da qualidade superficial da peça, no início da usinagem do lote. Entretanto, a aresta de corte 2

representa um desvio deste comportamento, pois seus valores da rugosidade superficial são inferiores ao das outras arestas.

Este desvio pode ser explicado por Wilkinson e colaboradores[7], que observaram em testes de usinagem comportamentos similares do desgaste de flanco V_b com relação ao tempo, para várias pastilhas, sendo que algumas destas mostraram menores taxas de desgastes que outras, possivelmente por apresentarem durezas iniciais maiores.

Destas observações, verifica-se que no início da usinagem de um lote de peças, a dureza e a rugosidade das superfícies das ferramentas podem proporcionar significativas variações na determinação da vida, quando adotada como critério de fim de vida a rugosidade superficial das peças.

Analisando-se o comportamento da rugosidade superficial em função do número de peças usinadas com cada uma das arestas de corte das ferramentas F_3 e F_4, para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min, conforme ilustrado pela figura 4.15, observa-se no estágio inicial, uma estabilidade com posterior crescimento da rugosidade superficial. Isto pode ser explicado pelo equilíbrio do aumento inicial do desgaste da superfície de folga e o polimento das superfícies da ferramenta[45], provavelmente em razão das condições mais severas de temperatura e pressão na interface peça/ferramenta, diminuindo o intervalo de tempo necessário a realização deste polimento.

Nesta velocidade observa-se também uma pequena dispersão dos

valores da rugosidade superficial, e ao contrário do ocorrido na velocidade V_1, nenhuma aresta provocou afastamento do comportamento. Estas observações indicam que as variações das durezas e rugosidades relativas às superficies das pastilhas, não foram suficientemente grandes ao ponto de produzirem desvios significativos.

Entretanto, ainda neste estado inicial, os valores da rugosidade relativos a V_2 são bem menores que em V_1, o que resulta vidas maiores para as ferramentas, quando pequenos valores para a rugosidade forem adotados como critério de fim de vida. Este fato, Micheletti[5] explica, que o aumento da velocidade de corte diminui o coeficiente de atrito, resultando na melhoria do acabamento superficial da peça, e Merchant[18], verificou que a redução do coeficiente de atrito produz uma grande melhoria na superficie da peça.

No estado de crescimento praticamente constante, analisando-se o comportamento da rugosidade superficial em função do número de peças pela usinagem com cada uma das arestas de corte para a velocidade de corte V_1 = 350 m/min, conforme figura 4.13, verifica-se a similaridade esperada, exceto para a aresta de corte 1, que apresenta um significativo crescimento seguido de um decréscimo dos valores da rugosidade. Isto provavelmente deve ter ocorrido em razão da falha prematura do revestimento de TiN.

No estado de desgaste acelerado, observa-se que os valores da rugosidade superficial produzidos pela usinagem com a aresta de corte 2 para a velocidade V_1, são maiores que os das outras arestas e os valores correspondentes a

aresta 4 são menores, provavelmente devido aos diferentes valores do desgaste da superficie de folga, relacionados a diferentes mecanismos de desgaste dominantes[45].

Verifica-se ainda neste estado, que a aresta de corte 2 ao final da usinagem do lote de peças, apresenta uma queda gradativa dos valores da rugosidade superficial, que provavelmente pode ser explicado pela combinação da forma resultante do raio de ponta da ferramenta devido a avarias, com o acentuado desgaste em cratera, conforme pode ser observado nas figuras 4.22 (a) e (b).

Destas observações, verificam-se que falhas prematuras do revestimento, e alterações geométricas da ferramenta, podem produzir significativas variações da rugosidade superficial das peças usinadas, originando uma variação na vida da ferramenta, quando adota-se como critério de fim de vida a rugosidade superficial.

Analisando-se o comportamento da rugosidade superficial em função do número de peças pela usinagem com cada uma das arestas de corte para uma velocidade de corte V_2 = 403 m/min, também verifica-se a similaridade esperada, exceto para a aresta de corte 8, que apresenta no estado de crescimento acelerado, uma queda brusca nos valores da rugosidade superficial, que provavelmente pode ser explicado pela combinação da forma resultante do raio de ponta da ferramenta devido a avarias, com o acentuado desgaste em cratera, conforme pode ser observado nas figuras 4.28 (a) e (b).

FACULDADE DE ENGENHARIA
DE GUARATINGUETÁ
BIBLIOTECA
359

Na apresentação da quantificação das vidas das ferramentas no ítem 4.7 do presente trabalho, ficou claramente estabelecida a existência e a dimensão de uma variação significativa destas vidas, que por vezes, atingiu valores extremamente elevados, sendo para arestas de uma mesma pastilha, próxima de 118%, entre arestas de duas ferramentas cerca de 178,8%, entre as médias de duas pastilhas de 59,6% e entre uma aresta e a média de todas, sempre sob os mesmos parâmetros de corte, aproximados 51,5%.

Baseando-se em toda a discussão aqui apresentada, diversos são os fatores que influenciam e induzem às variações das vidas das ferramentas de corte, como dureza, acabamento superficial e geometria das pastilhas, interação dos mecanismos de desgaste operantes e outros. No entanto, é importante citar as inclusões, como um fator metalúrgico do material de trabalho que pode influir nos modos e nas taxas de desgaste, produzindo vidas diferentes para as pastilhas.

A presença de inclusões moles do tipo sulfetos, aproximadamente 0,2% em área, no aço utilizado para os ensaios de usinagem, possivelmente explica a pequena dispersão observada nos valores da rugosidade superficial para a velocidade de corte V_2, onde a temperatura na região de contato peça/ferramenta é mais elevada, resultando na pequena variação das vidas das ferramentas. Isto, segundo Thoors e colaboradores[21], é devido a influência negativa das reações da camada de inclusões de sulfetos com o titânio do material da ferramenta, formando soluções sólidas moles e deste modo aumentando a taxa de desgaste.

CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES

Com relação aos resultados obtidos no presente trabalho, referentes à variação da vida de ferramentas de metal duro revestidos com TiN e camadas intermediárias de TiC e Al_2O_3, na operação de acabamento no processo de torneamento , adotando-se como critério de fim de vida a rugosidade superficial das peças usinadas, pode-se concluir que:

1 - Ocorreu uma grande variação entre as vidas das arestas de corte pertencentes ou não a uma mesma ferramenta, dependendo do valor adotado para a rugosidade superficial como critério de fim de vida.

2 - A rugosidade do revestimento de TiN das superficies de saída e de incidência da ferramenta de corte, pode proporcionar significativas variações na vida da ferramenta no início da usinagem do lote, quando adota-se a rugosidade superficial das peças como critério de fim de vida.

3 - A não homogeneidade dos revestimentos das pastilhas, quanto a sua dureza, espessura e aderência, pode proporcionar variações na vida da ferramenta.

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

4 - Houve uma similaridade do comportamento do desgaste da superfície de incidência em relação ao tempo com o comportamento da rugosidade superficial produzida com o tempo de usinagem das peças.

5 - Pode ocorrer alterações do período de vida dos revestimentos de TiN, Al_2O_3 e TiC, proporcionando uma variação da vida da ferramenta.

6 - Alterações geométricas da ferramenta causadas por avarias, podem produzir significativas variações da rugosidade superficial das peças usinadas, originando uma variação na vida da ferramenta, quando é adotado como critério de fim de vida a rugosidade superficial.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1 - CHIAVERINI, V. Materiais para Ferramenta. In: FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1970. p. 277-348.

2 - MARCONDES, F.C. A História do Metal Duro. 1ª ed. São Paulo: CPA, 1990. p. 13 a 50.

3 - ARAÚJO, J. A. Estudo de Uma Afiadora Universal de Ferramentas pelo Teste de Excitação Harmônica. São Carlos, 1984. p. 17 a 21. Dissertação de Mestrado - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

4 - SANDVIKEN. Historical Metal Cutting. In:__ Modern Metal Cutting. 1ª ed. Sweden: Tofters Tryckeri AB, 1994. p. 1-45.

