

FLÁVIA CRISTINA SOUSA E SILVA

**DIAGNÓSTICO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO
DO AÇO INOXIDÁVEL ABNT 304 A PARTIR DO
ESTUDO DA FORMAÇÃO DO CAVACO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
2007

FLÁVIA CRISTINA SOUSA E SILVA

**DIAGNÓSTICO DO PROCESSO DE TORNEAMENTO DO AÇO
INOXIDÁVEL ABNT 304 A PARTIR DO ESTUDO DA FORMAÇÃO DO
CAVACO**

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como
parte dos requisitos para a obtenção do título
de **MESTRE EM ENGENHARIA
MECÂNICA.**

Área de Concentração: Materiais e Processos
de Fabricação.

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva,
PhD.

UBERLÂNDIA – MG

2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

S586d Silva, Flávia Cristina Sousa e, 1980-
Diagnóstico do processo de torneamento do aço inoxidável ABNT 304
a partir do estudo da formação do cavaco / Flávia Cristina Sousa e Silva. -
2007.
89 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Ferramentas para cortar metais - Teses. 2. Usinagem - Teses. 2. Metais - Corte - Teses. I. Silva, Márcio Bacci da. II. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. IV. Título.

CDU: 621.941.025

**Aos meus pais e ao meu irmão, que são o
que tenho de mais importante na minha
vida.**

AGRADECIMENTOS

Ao professor Márcio Bacci da Silva pela orientação, paciência e confiança depositada neste trabalho.

À minha família, por todo amor e apoio incondicionais.

Ao professor Álisson Rocha Machado pela ajuda e incentivo na realização do mestrado.

À Universidade Federal de Uberlândia e ao Programa de Pós-Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este Curso.

A todos os meus colegas do LEPU e de outros laboratórios, pela amizade e pelo auxílio na realização dos testes.

A todos os técnicos de todos os laboratórios que colaboraram na realização dos testes.

Ao Instituto Fábrica do Milênio – IFM, no qual este trabalho está inserido.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo.

Às agências de fomento CNPq, CAPES e FAPEMIG, pelo apoio financeiro.

E SILVA, F. C. S. **Diagnóstico do Processo de Torneamento do Aço Inoxidável ABNT 304 a partir do Estudo da Formação do Cavaco.** 2007. 89 fls. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Resumo

Os aços inoxidáveis são materiais que apresentam em geral baixa usinabilidade devido principalmente à alta taxa de encruamento durante a usinagem e produção de cavacos longos que levam a um desgaste acelerado da ferramenta. Por isso, torna-se importante identificar a relação entre a evolução do desgaste e a morfologia do cavaco. Foram realizados testes de desgaste da ferramenta utilizando ferramentas de metal duro revestidas no torneamento do aço inoxidável ABNT 304. A cada passe foi monitorado o desgaste da ferramenta. Foram recolhidas amostras de cavacos correspondentes a cada estágio de desgaste monitorado e medido. Para cada amostra de cavaco foi medida a sua espessura, da qual se calculou o grau de recalque e o ângulo de cisalhamento. Foi realizado também análise do tipo e da forma do cavaco. Em seguida foi feita a análise metalográfica. Foram realizados testes onde se mediou a temperatura do cavaco através de um sensor infravermelho. Nestes ensaios, o desgaste também foi monitorado. E por fim, realizou-se um ensaio utilizando a técnica do “quick-stop” para identificar a raiz do cavaco e o mecanismo de desgaste da ferramenta. Os resultados mostraram que é possível estabelecer uma relação entre os estágios do desgaste com a morfologia do cavaco. Com o maior valor de desgaste obteve-se o maior grau de recalque e menor ângulo de cisalhamento. Em contrapartida, com o menor valor de desgaste obteve-se o menor grau de recalque e maior ângulo de cisalhamento. De acordo com os resultados obtidos, a espessura do cavaco aumenta com o desgaste da ferramenta, ou seja, o grau de recalque aumenta.

Palavras-chave: Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304, Monitoramento de Desgaste de Ferramenta, Espessura do Cavaco, Grau de Recalque, Temperatura do Cavaco.

E SILVA, F. C. S. **Diagnostic of Turning Operation of ABNT 304 Stainless Steel through Chip Analysis.** 2007. 89 fls. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

Abstract

Stainless steels are materials that generally present low machinability mainly because the high ability to workharden during the cutting process and the long chips produced that lead to a rapid tool wear. It is possible that there is a correlation between tool wear and chip morphology, and therefore, the chip formed could give a diagnosis of the process. In this work turning experiments were carried out in ABNT 304 stainless steel using coated cemented carbides tools. During the operation, tool wear was monitored and chips samples collected for different tool wear stages to be analyzed. Chip thickness was measured for each sample and chip thickness ratio and primary shear plane angle were calculated. Some metallographic analysis of the samples was also used to identify some characteristics of the process. The chips were also classified into different types and shapes. During the operation, chip temperature was measured using infrared sensor. Some samples from quick-stop experiments were analyzed to get information about flow zone thickness. The results showed that it is possible to establish a relation between tool wear and chip morphology. There is also a good correlation between tool wear and chip temperature. The results show that temperature increases with tool wear.

Keywords: Austenitic stainless steel, tool wear monitoring, chip thickness, chip thickness ratio, chip temperature.

Lista de Figuras

Figura 2.1 – Diagrama da aresta cortante [Trent, 2000]	4
Figura 2.2 – Esquema demonstrando as zonas de cisalhamento primária e secundária [Machado e Da Silva, 2004]	5
Figura 2.3 – Classificação das formas dos cavacos pela ISO 3685 [1977]	11
Figura 2.4 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos [Machado e Da Silva, 2004]	12
Figura 2.5 – Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte [Vieregge, 1970, citado por Machado e Da Silva, 2004]	14
Figura 2.6 – Mecanismos de desgaste proposto por Trent e Wright [2000]	14
Figura 2.7 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte [Dearnley, 1982]	16
Figura 2.8 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte [ISO 3685, 1977]	17
Figura 2.9 – Zonas de geração de calor em usinagem [Machado e Da Silva, 2004]	19
Figura 2.10 – Esquema para medição da temperatura de corte pelo método do termopar ferramenta-peça [De Melo, 1998]	23
Figura 2.11 – Esquema de aparelhagem de calibração do termopar ferramenta-peça-cavaco [Ferraresi, 1970]	23
Figura 2.12 – Medida da temperatura da ferramenta através de termopares [Ferraresi, 1970]	24

Figura 2.13 – Seção de uma ferramenta de médio carbono usinada a 27 m/min, com avanço de 0,25 mm/rev. (a) Fotomicrografia mostrando as marcas da indentação. (b) Isotermas determinadas pelas medidas de dureza [Trent, 2000]	26
Figura 2.14 – Distribuição bidimensional de temperatura na ferramenta através do método de elementos finitos [Carvalho, 2003]	27
Figura 2.15 – Aço inoxidável ABNT 409 recozido por uma hora a 870°C e resfriado no ar. Ataque: 10ml HNO ₃ - 10ml ácido acético - 15ml HCl - 2 gotas de glicerol. (100X) [Callister Jr., 2001]	32
Figura 2.16 – Aço inoxidável martensítico ABNT 440C, austenitizado por 1 hora à 1010°C, resfriado no ar e revenido 2h à 230°C. Ataque: Reativo de Vilella. (500X) [Callister Jr., 2001]	33
Figura 2.17 – Aço inoxidável ABNT 316 recozido à 1035°C e temperado. Ataque: H ₂ O-HCl-HNO ₃ (100X) [Callister Jr., 2001]	34
Figura 3.1 – Aço inoxidável austenítico 304 (126X)	39
Figura 3.2 – Torno Revolution 220 da Deb`Maq	40
Figura 3.3 – Vista em corte do dispositivo “quick-stop” do LEPU [Evangelista et al., 2006]	41
Figura 3.4 – Mira da posição de medida de temperatura do sensor infravermelho	44
Figura 3.5 – Programa de aquisição de temperatura do sensor em funcionamento	45
Figura 3.6 – Ferramentas desgastadas artificialmente: a) VB \cong 0,2 mm; b) VB \cong 0,5 mm	46

Figura 4.1 – Variação da espessura do cavaco com o desgaste da ferramenta para as várias velocidades de corte estabelecidas na usinagem do aço inox ABNT 304	48
Figura 4.2 – Variação da espessura do cavaco com a velocidade de corte para cada nível de desgaste da ferramenta utilizado na usinagem do aço inox ABNT 304	49
Figura 4.3 – Forma e tipo dos cavacos obtidos nos ensaios	51
Figura 4.4 – Efeito do desgaste na temperatura do cavaco	54
Figura 4.5 – Efeito da velocidade de corte na temperatura do cavaco	55
Figura 4.6 – Amostra da raiz do cavaco para $VB = 0$ mm; $Vc = 150$ m/min (20 X)	57
Figura 4.7 – Amostra da raiz do cavaco para $VB = 0,2$ mm; $Vc = 150$ m/min (20 X)	57
Figura 4.8 – Detalhe dos sinais de adesão do material na raiz do cavaco da amostra usinada com $VB = 0,2$ mm; $Vc = 150$ m/min (200X)	58
Figura 4.9 – Amostra da raiz do cavaco para $VB = 0,5$ mm; $Vc = 150$ m/min (20 X)	59
Figura 4.10 – (a) Metalografia da amostra usinada com $VB = 0$ mm; (b) Metalografia da amostra usinada com $VB = 0,2$ mm e (c) Metalografia da amostra usinada com $VB = 0,5$ mm (40 X)	60
Figura 4.11 – Ferramenta utilizada no teste de desgaste: (a) aresta 1, (b) aresta 2, (c) aresta 3	60
Figura 4.12 – Ferramenta utilizada no teste de temperatura: (a) aresta 1, (b) aresta 2, (c) aresta 3	61

Figura I.1 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 1, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 69

Figura I.2 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 2, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,1 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 70

Figura I.3 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 3, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,2 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 70

Figura I.4 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 4, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,3 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 71

Figura I.5 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 5, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,4 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 71

Figura I.6 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 6, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,5 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 72

Figura I.7 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 9, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 130 \text{ m/min}$ e $VB = 0,2 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 72

Figura I.8 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 12, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 130 \text{ m/min}$ e $VB = 0,5 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 73

Figura I.9 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 13, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 150$ m/min e $VB = 0$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 73

Figura I.10 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 13, utilizando as seguintes condições: $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,1$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 74

Figura I.11 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 17, utilizando as seguintes condições: $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,4$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 74

Figura I.12 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 18, utilizando as seguintes condições: $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,5$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 75

Figura I.13 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 21, utilizando as seguintes condições: $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,2$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 75

Figura I.14 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 24, utilizando as seguintes condições: $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,5$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 76

Figura I.15 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 25, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 76

Figura I.16 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 26, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,1$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X,
respectivamente 77

Figura I.17 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 27, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,2$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente 77

Figura I.18 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 29, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,4$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente 78

Figura I.19 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 30, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,5$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente 78

Figura II.1. Sinal de temperatura do cavaco durante o 1º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min e $VB = 0$ mm 79

Figura II.2. Sinal de temperatura do cavaco durante o 2º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min e $VB = 0$ mm 79

Figura II.3. Sinal de temperatura do cavaco durante o 3º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min e $VB = 0$ mm 80

Figura II.4. Sinal de temperatura do cavaco durante o 4º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min e $VB = 0$ mm 80

Figura II.5. Sinal de temperatura do cavaco durante o 5º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min e $VB = 0$ mm 80

Figura II.6. Sinal de temperatura do cavaco durante o 6º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min e $VB = 0,1$ mm 81

Figura II.7. Sinal de temperatura do cavaco durante o 7º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min e $VB = 0,1$ mm 81

Figura II.8. Sinal de temperatura do cavaco durante o 8º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min e
e $V_B = 0,1$ mm 81

Figura II.9. Sinal de temperatura do cavaco durante o 9º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min e
e $V_B = 0,1$ mm 82

Figura II.10. Sinal de temperatura do cavaco durante o 10º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min
e $V_B = 0,1$ mm 82

Figura II.11. Sinal de temperatura do cavaco durante o 11º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min
e $V_B = 0,2$ mm 82

Figura II.12. Sinal de temperatura do cavaco durante o 12º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min
e $V_B = 0,2$ mm 83

Figura II.13. Sinal de temperatura do cavaco durante o 13º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min
e $V_B = 0,2$ mm 83

Figura II.14. Sinal de temperatura do cavaco durante o 14º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min
e $V_B = 0,2$ mm 83

Figura II.15. Sinal de temperatura do cavaco durante o 15º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min
e $V_B = 0,2$ mm 84

Figura II.16. Sinal de temperatura do cavaco durante o 16º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min
e $V_B = 0,3$ mm 84

Figura II.17. Sinal de temperatura do cavaco durante o 17º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min
e $V_B = 0,3$ mm 84

Figura II.18. Sinal de temperatura do cavaco durante o 18º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min
e $V_B = 0,3$ mm 85

Figura II.19. Sinal de temperatura do cavaco durante o 19º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min
e $V_B = 0,3$ mm 85

Figura II.20. Sinal de temperatura do cavaco durante o 20º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min
e $V_B = 0,3$ mm 85

Figura II.21. Sinal de temperatura do cavaco durante o 21º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min
e $V_B = 0,4$ mm 86

Figura II.22. Sinal de temperatura do cavaco durante o 22º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min
e $V_B = 0,4$ mm 86

Figura II.23. Sinal de temperatura do cavaco durante o 23º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min
e $V_B = 0,4$ mm 86

Figura II.24. Sinal de temperatura do cavaco durante o 24º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min
e $V_B = 0,4$ mm 87

Figura II.25. Sinal de temperatura do cavaco durante o 25º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min
e $V_B = 0,4$ mm 87

Figura II.26. Sinal de temperatura do cavaco durante o 26º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min
e $V_B = 0,5$ mm 87

Figura II.27. Sinal de temperatura do cavaco durante o 27º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min
e $V_B = 0,5$ mm 88

Figura II.28. Sinal de temperatura do cavaco durante o 28º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min
e $V_B = 0,5$ mm 88

Figura II.29. Sinal de temperatura do cavaco durante o 29º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min
e $V_B = 0,5$ mm 88

Figura II.30. Sinal de temperatura do cavaco durante o 30º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min
e $V_B = 0,5$ mm

89

Lista de Tabelas

Tabela 2.1 – Método para o Monitoramento do Estado de Ferramentas de Corte	29
Tabela 3.1. Composição do aço inoxidável austenítico ABNT 304	39
Tabela 3.2 – Condições de corte utilizadas nos ensaios obtenção de amostras de cavaco para vários níveis de desgaste da ferramenta	42
Tabela 4.1 – Espessura dos cavacos relacionados à velocidade de corte e desgaste da ferramenta em mm	47
Tabela 4.2 – Grau de recalque e ângulo de cisalhamento das amostras de cavaco	50
Tabela 4.3 – Temperatura máxima e morfologia do cavaco em cada ensaio realizado	53

Lista de Símbolos e Abreviaturas

ϕ : Ângulo de cisalhamento primário

h : Espessura do metal a ser removido da peça

h' : Espessura do cavaco

R_c : Grau de recalque

γ_n : Ângulo de saída normal

γ_o : Ângulo de saída no corte ortogonal

β : Ângulo de atrito médio entre o cavaco e a ferramenta

K : Constante do material da peça

γ_{ne} : Ângulo de saída normal efetivo

VB : Desgaste de flanco médio

$VB_{máx}$: Desgaste de flanco máximo

KT : Profundidade do desgaste de cratera

VN : Desgaste de entalhe

f_n : Avanço

APC : Aresta postiça de corte

α_0 : Ângulo de Folga

a_p : Profundidade de corte

V_c : Velocidade de corte

χ_r : Ângulo de posição da aresta principal de corte

SUMÁRIO

CAPÍTULO I – Introdução	01
CAPÍTULO II – Revisão Bibliográfica	03
2.1. Formação do Cavaco	03
2.1.1. Mecanismo de Formação do Cavaco	03
2.1.2. Espessura do Cavaco, Grau de Recalque e Ângulo de Cisalhamento	05
2.1.3. Tipos de Cavacos	07
2.1.3.1. <i>Cavaco Contínuo</i>	08
2.1.3.2. <i>Cavaco Parcialmente Contínuo</i>	09
2.1.3.3. <i>Cavaco Descontínuo</i>	09
2.1.3.4. <i>Cavaco Segmentado</i>	10
2.1.4. Forma de Cavaco	10
2.1.5. Controle de Cavacos: Quebra-Cavacos.....	12
2.2. Desgaste de Ferramentas	13
2.2.1. Mecanismos de Desgastes.....	13
2.2.1.1. <i>Deformação Plástica Superficial por Cisalhamento a Altas Temperaturas</i>	15
2.2.1.2. <i>Deformação Plástica sob Altas Tensões de Compressão</i>	15
2.2.1.3. <i>Desgaste por Difusão</i>	15
2.2.1.4. <i>Aderência e Arrastamento (“Attrition”)</i>	16
2.2.1.5. <i>Desgaste por Abrasão</i>	16
2.2.2. Formas de Desgaste nas Ferramentas de Corte.....	16
2.3. Temperatura de Corte	18
2.3.1. Geração de Calor.....	18
2.3.1.1. <i>Calor Gerado na Zona de Cisalhamento Primária</i>	20
2.3.1.2. <i>Calor Gerado na Zona de Cisalhamento Secundária</i>	20
2.3.2. Efeito dos Parâmetros de Corte sobre a Temperatura de Corte	21
2.3.3. Medição Experimental da Temperatura de Usinagem.....	22
2.3.3.1. <i>Método do Termopar Ferramenta-Peça</i>	22
2.3.3.2. <i>Método da Inserção de Termopares na Ferramenta de Corte</i>	24

2.3.3.3. <i>Radiação Infravermelha</i>	24
2.3.3.4. <i>Método dos Vernizes Termosensíveis</i>	25
2.3.3.5. <i>Método de Técnicas Metalográficas</i>	25
2.3.3.6. <i>Método de Elementos Finitos</i>	26
2.3.3.7. <i>Método de Problemas Inversos em Condução de Calor</i>	27
2.4. Monitoramento de Processos de Usinagem	28
2.5. Usinagem de Aços Inoxidáveis.....	30
2.5.1. Aços Inoxidáveis.....	30
2.5.2. Classificação dos Aços Inoxidáveis.....	30
2.5.2.1. <i>Aços Inoxidáveis Ferríticos</i>	31
2.5.2.2. <i>Aços Inoxidáveis Martensíticos</i>	32
2.5.2.3. <i>Aços Inoxidáveis Austeníticos</i>	33
2.5.2.4. <i>Aços Inoxidáveis Duplex</i>	35
2.5.2.5. <i>Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação</i>	35
2.5.4. Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis	35
CAPÍTULO III – Procedimento Experimental	38
3.1. Materiais e Equipamentos.....	38
3.1.1. Peça	38
3.1.2. Ferramentas de Corte	40
3.1.3. Equipamentos Utilizados	40
3.2. Metodologia	42
3.2.1. Obtenção de Amostras de Cavaco para Vários Níveis de Desgaste da Ferramenta	42
3.2.2. Teste de Temperatura.....	44
3.2.3. Teste com Método “Quick-Stop”	45
CAPÍTULO IV – Resultados e Análise	47
4.1. Análise das Amostras de Cavaco	47
4.2. Temperatura do Cavaco	52
4.3. Teste com Técnica de “Quick-Stop”	56
4.4. Forma de Desgaste da Ferramenta.....	60

CAPÍTULO V – Conclusão	62
CAPÍTULO VI – Sugestões para Trabalhos Futuros	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Os aços inoxidáveis são materiais de suma importância na indústria e têm grande emprego em equipamentos de processo, devido às suas excelentes propriedades químicas como alta resistência a corrosão e resistência a temperaturas elevadas. Contudo, são materiais de difícil usinabilidade. E, além disso, os aços inoxidáveis austeníticos estão na classe dos mais difíceis de usinar. Por esta razão, é de extremo interesse da indústria conhecer técnicas para se monitorar a usinagem desses materiais, já que os aços de usinabilidade melhorada podem ser uma alternativa, porém, algumas vezes, não possuem o mesmo campo de aplicação.