5 - MICHELETTI, G. F. Mecanizado por Arranque de Viruta, 2ª ed. Barcelona: Editorial Blume, 1980.

6 - DEGARMO, E. P., BLACK, J. T., KOHSER, R. A., Materials and Processes in Manufacturing: 8ª ed. USA: Upper Saddle River, Prentice Hall, 1997. p 618-43.

7 - WILKINSON, P. et al. Surface Finish Parameters as Diagnostics of Tool Wear in face Milling. Wear, v.205, p.47-54, 1997.

8 - ALMEIDA, S. L. R., BERNARDO, V., CUPPINI, N. L. Aplicação de Lógica Fuzzi e Redes Neurais para a Otimização de Condições de Usinagem. Máquinas e Metais, v. 365, p. 98-106, 1996.

unesp

9 - MESQUITA, R. M. D. O Desgaste das Ferramentas de Corte e a sua Relação com as Forças de Corte. Lisboa, 1988. 305p. Tese de Doutorado - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

10 - FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

11 - TAYLOR, F. W. On The Art Of Cutting Metals. Transactions ASME, v. 28, p 50, 1907.

12 - SANDVIKEN. Tool Wear. In:__ Modern Metal Cutting a practical handbook. 1ª ed. Sweden: Tofters Tryckeri AB, 1994. p. IV1-27.

13 - CRNKOVIC, S. J. Comportamento de um Aço ABNT-1020 Bifásico Revenido Quanto ao Atrito e Desgaste. Campinas, 1993. 276p. Tese de Doutorado - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas.

14 - BUQUOI, D. J. Solid Particle Erosion: Its Causes, Effects and Solutions. In: ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology: Glossary of Terms. USA, v.18, 1995. p.1-2-3-14.

15 - KRUSHOV, M. M., BABICHEV, M. M. V. A New Model for two-body Abrasive Wear Based on the Localization of Plastic Deformation. Wear, v. 117, p.1-36, 1987.

16 - SCHEY, J. Wear. In:___ A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear. 2ª ed.Ohio: Metals Park, 1984. p.94-100.

17 - WILKINSON, P. et al. Surface Finish Parameters as Diagnostics of Tool Wear in face Milling. Wear, v.205, p.47-54, 1997.

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

18 - MERCHANT, M. E. Fundamentals of Cutting Fluid Action. In: FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1970.

19 - CHIAVERINI, V. Aços e Ferros Fundidos. 5ª ed. São Paulo: Publicado pela ABM, 1984. p.154-7 e 255-62.

20 - COLPAERT, H. Metalografia dos Produtos Siderúrgicos Comuns. 3ª ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1974. p.165-78.

21 - THOORS, H., CHANDRASEKARAN, H., ÖLUND, P. Study of Some Active Wear Mechanisms in a Titanium-Based Cermet when Machining Steels. Wear, v.162-4, p.1-11, 1993.

22 - WRIGHT, P. K., TRENT, E. M. Metallurgical Appraisal of Wear Mechanisms and Processes on High-Speed-Steel Cutting Tools. Metals Technology, v. january, p.21-32, 1974.

23 - DEARNLEY P. A., TRENT E. M. Wear Mechanisms of Coated Carbide Tools. Metals Technology, v. february, p.42-9, 1982.

24 - LIN, S. C., TING, C. J. Tool Wear Monitoring in Drilling Using Force Signals. Wear, v.180, p.53-60, 1995.

25 - LUDEMA, K. C. Wear. In: ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology: USA, v.18, 1995. p.184-280.

26 - TRENT, E. M. Metal Cutting. In: MESQUITA, R. M. D. O Desgaste das Ferramentas de Corte e a sua Relação com as Forças de Corte. Lisboa, 1988. 305p. Tese de Doutorado - Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa.

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

27 - RUBENSTEIN, C. An Analysis of Tool Life Based on Flank-Face Wear. ASME Journal of Engineering for Industry, v.february, p.13-21, 1976.

28 - TRIGGER, K. J., CHAO B. T. The Mechanism of Crater Wear of Cemented Carbide Tools. ASME Journal of Engineering for Industry, v.july, p.19-35, 1956.

29 - BHATTACHARYYA, A., HAM, I. Analysis of Tool Wear. ASME Journal of Engineering for Industry, v.august, p.28-41, 1969.

30 - COOK, N. H. Tool Wear and Tool Life. Journal of Engineering for Industry, v.november, p.931-938, 1973.

31 - SCHEY, J. Metal Removal. In:___ A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear. 2ª ed.Ohio: Metals Park, 1984. p.604-12.

32 - COLDING, B. N. In: SCHEY, J. A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear. 2ª ed.Ohio: Metals Park, 1984. p.

33 - NOVAK, S., KOMAC, M. Wear of Cermet Cutting Tools Coated with Physically Vapour Deposited TiN. Wear, v.205, p.160-8, 1997.

34 - HALE, T. E., GRAHAM, D. E. In: A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear. 2ª ed.Ohio: Metals Park, 1984. p.604-12.

35 - SCHOLL, M. Abrasive Wear of Titanium Nitride Coatings. Wear, v.203-204, p.57-64, 1997.

36 - DEARNLEY, P. A., TRENT, E. M. In: A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear. 2ª ed.Ohio: Metals Park, 1984. p.604-12.

37 - GOH, G. K. L. et al. Transitions in Wear Mechanisms of Alumina Cutting Tools. Wear, v.201, p.199-208, 1996.

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

38 - KRISHNAMURTHY, R. In: A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear. 2ª ed.Ohio: Metals Park, 1984. p.604-12.

39 - WERTHEIM, R. et al. In: A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear. 2ª ed.Ohio: Metals Park, 1984. p.604-12.

40 - RAMALINGAM, S., VAN WYK, R. In: A. Tribology in Metalworking: Friction, Lubrication and Wear. 2ª ed.Ohio: Metals Park, 1984. p.604-12.

41 - LIM, S. C., ASHBY, M. F. Wear-Mechanism Maps. In: KENDALL, L. A. Friction and Wear of Cutting Tools and Cutting Tool Materials. In: ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology: USA, v.18, 1995. p.609-620.

42 - KRAMER, B. M., SUH, N. P. Tool Wear by Solution: A Quantitative Understanding. In: KENDALL, L. A. Friction and Wear of Cutting Tools and Cutting Tool Materials. In: ASM Handbook: Friction, Lubrication, and Wear Technology: USA, v.18, 1995. p.609-620.

43 - SU, Y. L., YAO, S. H. On the Performance and Application of CrN Coating Wear, v.205, p.112-19, 1997.

44 - TAKEYAMA, H., MURATA, R. Basic Investigation of Tool Wear. ASME Journal of Engineering for Industry, november, p.83-94, 1963.

45 - SCHALLBROCH, H., BETHMANN, H. KURSPRÜFVERFAHREN DER ZERSPANARBEIT. In: FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem dos Metais. São Paulo: Edgard Blücher, 1970, p.436-39.