As condições de corte, quando possível, são escolhidas a fim de se evitar ou minimizar a formação de cavacos de características indesejáveis e, portanto, prejudiciais. Os aços inoxidáveis austeníticos apresentam, em geral, cavacos longos que levam a um desgaste acelerado da ferramenta. Sendo assim, estudos que têm como objetivo desenvolver métodos de controle do cavaco para minimizar problemas durante a usinagem se tornam interessantes.

As altas taxas de desgaste em ferramentas, principalmente na usinagem de aços inoxidáveis austeníticos é um fator inevitável, devido ao fato destes materiais serem considerados de difícil usinabilidade pela elevada capacidade de encruamento. O contato entre cavaco e ferramenta possui uma extensa área em relação à área de contato cavaco-ferramenta na usinagem de outros materiais. Desta forma, altas temperaturas são geradas, acelerando o processo de desgaste.

Poder determinar o nível de desgaste da ferramenta através de algum método de monitoramento que não necessitasse interromper o processo de corte seria uma alternativa para evitar custos adicionais e diminuição da produtividade.

Como todo o processo de formação do cavaco gera deformação e acréscimo de temperatura, que ocorrem diretamente na interface cavaco-ferramenta, o cavaco pode ser relacionado diretamente ao desgaste da ferramenta.

Este trabalho tem por objetivo determinar a relação entre a morfologia e temperatura dos cavacos produzidos no torneamento cilíndrico externo do aço inoxidável austenítico ABNT 304 com os diferentes níveis de desgaste em ferramenta de metal duro revestida, e está subdividido da seguinte forma:

- **Capítulo 1:** Introdução.
- **Capítulo 2:** Revisão Bibliográfica – Neste capítulo são estudados os fundamentos sobre formação de cavaco, métodos de monitoramento de desgaste de ferramenta e aços inoxidáveis.
- **Capítulo 3:** Procedimentos Experimentais – Neste capítulo são descritos os equipamentos, as ferramentas e a metodologia empregados na parte experimental deste trabalho.
- **Capítulo 4:** Resultados e Discussões – Neste capítulo são apresentados e analisados os resultados obtidos através dos procedimentos experimentais realizados.
- **Capítulo 5:** Conclusões – Neste capítulo são apresentadas as conclusões oriundas do presente trabalho.
- **Capítulo 6:** Sugestões para Trabalhos Futuros – Neste capítulo são apresentadas sugestões para trabalhos futuros a serem realizados nesta área de estudo.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. FORMAÇÃO DO CAVACO

2.1.1. Mecanismo de Formação do Cavaco

Apesar de bastante conhecido, o mecanismo de formação do cavaco não é um processo óbvio, pois as velocidades e as deformações que ocorrem são muito grandes comparadas com aquelas tratadas na teoria da plasticidade [Ferraresi, 1970]. Por conseguinte, o corte ortogonal é utilizado para simplificar o estudo do mecanismo. No corte ortogonal o fenômeno de formação do cavaco é visto através de um ponto de vista bidimensional, que ocorre no plano de trabalho, onde a aresta cortante é reta, normal à direção de corte e à direção de avanço. Através deste modelo, pode-se determinar as forças atuantes e os fenômenos envolvidos no processo de formação do cavaco e estender os resultados ao corte tridimensional, às vezes, com algumas ressalvas [Machado e Da Silva, 2004].

Através do diagrama proposto por Trent [2000], mostrado na figura 2.1, o mecanismo de formação do cavaco é representado, considerando o volume de material “klmn” se movendo em direção à aresta cortante.

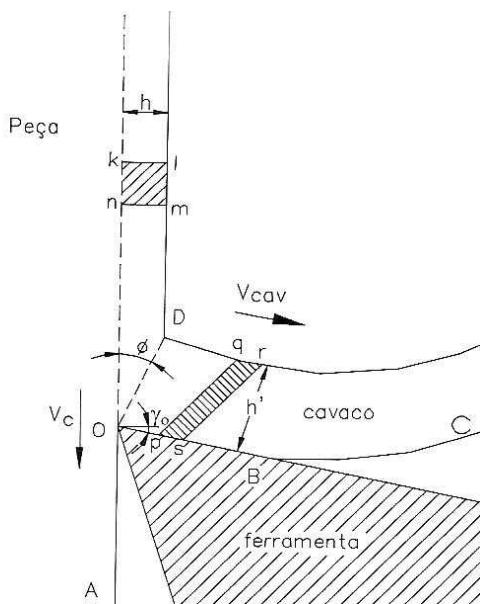


Figura 2.1 – Diagrama da aresta cortante [Trent, 2000]

O material se move até que a ferramenta comece a recalcar a porção de material “klmn”, que passa a sofrer deformações elásticas neste ponto. Como o processo é contínuo, o limite de escoamento do material é ultrapassado, de tal forma que o material começa a se deformar plasticamente. As deformações plásticas continuam ocorrendo de forma que as tensões não são mais suficientes para manter esse regime. Neste ponto, define-se a zona de cisalhamento primária, que na figura 2.1 é representada pelo segmento OD. Devido ao avanço da ferramenta, as tensões ultrapassam o limite de resistência do material dentro da zona de cisalhamento primária. Desta forma, inicia-se uma trinca no ponto O, que pode se estender até o ponto D. A ductilidade ou fragilidade do material irá determinar a propagação da trinca e, consequentemente, se o tipo de cavaco será contínuo ou descontínuo.

Quando a porção “klmn” atravessa a zona de cisalhamento primária, ela se move sobre a superfície de saída da ferramenta, e as conseqüentes deformações plásticas que ela continua sofrendo fazem se transformar no volume “pqrs”. Essa nova porção de material atravessa a superfície de saída da ferramenta ainda sofrendo altíssimas deformações plásticas cisalhantes [Machado e Da Silva, 2004]. Essa região é definida como a zona de cisalhamento secundária, que na figura 2.1 está definida pelo segmento OB.

Ao se completar todo esse ciclo de transformações sofrido por cada porção de material que adentra a zona de cisalhamento primária, tem-se a formação de uma lamela de cavaco. E como depois de cada porção vem seguindo outra, similar, que atravessa todo o ciclo novamente, dá-se, assim, o mecanismo de formação do cavaco [Machado e Da Silva, 2004].

2.1.2. Espessura do Cavaco, Grau de Recalque e Ângulo de Cisalhamento

A espessura do cavaco em usinagem não é determinada apenas pela geometria da ferramenta e pela espessura do material a ser usinado, mas também pelas condições do contato existente na interface cavaco-ferramenta. O fato do processo de corte ser afetado por estes fatores, difere fundamentalmente de outros processos de deformação de material, onde a forma final do material deformado é determinada pela forma ou pelo ajuste da ferramenta utilizada [Boothroyd, 1989]. A espessura do cavaco pode ser medida diretamente no cavaco, através do auxílio de micrômetros.

Durante a etapa em que o material está passando através da zona de cisalhamento primária ocorrem grandes deformações plásticas. O segmento OD, na figura 2.1, aparece definindo o chamado plano de cisalhamento primário. O ângulo definido entre o plano de corte e o plano de cisalhamento primário é denominado ângulo de cisalhamento ϕ , está representado na figura 2.2.

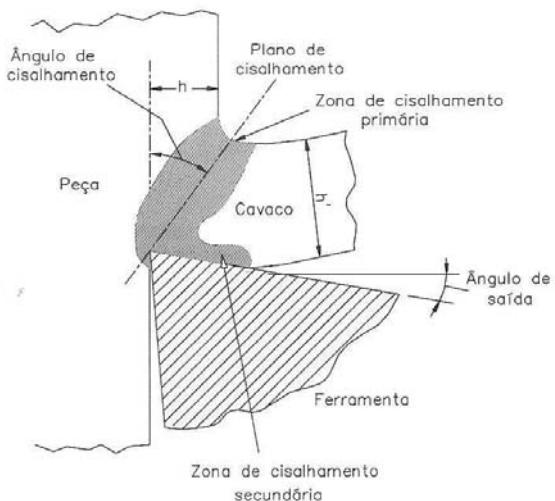


Figura 2.2 – Esquema demonstrando as zonas de cisalhamento primária e secundária
[Machado e Da Silva, 2004]

Pela figura 2.2 percebe-se que a espessura h' do cavaco é maior que a espessura h do material a ser removido da peça. A este fenômeno dá-se o nome de recalque. O grau de recalque, R_c , representa o percentual de deformação sofrido pelo cavaco no plano de cisalhamento primário, e é definido pela relação [Ferraresi, 1970]:

$$Rc = \frac{h'}{h} \quad (2.1)$$

O ângulo de cisalhamento ϕ pode ser calculado através da medição da espessura do cavaco, h' , assim:

$$\operatorname{tg} \phi = \frac{\cos \gamma_n}{(Rc - \operatorname{sen} \gamma_n)} \quad (2.2)$$

onde γ_n é o ângulo de saída normal, medido no plano normal, que para o corte ortogonal vale γ_0 .

A equação 2.2 também mostra que o conhecimento do ângulo de cisalhamento permite estimar a espessura do cavaco através das condições de corte pré-ajustadas.

O ângulo de cisalhamento e o grau de recalque do cavaco são os indicadores da deformação da zona de cisalhamento primária. Altos valores do grau de recalque correspondem a baixos valores do ângulo de cisalhamento e isso indica grandes deformações na zona de cisalhamento primária. Experimentalmente, o ângulo de cisalhamento e, consequentemente, o grau de recalque, dependem dos materiais da peça e da ferramenta e das condições de corte.

Há muitas dificuldades em se medir o ângulo de cisalhamento. Portanto, muitas tentativas foram realizadas para se determiná-lo experimentalmente. Uma delas está demonstrada na equação 2.2. A direção indicada pelo ângulo de cisalhamento representa a direção onde a tensão de cisalhamento é máxima. Baseado nisso, pesquisadores desenvolveram algumas outras fórmulas para calculá-lo.

A teoria de Ernst e Merchant, citada por Machado e Da Silva [2004] se baseia no corte ortogonal com formação contínua de cavaco e admitem ainda a hipótese da tensão média cisalhante ser função apenas do material usinado. A equação 2.3 mostra a fórmula que descreve a teoria.

$$2\phi + \beta - \gamma_{ne} = \operatorname{arc cot} g(K) \quad (2.3)$$

Onde:

β = ângulo de atrito médio entre o cavaco e a ferramenta.

K = constante do material da peça.

γ_{ne} = ângulo de saída normal efetivo.

A hipótese de Lee e Shaffer, citada por Machado e Da Silva [2004], também leva em consideração o corte ortogonal com formação contínua de cavaco, a tensão de cisalhamento que ocorre no plano de cisalhamento primário sendo máxima e admite o comportamento do material como sendo plástico ideal, havendo na região de cisalhamento uma distribuição uniforme de tensões [Ferraresi, 1970]. A equação 2.4 resume a hipótese:

$$\phi + \beta - \gamma_{ne} = \frac{\pi}{4} \quad (2.4)$$

Apesar de todas as hipóteses que existem para o cálculo do ângulo de cisalhamento baseadas em considerações teóricas fornecerem valores do ângulo de cisalhamento bem próximos da realidade, deve-se levar em consideração que a maioria dos casos práticos de usinagem é de corte tridimensional, onde há a influência da aresta lateral de corte, tornando o estudo muito mais complicado [Ferraresi, 1970].

A zona de cisalhamento secundária está localizada dentro da interface cavaco-ferramenta. Nessa região, ocorre uma grande resistência ao escoamento do cavaco e, desta forma, é consumida uma grande quantidade de energia. Logo, a zona de cisalhamento secundária também exerce influência no valor do grau de recalque e ângulo de cisalhamento, ou seja, quando o cavaco sofre maior resistência ao seu movimento e o comprimento da zona de cisalhamento secundária é maior, tem-se um menor valor do ângulo de cisalhamento e o grau de recalque maior, sendo estes também indicadores da energia consumida pelo cavaco nesta região [Boothroyd, 1989].

2.1.3. Tipos de Cavacos

A tensão normal no plano de cisalhamento, influenciada pelo ângulo de saída ou pela região de contato com a ferramenta, é uma variável importante para se determinar se o tipo de cavaco será contínuo ou descontínuo. Também são variáveis importantes a velocidade de corte, a profundidade de corte, as inclusões no material de corte e a rigidez da ferramenta [Cook et al, 1954].

A bibliografia é composta de diversas formas de classificação quanto ao tipo de cavaco. Ferraresi [1970] sugere a divisão mais comum, em três tipos: cavacos contínuos, descontínuos e parcialmente contínuos ou de cisalhamento. Contudo, uma classificação mais completa é oferecida por Machado e Da Silva [2004], que propõem, além dessas outras divisões já citadas, o cavaco segmentado. As três primeiras classificações dependem quase que exclusivamente da ductilidade ou fragilidade do material da peça e das condições de corte adotadas. Já o cavaco segmentado ocorre em materiais com baixa condutividade térmica, onde ocorre o cisalhamento termoplástico catastrófico, ou adiabático [Recht, 1964].

2.1.3.1. Cavaco Contínuo

Este tipo de cavaco é gerado durante o corte de materiais dúcteis e homogêneos, como os aços, aços forjados, de baixa liga, na usinagem de cobre e alumínio, tanto em baixo quanto médio avanço e em altas velocidades. É extremamente indesejável, devido aos problemas gerados, como perigo ao operador da máquina ferramenta e dificuldade na remoção e transporte. Segundo Ferraresi [1970], são lamelas justapostas numa disposição contínua e agrupadas em grupos lamelares. Não há uma distinção entre esses grupos lamelares, mas apenas um deslizamento entre eles. Mas, apesar de não haver evidências da formação da trinca, uma nova superfície está sendo formada na peça e isto tem que envolver fratura [Machado e Da Silva, 2004].

Uma teoria que explica esse fenômeno é a de Cook et al [1954], que sugere um campo de tensões de tração na ponta da ferramenta, devido a curvatura imposta pela cunha de corte, produzindo, assim, trinca necessária para separar o material. Depois do campo de tração, o material passa por uma elevada tensão de compressão, e a propagação da trinca é interrompida ao chegar nessa região, resultando no cavaco contínuo.

Existem alguns fatores que favorecem a propagação da trinca, que modificados, influenciam nas tensões criadas na formação do cavaco, como velocidade de corte, ângulo de saída da ferramenta, profundidade de corte, aplicação de fluido de corte e adição de elementos de livre corte, como chumbo, selênio, enxofre, e rigidez da máquina ferramenta.

2.1.3.2. Cavaco Parcialmente Contínuo

É um de tipo de cavaco que está classificado entre o cavaco contínuo e o descontínuo, também chamado cavaco de cisalhamento [Ferraresi, 1970].

Ele se forma quando há diminuição da resistência do material no plano de cisalhamento, devido ao aumento da deformação, à heterogeneidade da estrutura metalográfica, ou a vibrações externas que conduzem às variações da espessura do cavaco. Cook et al [1954] sugere que dois fatores são responsáveis para a formação do cavaco parcialmente contínuo: a energia elástica acumulada na ponta da ferramenta não é suficiente para continuar a propagação da trinca; e a presença de grande tensão de compressão no plano de cisalhamento primário, um pouco além da ponta da ferramenta, que pode suprimir a propagação da trinca.

Ele também pode se formar em cortes com grandes valores de avanço, velocidades de corte inferiores a 100 m/min e com ângulo de saída pequeno [Ferraresi, 1970].

2.1.3.3. Cavaco Descontínuo

Alguns materiais, como o ferro fundido cinzento e o bronze, que contêm uma estrutura muito heterogênea, possuem comportamento frágil e ocasionalmente falham após uma quantidade limitada de deformação plástica. O cavaco dessa classe de materiais é do tipo descontínuo [Ferraresi, 1970].

A trinca se propaga completamente pela zona de cisalhamento primário, provocando a formação de fragmentos do material usinado. Contudo, também há influência da zona de cisalhamento secundária neste processo. Primeiramente, a componente da força tangencial à superfície de saída é menor do que a força necessária para promover o escorregamento do cavaco. Forma-se, então, uma zona estática de material. A separação do material se dá com o aumento da razão entre a força tangencial e a força normal.

Pode-se obter cavacos descontínuos em materiais semi-dúcteis, variando algumas condições de corte, para se forçar esse processo, como utilizar baixas velocidades, ângulos de saída pequenos e grandes avanços [Machado e Da Silva, 2004].

2.1.3.4. Cavaco Segmentado

É um processo de formação de cavaco bem particular. Os cavacos sofrem grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre os segmentos, com muita pouca ou quase nenhuma deformação dentro destes segmentos. Ocorre em materiais com pobres propriedades térmicas, como condutividade térmica. Exemplos são o titânio e suas ligas.

Nesses materiais, durante o processo de formação do cavaco, ocorre o fenômeno do encruamento. Logo, o material deveria sofrer um aumento de resistência. Contudo, devido a baixa condutividade térmica, a taxa de encruamento é superado em algumas regiões pela diminuição da resistência, ou amolecimento, devido ao calor gerado no processo de cisalhamento. Por este motivo, a deformação continua acontecendo no mesmo plano primário, até que se afasta da aresta o suficiente para as tensões cisalhantes não serem mais capazes de continuar a deformação. Neste ponto, uma nova banda de cisalhamento começa a se deformar [Machado, 2007].

Neste processo, apesar do comprimento de contato cavaco-ferramenta ser pequeno, as temperaturas atingidas na interface são muito altas. Os cavacos segmentados, em geral, são muito finos, consequentemente, obtém-se baixos valores do grau de recalque, em torno de 1,2 a 2 [Machado, 2007].

2.1.4. Formas de Cavaco

A classificação das formas dos cavacos mais completa é dada pela norma ISO 3685 [1977], de acordo com a figura 2.3.

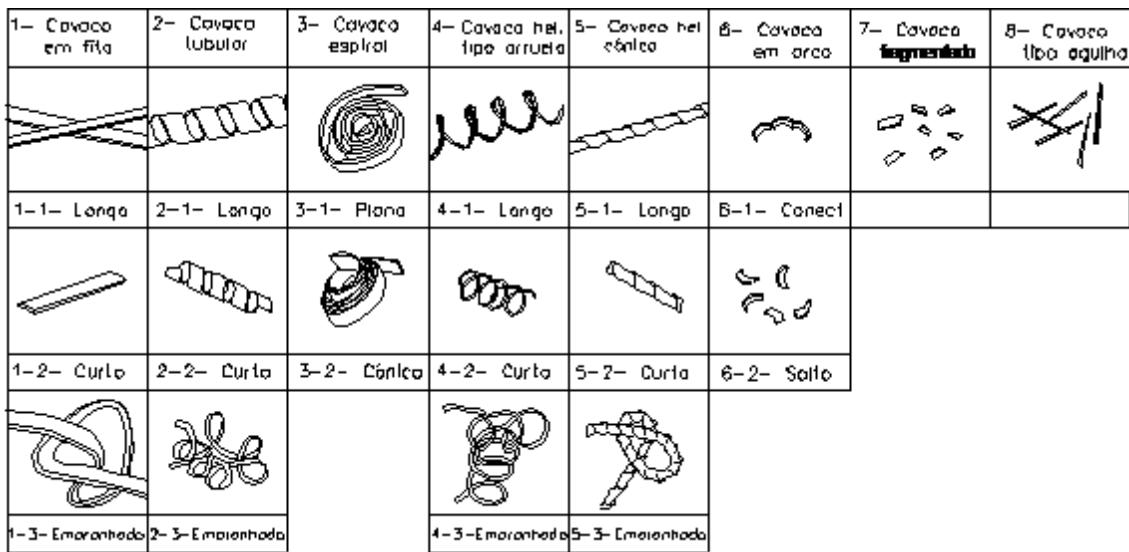


Figura 2.3 – Classificação das formas dos cavacos pela ISO 3685 [1977]

Os cavacos do tipo contínuo, em forma de fita, trazem sérios inconvenientes durante o processo, como ocasionar acidentes, enrolar em torno da peça, da ferramenta ou dos componentes da máquina, dificultar a refrigeração direcionada desperdiçando o fluido de corte, ser de difícil transporte e manuseio, além de ocupar muito volume e prejudicar o corte, podendo afetar no acabamento, nas forças de corte e na vida útil das ferramentas.

O fator determinante na classificação da forma dos cavacos é o material da peça. As condições de corte também influenciam fortemente na forma dos cavacos. Em geral, para maiores valores de velocidade de corte, redução do avanço e aumento no ângulo de saída produz-se cavacos em fitas. Dentre estes, o avanço é o parâmetro mais influente e a profundidade de corte é o que menos influencia na forma de cavacos. A Figura 2.4 ilustra a influência destes parâmetros na forma do cavaco.

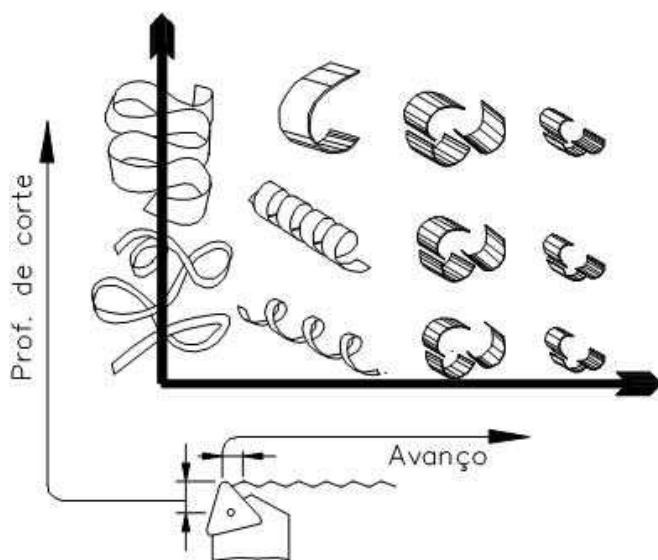


Figura 2.4 – Efeito do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos [Machado e Da Silva, 2004]

Mesmo podendo se controlar os parâmetros de corte a fim de se evitar cavacos longos, o método mais efetivo para se conseguir cavacos curtos é o uso de quebra-cavacos.

2.1.5. Controle de Cavacos: Quebra-Cavacos

Como já foi dito anteriormente, com o advento de máquinas-ferramenta que podem alcançar altíssimas velocidades de corte, o controle dos cavacos se torna necessário, pois, nessas condições, o cavaco não possui uma curvatura natural adequada, tornando-se contínuo e podendo gerar uma série de danos ao processo em geral. A forma mais conhecida para promover a quebra desse tipo de cavaco é a utilização de quebra-cavacos postiços ou integrais, que é a modificação da superfície da ferramenta com formatos característicos. Eles agem controlando o raio de curvatura do cavaco, garantindo que o cavaco, ao se chocar com um obstáculo tenha atingido o valor de deformação crítica na fratura que promova sua quebra [Machado e Da Silva, 2004]. Além disso, as ranhuras dos quebra-cavacos também são projetadas para conformar mais ainda os cavacos, de forma a torná-los mais frágeis e reduzir o valor da deformação crítica necessária para a fratura.

No projeto de um quebra-cavaco é necessário se ter a geometria correta da ferramenta, como os ângulos de saída, inclinação e posição [Boothroyd, 1989], além, é claro, de

considerar o material da peça, o raio de curvatura natural do cavaco, a espessura do cavaco e também as condições de corte, como velocidade e profundidade de corte e rigidez da máquina-ferramenta. Em geral, as ferramentas são fabricadas com desenhos de quebra-cavaco para cada tipo de operação, e abrange uma faixa de profundidade de corte e avanço.

2.2. DESGASTE DE FERRAMENTAS

Durante os processos de usinagem ocorre desgaste nas superfícies de saída e de folga das ferramentas [Ferraresi, 1970]. Segundo Childs et al [2000], desgaste é a perda de matéria através de asperezas ou micro-contato, ou em menor escala, mecanismos de remoção atômica ou molecular. É um processo que progride continuamente. Para Trent e Wright [2000] o processo de desgaste sempre envolve alguma perda de material da superfície da ferramenta.

Apesar do gasto com ferramentas significar apenas uma pequena parte no custo total de fabricação de um componente, é importante o estudo do desgaste de ferramentas, pois, além de ser economicamente interessante, prolonga a vida da aresta de corte, diminui a parada para trocas de ferramentas, gera custos adicionais e perde produtividade [Machado e Da Silva, 2004].

A seguir, estão apresentados os mecanismos pelos quais ocorrem os diversos tipos de desgaste nas ferramentas de corte.

2.2.1. Mecanismos de Desgastes

Existem várias formas pela qual uma ferramenta se desgasta. Conforme Shaw [1984], raramente em uma situação de desgaste somente um tipo estará presente. Na figura 2.5, pode-se perceber a forma como se apresenta os mecanismos em função da temperatura de corte, ou de qualquer fator que a influencie, como a velocidade de corte e o avanço, proposto por Vieregge, citado por Machado e Da Silva [2004]. Nota-se que o desgaste total cresce muito com a temperatura de corte.

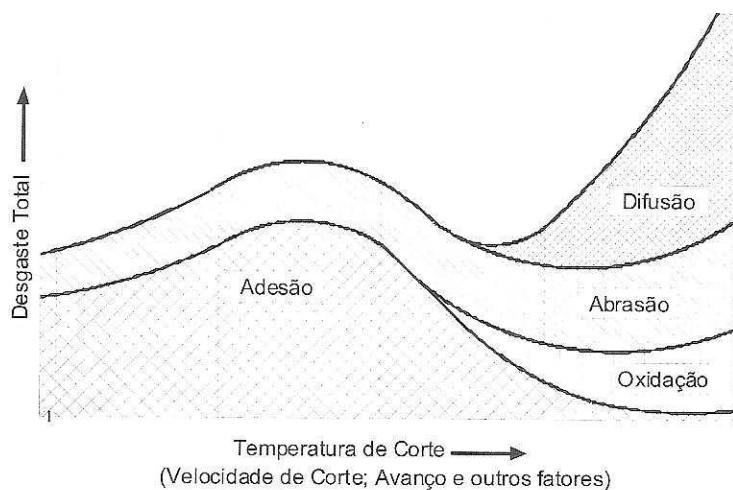


Figura 2.5 – Diagrama de distribuição dos mecanismos de desgaste das ferramentas de corte [Vieregge, citado por Machado e Da Silva 2004]

Os mecanismos de desgaste em ferramentas de usinagem são classificados de diferentes maneiras, conforme o autor. Trent e Wright [2000] classificam seis diferentes mecanismos de desgaste, como mostrados na figura 2.6:

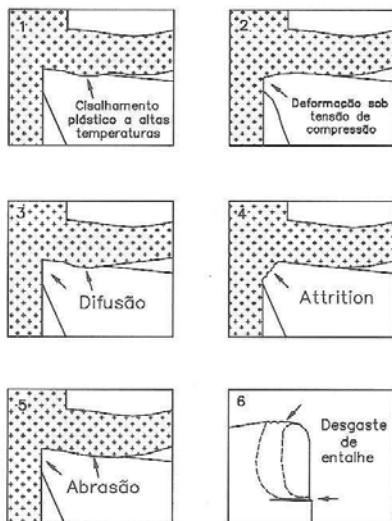


Figura 2.6 – Mecanismos de desgaste proposto por Trent e Wright [2000]

A seguir, são mostrados os mecanismos de desgaste conforme a classificação proposta por Trent e Wright, exceto o desgaste de entalhe que não constitui propriamente um mecanismo, mas sim, uma forma de desgaste, e será tratado posteriormente.

2.2.1.1. Deformação Plástica Superficial por Cisalhamento a Altas Temperaturas

Em geral, esse mecanismo acontece em ferramentas de aço-rápido, que possuem baixa resistência ao cisalhamento, quando se usina materiais com alto ponto de fusão com altos valores de velocidade de corte e avanço. Devido às elevadas temperaturas geradas na interface cavaco-ferramenta, as tensões cisalhantes criadas nesta região são suficientes para causar deformação plástica superficial [Trent, 1988]. A resistência ao escoamento do material da ferramenta próximo à interface é reduzida, devido ao aumento da temperatura. Desta forma, o material é cisalhado junto com o cavaco e arrancado da superfície da ferramenta, gerando o desgaste de cratera [Machado e Da Silva, 2004].

2.2.1.2. Deformação Plástica sob Altas Tensões de Compressão

Esse fenômeno se aproxima mais de um processo de desgaste que um mecanismo propriamente dito, sendo que a deformação não é um processo de desgaste, pois o material não foi removido da ferramenta [Trent e Wright, 2000]. Contudo, com o aumento das forças e temperaturas de corte, a aresta de corte vai ficando cada vez mais deformada, por ser a região menos resistente da cunha cortante, até o ponto em que entra em colapso. Ocorre no corte de materiais de elevada dureza utilizando-se ferramentas de aço-rápido e metal duro.

2.2.1.3. Desgaste por Difusão

O desgaste por difusão pode ser observado em ferramentas que são utilizadas durante longos períodos de tempo [Wright e Trent, 1974]. Ocorre sob altas temperaturas devido ao contato dos materiais, ferramenta e peça ou ferramenta e cavaco. Em função da aderência que ocorre entre os materiais, é possível ocorrer difusão [Childs et al, 2000], desde que ocorram altas temperaturas e tempo suficiente. Dentro da zona de fluxo há um gradiente de velocidades, assumindo o valor zero na interface cavaco-ferramenta, o que garante tempo suficiente para haver a difusão [Machado e Da Silva, 2000].

A difusão depende também, é claro, da solubilidade dos elementos envolvidos no processo, ou seja, dos materiais da peça e da ferramenta.

2.2.1.4. Aderência e Arrastamento (“Attrition”)

Ocorre em cortes a baixas velocidades, consequentemente, baixas temperaturas, onde o fluxo de material sobre a superfície de saída da ferramenta se torna irregular. Nestas condições, a aresta postiça de corte pode-se formar. Este mecanismo de desgaste se caracteriza por fragmentos de escala microscópica que são arrancados da superfície de saída da ferramenta. Como este mecanismo se processa em nível de grãos, no microscópio, as áreas desgastadas por *attrition* têm uma aparência áspera [Machado e Da Silva, 2000].

2.2.1.5. Desgaste por Abrasão

O desgaste abrasivo é causado pelo movimento relativo entre partículas duras contra a superfície da ferramenta. As partículas duras podem ser provenientes tanto da microestrutura do material usinado, quanto serem partículas da própria ferramenta. Para que ele ocorra, é necessária a presença de partículas duras e abrasivas.

2.2.2. Formas de Desgaste nas Ferramentas de Corte

As ferramentas de corte sempre estão sujeitas a alguma forma de desgaste durante a usinagem, tanto na superfície de saída quanto na superfície de folga da ferramenta. A figura 2.7 apresenta as principais áreas de desgaste de uma ferramenta.

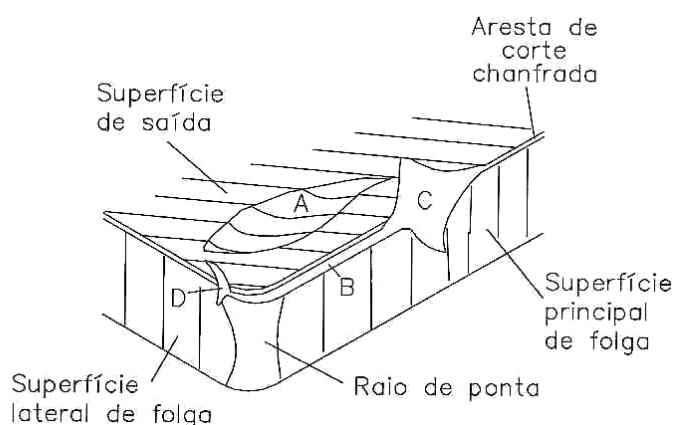


Figura 2.7 – Principais áreas de desgaste de uma ferramenta de corte [Dearnley, 1982]

Pela norma ISO 3685 de 1977, as formas de desgaste são quantificadas, como mostra a figura 2.8.

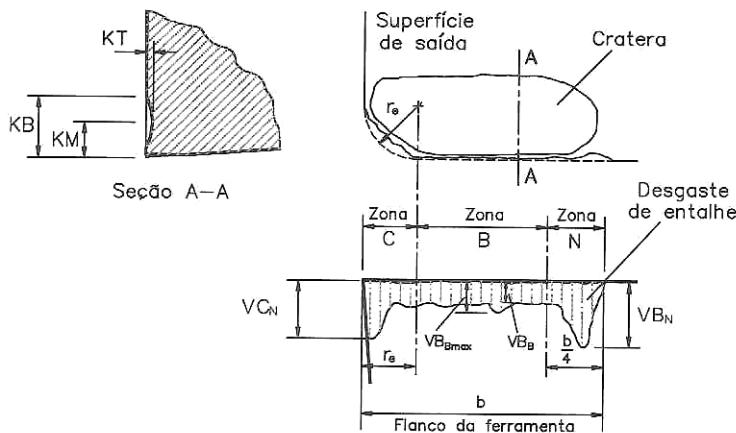


Figura 2.8 – Parâmetros utilizados para medir os desgastes das ferramentas de corte [ISO 3685, 1977]

Com o desgaste, a ferramenta perde efetivamente sua capacidade de corte. Desta forma, pode-se definir vida da ferramenta como sendo o tempo que ela trabalha antes de ser afiada ou substituída. Utiliza-se, então, um critério para se determinar o fim de vida de uma ferramenta. Os critérios recomendados pela mesma norma ISO 3685 [1977] para ferramentas de aço-rápido, metal duro e cerâmicas no torneamento são:

- Desgaste de flanco médio: $VB=0,3 \text{ mm}$;
- Desgaste de flanco máximo: $VB_{\text{máx}}=0,6 \text{ mm}$;
- Profundidade de cratera: $KT=0,06=0,3f$, onde f é o avanço em mm/rev ;
- Falha catastrófica.