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

APÊNDICE A

Tabela 4.1 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 1 da ferramenta F_1

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
1	1,98	1,9	1,93
2	2,02	2,01	1,98
3	2,06	2,04	2,06
4	2,09	2,09	2,09
5	2,12	2,11	2,1
6	2,1	2,11	2,1
7	2,14	2,16	2,15
8	2,15	2,17	2,16
9	2,18	2,13	2,29
10	2,18	2,16	2,23
11	2,19	2,21	2,2
12	2,23	2,22	2,2
13	2,22	2,2	2,21
14	2,22	2,22	2,23
15	2,2	2,24	2,25
16	2,19	2,2	2,18
17	2,19	2,23	2,18
18	2,22	2,27	2,19
19	2,27	2,21	2,2
20	2,24	2,25	2,24
21	2,21	2,24	2,16
22	2,26	2,27	2,24
23	2,15	2,18	2,21
24	2,07	2,05	2,15
25	2,26	2,25	2,25
26	2,26	2,27	2,25
27	2,32	2,34	2,26
28	2,39	2,38	2,35
29	2,42	2,44	2,39
30	2,44	2,43	2,44
31	2,46	2,41	2,5
32	2,45	2,41	2,43
33	2,49	2,49	2,47
34	2,49	2,44	2,51

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
35	2,49	2,53	2,55
36	2,57	2,59	2,52
37	2,58	2,57	2,49
38	2,57	2,54	2,5
39	2,62	2,58	2,57
40	2,67	2,56	2,55
41	2,57	2,59	2,58
42	2,59	2,55	2,6
43	2,63	2,58	2,51
44	2,52	2,51	2,59
45	2,55	2,55	2,58
46	2,44	2,59	2,58
47	2,55	2,56	2,51
48	2,5	2,54	2,56
49	2,53	2,52	2,56
50	2,55	2,65	2,55
51	2,31	2,58	2,52
52	2,56	2,51	2,62
53	2,57	2,56	2,55
54	2,3	2,48	2,49
55	2,21	2,18	2,2
56	2,52	2,4	2,45
57	2,49	2,37	2,3
58	2,33	2,28	2,22
59	2,37	2,41	2,51
60	2,43	2,35	2,52
61	2,38	2,45	2,44
62	2,62	2,45	2,61
63	2,43	2,54	2,46
64	2,18	2,34	2,31
65	2,37	2,44	2,42
66	2,41	2,39	2,34
67	2,47	2,71	2,5
68	2,27	2,28	2,41

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
69	2,21	2,44	2,3
70	2,11	2,07	2,09
71	2,25	2,39	2,39
72	2,15	2,18	2,2
73	2,28	2,24	2,32
74	2,31	2,53	2,36
75	2,24	2,28	2,2
76	2,34	2,3	2,36
77	2,06	2,12	2,2
78	2,48	2,21	2,15
79	2,38	2,48	2,43
80	2,51	2,26	2,3
81	2,28	2,19	2,23
82	2,46	2,36	2,18
83	2,37	2,35	2,23
84	2,49	2,31	2,4
85	2,44	2,5	2,49
86	2,89	2,75	2,28
87	2,74	2,88	2,65
88	2,7	2,67	2,54
89	2,95	2,83	2,69
90	2,58	2,7	2,74
91	2,9	2,91	2,44
92	2,96	2,77	2,66
93	2,8	2,74	2,67
94	3,03	2,73	2,57
95	2,78	2,81	2,87
96	3,06	3,31	3,22
97	3,38	3,25	3,2
98	3,3	3,1	2,84
99	3,2	3,28	3,16
100	3,35	3,23	3,32
101	3,25	3,09	3,14
102	3,41	3,11	3,37

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

APÊNDICE A

Tabela 4.2 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 2 da ferramenta F_1

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
1	1,65	1,63	1,69
2	1,47	1,45	1,38
3	1,46	1,48	1,49
4	1,56	1,49	1,55
5	1,62	1,65	1,68
6	1,56	1,61	1,57
7	1,58	1,65	1,66
8	1,63	1,59	1,69
9	1,64	1,65	1,67
10	1,66	1,75	1,68
11	1,68	1,69	1,76
12	1,65	1,66	1,74
13	1,68	1,71	1,75
14	1,7	1,72	1,72
15	1,73	1,7	1,72
16	1,66	1,75	1,81
17	1,66	1,71	1,77
18	1,71	1,7	1,74
19	1,76	1,81	1,82
20	1,7	1,74	1,79
21	1,76	1,75	1,83
22	1,71	1,78	1,77
23	1,75	1,75	1,72
24	1,78	1,8	1,8
25	1,82	1,88	1,84
26	1,89	1,9	1,91
27	1,86	1,9	1,86
28	1,81	1,84	1,87
29	1,86	1,85	1,8
30	1,83	1,89	1,89
31	1,85	1,88	1,99
32	1,92	1,89	1,97
33	1,87	1,91	1,94
34	1,82	1,93	1,87

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
35	1,84	1,87	1,88
36	1,85	1,87	1,91
37	1,88	1,97	1,95
38	1,92	1,94	1,97
39	1,94	1,96	1,93
40	1,95	1,96	1,99
41	2	1,99	1,97
42	2	1,98	1,96
43	1,98	1,98	2,02
44	1,94	1,98	1,91
45	1,99	1,95	2,04
46	1,95	2	1,89
47	2	1,99	2
48	2,02	2	2,02
49	2,05	2,07	2,02
50	2,06	2,12	2
51	1,98	1,88	2,01
52	2,11	2,08	2,09
53	2,1	2,05	2,02
54	2,06	2,07	2,03
55	2,11	2,15	2,06
56	2,13	2,12	2,13
57	2,15	2,08	2,14
58	2,19	2,13	2,09
59	2,24	2,26	2,22
60	2,29	2,29	2,25
61	2,24	2,23	2,27
62	2,25	2,26	2,26
63	2,23	2,19	2,15
64	2,32	2,28	2,25
65	2,4	2,44	2,33
66	2,4	2,37	2,35
67	2,49	2,43	2,46
68	2,48	2,37	2,4

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
69	2,4	2,35	2,3
70	2,37	2,38	2,31
71	2,41	2,38	2,26
72	2,5	2,49	2,43
73	2,65	2,59	2,57
74	2,68	2,61	2,57
75	2,73	2,72	2,66
76	2,8	2,77	2,64
77	2,83	2,77	2,7
78	2,85	2,82	2,79
79	2,83	2,77	2,76
80	2,78	2,82	2,79
81	2,93	2,88	2,8
82	3,06	2,96	2,9
83	3,15	3,09	3,11
84	3,19	3,14	3,12
85	3,05	3,11	3,09
86	3,12	3,11	3,11
87	3,16	3,18	3,1
88	3,34	3,35	3,21
89	3,34	3,35	3,3
90	3,45	3,41	3,34
91	3,62	3,62	3,45
92	3,53	3,52	3,48
93	3,53	3,53	3,47
94	3,64	3,56	3,52
95	3,66	3,66	3,58
96	3,72	3,7	3,68
97	3,67	3,69	3,61
98	3,66	3,63	3,61
99	3,61	3,58	3,55
100	3,48	3,51	3,51
101	3,59	3,55	3,52
102	3,42	3,43	3,49

unesp

APÊNDICE A

Tabela 4.3 - Valores médios da rugosidade superficial relativos a usinagem com cada uma das arestas de corte 1 e 2 da ferramenta F_1, e média dos valores destas duas arestas