Se o desgaste de entalhe for predominante, utiliza-se $VC_N=1,0\text{mm}$ como critério de fim de vida.

Dentro de indústrias esses parâmetros variam, conforme a necessidade, devido principalmente a rigidez da máquina ferramenta e precisão requerida na peça. Geralmente, utiliza-se a ferramenta até que as peças produzidas saiam das especificações de tolerância ou acabamento [Lourenço, 1996].

Diversos fatores têm influência na vida de uma ferramenta. A presença da aresta postiça de corte, APC, por exemplo, pode afetar de modo a aumentar ou diminuir a taxa de desgaste. Quando se tem uma aresta postiça instável, vários fragmentos altamente encruados

ficam aderidos na parte inferior do cavaco e também na superfície que vai sendo revelada da peça. Isso faz com que a ferramenta se desgaste mais com o contato com essa superfície abrasiva. Já uma aresta postiça estável protege a ferramenta da ação do desgaste [Machado e Da Silva, 2004], fazendo ela mesma a função de aresta cortante.

Em geral, um aumento da velocidade de corte e do avanço gera um aumento das temperaturas envolvidas no processo de usinagem. A baixas velocidades de corte, o aumento da temperatura do contato peça-ferramenta ajuda a diminuir o atrito na interface cavaco-ferramenta, diminuindo a formação de APC. Em altas velocidades, o acréscimo das temperaturas do processo causa um aumento do desgaste de cratera.

Existe uma relação característica entre o ângulo de saída e a vida da ferramenta de corte. Para algumas combinações do par ferramenta-peça existem dados que mostram que há um valor de ângulo de saída ótimo, no qual a vida da ferramenta é maior [Ferraresi, 1970].

2.3. TEMPERATURA DE CORTE

Como pode ser observado no capítulo anterior, alguns dos mecanismos de desgaste são de origem térmica, e os mecanismos de origem mecânica também são influenciados pela temperatura. Desta forma, as altas temperaturas atingidas na interface cavaco-ferramenta e no contato da ferramenta com a peça são uma das principais causas do desgaste das ferramentas de corte, e isto limita a aplicação de regimes de corte mais altos, fixando, portanto, as condições máximas de produtividade e duração das ferramentas [Ferraresi, 1970]. Logo, é de extrema importância a tentativa de conhecer as temperaturas envolvidas no corte, a fim de se obter dados para redimensionar a ferramenta, para que ela tenha uma vida útil prolongada, gerando economia no processo.

2.3.1. Geração de Calor

Na usinagem, quase toda a energia envolvida é convertida em calor. Apenas uma pequena porcentagem, cerca de 1 a 3%, não é convertida em energia térmica. Parte fica retida no sistema, como energia elástica e a outra porção, associada à geração de novas superfícies. O aumento da temperatura de corte na usinagem se deve a dois fatores: a formação do cavaco

na zona de cisalhamento primária e o movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta.

Trent [1988] determina o calor gerado em três zonas distintas, a saber:

A – Zona de Cisalhamento Primária;

B e C – Zona de Cisalhamento Secundária;

D – Interface entre a peça e a superfície de folga da ferramenta.

Estas três zonas estão mostradas na figura 2.9.



Figura 2.9 – Zonas de geração de calor em usinagem [Machado e Da Silva, 2004]

Vale ressaltar que a geração de calor na região C da figura 2.9 somente apresentará um diferencial quando a aresta de corte já estiver desgastada ou se o ângulo de folga for pequeno.

A quantidade de calor produzida por estas zonas é dissipada através do cavaco, da peça, da ferramenta e para o meio ambiente. Por conseguinte, a equação do balanço energético do processo de corte é expressa desta forma, onde o calor Q é dado em [kcal/min] [Ferraresi, 1970]:

$$Q_z + Q_{a1} + Q_{a2} = Q_c + Q_p + Q_{ma} + Q_f \quad . \quad (2.3)$$

Onde:

Q_z : calor gerado na zona A

Q_{a1} : calor gerado na zona B e C

Q_{a2} : calor gerado na zona D

Q_c : calor dissipado pelo cavaco

Q_p : calor dissipado pela peça

Qma: calor dissipado pelo meio

Qf: calor dissipado pela ferramenta de corte

2.3.1.1. Calor Gerado na Zona de Cisalhamento Primária

Boa parte do calor gerado na zona de cisalhamento primária é dissipada pelo cavaco, e a outra pequena parte é conduzida à peça. Esta pequena parcela de calor é responsável por uma elevação da temperatura superficial da mesma, que conforme Wick [1987] é percebida quando há um aumento da rotação da peça.

O calor gerado nesta zona praticamente não tem influência nenhuma na temperatura da ferramenta, pois o calor gerado aqui se deve a formação do cavaco, e o tempo que uma porção do cavaco passa sobre a superfície de saída da ferramenta é muito pequeno para poder conduzir calor [Trent, 2000].

A distribuição de temperatura no cavaco não segue um modelo uniforme, causando uma distribuição de tensões irregular, que é uma das razões da curvatura dos cavacos [Yajun e Wei, 1998]. Então, através da medição das temperaturas do cavaco pode-se determinar também alguns aspectos característicos da sua morfologia.

2.3.1.2. Calor Gerado na Zona de Cisalhamento Secundária

É aqui que se desenvolve a maior fonte de calor para o aumento da temperatura da ferramenta. É também a zona mais próxima da ferramenta. O aumento da temperatura causa efeito direto na taxa de remoção de material, que não vem a ser um problema na usinagem de materiais macios e de baixo ponto de fusão. Mas, na usinagem de materiais duros é extremamente danoso [Shaw, 1984]. As altas temperaturas atingidas nesta região são determinantes na evolução dos mecanismos de desgaste que se dão por efeito térmico e levam à redução do limite de escoamento da ferramenta, diminuindo, assim, sua vida útil. Boud [2006] realizou testes que concluíram que o diâmetro da barra também influencia na temperatura da ferramenta e, consequentemente, no desgaste da mesma.

Quando há o aparecimento de zona de fluxo, a quantidade e a taxa de deformação são muito altas e complexas. Essas altíssimas taxas de deformação ocorrem sem promover o encruamento do material usinado devido ao amolecimento adiabático do material causado pelo aumento da temperatura. Portanto, a temperatura na zona de fluxo e da ferramenta são

dependentes da quantidade de trabalho necessária para realizar o cisalhamento do material e da quantidade de material que passa pela zona de fluxo. Isto varia de acordo com o material da peça. A temperatura da ferramenta pode chegar, em certos casos, a 1100 °C, e elas precisam ser projetadas para suportar essas temperaturas [Machado e Da Silva, 2004].

2.3.2. Efeito dos Parâmetros de Corte sobre a Temperatura de Corte

A temperatura de corte é influenciada por alguns parâmetros de corte e a interação entre essas variáveis é uma situação complexa. A seguir, é mostrado o efeito desses parâmetros na temperatura.

- **Velocidade de Corte:** O aumento da velocidade de corte gera um aumento na temperatura de corte, pois aumenta a geração de calor. Esse aumento de temperatura acelera com o aumento do desgaste da ferramenta, o que, consequentemente, faz aumentar o contato entre a peça e a ferramenta, e resulta num aumento da força de corte.
- **Avanço:** O efeito do avanço é analisado juntamente com a velocidade de corte. Para baixos valores de avanço e baixas velocidades de corte, em geral, há a presença de aresta postiça de corte, e quando esta se faz presente, a principal fonte de calor está afastada da superfície da ferramenta. Porém, com o aumento da velocidade de corte, a aresta postiça de corte perde estabilidade e a temperatura da ferramenta volta a aumentar com o aumento da velocidade.
- **Profundidade de Corte:** O aumento da profundidade de corte, assim como o avanço, altera as áreas dos planos de cisalhamento primário e secundário, e isso resulta num aumento da força de corte. A quantidade de calor gerado é resultado da força de corte. Logo, um aumento da profundidade de corte implica num aumento da temperatura.
- **Ângulo de Folga:** As evidências indicam que as interações entre o efeito do ângulo de folga, α_0 , a velocidade de corte e o avanço podem ser muito significativas, trazendo resultados ótimos para a redução da temperatura de corte [Matosinhos,1999].

2.3.3. Medição Experimental da Temperatura de Usinagem

Como já foi exposto, a temperatura de corte é um dado muito importante na usinagem, pois influí diretamente no desgaste da ferramenta. Conhecê-la, por certo, é ter um dado bastante relevante em mãos. E, devido a este fato, existem várias maneiras para tentar estimá-la. Nessas tentativas, já foram utilizados métodos práticos e analíticos. A seguir, apresentam-se alguns métodos para determinação da temperatura em usinagem.

2.3.3.1. Método do Termopar Ferramenta-Peça

Segundo Ferraresi [1970], Shore foi o primeiro a utilizar este método na medida da temperatura de corte em 1924. Além de ser um método relativamente simples de medição, também oferece boa confiabilidade, pois a temperatura medida é a maior conseguida entre todos os tipos de medição e também por estabilizar-se rapidamente.

O efeito Seebeck é um dos efeitos termoelétricos que aparecem na montagem de um termopar, e é também o mais relevante. Acontece pelo fato de que a diferença de temperatura entre as junções de dois metais diferentes gera uma força eletromotriz entre as junções. Essa diferença de potencial é determinada por três fatores [Matosinhos, 1999]:

- O potencial é proporcional à diferença de temperatura;
- O potencial depende da combinação dos tipos de metais usados;
- O potencial depende da homogeneidade do material,

ou seja, a força eletromotriz no circuito termoelétrico não depende do gradiente nas partes componentes do sistema, nem do diâmetro, resistência e comprimento dos fios condutores utilizados, tornando esse tipo de montagem bastante vantajoso. O diâmetro e o comprimento dos fios influenciam apenas no tempo de resposta.

A figura 2.10 mostra um esquema de montagem de um termopar ferramenta-peça.

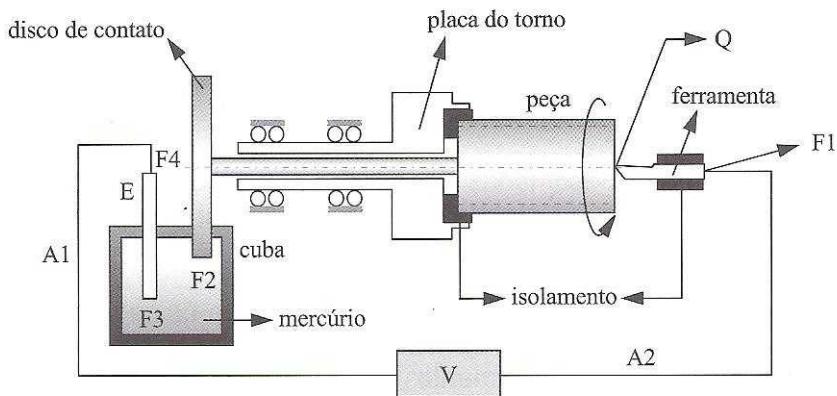


Figura 2.10 – Esquema para medição da temperatura de corte pelo método do termopar ferramenta-peça [De Melo, 1998]

Na utilização de termopares, se faz necessário estabelecer a relação entre diferença de temperatura nas juntas e força eletromotriz. Para isso, se utiliza métodos de calibração. O método mais simples de calibração de um termopar cavaco-ferramenta e provavelmente o mais preciso é o demonstrado na figura 2.11.

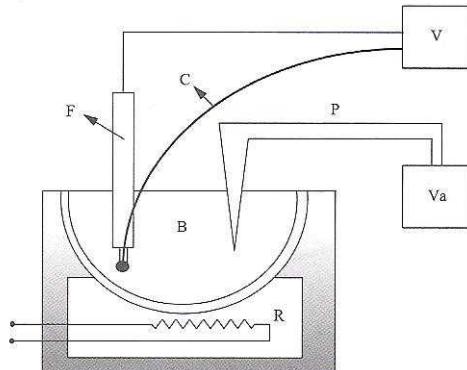


Figura 2.11 – Esquema de aparelhagem de calibração do termopar ferramenta-peça-cavaco [Ferraresi, 1970]

Para se obter calibração com mais acuracidade, de preferência, é conveniente que se use o próprio cavaco, indicado na figura pela letra C. A extremidade da ferramenta F, é imersa no banho B. Para manter esta extremidade à temperatura ambiente, é aconselhável usar uma ferramenta comprida. Se o material em usinagem não produz cavaco longo, deve-se preparar uma peça longa semelhante à haste da ferramenta. A temperatura do banho é medida por um

termopar cromel-alumel padrão, que na figura está indicado por P. O banho é aquecido através de uma resistência, R.

2.3.3.2. Método da Inserção de Termopares na Ferramenta de Corte

Este método consiste na utilização de termopares bem pequenos, colocados dentro da ferramenta, em diversas posições. Assim, pode-se registrar a variação da temperatura com o tempo ao longo do inserto. Os micro furos na ferramenta são feitos pelo processo de eletroerosão. A figura 2.12 ilustra a montagem de um termopar dentro de um inserto de metal duro.

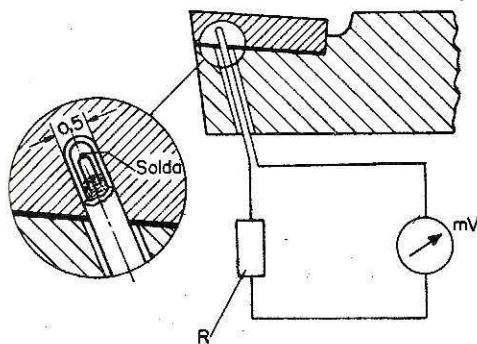


Figura 2.12 – Medida da temperatura da ferramenta através de termopares [Ferraresi, 1970]

2.3.3.3. Radiação Infravermelha

A radiação ocorre quando acontece fluxo de calor entre dois objetos, via ondas eletromagnéticas. Os aparelhos que utilizam o sistema de radiação infravermelha para medição de temperatura medem apenas o calor transferido por radiação.

Nicholas e White [1994] descrevem o princípio de funcionamento do sensor infravermelho assim: as ondas de calor atingem a câmera, passam por lentes especiais e, através de um detector, criam sinais elétricos, transformando um espectro infravermelho em um espectro visível, permitindo ver ou medir o calor transferido. Os detectores mais utilizados são os térmicos e os de fóton. Os primeiros mudam sua temperatura quando ocorre variação na quantidade de radiação infravermelha. Isso porque a mudança na temperatura instantânea dentro do detector produz o sinal elétrico necessário para criar imagens. Os detectores de fóton criam sinais elétricos pela absorção da energia infravermelha na forma de fótons, ou

seja, através do efeito fotoelétrico. O detector de fóton é mais utilizado, pois é mais sensível que o térmico e possui foco plano.

2.3.3.4. Método dos Vernizes Termosensíveis

É um método simples que consiste na aplicação de vernizes que mudam de coloração com a temperatura. Fornecem a distribuição direta da temperatura na superfície da ferramenta. A mudança de cor se dá de forma irreversível e a taxa de mudança é dependente da temperatura atingida. A desvantagem é que o processo químico pelo qual acontece a mudança de cor se desenvolve dentro de um intervalo de tempo, o que gera inexatidão na avaliação da mudança ocorrida. Além disso, na área de contato, o atrito remove a tinta e não permite uma avaliação precisa dos contornos das isotermas.

2.3.3.5. Método de Técnicas Metalográficas

Através da metalografia da própria ferramenta pode-se obter várias informações sobre o comportamento e distribuição de temperatura. Sabe-se que a dureza à temperatura ambiente do aço carbono endurecido e do aço-rápido decresce após o seu reaquecimento, e a redução na dureza depende da temperatura e do tempo de aquecimento. Wright e Trent [2000] afirmam que as ferramentas de aço carbono endurecidas diminuem sua dureza a partir de 250 °C, que decresce mais rapidamente a 600 °C. As ferramentas de aço-rápido não têm diminuição severa de dureza até 600 °C. Porém, entre 600 °C e 850 °C a dureza cai rapidamente. Só que essa dureza pode voltar a subir para temperaturas de reaquecimento maiores, se forem resfriadas rapidamente. Através da calibração da dureza versus temperatura e o tempo de aquecimento, uma família de curvas pode ser obtida para qualquer ferramenta de aço.

Dearnley [1983] desenvolveu uma técnica que permite avaliar a distribuição de temperatura em insertos de metal duro. Ela consiste na substituição do elemento de liga comumente utilizado nesses insertos, o cobalto, por ferro e ferro-silício, com diferentes teores. Cada elemento de liga possui uma temperatura na qual há uma transformação de fase, e este fato permite determinar as isotermas nas ferramentas.

Medidas de microdureza em ferramentas tratadas termicamente podem ser utilizadas para estimar as temperaturas na aresta cortante que estão em torno de 500 a 650 °C [Trent,

2000]. A figura 2.13 (b) mostra os contornos de temperatura derivados das indentações feitas anteriormente (a).

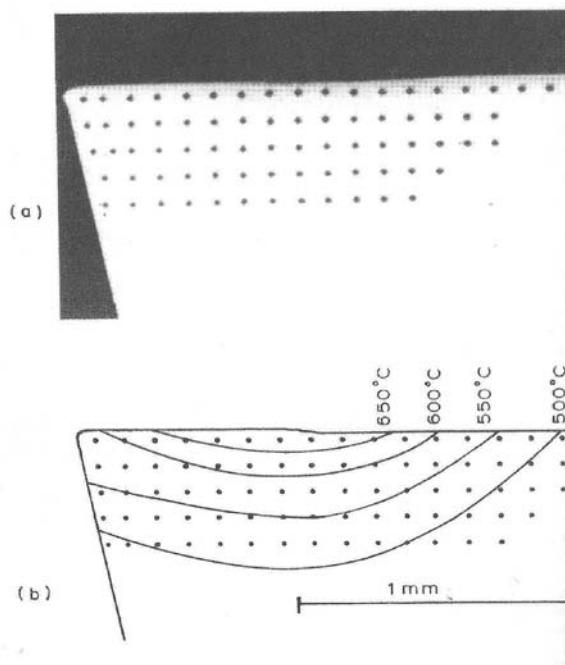


Figura 2.13 – Seção de uma ferramenta de médio carbono usinada a 27 m/min, com avanço de 0,25 mm/rev. (a) Fotomicrografia mostrando as marcas da indentação. (b) Isothermas determinadas pelas medidas de dureza [Trent, 2000]

2.3.3.6. Método de Elementos Finitos

A técnica numérica através de elementos finitos é um método analítico muito utilizado para a determinação da temperatura na usinagem, principalmente para se determinar a distribuição de temperatura na ferramenta, peça e cavaco. A figura 2.14 mostra o resultado de um problema de usinagem através de elementos finitos.

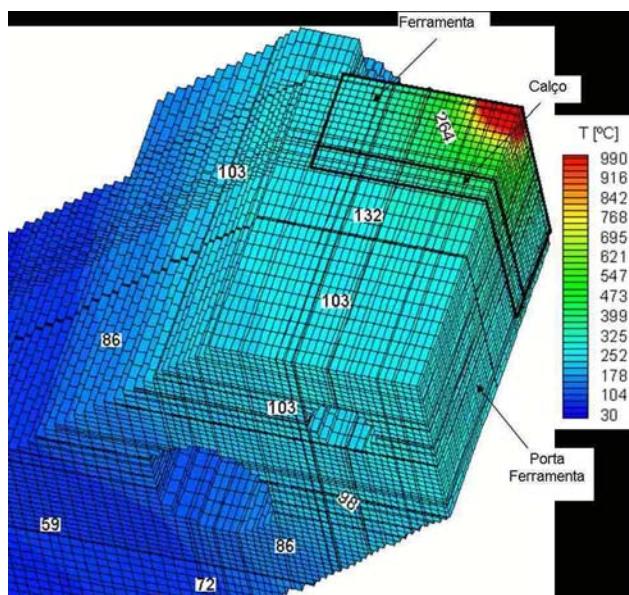


Figura 2.14 – Distribuição bidimensional de temperatura na ferramenta através do método de elementos finitos [Carvalho, 2003]

2.3.3.7. *Método de Problemas Inversos em Condução de Calor*

Outro método analítico utilizado na determinação de temperatura em usinagem é a técnica de problemas inversos em condução de calor. Esse método é usado para se determinar a temperatura na interface cavaco-ferramenta, que, por certo, é o local mais difícil de estimar a temperatura, por ser de acesso muito restrito a métodos práticos de medição.

De Melo [1998] desenvolveu um método que consiste na utilização de técnicas de problemas inversos, associados à temperatura na aresta inferior oposta à aresta de corte e uso do modelo de mapeamento elipsoidal desenvolvido por Lin et al [1992] para a estimativa da temperatura na interface cavaco-ferramenta. As equações pertinentes ao método foram resolvidas por diferenças finitas. A técnica apresentou-se bastante sensível a variações de parâmetros geométricos importantes, tais como o comprimento de contato cavaco-ferramenta e o posicionamento dos sensores de temperatura [Machado e Da Silva, 2004].

Carvalho [2005] propôs uma metodologia experimental para a determinação dos campos térmicos e do fluxo térmico gerado em ferramentas de corte durante um processo de torneamento utilizando problemas inversos. É apresentado um desenvolvimento de um modelo térmico tridimensional transitório que considera além da ferramenta de corte, o conjunto ferramenta, calço e porta-ferramenta. O problema direto é resolvido numericamente

utilizando-se diferenças finitas a partir de uma malha de discretização não uniforme. E o problema inverso é resolvido por meio da técnica de otimização da seção áurea.

2.4. MONITORAMENTO DE PROCESSOS DE USINAGEM

A evolução do desgaste nas ferramentas causa distorções na dimensão dos componentes fabricados, gerando, muitas vezes, custos adicionais. Portanto, a necessidade da instalação de sistemas de monitoramento *on-line* adequados nos processos de usinagem é um importante requisito no desenvolvimento de sistemas de usinagem completamente automatizados [Dolinsek e Kopac, 1999].

Segundo Blum et al [1988], as avarias e desgastes de ferramentas são os maiores fatores que influenciam na qualidade e ritmo de produção. Além disso, com o emprego de ferramentas de alto custo, sua utilização otimizada torna-se imprescindível. Com isso, surgiram vários métodos de monitoramento da ferramenta de corte, que podem ser divididos conforme Blum et al [1988]:

- Métodos diretos (*off line*): medição direta do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, após a interrupção da usinagem;
- Métodos indiretos (*on line*): medição indireta do desgaste ou detecção da quebra da ferramenta, através de sinais que possuem correlações com o processo de corte. A medição é realizada durante a usinagem.

A tabela 2.1 [Ferraz Jr, 2002] mostra alguns sensores utilizados para o monitoramento de ferramentas de corte, com o respectivo método empregado.

Tabela 2.1 – Método para o Monitoramento do Estado de Ferramentas de Corte

Método	Procedimento	Medida	Sensor
Direto	Ótico	Forma ou Posição da Borda	Câmera de TV, Sensor Óptico, Espectrofotômetro, Cintilador
	Partículas de Desgaste e Radioatividade	Tamanho da Partícula de Concentração	Medidor de Radioatividade
	Resistência Peça-Ferramenta	Alteração na Resistência Elétrica da Junção	Ohmímetro
	Tamanho da Peça	Dimensão da Peça sendo Usinada	Apalpador, Sensor: Eletromagnético, Ultrassônico e Óptico
	Distância Peça-Ferramenta	Distância entre Ferramenta ou Suporte à Peça	Micrômetro, Medidor de Deslocamento (LVDT)
Indireto	Força de Corte	Alterações na Força	Dinamômetro, <i>Strain Gage</i>
	Emissão Acústica	Energia nas Ondas de Deformação ou <i>Stress</i>	Transdutor Piezoelétrico
	Som e Ultra-som	Ondas Acústicas	Microfone
	Vibração	Vibração da Ferramenta/Porta Ferramenta	Acelerômetro
	Temperatura	Variação da Temperatura no Ponto de Corte	Termopar, Pirômetro
	Potência	Corrente ou Consumo de Potência do Motor de Acionamento	Amperímetro, Sensor de Corrente (Efeito Hall)
	Rugosidade	Rugosidade da Peça	Agulha Mecânica, Sensor Óptico, Laser
	Torque	Alterações de Torque	Sensor de Torque
	Velocidade de Rotação	Alterações Devido às Variações de Torque	Tacômetro

No monitoramento do fim de vida de ferramentas e tomada de decisões, é comum a utilização de técnicas que envolvam o raciocínio aproximado obtendo-se soluções mais próximas possíveis ao raciocínio humano. Os sistemas inteligentes, tais como lógica fuzzy e as redes neurais artificiais vêm sendo utilizados com sucesso, nos últimos anos, em problemas que envolvam o raciocínio aproximado (Zadeh, 1997).

2.5. USINAGEM DE AÇOS INOXIDÁVEIS

2.5.1. Aços Inoxidáveis

Aço inoxidável é a denominação dada a ligas de ferro, resistentes à corrosão, à oxidação e ao calor e que contêm, no mínimo, 10,5% de cromo. Outros elementos também integram essas ligas, porém o cromo é o elemento de liga mais importante, responsável por criar uma camada passivadora de óxido e hidróxido de cromo, que é resistente e uniforme, tem excelente aderência e plasticidade, baixa porosidade e volatilidade além de solubilidade praticamente nula [Lourenço, 1996].

Os aços inoxidáveis surgiram de estudos realizados em 1912, tanto na Inglaterra como na Alemanha. O aço estudado na Inglaterra era uma liga Fe-Cr, com cerca de 13% de Cr. Na Alemanha se tratou de uma liga que, além de ferro e cromo, continha também níquel. Desde então, os aços inoxidáveis evoluíram muito em função da indústria petrolífera, da aeronáutica, criogênica e devido também à Segunda Guerra Mundial [Carbó, 2001].

Atualmente, os aços inoxidáveis são um dos principais materiais empregados na fabricação de peças críticas em indústrias químicas modernas devido à combinação de propriedades mecânicas adequadas e elevada resistência à corrosão [Gennari et al., 2001].

Existe uma grande variedade de aços inoxidáveis, com níveis progressivamente maiores de resistência à corrosão, devido principalmente ao cromo, e resistência mecânica, propriedade obtida pela presença de níquel, além da adição de outros elementos de liga, originando propriedades específicas com relação à possibilidade de resistir a diferentes meios.

2.5.2. Classificação dos Aços Inoxidáveis

Os aços inoxidáveis são classificados em grupos de acordo com a microestrutura básica formada. São eles os ferríticos, martensíticos, austeníticos, duplex e endurecível por precipitação [Metals Handbook, 1972].

2.5.2.1. Aços Inoxidáveis Ferríticos

Os aços inoxidáveis ferríticos são aqueles classificados pela série 400. Eles possuem uma estrutura cristalina cúbica de corpo centrado, que é a mesma do ferro puro à temperatura ambiente. O teor de cromo pode variar de 10,5%, como no ABNT 409, a até quase 30%, em alguns casos, como o ABNT 446. O baixo teor de carbono em relação ao de cromo elimina o efeito de transformação térmica, ou seja, são aços inoxidáveis que não podem ser endurecíveis por tratamento térmico e são utilizados na condição de recozidos, onde o limite de escoamento é de 275 a 350 MPa [Metals Handbook, 1972]. Logo após passarem por resfriamento rápido de altas temperaturas, demonstram uma estrutura macia, tenaz e homogênea, conhecida como ferrítica.

Os aços inoxidáveis ferríticos são ferromagnéticos, têm boa ductilidade, boa resistência a corrosão e oxidação. A resistência à corrosão dos aços inoxidáveis ferríticos é melhorada devido ao aumento do teor de cromo e molibdênio, sendo que a ductilidade, tenacidade e soldabilidade são devidas à redução de carbono e nitrogênio.

Algumas aplicações são lâminas de turbina sujeitas à corrosão e desgaste por abrasivo e corrosão úmida, caixas de recozimento, tanques de combustível, cestos das máquinas de lavar roupa, entre outras que exijam resistência à corrosão.

Na figura 2.15 pode-se ver a microestrutura característica do aço inoxidável ferrítico ABNT 409.

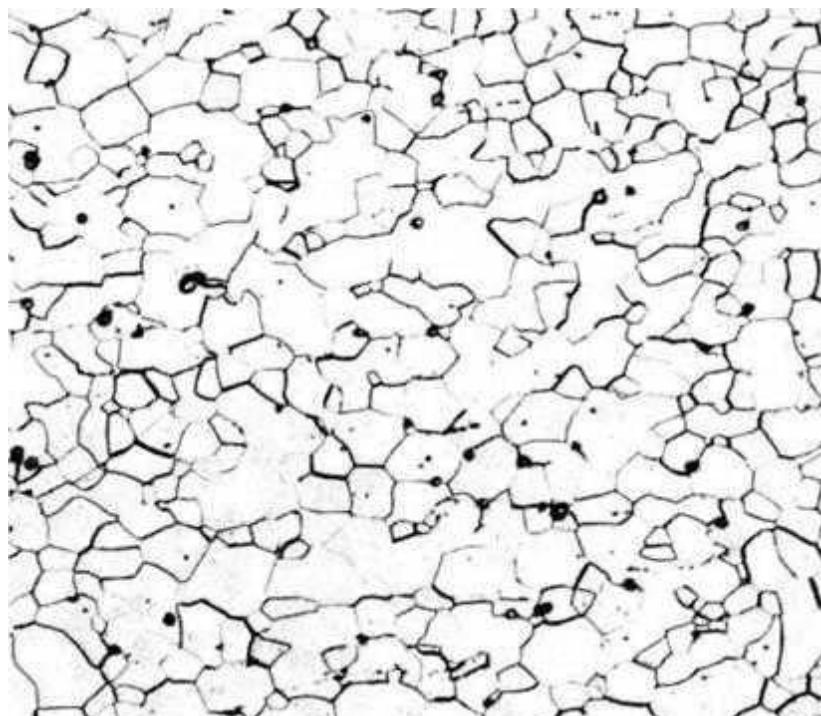


Figura 2.15 – Aço inoxidável ABNT 409 recozido por uma hora a 870°C e resfriado no ar. Ataque: 10ml HNO₃ - 10ml ácido acético - 15ml HCl - 2 gotas de glicerol. (100X) [Callister Jr., 2001]

2.5.2.2. Aços Inoxidáveis Martensíticos

Os aços inoxidáveis martensíticos também pertencem à classe numérica 400. Eles possuem estrutura cristalina tetragonal de corpo centrado. Devido à adição de carbono, podem ser endurecidos e ter a resistência aumentada pelo tratamento térmico, da mesma forma que os aços carbono. A resistência mecânica obtida pelo tratamento térmico depende do teor de carbono da liga [Metals Handbook, 1972]. São classificados como ferromagnéticos. O principal elemento de liga é o cromo, com um teor típico de 12 a 15%. A figura 2.16 traz a microestrutura típica de um aço inoxidável martensítico.

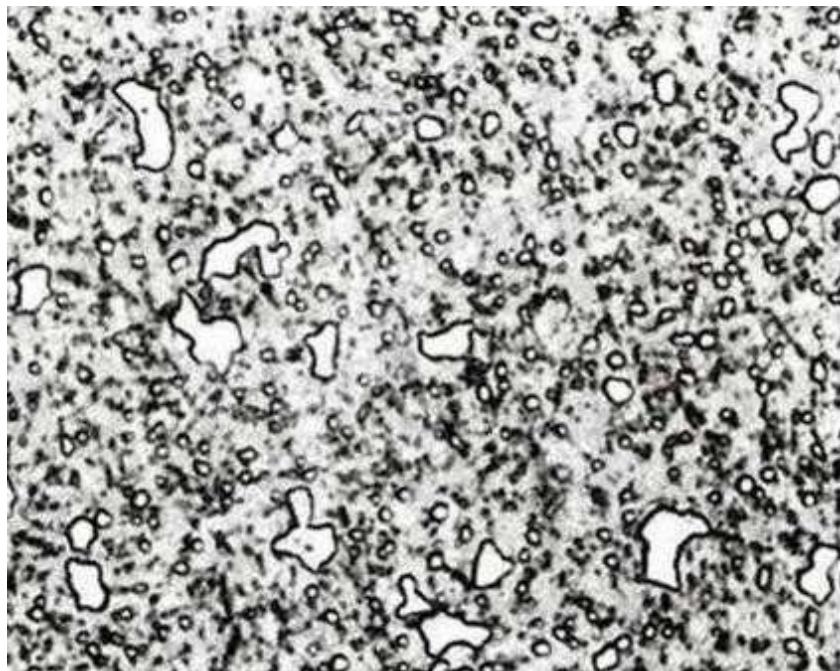


Figura 2.16 – Aço inoxidável martensítico ABNT 440C, austenitizado por 1 hora à 1010°C, resfriado no ar e revenido 2h à 230°C. Ataque: Reativo de Vilella. (500X) [Callister Jr., 2001]

Na condição recozida, apresentam limite de escoamento com cerca de 275 MPa e são usinados, conformados ou trabalhados a frio nessa condição. Quando se aumenta o teor de carbono, consequentemente se aumenta o potencial da resistência e dureza, mas diminui-se a ductilidade e tenacidade. Os aços com teores de carbono mais elevados são capazes de serem tratados na dureza de 60 HRC.

A melhor resistência à corrosão é obtida no tratamento térmico, ou seja, na condição de temperado e revenido.

Alguns aços inoxidáveis martensíticos são modificados para melhorar a usinabilidade, como é o caso do 416, 420F e 440F.

2.5.2.3. Aços Inoxidáveis Austeníticos

Os aços inoxidáveis austeníticos contêm na sua composição cromo, níquel e manganês, ou apenas cromo e níquel como elementos principais, e são identificados pela ordem 200 ou a série 300, respectivamente.

Os aços inoxidáveis austeníticos são os maiores, em termos de número de ligas e de utilização. Como os ferríticos, os austeníticos não podem ser endurecidos por tratamento térmico, tendo o nível de teor de carbono restrito, mas as adições, principalmente de níquel,

mudam a estrutura em temperatura ambiente para o arranjo atômico cúbico de face centrada, que também não é magnética. Eles respondem ao trabalho a frio com o aumento da resistência mecânica. O endurecimento por encruamento é acompanhado pelas mudanças parciais na estrutura, com a conformação de uma fase de martensita ferromagnética, que explica o porquê de, com a deformação a frio ocorrer os chamados “aços austeníticos magnéticos”.

São caracterizados por apresentar excelente resistência à corrosão e uma ótima conformabilidade. Recozidos, eles possuem máxima resistência à corrosão e ductilidade. A figura 2.17 mostra a microestrutura de um aço inoxidável ABNT 316.