Peça	Rugosidade Média (μm)		
	A_1	A_2	Média
1	1,94	1,66	1,80
2	2,00	1,43	1,72
3	2,05	1,48	1,77
4	2,09	1,53	1,81
5	2,11	1,65	1,88
6	2,10	1,58	1,84
7	2,15	1,63	1,89
8	2,16	1,64	1,90
9	2,20	1,65	1,93
10	2,19	1,70	1,94
11	2,20	1,71	1,96
12	2,22	1,68	1,95
13	2,21	1,71	1,96
14	2,22	1,71	1,97
15	2,23	1,72	1,97
16	2,19	1,74	1,97
17	2,20	1,71	1,96
18	2,23	1,72	1,97
19	2,23	1,80	2,01
20	2,24	1,74	1,99
21	2,20	1,78	1,99
22	2,26	1,75	2,01
23	2,18	1,74	1,96
24	2,09	1,79	1,94
25	2,25	1,85	2,05
26	2,26	1,90	2,08
27	2,31	1,87	2,09
28	2,37	1,84	2,11
29	2,42	1,84	2,13
30	2,44	1,87	2,15
31	2,46	1,91	2,18
32	2,43	1,93	2,18
33	2,48	1,91	2,20
34	2,48	1,87	2,18
35	2,52	1,86	2,19
36	2,56	1,88	2,22
37	2,55	1,93	2,24
38	2,54	1,94	2,24
39	2,59	1,94	2,27
40	2,59	1,97	2,28
41	2,58	1,99	2,28
42	2,58	1,98	2,28
43	2,57	1,99	2,28
44	2,54	1,94	2,24
45	2,56	1,99	2,28
46	2,54	1,95	2,24
47	2,54	2,00	2,27
48	2,53	2,01	2,27
49	2,54	2,05	2,29
50	2,58	2,06	2,32
51	2,47	1,96	2,21
52	2,56	2,09	2,33
53	2,56	2,06	2,31
54	2,42	2,05	2,24
55	2,20	2,11	2,15
56	2,46	2,13	2,29
57	2,39	2,12	2,26
58	2,28	2,14	2,21
59	2,43	2,24	2,34
60	2,43	2,28	2,36
61	2,42	2,25	2,34
62	2,56	2,26	2,41
63	2,48	2,19	2,33
64	2,28	2,28	2,28
65	2,41	2,39	2,40
66	2,38	2,37	2,38
67	2,56	2,46	2,51
68	2,32	2,42	2,37
69	2,32	2,35	2,33
70	2,09	2,35	2,22
71	2,34	2,35	2,35
72	2,18	2,47	2,33
73	2,28	2,60	2,44
74	2,40	2,62	2,51
75	2,24	2,70	2,47
76	2,33	2,74	2,54
77	2,13	2,77	2,45
78	2,28	2,82	2,55
79	2,43	2,79	2,61
80	2,36	2,80	2,58
81	2,23	2,87	2,55
82	2,33	2,97	2,65
83	2,32	3,12	2,72
84	2,40	3,15	2,78
85	2,48	3,08	2,78
86	2,64	3,11	2,88
87	2,76	3,15	2,95
88	2,64	3,30	2,97
89	2,82	3,33	3,08
90	2,67	3,40	3,04
91	2,75	3,56	3,16
92	2,80	3,51	3,15
93	2,74	3,51	3,12
94	2,78	3,57	3,18
95	2,82	3,63	3,23
96	3,20	3,70	3,45
97	3,28	3,66	3,47
98	3,08	3,63	3,36
99	3,21	3,58	3,40
100	3,30	3,50	3,40
101	3,16	3,55	3,36
102	3,30	3,45	3,37

APÊNDICE A

Tabela 4.4 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 3 da ferramenta F_2

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
1	1,63	1,69	1,83
2	1,45	1,38	1,87
3	1,48	1,49	1,89
4	1,49	1,55	1,94
5	1,65	1,68	1,94
6	1,61	1,57	1,98
7	1,65	1,66	2,03
8	1,59	1,69	2,06
9	1,65	1,67	2,07
10	1,75	1,68	2,1
11	1,69	1,76	2,1
12	1,66	1,74	2,12
13	1,71	1,75	2,1
14	1,72	1,72	2,15
15	1,7	1,72	2,13
16	1,75	1,81	2,14
17	1,71	1,77	2,15
18	1,7	1,74	2,18
19	1,81	1,82	2,18
20	1,74	1,79	2,19
21	1,75	1,83	2,2
22	1,78	1,77	2,17
23	1,75	1,72	2,17
24	1,8	1,8	2,24
25	1,88	1,84	2,09
26	1,9	1,91	2,07
27	1,9	1,86	1,98
28	1,84	1,87	1,96
29	1,85	1,8	1,94
30	1,89	1,89	1,94
31	1,88	1,99	1,94
32	1,89	1,97	1,96
33	1,91	1,94	1,94
34	1,93	1,87	1,99

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
35	1,87	1,88	1,97
36	1,87	1,91	2,01
37	1,97	1,95	2
38	1,94	1,97	2
39	1,96	1,93	1,98
40	1,96	1,99	1,99
41	1,99	1,97	2
42	1,98	1,96	2,01
43	1,98	2,02	2,08
44	1,98	1,91	2,13
45	1,95	2,04	2,14
46	2	1,89	2,11
47	1,99	2	2,13
48	2	2,02	2,2
49	2,07	2,02	2,22
50	2,12	2	2,13
51	1,88	2,01	2,19
52	2,08	2,09	2,25
53	2,05	2,02	2,26
54	2,07	2,03	2,2
55	2,15	2,06	2,24
56	2,12	2,13	2,31
57	2,08	2,14	2,3
58	2,13	2,09	2,24
59	2,26	2,22	2,28
60	2,29	2,25	2,34
61	2,23	2,27	2,36
62	2,26	2,26	2,36
63	2,19	2,15	2,3
64	2,28	2,25	2,27
65	2,44	2,33	2,3
66	2,37	2,35	2,29
67	2,43	2,46	2,35
68	2,37	2,4	2,42

Peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
69	2,35	2,3	2,34
70	2,38	2,31	2,34
71	2,38	2,26	2,38
72	2,49	2,43	2,41
73	2,59	2,57	2,43
74	2,61	2,57	2,48
75	2,72	2,66	2,44
76	2,77	2,64	2,45
77	2,77	2,7	2,46
78	2,82	2,79	2,41
79	2,77	2,76	2,27
80	2,82	2,79	2,39
81	2,88	2,8	2,43
82	2,96	2,9	2,47
83	3,09	3,11	2,34
84	3,14	3,12	2,44
85	3,11	3,09	2,48
86	3,11	3,11	2,59
87	3,18	3,1	2,61
88	3,35	3,21	2,6
89	3,35	3,3	2,71
90	3,41	3,34	2,71
91	3,62	3,45	2,75
92	3,52	3,48	2,82
93	3,53	3,47	2,84
94	3,56	3,52	2,91
95	3,66	3,58	3,02
96	3,7	3,68	3,07
97	3,69	3,61	3,07
98	3,63	3,61	3,18
99	3,58	3,55	3,27
100	3,51	3,51	3,38
101	3,55	3,52	3,44
102	3,43	3,49	3,59

unesp

APÊNDICE A

Tabela 4.5 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 4 da ferramenta F_2

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
1	1,78	1,78	1,75
2	1,78	1,77	1,85
3	1,83	1,83	1,87
4	1,82	1,87	1,83
5	1,87	1,85	1,88
6	1,87	1,9	1,87
7	1,93	1,91	1,94
8	1,96	1,96	1,93
9	1,99	1,97	2,05
10	1,97	2,01	2,05
11	2	2	2
12	2	2,02	2,1
13	2,06	2,06	2,05
14	2,05	2,07	2,15
15	2,1	2,09	2,09
16	2,1	2,09	2,09
17	2,11	2,11	2,11
18	2,11	2,14	2,2
19	2,1	2,14	2,17
20	2,1	2,13	2,2
21	2,09	2,09	2,1
22	2,12	2,14	2,13
23	2,14	2,15	2,13
24	2,16	2,16	2,2
25	2,08	2,14	2,15
26	2,04	2,05	2,12
27	2,02	2,05	2,04
28	1,97	2	2,11
29	1,91	1,96	1,99
30	1,94	1,95	2,02
31	1,96	2,02	2,06
32	1,95	2	1,95
33	1,94	1,98	1,99
34	1,95	1,98	1,98
35	1,96	2,02	2,02
36	2,02	2,01	2,01
37	1,98	2	2,08
38	1,99	2	2,03
39	2	1,97	2,09
40	1,99	2,04	2,09
41	2,01	2,06	2,03
42	2,01	2,06	2,03
43	2,07	2,03	2,01

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
44	2,03	2,02	2,01
45	2,06	2,07	2,08
46	2,07	2,07	2,11
47	2,09	2,08	2,16
48	2,1	2,06	2,1
49	2,11	2,15	2,1
50	2,14	2,16	2,13
51	2,2	2,14	2,18
52	2,21	2,24	2,21
53	2,17	2,24	2,24
54	2,17	2,19	2,24
55	2,18	2,18	2,15
56	2,2	2,26	2,2
57	2,25	2,2	2,16
58	2,19	2,2	2,15
59	2,31	2,22	2,23
60	2,32	2,32	2,23
61	2,29	2,32	2,24
62	2,34	2,25	2,31
63	2,23	2,3	2,27
64	2,25	2,25	2,28
65	2,27	2,32	2,31
66	2,28	2,29	2,33
67	2,37	2,3	2,37
68	2,32	2,41	2,43
69	2,24	2,36	2,36
70	2,32	2,3	2,34
71	2,32	2,34	2,3
72	2,28	2,28	2,38
73	2,38	2,42	2,3
74	2,33	2,35	2,35
75	2,28	2,33	2,34
76	2,32	2,22	2,31
77	2,28	2,27	2,28
78	2,26	2,39	2,28
79	2,46	2,45	2,39
80	2,48	2,44	2,39
81	2,42	2,34	2,48
82	2,38	2,46	2,42
83	2,33	2,39	2,32
84	2,27	2,32	2,41
85	2,39	2,43	2,27
86	2,38	2,3	2,35