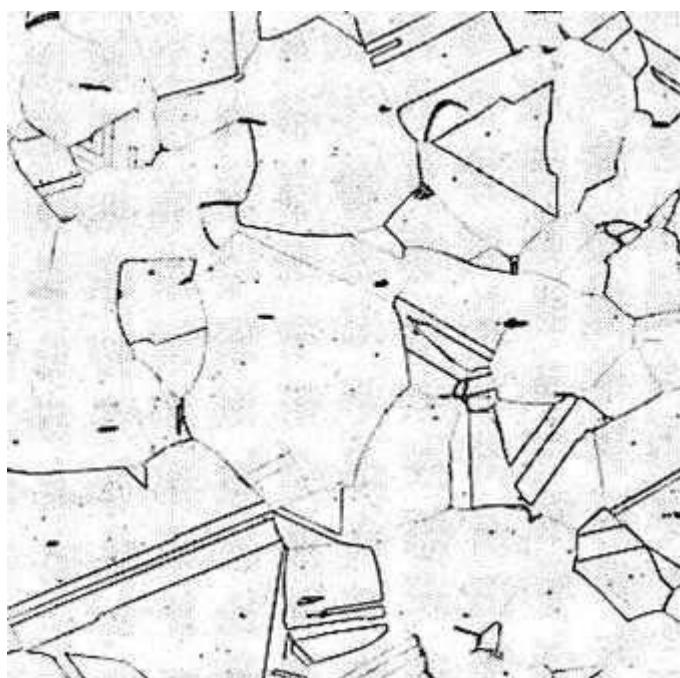


Figura 2.17 – Aço inoxidável ABNT 316 recozido à 1035°C e temperado. Ataque: $\text{H}_2\text{O} - \text{HCl} - \text{HNO}_3$ (100X) [Callister Jr., 2001]

O molibdênio é adicionado em alguns dos aços austeníticos para aumentar sua resistência aos mecanismos de corrosão localizados tais como corrosão galvânica e alveolar.

O exemplo típico deste grupo é o 304, também conhecido por aço inoxidável 18-8, que se refere à porcentagem de cromo, 18%, e a de níquel, 8% [Metals Handbook, 1972]. Possui grande ductilidade, conformabilidade e tenacidade, até em temperaturas criogênicas. Este é o aço inoxidável objeto deste estudo.

2.5.2.4. Aços Inoxidáveis Duplex

Os aços inoxidáveis duplex têm uma estrutura mista de 50% de austenita e 50% de ferrita, e como resultado têm características desses tipos básicos. Uma composição química típica tem 22% de cromo, 5% de níquel e 3% molibdênio [Metals Handbook, 1972] com pequena adição de nitrogênio.

Os aços duplex são endurecíveis por tratamento térmico, mas são mais duros que os aços ferrítico e austenítico na condição recozida e tem limite de escoamento médio em torno de 450 MPa. Como os aços ferríticos, são ferromagnéticos, mas têm boa conformabilidade e soldabilidade dos aços austeníticos. Entretanto são necessários maiores esforços na conformação devido a sua maior resistência. Sua grande vantagem é sua maior resistência à corrosão sob tensão.

2.5.2.5. Aços Inoxidáveis Endurecíveis por Precipitação

Os aços inoxidáveis endurecíveis por precipitação são endurecíveis por tratamento de envelhecimento e assim tem algumas similaridades com os aços martensíticos, entretanto o processo metalúrgico para endurecimento é diferente. Estes aços são capazes de atingir a resistência a tração até 1700 MPa [Metals Handbook, 1972]. Normalmente têm estrutura martensítica e, desta forma são ferromagnéticos.

Os aços endurecíveis por precipitação têm boa ductilidade e tenacidade, dependendo do tratamento térmico. Sua resistência à corrosão é comparável ao aço austenítico 304. Podem ser soldados mais facilmente que os aços martensíticos comuns.

Esse tipo de aço é desenvolvido e usado de forma ampla, tanto nos Estados Unidos como no Reino Unido, nas aplicações aeroespaciais.

2.5.4. Usinabilidade dos Aços Inoxidáveis

A usinabilidade dos aços inoxidáveis é substancialmente diferente da usinabilidade dos aços carbonos e outras ligas. Em vários aspectos, a maioria dos aços inoxidáveis são mais difíceis de usinar. É devido a esse fato que existem aços inoxidáveis de usinabilidade melhorada [Lourenço, 1996].

Segundo Ramos [2004], a dificuldade de usinagem aumenta com o teor de elementos de liga, desgastando de forma intensa as ferramentas e reduzindo a qualidade de acabamento superficial. Carbonetos abrasivos presentes nos aços inoxidáveis altamente ligados causam rápido desgaste nas ferramentas. A quebra do cavaco também é dificultada, aumentando a deformação na zona de cisalhamento primária com consequente redução da velocidade de corte.

Denkena et al [2002] constatou a melhoria da usinabilidade dos aços inoxidáveis com a adição de enxofre e manganês como elementos de liga e também da influência positiva a altas velocidades de corte que o cobre proporciona como elemento ligante. O sulfeto de manganês é mole e deformável, sendo muito benéfico para a usinabilidade. Embora Fonseca et al [2002] tenham obtido valores similares de rugosidade da superfície da peça para o aço inoxidável austenítico ABNT 304 e para o mesmo aço com adição de enxofre.

As características dos aços inoxidáveis que exercem grande influência na usinabilidade são:

- Alto limite de resistência à tração;
- Alta taxa de encruabilidade, particularmente das ligas austeníticas;
- Alta ductilidade.

Esses fatores explicam a tendência do material de formar aresta postiça de corte na ferramenta durante as operações tradicionais de usinagem. Os cavacos removidos durante o corte exercem altas pressões na aresta de corte. Estas pressões, quando combinadas com altas temperaturas na interface cavaco-ferramenta causam a aderência de porções de cavacos na ferramenta. Além disso, a baixa condutividade térmica dos aços inoxidáveis contribui com o aumento do calor durante o corte.

Durante a usinagem dos aços inoxidáveis forma-se uma camada encruada de alta resistência que se opõe ao avanço da ferramenta. Simultaneamente, a formação de cavacos contínuos, causada pela alta ductilidade do material e o atrito elevado na interface cavaco-ferramenta leva a um aquecimento na região de corte. Os aços inoxidáveis, por terem uma baixa condutividade térmica, não dissipam efetivamente o calor gerado. O aquecimento compromete a vida da ferramenta e a qualidade superficial da peça [Mesquita et al., 2003].

Os aços inoxidáveis geralmente são usinados em equipamentos de alta produção. A melhor forma de se conseguir o máximo de usinabilidade é especificar um aço inoxidável de usinabilidade melhorada, quando o uso a que se destinarão as peças permitir. A melhor

usinabilidade está associada a uma condição de baixa dureza e resistência e baixa ductilidade [Ramos, 2004].

Os aços inoxidáveis da série 400 são os mais fáceis de usinar, porém eles produzem cavacos em fita, o que pode diminuir a produção.

As séries 200 e 300, por outro lado, são caracterizadas como as mais difíceis de usinar, primeiramente por causa da sua ductilidade e por fim devido a sua capacidade de encruar muito rapidamente. Os aços inoxidáveis duplex apresentam pior usinabilidade do que os austeníticos ABNT 304 e 316, devido à sua maior resistência mecânica [Ramos, 2004].

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Os trabalhos experimentais foram realizados no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem – LEPU, sendo que as medições de desgaste, fotografias e análises de imagens foram feitas no Laboratório de Metrologia, e a preparação das amostras metalográficas foram feitas no Laboratório de Tribologia e Materiais – LTM, todos pertencentes à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia – UFU.

Os testes consistiram basicamente de operações de torneamento cilíndrico externo para obtenção de amostras de cavaco, “quick-stop” e medição de temperatura. Foram utilizadas ferramentas novas e com vários níveis de desgaste. A seguir são descritos os materiais, equipamentos e metodologia utilizada.

3.1. MATERIAIS E EQUIPAMENTOS

3.1.1. Peça

Foram utilizadas, ao longo de todos os testes, duas barras cilíndricas de aço inoxidável ABNT 304, de 100 mm de diâmetro e 500 mm de comprimento. A tabela 3.1 apresenta a composição química do material utilizado.

Tabela 3.1. Composição do aço inoxidável austenítico ABNT 304 (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
0,0700	0,500	1,750	0,0420	0,0210	18,8200	8,9300
Mo	W	Co	V	Ti	Al	Sn
0,4000	0,1700	0,1400	0,0500	0,0050	0,0100	0,0130
Cu	Pb	Nb	Mg	Ca	N	B
0,2500	0,0040	0,0030	0,0060	0,0009	0,0261	0,0015

Para a medição de dureza do material, utilizou-se um medidor universal de dureza Vickers com carga de 20 Kg, aplicada durante 30 segundos com penetrador piramidal de base quadrada. Realizou-se 15 medidas de diferentes pontos ao longo da seção transversal da barra e calculou-se a média dessas durezas medidas. A figura 3.1 mostra a microestrutura do material que possui dureza média de 143 HV.

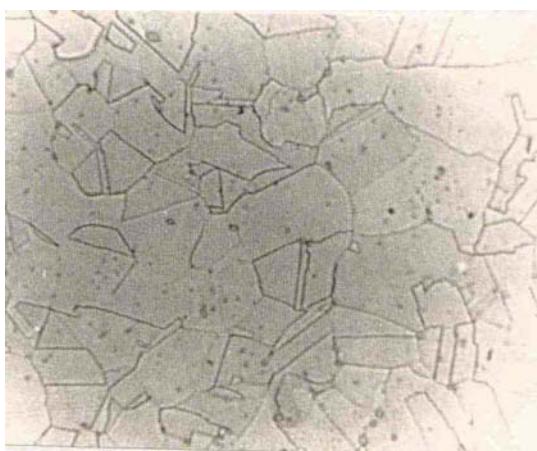


Figura 3.1 – Aço inoxidável austenítico 304 (126X)

Para a obtenção de micrografias, tanto do material da peça, quanto de cavacos e amostras de “quick-stop”, as amostras foram lixadas com lixas de granulometria 120, 240, 320, 400, 600 e 1000. Em seguida, feito o polimento utilizando-se pasta de diamante com granulação de 3 µm e 1 µm. Para o ataque químico para revelar a microestrutura, o reagente utilizado foi uma mistura de ácidos composta de 5 ml de glicerol, 10 ml de ácido nítrico, 10 ml de ácido acético e 15 ml de ácido clorídrico, com exposição das amostras durante 1 minuto.

Para a preparação das amostras de cavacos tomou-se o cuidado de posicionar os mesmos, durante o embutimento, numa posição adequada para lixamento da superfície paralela ao plano ortogonal. Para facilitar o posicionamento foi utilizada resina odontológica da marca Jet para o embutimento das amostras.

3.1.2. Ferramentas de Corte

As ferramentas utilizadas nos testes de obtenção de amostras de cavaco e medição de temperatura foram insertos de metal duro revestido com TiN com especificação ISO SNMG 120404 MF 431, da Sandvik Coromant. O suporte usado tem especificação ISO PSSNR 2020 K12, também da Sandvik.

Nos ensaios para obtenção de amostras de “quick-stop” os insertos utilizados foram de metal duro, sem revestimento com especificação ISO SPUN 120308. Isto se deve ao fato do equipamento ter sido constituído especificamente para esta ferramenta.

3.1.3. Equipamentos Utilizados

Durante os testes de obtenção de amostras de cavaco e medição de temperatura, utilizou-se o torno com variação contínua de velocidade, Revolution 220, da Deb`Maq, com 7,5 CV de potência, mostrado na figura 3.2.



Figura 3.2 – Torno Revolution 220 da Deb`Maq

Para a medição da espessura dos cavacos, foi utilizado um micrômetro Mitutoyo com resolução de 0,01 mm. O desgaste da ferramenta foi monitorado e medido utilizando-se estereomicroscópio marca Olimpus com ampliação máxima de 45 vezes. Este microscópio

possui câmera de vídeo acoplada ao computador para utilização do software de análise de imagem Image Pro. As fotomicrografias também foram feitas utilizando o software de análise de imagem através do microscópio metalúrgico Lambda.

Para medição de temperatura foi utilizado um sensor infravermelho Raytek modelo Thermalert TX com o software Data Temp Multidrop. Este equipamento permite a obtenção de temperaturas na faixa de -17,8 °C a 540 °C, numa área de superfície de 2,5 mm de diâmetro, desde que o sensor esteja posicionado a 76 mm da superfície.

O teste de “quick-stop” foi realizado no torno mecânico IMOR MAX II 520.

O dispositivo destinado à realização de ensaios com o dispositivo de “quick-stop” foi desenvolvido no LEPU (Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem) da Universidade Federal de Uberlândia. Ele é acionado pelo impacto de um martelo manual. Após o golpe do martelo, um pino de impacto exerce uma força vertical sobre um pino de cisalhamento (pino fusível) que se rompe imediatamente. Após a fratura, o suporte desloca-se afastando a ferramenta da peça que está sendo usinada. O porta-ferramenta gira então em torno do pino de pivotamento, e a massa de amortecimento evita o rebote do suporte. A figura 3.3 apresenta o esquema de montagem do dispositivo.

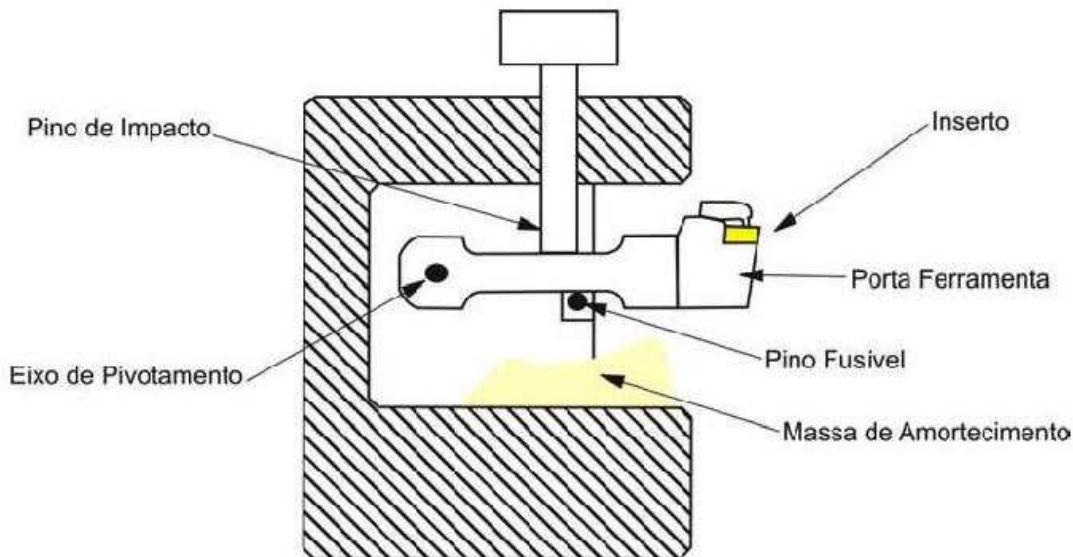


Figura 3.3 – Vista em corte do dispositivo “quick-stop” do LEPU [Evangelista et al., 2006]

O desgaste das ferramentas para este ensaio foi medido utilizando-se o estereomicroscópio com o software de análise de imagem. Além disso, foi utilizado o

microscópio eletrônico de varredura (MEV) para fotos de grande ampliação das amostras de raiz de cavaco obtidas com o dispositivo de “quick-stop”.

3.2. METODOLOGIA

3.2.1. Obtenção de Amostras de Cavaco para Vários Níveis de Desgaste da Ferramenta

Foram realizados testes de usinagem para obtenção de amostras de cavaco para posterior análise. Para estes testes foram utilizadas as condições de corte de acordo com a tabela 3.2.

Tabela 3.2. Condições de corte utilizadas nos ensaios obtenção de amostras de cavaco para vários níveis de desgaste da ferramenta

Condições de Corte	Valor
Velocidade de Corte (m/min)	125
	130
	150
	160
	170
Profundidade de Corte (mm)	1
Avanço (mm/rev)	0,15

Os valores de velocidade de corte foram escolhidos baseados nas instruções do fabricante da ferramenta. Foram utilizadas ferramentas novas e com diferentes níveis de desgaste. Para obtenção dos níveis de desgaste, ferramentas foram utilizadas em ensaios numa barra do próprio material, para manter o mesmo mecanismo e forma de desgaste. Utilizou-se, inicialmente, uma aresta nova, sem desgaste, para cada velocidade pré-determinada. Logo após, os testes foram realizados para cada velocidade de corte com desgastes diferentes, que variaram de 0,1 mm até 0,5 mm, com acréscimo de 0,1 mm a cada passe. Após o término do passe, retirava-se a ferramenta e monitorava-se o desgaste.

Foram realizados 30 passes para coleta de cavacos, com velocidades de corte diferentes e diversos níveis de desgaste determinados. Todos os testes foram realizados a seco.

Após os testes de torneamento, mediu-se a espessura dos cavacos (h') colhidos. Realizou-se uma média de cinco medidas para cada grupo de cavacos. Com os valores de h' , calculou-se o grau de recalque (Rc) dado pela equação 3.1:

$$Rc = \frac{h'}{h} \quad (3.1)$$

onde h = espessura de corte.

A espessura de corte é calculada através da equação 3.2:

$$h = f_c \times \operatorname{sen}\chi_r \quad (3.2)$$

onde : f_c = avanço de corte e χ_r = ângulo de posição da aresta principal de corte.

O valor do ângulo de posição da aresta principal de corte, neste caso, é determinado pelo suporte da ferramenta, e vale 45° , e o avanço utilizado foi de 0,15 mm, resultando num valor da espessura de corte, h , de 0,106066 mm.

Calculou-se também o ângulo de cisalhamento primário teórico para cada amostra de cavaco selecionada, conforme a Equação 3.3:

$$\operatorname{tg}\phi = \frac{\cos\gamma_n}{Rc - \operatorname{sen}\gamma_n} \quad (3.3)$$

sendo que ϕ = ângulo de cisalhamento primário e γ_n = ângulo de saída normal da ferramenta, e que para esta ferramenta utilizada vale 8° .

Para cada condição de corte foi obtida a metalografia dos cavacos correspondente, segundo a metodologia descrita anteriormente.

3.2.2. Teste de Temperatura

Os parâmetros de corte foram mantidos com os mesmos valores do teste de desgaste, ou seja, profundidade de corte (a_p) com o valor de 1 mm e o avanço (f_n) de 0,15 mm/volta. Utilizou-se também as mesmas velocidades usadas no teste para obtenção de amostras de cavaco. Com exceção da primeira velocidade que foi de 120 m/min, as demais velocidades utilizadas foram 130 m/min, 150 m/min, 160 m/min e 170 m/min. Os testes foram realizados a seco.

Aqui, da mesma forma que no teste da seção anterior, as ferramentas utilizadas foram desgastadas previamente numa barra do próprio material, para evitar influência da composição química na forma e os mecanismos de desgaste. Usou-se, inicialmente, uma aresta nova, sem desgaste, para cada velocidade pré-determinada. Logo após, os testes foram realizados para cada velocidade de corte com desgastes diferentes, que variaram de 0,1 mm até 0,5 mm, com acréscimo de 0,1 mm a cada passe.

O sensor infravermelho foi posicionado de forma que a superfície da sua lente ficasse a 76 mm da superfície de saída da ferramenta, a fim de se ajustar o foco na menor região possível (2,5 mm de diâmetro). Fez-se a mira do local onde o sensor captaria as temperaturas através de um feixe luminoso que se encontrava num suporte adaptado ao sensor, como é mostrado na figura 3.4.

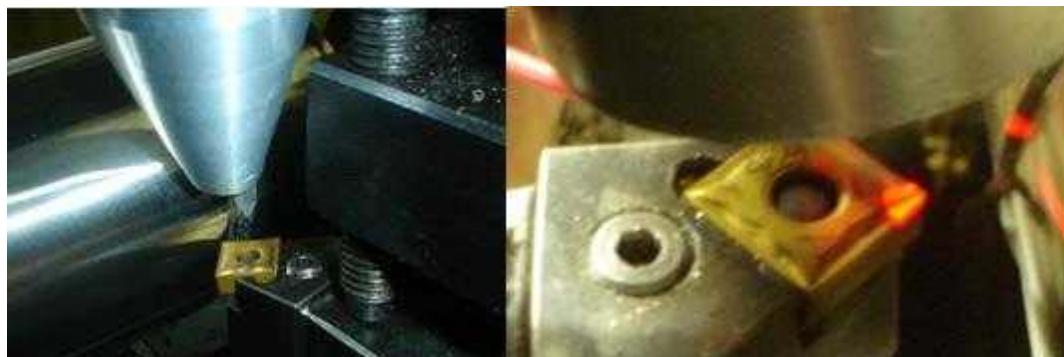


Figura 3.4 – Mira da posição de medida de temperatura do sensor infravermelho

Após posicionar o sensor no local certo de medição, trocou-se o suporte adaptado com o feixe luminoso por suporte que tem a finalidade de proteger a lente do sensor.

A duração de cada teste foi de 30 segundos. Durante esse tempo, foi captado o sinal enviado pelo sensor, através do software Data Temp Multidrop. (Figura 3.5.)

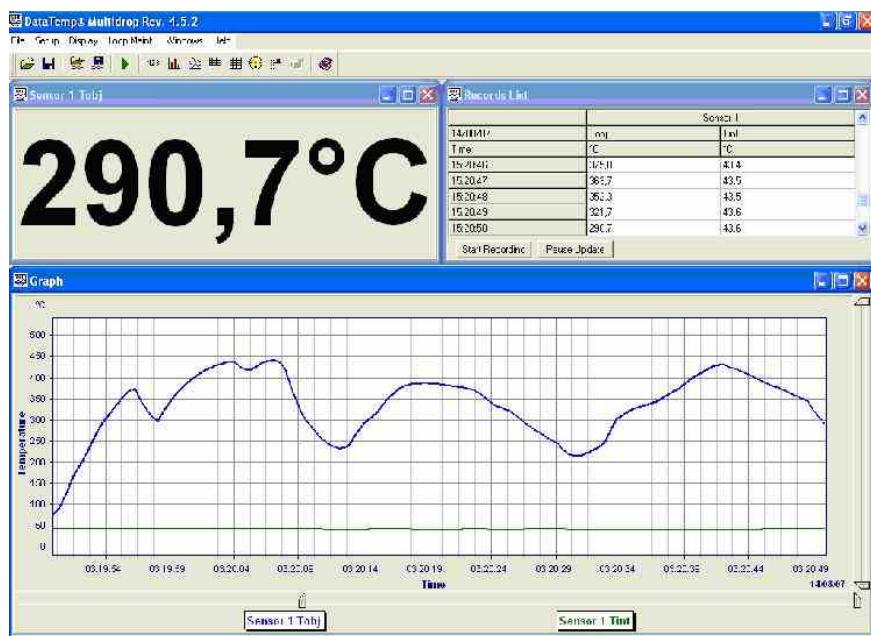


Figura 3.5 – Programa de aquisição de temperatura do sensor em funcionamento

Foram realizados 30 ensaios para medição da temperatura da superfície superior dos cavacos, com velocidades de corte diferentes e diversos níveis de desgaste, combinados da mesma forma que no teste de coleta de cavacos.

Fez-se fotos de amostras dos cavacos obtidos de cada ensaio, para se relacionar o tipo e a forma com os gráficos de temperatura medida.

3.2.3. Teste com Método “Quick-Stop”

Para esse teste, as ferramentas de metal duro sem revestimento foram desgastadas previamente, de forma artificial, num rebolo abrasivo, a fim de se obter, com aproximação, os níveis de desgaste desejados, que foram de 0,2 mm e 0,5 mm, além de se utilizar uma ferramenta nova. Os insertos desgastados são mostrados na figura 3.6.

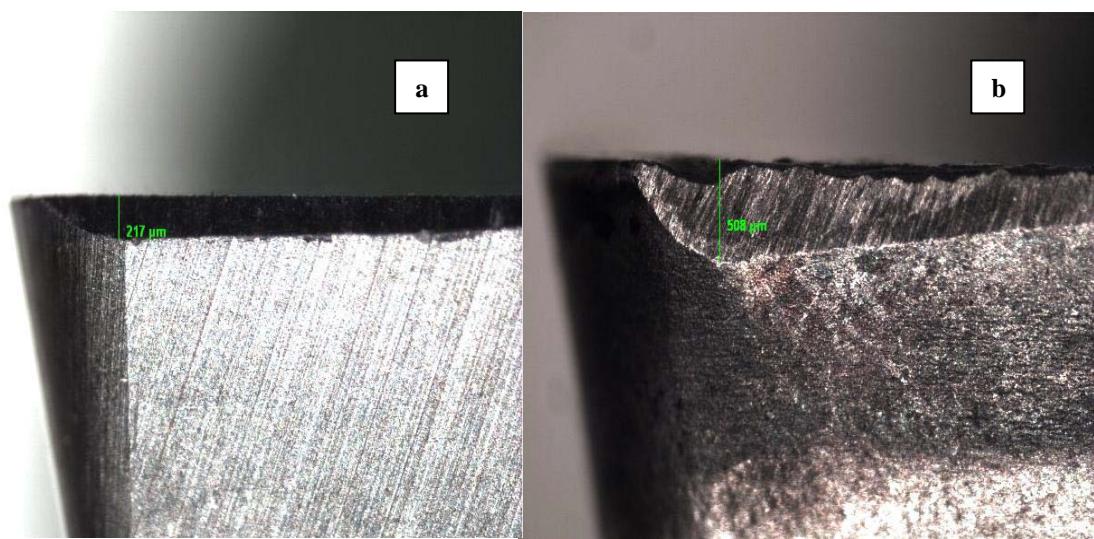


Figura 3.6 – Ferramentas desgastadas artificialmente: a) $VB \cong 0,2 \text{ mm}$; b) $VB \cong 0,5 \text{ mm}$

Os ensaios foram realizados com profundidade de corte (a_p) de 1 mm e avanço (f_n) de 0,15 mm/volta e velocidade de corte de 150 m/min.

As amostras de raiz de cavaco foram retiradas da peça com o auxílio de uma serra. Foram feitas fotos dessas amostras no microscópio eletrônico de varredura. As mesmas foram posteriormente embutidas, lixadas polidas e atacadas para revelação da microestrutura conforme foi explicado no item 3.1.1.

Para a realização deste teste foi necessária a utilização do torno IMOR MAX II 520, que não possui variação contínua de rotação do eixo árvore. Por isto, decidiu-se realizar os testes com velocidade constante de 150 mm/min.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E ANÁLISE

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os resultados de análise de cavacos, da medição de temperatura, as análises das amostras dos ensaios de “quick-stop” e as formas de desgaste das ferramentas utilizadas nos testes.

4.1. ANÁLISE DAS AMOSTRAS DE CAVACO

A tabela 4.1 mostra os valores de espessura dos cavacos recolhidos em cada passe, em função do nível de desgaste das ferramentas e velocidade de corte.

Tabela 4.1 – Espessura média dos cavacos relacionados à velocidade de corte e desgaste da ferramenta em mm na usinagem do aço inox ABNT 304

Desgaste da Ferramenta VB (mm)	Velocidade de Corte (m/min)				
	125	130	150	160	170
0,0	0,53	0,48	0,48	0,52	0,55
0,1	0,59	0,58	0,44	0,52	0,35
0,2	0,49	0,47	0,46	0,43	0,41
0,3	0,46	0,48	0,50	0,51	0,50
0,4	0,50	0,53	0,52	0,48	0,51
0,5	0,62	0,58	0,60	0,64	0,56

A Tabela 4.1 mostra que a espessura dos cavacos tende a aumentar com o desgaste da ferramenta, a partir de valores de VB de 0,2 mm, para qualquer velocidade de corte. Este comportamento é diferente para desgastes menores. Pode-se observar que apenas para VB

igual a 0,2 mm a espessura do cavaco diminuiu com o aumento da velocidade de corte. Este comportamento é melhor visualizado através do gráfico da figura 4.1.

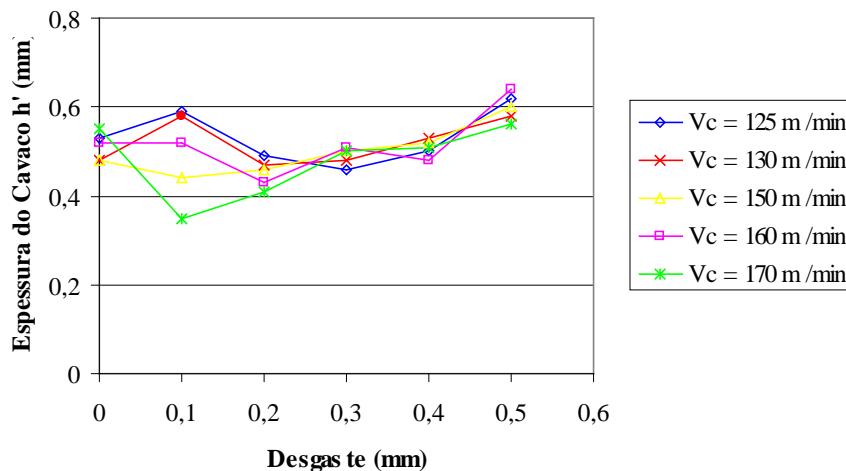


Figura 4.1 – Variação da espessura do cavaco com o desgaste da ferramenta para as várias velocidades de corte estabelecidas na usinagem do aço inox ABNT 304

Conforme esperado, a espessura do cavaco aumentou com o aumento do desgaste. O desgaste da ferramenta altera a geometria da cunha de corte, além de aumentar a área de contato com o cavaco e com a peça, segundo Machado e Da Silva [2004], e isso faz aumentar as forças na usinagem. Logo, a quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário também sofre acréscimos e a energia consumida na zona de cisalhamento secundária também aumenta, gerando baixos valores do ângulo de cisalhamento, consequentemente a espessura do cavaco aumenta.

A figura 4.2 mostra a variação da espessura do cavaco com a velocidade de corte para os vários níveis de desgaste da ferramenta na usinagem do aço inox ABNT 304 . Não é possível identificar a influência da velocidade de corte. A princípio, o comportamento é um pouco aleatório, mostrando uma tendência de decréscimo com a velocidade de corte apenas para desgastes de 0,1, 0,2 e 0,5 mm.

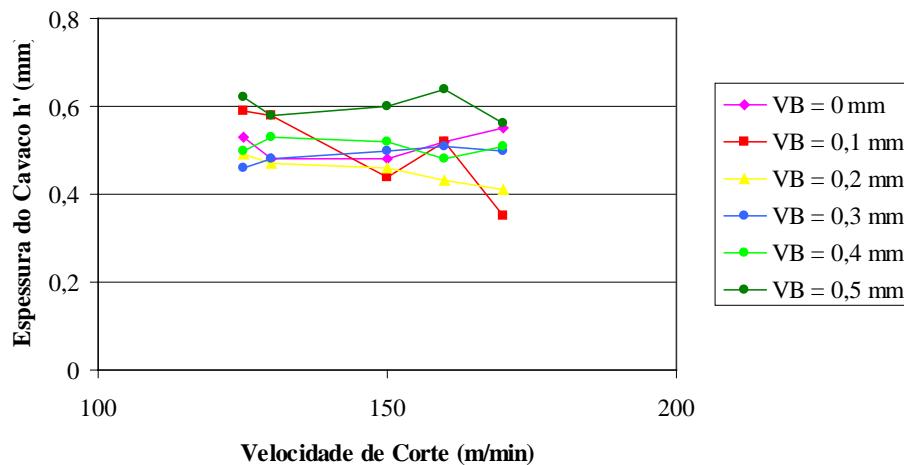


Figura 4.2 – Variação da espessura do cavaco com a velocidade de corte para cada nível de desgaste da ferramenta utilizado na usinagem do aço inox ABNT 304

A velocidade de corte não foi um fator tão determinante na espessura do cavaco quanto o desgaste. Para os aços inoxidáveis austeníticos, as forças de corte sofrem uma tendência à diminuição com o aumento da velocidade, assim como nos aço de médio carbono [Trent, 2000]. Para altas velocidades, como as usadas neste teste, as forças se mantêm praticamente constantes com o aumento da velocidade de corte, o que explica os valores de espessura dos cavacos não terem sofrido variações significativas.

Outra forma de analisar as deformações sofridas pelo cavaco durante a usinagem, o efeito da velocidade de corte e desgaste de ferramenta é através do grau de recalque, R_c , e ângulo de cisalhamento. No caso do grau de recalque, a análise coincide com a análise prévia, pois R_c é simplesmente a relação entre a espessura do cavaco, h' , que neste trabalho é constante, e da espessura de corte, h . O ângulo de cisalhamento também depende neste caso apenas de h' , pois os demais parâmetros são constantes. Os valores obtidos para todos os testes estão mostrados na tabela 4.2.

Tabela 4.2 – Grau de recalque e ângulo de cisalhamento das amostras de cavaco

Passe	Grau de Recalque	Ângulo de Cisalhamento (º)
1	4,996	11,52
2	5,562	10,34
3	4,619	12,46
4	4,337	13,27
5	4,714	12,21
6	5,845	9,84
7	4,525	12,72
8	5,468	10,52
9	4,431	12,98
10	4,525	12,72
11	4,996	11,52
12	5,468	10,52
13	4,525	12,72
14	4,148	13,87
15	4,337	13,27
16	4,714	12,21
17	4,903	11,74
18	5,656	10,17
19	4,903	11,74
20	4,903	11,74
21	4,054	14,19
22	4,808	11,97
23	4,525	12,72
24	6,034	9,53
25	5,185	11,10
26	3,300	17,39
27	3,866	14,87
28	4,714	12,21
29	4,808	11,97
30	5,279	10,90

O maior valor do grau de recalque foi do teste 24, realizado com velocidade de corte de 160m/min com uma ferramenta com desgaste de 0,5 milímetros, que foi de 6,034, e consequente menor valor para o ângulo de cisalhamento, que foi de 9,53º. O menor valor do grau de recalque foi de 3,300 no teste 26 e ângulo de cisalhamento maior de 17,39º. Neste teste a velocidade de corte foi de 170 m/min e desgaste de 0,1 milímetros. Ou seja, valores de velocidades altas e diferença nos valores de desgaste produziram valores extremos de grau de recalque e ângulo de cisalhamento. Com o maior valor de desgaste obteve-se o maior grau de recalque e menor ângulo de cisalhamento. Em contrapartida, com o menor valor de desgaste obteve-se o menor grau de recalque e maior ângulo de cisalhamento.

Evidentemente, os valores do ângulo de cisalhamento primário foram obtidos por considerações geométricas, assumindo uma ferramenta com raio de arredondamento igual a zero e sem aresta postiça de corte. Esta é uma aproximação muito grosseira. Além disso, na

prática é difícil ou improvável que o cisalhamento ocorra num plano, e, portanto, deve ser considerada uma zona de cisalhamento primária.

As figuras mostrando as micrografias dos cavacos obtidos encontram-se no Anexo I. Pode-se notar a presença da zona de fluxo em todas as amostras.

Os cavacos produzidos foram todos do tipo contínuo. Para condições de maior velocidade, os cavacos se apresentavam com aspecto mais distorcido, e com coloração diferente. Sendo que, em condições mais amenas de velocidade e desgaste os cavacos apresentavam coloração amarela, enquanto que para condições mais severas de desgaste e velocidade, os mesmos apresentavam coloração púrpura.

A forma dos cavacos oscilou entre cavacos em arco soltos e conectados. Exceções ocorreram para velocidades mais altas, onde se teve a ocorrência de cavaco helicoidal tipo arruela. A figura 4.3 mostra a variação na forma dos cavacos produzidos em função da velocidade de corte e desgaste.