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
87	2,33	2,29	2,35
88	2,36	2,41	2,17
89	2,39	2,41	2,38
90	2,34	2,41	2,29
91	2,4	2,45	2,25
92	2,44	2,46	2,44
93	2,44	2,53	2,45
94	2,57	2,5	2,45
95	2,49	2,51	2,37
96	2,6	2,57	2,44
97	2,58	2,56	2,48
98	2,54	2,57	2,56
99	2,65	2,58	2,52
100	2,67	2,76	2,61
101	2,62	2,58	2,57
102	2,74	2,75	2,67
103	2,79	2,93	2,92
104	2,78	2,84	2,86
105	2,89	2,9	2,78
106	2,86	2,92	2,7
107	2,88	2,84	2,72
108	2,97	2,83	2,99
109	2,96	2,98	3
110	3,1	3,26	2,91
111	3,11	3,12	2,92
112	3,15	3,06	3
113	3,23	3,22	3,1
114	3,24	3,23	3,22
115	3,15	3,14	3,09
116	3,29	3,27	3,14
117	3,33	3,31	3,21
118	3,4	3,36	3,27
119	3,37	3,38	3,37
120	3,49	3,47	3,47
121	3,74	3,67	3,41
122	3,98	3,86	3,73
123	4,13	4,16	4,03
124	4,59	4,61	4,26
125	5,35	5,16	4,94
126	5,55	5,43	5,39
127	5,58	5,63	5,59

APÊNDICE A

Tabela 4.6 - Valores médios da rugosidade superficial relativos a usinagem com cada uma das arestas de corte 3 e 4 da ferramenta F_2, e média dos valores destas duas arestas

Peça	Rugosidade Média (μm)		
	A_3	A_4	Média
1	1,86	1,77	1,82
2	1,90	1,80	1,85
3	1,92	1,84	1,88
4	1,95	1,84	1,89
5	1,99	1,87	1,93
6	1,99	1,88	1,94
7	2,04	1,93	1,98
8	2,07	1,95	2,01
9	2,08	2,00	2,04
10	2,10	2,01	2,06
11	2,13	2,00	2,07
12	2,13	2,04	2,08
13	2,13	2,06	2,10
14	2,17	2,09	2,13
15	2,17	2,09	2,13
16	2,16	2,09	2,13
17	2,13	2,11	2,12
18	2,21	2,15	2,18
19	2,16	2,14	2,15
20	2,18	2,14	2,16
21	2,20	2,09	2,15
22	2,19	2,13	2,16
23	2,18	2,14	2,16
24	2,25	2,17	2,21
25	2,20	2,12	2,16
26	2,11	2,07	2,09
27	2,05	2,04	2,04
28	2,04	2,03	2,04
29	1,98	1,95	1,97
30	1,96	1,97	1,97
31	2,01	2,01	2,01
32	1,98	1,97	1,97
33	1,98	1,97	1,98
34	2,03	1,97	2,00
35	2,01	2,00	2,01
36	2,06	2,01	2,04
37	2,05	2,02	2,04
38	2,02	2,01	2,02
39	2,03	2,02	2,02
40	2,05	2,04	2,05
41	2,04	2,03	2,04
42	2,02	2,03	2,03
43	2,08	2,04	2,06
44	2,09	2,02	2,06
45	2,15	2,07	2,11
46	2,13	2,08	2,11
47	2,14	2,11	2,12
48	2,19	2,09	2,14
49	2,19	2,12	2,16
50	2,16	2,14	2,15
51	2,19	2,17	2,18
52	2,24	2,22	2,23
53	2,27	2,22	2,25
54	2,25	2,20	2,22
55	2,25	2,17	2,21
56	2,32	2,22	2,27
57	2,30	2,20	2,25
58	2,26	2,18	2,22
59	2,31	2,25	2,28
60	2,33	2,29	2,31
61	2,39	2,28	2,34
62	2,39	2,30	2,35
63	2,34	2,27	2,31
64	2,27	2,26	2,27
65	2,31	2,30	2,31
66	2,30	2,30	2,30
67	2,35	2,35	2,35
68	2,43	2,39	2,41
69	2,33	2,32	2,33
70	2,33	2,32	2,33
71	2,36	2,32	2,34
72	2,41	2,31	2,36
73	2,42	2,37	2,40
74	2,45	2,34	2,40
75	2,53	2,32	2,42
76	2,45	2,28	2,37
77	2,45	2,28	2,36
78	2,36	2,31	2,33
79	2,31	2,43	2,37
80	2,42	2,44	2,43
81	2,44	2,41	2,43
82	2,43	2,42	2,43
83	2,39	2,35	2,37
84	2,44	2,33	2,39
85	2,42	2,36	2,39
86	2,54	2,34	2,44
87	2,56	2,32	2,44
88	2,57	2,31	2,44
89	2,65	2,39	2,52
90	2,66	2,35	2,50
91	2,69	2,37	2,53
92	2,76	2,45	2,61
93	2,75	2,47	2,61
94	2,87	2,51	2,69
95	2,92	2,46	2,69
96	3,04	2,54	2,79
97	3,07	2,54	2,81
98	3,12	2,56	2,84
99	3,22	2,58	2,90
100	3,30	2,68	2,99
101	3,39	2,59	2,99
102	3,57	2,72	3,15

APÊNDICE A

Tabela 4.7 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, aresta de corte 5 da ferramenta F_3

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
1	1,7	1,75	1,76
2	1,73	1,74	1,76
3	1,71	1,75	1,75
4	1,74	1,73	1,75
5	1,7	1,72	1,72
6	1,7	1,78	1,78
7	1,69	1,69	1,72
8	1,72	1,71	1,74
9	1,71	1,71	1,73
10	1,72	1,75	1,76
11	1,72	1,75	1,78
12	1,73	1,74	1,78
13	1,74	1,79	1,9
14	1,75	1,77	1,78
15	1,75	1,83	1,91
16	1,79	1,79	1,79
17	1,81	1,81	1,83
18	1,83	1,86	1,86
19	1,79	1,83	1,85
20	1,78	1,85	1,87
21	1,83	1,85	1,91
22	1,89	1,88	1,88
23	1,84	1,88	1,96
24	1,87	1,87	1,9
25	1,91	1,98	1,95
26	1,95	2	2,03
27	1,95	1,98	2,02
28	2	1,96	1,97
29	2,01	1,98	1,99
30	2,04	2,03	2
31	2,05	2,07	2,05
32	2,1	2,08	2,08
33	2,16	2,15	2,13
34	2,19	2,19	2,18

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
35	2,19	2,2	2,22
36	2,24	2,21	2,2
37	2,26	2,29	2,26
38	2,32	2,33	2,28
39	2,34	2,31	2,32
40	2,35	2,35	2,33
41	2,38	2,38	2,4
42	2,36	2,34	2,39
43	2,34	2,37	2,35
44	2,26	2,3	2,32
45	2,28	2,31	2,33
46	2,24	2,32	2,34
47	2,3	2,32	2,32
48	2,28	2,37	2,31
49	2,33	2,35	2,34
50	2,25	2,26	2,33
51	2,31	2,28	2,26
52	2,31	2,25	2,25
53	2,36	2,31	2,31
54	2,38	2,39	2,34
55	2,41	2,39	2,38
56	2,39	2,35	2,4
57	2,43	2,39	2,41
58	2,5	2,43	2,43
59	2,43	2,45	2,4
60	2,59	2,56	2,47
61	2,66	2,58	2,63
62	2,71	2,76	2,65
63	2,71	2,73	2,81
64	2,72	2,8	2,75
65	2,64	2,73	2,76
66	2,7	2,65	2,69
67	2,79	2,73	2,74
68	2,84	2,72	2,65

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
69	2,78	2,7	2,75
70	2,77	2,83	2,76
71	2,88	2,88	2,78
72	2,87	2,89	2,87
73	2,86	2,88	2,81
74	3	2,95	2,91
75	2,98	3,02	2,99
76	3,02	3,02	2,91
77	3,08	3,03	3,08
78	3,16	3,13	3,08
79	3,19	3,19	3,18
80	3,28	3,26	3,19
81	3,49	3,34	3,25
82	3,57	3,56	3,49
83	3,71	3,59	3,62
84	3,74	3,74	3,81
85	3,75	3,75	3,77
86			
87			
88			
89			
90			
91			
92			
93			
94			
95			
96			
97			
98			
99			
100			
101			
102			

APÊNDICE A

Tabela 4.8 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 6 da ferramenta F_3

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
1	1,8	1,79	1,78
2	1,76	1,77	1,79
3	1,75	1,78	1,85
4	1,78	1,78	1,87
5	1,78	1,78	1,79
6	1,76	1,8	1,82
7	1,78	1,76	1,8
8	1,8	1,84	1,85
9	1,77	1,79	1,83
10	1,77	1,87	1,82
11	1,81	1,96	2
12	1,79	1,83	1,85
13	1,82	1,8	1,79
14	1,84	1,92	1,89
15	1,81	1,85	1,9
16	1,82	1,83	1,85
17	1,86	1,85	1,84
18	1,88	1,9	1,96
19	1,9	1,93	1,95
20	1,84	1,9	1,88
21	1,88	1,87	1,88
22	1,96	1,94	1,96
23	1,94	1,95	2
24	1,99	1,97	2,02
25	2,12	2,09	2,07
26	2,05	2,08	2,01
27	2,04	2,07	2,13
28	2,05	2,05	2,07
29	2,05	2,06	2,12
30	2,07	2,14	2,07
31	2,12	2,11	2,1
32	2,14	2,12	2,13
33	2,12	2,15	2,17
34	2,15	2,17	2,2

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
35	2,19	2,22	2,22
36	2,13	2,15	2,15
37	2,18	2,14	2,19
38	2,21	2,23	2,19
39	2,21	2,29	2,34
40	2,29	2,26	2,22
41	2,26	2,33	2,31
42	2,24	2,29	2,29
43	2,29	2,31	2,32
44	2,28	2,29	2,29
45	2,27	2,23	2,25
46	2,18	2,23	2,27
47	2,2	2,24	2,24
48	2,18	2,2	2,23
49	2,15	2,3	2,29
50	2,14	2,18	2,17
51	2,29	2,2	2,17
52	2,29	2,24	2,37
53	2,27	2,25	2,28
54	2,55	2,49	2,39
55	2,5	2,45	2,45
56	2,26	2,17	2,32
57	2,35	2,34	2,3
58	2,28	2,33	2,37
59	2,51	2,44	2,45
60	2,59	2,6	2,59
61	2,67	2,67	2,61
62	2,71	2,72	2,71
63	2,7	2,77	2,78
64	2,63	2,66	2,63
65	2,64	2,69	2,68
66	2,58	2,55	2,62
67	2,65	2,66	2,65
68	2,64	2,58	2,6

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
69	2,58	2,56	2,54
70	2,61	2,57	2,59
71	2,59	2,58	2,58
72	2,78	2,69	2,66
73	2,75	2,78	2,8
74	2,78	2,86	2,78
75	2,83	2,76	2,85
76	3,04	2,99	2,92
77	2,99	2,9	2,93
78	2,97	3,03	2,97
79	2,96	2,93	2,9
80	3,05	3,05	3,01
81	3,06	3,06	2,99
82	3,25	3,17	3,13
83	3,31	3,23	3,18
84	3,39	3,34	3,29
85	3,37	3,38	3,36
86	3,42	3,4	3,4
87	3,43	3,42	3,42
88	3,41	3,47	3,45
89	3,4	3,52	3,38
90	3,34	3,41	3,38
91	4	3,76	3,64
92	3,82	4,03	4,08
93	3,78	3,77	3,77
94	4,17	3,94	4,16
95	5,23	4,61	4,98
96			
97			
98			
99			
100			
101			
102			

unesp

APÊNDICE A

Tabela 4.9 - Valores médios da rugosidade superficial relativos a usinagem com cada uma das arestas de corte 5 e 6 da ferramenta F_3, e média dos valores destas duas arestas

Peça	Rugosidade Média (μm)		
	A_5	A_6	Média
1	1,74	1,79	1,76
2	1,74	1,77	1,76
3	1,74	1,79	1,77
4	1,74	1,81	1,78
5	1,71	1,78	1,75
6	1,75	1,79	1,77
7	1,70	1,78	1,74
8	1,72	1,83	1,78
9	1,72	1,80	1,76
10	1,74	1,82	1,78
11	1,75	1,92	1,84
12	1,75	1,82	1,79
13	1,81	1,80	1,81
14	1,77	1,88	1,83
15	1,83	1,85	1,84
16	1,79	1,83	1,81
17	1,82	1,85	1,83
18	1,85	1,91	1,88
19	1,82	1,93	1,88
20	1,83	1,87	1,85
21	1,86	1,88	1,87
22	1,88	1,95	1,92
23	1,89	1,96	1,93
24	1,88	1,99	1,94
25	1,95	2,09	2,02
26	1,99	2,05	2,02
27	1,98	2,08	2,03
28	1,98	2,06	2,02
29	1,99	2,08	2,04
30	2,02	2,09	2,06
31	2,06	2,11	2,08
32	2,09	2,13	2,11
33	2,15	2,15	2,15
34	2,19	2,17	2,18

Peça	Rugosidade Média (μm)		
	A_5	A_6	Média
35	2,20	2,21	2,21
36	2,22	2,14	2,18
37	2,27	2,17	2,22
38	2,31	2,21	2,26
39	2,32	2,28	2,30
40	2,34	2,26	2,30
41	2,39	2,30	2,34
42	2,36	2,27	2,32
43	2,35	2,31	2,33
44	2,29	2,29	2,29
45	2,31	2,25	2,28
46	2,30	2,23	2,26
47	2,31	2,23	2,27
48	2,32	2,20	2,26
49	2,34	2,25	2,29
50	2,28	2,16	2,22
51	2,28	2,22	2,25
52	2,27	2,30	2,29
53	2,33	2,27	2,30
54	2,37	2,48	2,42
55	2,39	2,47	2,43
56	2,38	2,25	2,32
57	2,41	2,33	2,37
58	2,45	2,33	2,39
59	2,43	2,47	2,45
60	2,54	2,59	2,57
61	2,62	2,65	2,64
62	2,71	2,71	2,71
63	2,75	2,75	2,75
64	2,76	2,64	2,70
65	2,71	2,67	2,69
66	2,68	2,58	2,63
67	2,75	2,65	2,70
68	2,74	2,61	2,67

Peça	Rugosidade Média (μm)		
	A_5	A_6	Média
69	2,74	2,56	2,65
70	2,79	2,59	2,69
71	2,85	2,58	2,72
72	2,88	2,71	2,79
73	2,85	2,78	2,81
74	2,95	2,81	2,88
75	3,00	2,81	2,91
76	2,98	2,98	2,98
77	3,06	2,94	3,00
78	3,12	2,99	3,06
79	3,19	2,93	3,06
80	3,24	3,04	3,14
81	3,36	3,04	3,20
82	3,54	3,18	3,36
83	3,64	3,24	3,44
84	3,76	3,34	3,55
85	3,76	3,37	3,56
86	--	3,41	--
87	--	3,42	--
88	--	3,44	--
89	--	3,43	--
90	--	3,38	--
91	--	3,80	--
92	--	3,98	--
93	--	3,77	--
94	--	4,09	--
95	--	--	--
96	--	--	--
97	--	--	--
98	--	--	--
99	--	--	--
100	--	--	--
101	--	--	--
102	--	--	--

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

APÊNDICE A

Tabela 4.10 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 7 da ferramenta F_4

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
1	1,84	1,86	1,87
2	1,84	1,86	1,87
3	1,85	1,87	1,87
4	1,85	1,88	1,91
5	1,85	1,81	1,88
6	1,85	1,84	1,85
7	1,78	1,8	1,84
8	1,8	1,81	1,83
9	1,77	1,79	1,78
10	1,77	1,8	1,8
11	1,82	1,84	1,86
12	1,79	1,77	1,86
13	1,81	1,83	1,82
14	1,84	1,85	1,93
15	1,8	1,84	1,89
16	1,81	1,79	1,87
17	1,84	1,85	1,85
18	1,84	1,87	1,93
19	1,83	1,87	1,89
20	1,84	1,88	1,88
21	1,84	1,87	1,89
22	1,88	1,88	1,89
23	1,86	1,9	1,92
24	1,9	1,91	1,89
25	1,93	1,94	1,92
26	1,93	1,94	1,97
27	1,94	1,97	2,03
28	1,99	1,98	1,97
29	1,96	1,98	2
30	1,99	2	2,03
31	1,99	1,99	2,05
32	2,02	2	2,02
33	1,99	2,04	2,01
34	2,07	2,08	2,13

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
35	2,09	2,12	2,11
36	2,11	2,13	2,1
37	2,16	2,16	2,16
38	2,2	2,15	2,2
39	2,2	2,26	2,36
40	2,33	2,3	2,33
41	2,25	2,32	2,33
42	2,28	2,3	2,33
43	2,25	2,26	2,27
44	2,24	2,28	2,29
45	2,21	2,24	2,22
46	2,2	2,22	2,26
47	2,18	2,15	2,3
48	2,2	2,23	2,25
49	2,19	2,24	2,21
50	2,15	2,15	2,18
51	2,16	2,12	2,23
52	2,18	2,21	2,22
53	2,28	2,25	2,21
54	2,26	2,24	2,24
55	2,3	2,29	2,27
56	2,27	2,24	2,29
57	2,31	2,23	2,33
58	2,31	2,32	2,32
59	2,43	2,36	2,39
60	2,55	2,43	2,42
61	2,73	2,67	2,53
62	2,69	2,74	2,68
63	2,86	2,89	2,78
64	2,79	2,89	2,93
65	2,87	2,87	2,87
66	2,84	2,85	2,88
67	2,92	2,91	2,9
68	2,89	2,89	2,84

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
69	2,92	2,9	2,87
70	2,98	2,89	2,84
71	2,9	2,89	2,94
72	3,12	3,09	3,07
73	3,1	3,11	3,05
74	3,16	3,05	3,05
75	3,19	3,18	3,13
76	3,31	3,29	3,21
77	3,31	3,28	3,24
78	3,15	3,22	3,26
79	3,06	3,11	3,16
80	3,13	3,2	3,1
81	3,28	3,26	3,22
82	3,45	3,38	3,33
83	3,38	3,38	3,4
84	3,39	3,44	3,53
85	3,4	3,66	3,59
86	3,64	3,93	3,59
87	3,87	3,61	3,92
88	4,64	4,36	3,92
89	5,19	4,79	4,68
90	6,27	5,52	5,32
91	5,56	5,17	6,26
92	9,51	9,56	5,97
93			
94			
95			
96			
97			
98			
99			
100			
101			
102			

APÊNDICE A

Tabela 4.11 - Resultados experimentais da rugosidade superficial, pela usinagem com a aresta de corte 8 da ferramenta F_4

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
1	1,76	1,8	1,98
2	1,77	1,79	1,79
3	1,77	1,79	1,87
4	1,75	1,79	1,81
5	1,75	1,85	1,85
6	1,76	1,78	1,79
7	1,77	1,76	1,79
8	1,77	1,83	1,85
9	1,76	1,8	1,79
10	1,78	1,8	1,88
11	1,81	1,78	1,85
12	1,81	1,82	2,01
13	1,79	1,86	1,86
14	1,81	1,81	1,86
15	1,76	1,77	1,85
16	1,72	1,81	1,82
17	1,77	1,76	1,78
18	1,81	1,78	1,81
19	1,76	1,78	1,79
20	1,71	1,76	1,77
21	1,73	1,75	1,74
22	2,32	1,79	1,81
23	1,76	1,79	1,83
24	1,77	1,82	1,84
25	1,88	1,91	1,84
26	1,91	1,87	1,9
27	1,92	1,85	1,89
28	1,87	1,84	1,89
29	1,89	1,88	1,91
30	1,91	1,9	1,9
31	1,95	1,98	2,01
32	1,93	2	1,99
33	1,97	1,98	1,97
34	1,98	2,01	2,01

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
35	2,03	2,02	2,01
36	2,02	2,09	2,14
37	2,21	2,09	2,07
38	2,13	2,17	2,13
39	2,16	2,17	2,11
40	2,17	2,15	2,18
41	2,19	2,18	2,19
42	2,16	2,17	2,19
43	2,14	2,17	2,17
44	2,1	2,15	2,14
45	2,09	2,1	2,16
46	2,12	2,13	2,15
47	2,12	2,22	2,21
48	2,21	2,16	2,17
49	2,27	2,26	2,14
50	2,2	2,18	2,22
51	2,18	2,2	2,19
52	2,16	2,17	2,19
53	2,25	2,18	2,25
54	2,29	2,31	2,22
55	2,26	2,22	2,23
56	2,21	2,18	2,29
57	2,12	2,14	2,21
58	2,33	2,32	2,28
59	2,37	2,27	2,27
60	2,28	2,32	2,28
61	2,43	2,46	2,29
62	2,52	2,48	2,42
63	2,8	2,66	2,71
64	2,76	2,68	2,69
65	2,88	2,76	2,83
66	2,82	2,83	2,82
67	2,93	2,96	2,88
68	2,83	2,83	2,84

peça	Rugosidade (μm)		
	A	B	C
69	2,77	2,79	2,78
70	2,9	2,85	2,82
71	2,89	2,97	2,9
72	3,1	3,08	3,04
73	2,99	3,04	3,04
74	3,12	3,12	3,08
75	3,11	3,11	3,02
76	3,28	3,25	3,23
77	3,28	3,22	3,25
78	3,25	3,21	3,32
79	3,21	3,16	3,22
80	3,26	3,27	3,26
81	3,4	3,32	3,26
82	3,53	3,49	3,43
83	3,63	3,59	3,55
84	3,7	3,67	3,68
85	3,76	3,76	3,72
86	3,92	3,83	3,81
87	4,07	4,05	3,98
88	3,98	4,06	4,11
89	3,91	3,9	3,9
90	4,08	3,94	3,93
91	3,43	3,37	3,4
92	3,4	3,37	3,48
93	3,33	3,37	3,31
94	3,45	3,45	3,48
95	3,3	3,39	3,43
96	3,26	3,26	3,3
97	3,17	3,27	3,34
98	3,18	3,29	3,21
99	3,31	3,29	3,25
100	3,23	3,3	3,34
101	3,16	3,23	3,4
102	3,09	3,07	3,32

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

APÊNDICE A

Tabela 4.12 - Valores médios da rugosidade superficial relativos a usinagem com cada uma das arestas de corte 7 e 8 da ferramenta F_4, e média dos valores destas duas arestas

Peça	Rugosidade Média (μm)		
	A_7	A_8	Média
1	1,86	1,85	1,85
2	1,86	1,78	1,82
3	1,86	1,81	1,84
4	1,88	1,78	1,83
5	1,85	1,82	1,83
6	1,85	1,78	1,81
7	1,81	1,77	1,79
8	1,81	1,82	1,82
9	1,78	1,78	1,78
10	1,79	1,82	1,81
11	1,84	1,81	1,83
12	1,81	1,88	1,84
13	1,82	1,84	1,83
14	1,87	1,83	1,85
15	1,84	1,79	1,82
16	1,82	1,78	1,80
17	1,85	1,77	1,81
18	1,88	1,80	1,84
19	1,86	1,78	1,82
20	1,87	1,75	1,81
21	1,87	1,74	1,80
22	1,88	1,97	1,93
23	1,89	1,79	1,84
24	1,90	1,81	1,86
25	1,93	1,88	1,90
26	1,95	1,89	1,92
27	1,98	1,89	1,93
28	1,98	1,87	1,92
29	1,98	1,89	1,94
30	2,01	1,90	1,96
31	2,01	1,98	2,00
32	2,01	1,97	1,99
33	2,01	1,97	1,99
34	2,09	2,00	2,05
35	2,11	2,02	2,06
36	2,11	2,08	2,10
37	2,16	2,12	2,14
38	2,18	2,14	2,16
39	2,27	2,15	2,21
40	2,32	2,17	2,24
41	2,30	2,19	2,24
42	2,30	2,17	2,24
43	2,26	2,16	2,21
44	2,27	2,13	2,20
45	2,22	2,12	2,17
46	2,23	2,13	2,18
47	2,21	2,18	2,20
48	2,23	2,18	2,20
49	2,21	2,22	2,22
50	2,16	2,20	2,18
51	2,17	2,19	2,18
52	2,20	2,17	2,19
53	2,25	2,23	2,24
54	2,25	2,27	2,26
55	2,29	2,24	2,26
56	2,27	2,23	2,25
57	2,29	2,16	2,22
58	2,32	2,31	2,31
59	2,39	2,30	2,35
60	2,47	2,29	2,38
61	2,64	2,39	2,52
62	2,70	2,47	2,59
63	2,84	2,72	2,78
64	2,87	2,71	2,79
65	2,87	2,82	2,85
66	2,86	2,82	2,84
67	2,91	2,92	2,92
68	2,87	2,83	2,85
69	2,90	2,78	2,84
70	2,90	2,86	2,88
71	2,91	2,92	2,92
72	3,09	3,07	3,08
73	3,09	3,02	3,06
74	3,09	3,11	3,10
75	3,17	3,08	3,12
76	3,27	3,25	3,26
77	3,28	3,25	3,26
78	3,21	3,26	3,24
79	3,11	3,20	3,15
80	3,14	3,26	3,20
81	3,25	3,33	3,29
82	3,39	3,48	3,44
83	3,39	3,59	3,49
84	3,45	3,68	3,57
85	3,55	3,75	3,65
86	3,72	3,85	3,79
87	3,80	4,03	3,92
88	--	4,05	--
89	--	3,90	--
90	--	3,98	--
91	--	3,40	--
92	--	3,42	--
93	--	3,34	--
94	--	3,46	--
95	--	3,37	--
96	--	3,27	--
97	--	3,26	--
98	--	3,23	--
99	--	3,28	--
100	--	3,29	--
101	--	3,26	--
102	--	3,16	--

APÊNDICE A

Tabela 4.13 - Rugosidade superficial média, obtida pela usinagem com as arestas de corte 1, 2, 3 e 4 das ferramentas F_1 e F_2

Peça	Rugosidade Média (μm)
1	1,81
2	1,78
3	1,82
4	1,85
5	1,90
6	1,89
7	1,94
8	1,95
9	1,98
10	2,00
11	2,01
12	2,02
13	2,03
14	2,05
15	2,05
16	2,05
17	2,04
18	2,07
19	2,08
20	2,08
21	2,07
22	2,08
23	2,06
24	2,08
25	2,11
26	2,09
27	2,07
28	2,07
29	2,05
30	2,06
31	2,10
32	2,08
33	2,09
34	2,09
35	2,10
36	2,13
37	2,14
38	2,13
39	2,14
40	2,16
41	2,16
42	2,15
43	2,17
44	2,15
45	2,19
46	2,17
47	2,20
48	2,21
49	2,22
50	2,24
51	2,20
52	2,28
53	2,28
54	2,23
55	2,18
56	2,28
57	2,25
58	2,21
59	2,31
60	2,33
61	2,34
62	2,38
63	2,32
64	2,27
65	2,35
66	2,34
67	2,43
68	2,39
69	2,33
70	2,27
71	2,34
72	2,34
73	2,42
74	2,45
75	2,45
76	2,45
77	2,40
78	2,44
79	2,49
80	2,50
81	2,49
82	2,54
83	2,54
84	2,58
85	2,59
86	2,66
87	2,70
88	2,70
89	2,80
90	2,77
91	2,84
92	2,88
93	2,87
94	2,93
95	2,96
96	3,12
97	3,14
98	3,10
99	3,15
100	3,19
101	3,17
102	3,26

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

APÊNDICE A

Tabela 4.14 - Rugosidade superficial média, obtida pela usinagem com as arestas de corte 5, 6, 7 e 8 das ferramentas F_3 e F_4

Peça	Rugosidade Média (μm)
1	1,81
2	1,79
3	1,80
4	1,80
5	1,79
6	1,79
7	1,77
8	1,80
9	1,77
10	1,79
11	1,83
12	1,82
13	1,82
14	1,84
15	1,83
16	1,81
17	1,82
18	1,86
19	1,85
20	1,83
21	1,84
22	1,92
23	1,89
24	1,90
25	1,96
26	1,97
27	1,98
28	1,97
29	1,99
30	2,01
31	2,04
32	2,05
33	2,07
34	2,11

Peça	Rugosidade Média (μm)
35	2,14
36	2,14
37	2,18
38	2,21
39	2,26
40	2,27
41	2,29
42	2,28
43	2,27
44	2,25
45	2,22
46	2,22
47	2,23
48	2,23
49	2,26
50	2,20
51	2,22
52	2,24
53	2,27
54	2,34
55	2,35
56	2,28
57	2,30
58	2,35
59	2,40
60	2,47
61	2,58
62	2,65
63	2,77
64	2,74
65	2,77
66	2,74
67	2,81
68	2,76

Peça	Rugosidade Média (μm)
69	2,75
70	2,78
71	2,82
72	2,94
73	2,93
74	2,99
75	3,01
76	3,12
77	3,13
78	3,15
79	3,11
80	3,17
81	3,24
82	3,40
83	3,46
84	3,56
85	3,61
86	
87	
88	
89	
90	
91	
92	
93	
94	
95	
96	
97	
98	
99	
100	
101	
102	

unesp

RODRIGUES, H. L. Variation in carbide cemented tool-life with TiN on finishing operation in the turning process. Guaratinguetá, 1997. 112p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Faculdade de Engenharia, Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho".

ABSTRACT

The variations in carbide cemented cutting tools life, coated with titanium nitride and intermediate layers of titanium carbide and aluminum oxide, was identified and analysed in steel machining. Therefore, a machining process under laboratory controlled conditions was realized, fixing the feed rate and depth cutting. In order to characterize the material homogeneity of piecework, hardness test and micrographic and chemical analysis was realized, what resulted in metal identification like ABNT-1050 steel. The life tool was quantified by determinist methods, using the surface roughness values of machining pieces like end tool life criterion. For each speed cutting of 350 and 403 meters by minute, four sets of 102 pieces was machined with three roughness measurements being realized. The results showed that the surface roughness behaviour in function of machined piece number for each one edge, when compared with itself medium behaviour, presented significative variations. It was concluded that variations can be connected with non-homogeneity and different times of coated life, the initial roughness of tools surface and insert geometrical changes caused by damage. The similarity between the wear behaviour of incidence surface and surface roughness in function of pieces machining times was also concluded.

Key words: tool life variations; machining; coating; cutting edge; surface roughness.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

1 - Estudo do comportamento da rugosidade superficial em relação do número de peças usinadas, baseando-se na dureza, rugosidade superficial, espessura e aderência dos revestimentos em pastilhas de metal duro.

2 - Monitoramento do desgaste de flanco em função do número de peças usinadas para pastilhas com revestimento múltiplo.

3 - Estudo dos mecanismos operantes de desgaste nas pastilhas com revestimento múltiplo.

4 - Monitoramento dos desgastes para cada um dos revestimentos da pastilha em função do número de peças usinadas.

5 - Estudo da influência da velocidade de corte na variação da vida de pastilhas com revestimento múltiplo.

unesp

Autorizo a reprodução deste trabalho.

Guaratinguetá, 19 de dezembro de 1997.

HUMBERTO LOPES RODRIGUES

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