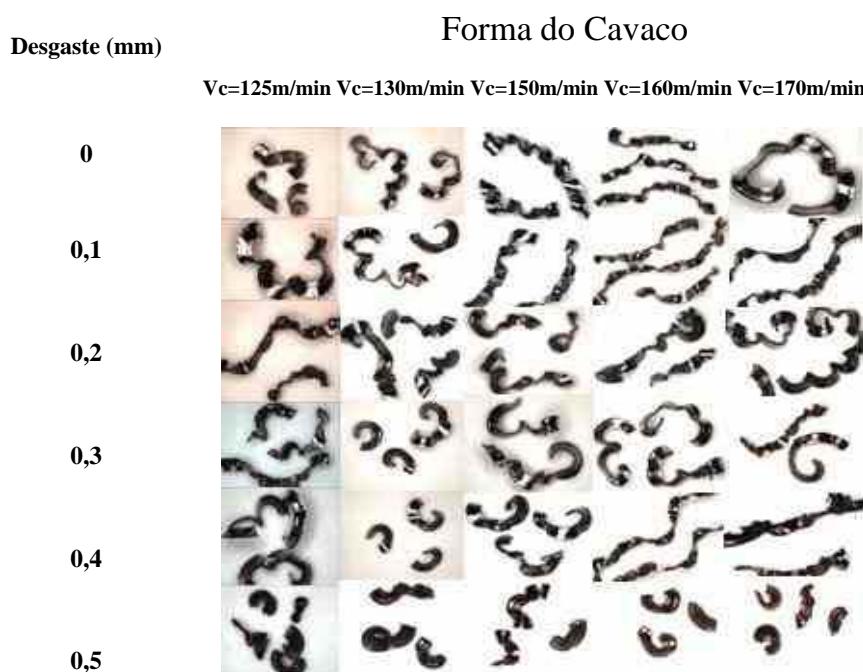


Figura 4.3 – Forma e tipo dos cavacos obtidos nos ensaios

Como já era esperado para aços inoxidáveis austeníticos, devido a alta ductilidade, os cavacos obtidos foram do tipo contínuo. A diferença na coloração, provavelmente se deve ao fato dos diversos óxidos formados a diferentes temperaturas. Para condições mais amenas de

desgaste e velocidade, foram obtidos tons mais amarelados e para condições mais severas desses parâmetros foram obtidos tons de púrpura.

A forma dos cavacos obtidos também se deve a ductilidade do material da peça. A princípio, com velocidades mais baixas, os cavacos são da forma de arco conectados. A medida que o desgaste vai aumentando, eles se desconectam, e com o aumento da velocidade a tendência é se tornarem mais contínuos e mais deformados.

4.2. TEMPERATURA DO CAVACO

Os resultados das temperaturas medidas com o sensor infravermelho estão mostrados no Anexo II. São 30 gráficos mostrando os sinais de temperatura obtidos durante a usinagem para as combinações de velocidade de corte e nível de desgaste. Cada teste teve a duração suficiente para a estabilização da temperatura medida. Para a maioria dos testes percebe-se, claramente, o aumento da temperatura e a estabilização num tempo de aproximadamente 15 s. Para alguns testes, o sinal sofria muita interferência devido ao emaranhado de cavaco que se formava entre o sensor e a área de medição de temperatura.

Dos gráficos, foram retirados os valores máximos de temperatura obtidos. Estes valores estão mostrados na tabela 4.3 para todos os 30 testes.

Tabela 4.3 – Temperatura máxima e morfologia do cavaco em cada ensaio realizado

Ensaio	Vc (m/min)	VB (mm)	T_{Máx} do Cavaco (°C)
1	120	0	274
2	130	0	263
3	150	0	237
4	160	0	247
5	170	0	248
6	120	0,1	273
7	130	0,1	255
8	150	0,1	250
9	160	0,1	235
10	170	0,1	228
11	120	0,2	299
12	130	0,2	290
13	150	0,2	280
14	160	0,2	284
15	170	0,2	275
16	120	0,3	287
17	130	0,3	295
18	150	0,3	299
19	160	0,3	298
20	170	0,3	290
21	120	0,4	350
22	130	0,4	290
23	150	0,4	298
24	160	0,4	310
25	170	0,4	375
26	120	0,5	324
27	130	0,5	327
28	150	0,5	335
29	160	0,5	367
30	170	0,5	385

Os resultados da tabela 4.3 estão plotados nas figuras 4.4 e 4.5. A figura 4.4 mostra a variação de temperatura máxima do cavaco com o desgaste de flanco para todas as velocidades de corte. De acordo com o gráfico, a temperatura é diretamente proporcional ao desgaste. A temperatura na zona de corte é proporcional à energia envolvida no processo, já que é quase toda convertida em calor. De acordo com a figura 4.1, a espessura do cavaco aumenta com o desgaste da ferramenta, ou seja, o grau de recalque aumenta. Como este parâmetro é uma medida da quantidade de deformação ou energia envolvida no processo, é de se esperar o aumento da temperatura com o desgaste.

Se o aumento da temperatura causa formação de óxido no cavaco, poderia se estabelecer uma relação direta da cor do cavaco com o estado de desgaste da ferramenta.

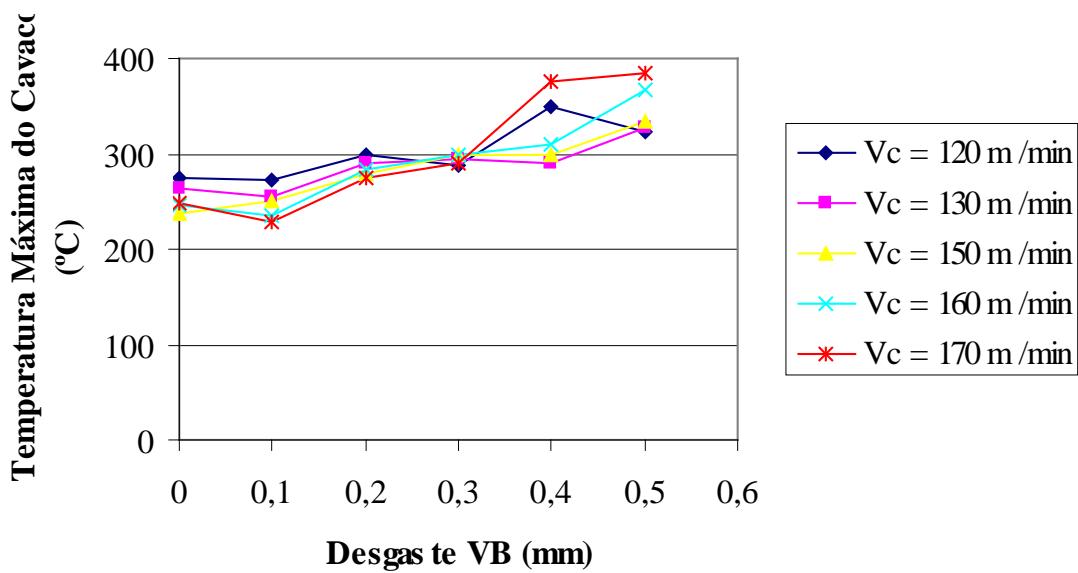


Figura 4.4 – Efeito do desgaste na temperatura do cavaco

As temperaturas atingidas pelos cavacos também sofreram maior influência do desgaste. Com o aumento do desgaste, as temperaturas máximas atingidas pelos cavacos também aumentaram significativamente.

No cavaco é dissipada a maior parte do calor gerado na zona de cisalhamento primária. E com o aumento do desgaste, como já foi visto, aumenta-se a quantidade de deformações na zona de cisalhamento primária, consequentemente, o calor nela gerado e a temperatura do cavaco.

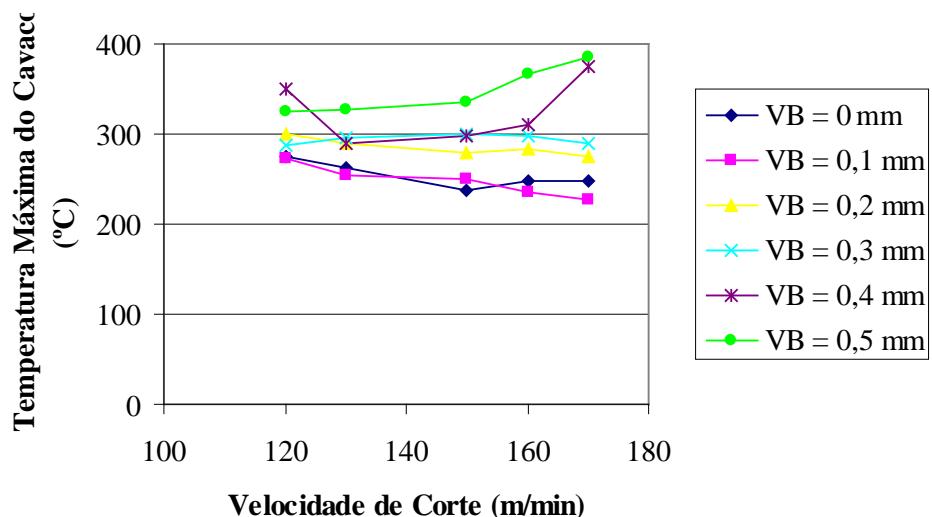


Figura 4.5 – Efeito da velocidade de corte na temperatura do cavaco

Pela análise do gráfico da figura 4.5, nota-se que apenas para os desgastes mais altos, de 0,4 mm e 0,5 mm é que o acréscimo da velocidade de corte é significativo no aumento da temperatura máxima atingida pelo cavaco. Para os demais níveis de desgaste esse efeito não ocorre. Ao contrário, observa-se um ligeiro decréscimo nos valores da temperatura do cavaco.

Boothroyd [1989] propõe um método que permite cálculos aproximados do aumento da temperatura do cavaco devido ao calor gerado na zona de cisalhamento primária. Através dela constatou-se que o aumento de temperatura no cavaco não é muito influenciado pela velocidade de corte. Os resultados dos ensaios comprovam este fato. Praticamente, não houve variações significativas da temperatura do cavaco com o aumento da velocidade de corte, a não ser para os ensaios realizados com as ferramentas de maior nível de desgaste.

Para pequenos valores de desgaste da ferramenta, menores que 0,4 mm, percebe-se uma tendência de decréscimo da temperatura com a velocidade de corte. Estes casos precisam ser analisados com mais detalhes. O efeito da velocidade de corte é aumentar a geração de calor, mas deve-se analisar também o efeito da velocidade de corte no balanço energético. De acordo com a figura 4.2, para estes mesmos níveis de desgaste, a espessura do cavaco diminui com a velocidade de corte. Isto significa que o ângulo de cisalhamento primário aumenta, colocando a fonte de calor mais favorável a dissipar pelo cavaco. Por outro lado, o aumento da velocidade de corte também pode influenciar no tempo necessário para a dissipação de calor. Assim, a temperatura pode ainda estar aumentando durante o movimento do cavaco e se estabilizar em posições mais afastadas da zona de corte. Seria interessante obter a temperatura no cavaco em diferentes posições.

Pela análise da morfologia do cavaco, nota-se que para todos os testes realizados os cavacos são do tipo contínuo. Porém, quanto à forma, pode-se perceber que com a ferramenta sem desgaste o cavaco resultante sempre foi em arcos conectados. Ao passo que, na maioria dos outros ensaios os cavacos apresentaram forma helicoidal curta e bem deformada.

Como já era esperado, os cavacos deste teste mantiveram o mesmo tipo e as mesmas formas do teste de desgaste, que foi realizado nas mesmas condições. O tipo contínuo, por ser característica dos aços inoxidáveis austeníticos, devido a sua grande ductilidade, e as formas de arcos conectados para menores desgastes e helicoidal bem distorcido para desgastes maiores.

Quanto à coloração, não houve diferenças tão significativas, sendo que todos ficaram entre tons amarelados, a não ser na amostra do último ensaio, que chegou a um tom avermelhado. A coloração é um fato bem característico das temperaturas atingidas, devido a

formação dos óxidos na superfície dos cavacos. Para velocidades mais baixas, a coloração é sempre amarelada. E para a condição mais severa de velocidade e desgaste, a coloração se aproxima do vermelho.

4.3. TESTE COM TÉCNICA DE “QUICK-STOP”

As seguintes figuras apresentam fotos feitas no microscópio eletrônico de varredura (MEV) das três amostras obtidas nos ensaios que utilizaram a técnica de “quick-stop”.

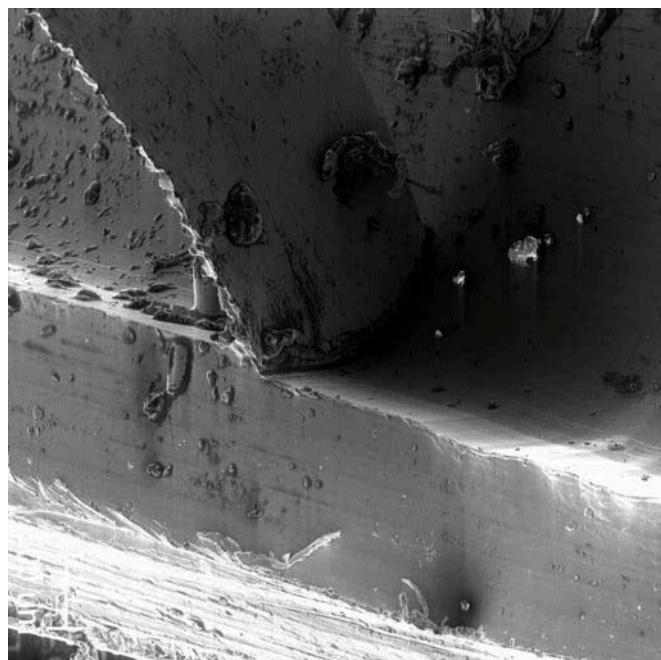


Figura 4.6 – Amostra da raiz do cavaco para $VB = 0 \text{ mm}$; $V_c = 150 \text{ m/min}$ (20 X)

Devido às condições frágeis do cavaco na amostra de “quick-stop”, a amostra não pôde ser limpa, resultando nas inclusões presentes na figura 4.6. Observa-se, nesta amostra, um raio de curvatura do cavaco grande. Não há sinais de que o material tenha aderido na ferramenta durante o corte. Não existe presença de aresta postiça de corte. A separação da ferramenta e da peça apresenta um aspecto limpo.

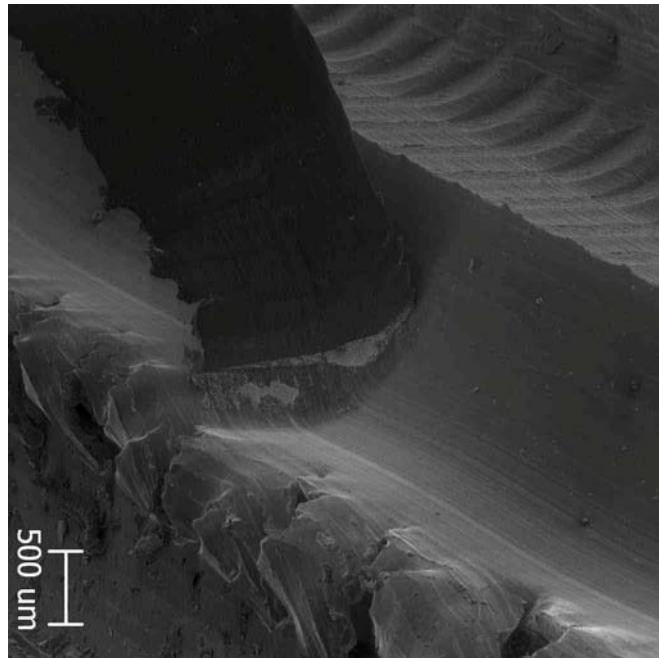


Figura 4.7 – Amostra da raiz do cavaco para $VB = 0,2\text{ mm}$; $V_c = 150\text{ m/min}$ (20 X)

A amostra da figura 4.7 tem aspecto mais limpo, podendo-se notar mais uma vez a superfície lisa criada na separação da peça e da ferramenta. Porém, exatamente no início da raiz do cavaco apresentam-se algumas manchas mais claras, que provavelmente são sinais de adesão do material na ferramenta. Esses sinais ficam mais evidentes na figura 4.8.

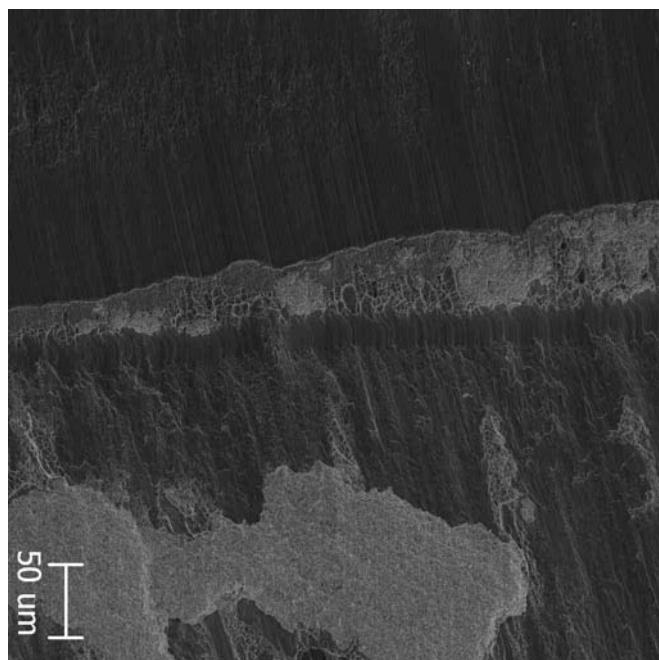


Figura 4.8 – Detalhe dos sinais de adesão do material na raiz do cavaco da amostra usinada com $VB = 0,2\text{mm}$; $V_c = 150\text{ m/min}$ (200X)

Esta amostra também não possui evidências de APC e o raio de curvatura do cavaco também é grande.

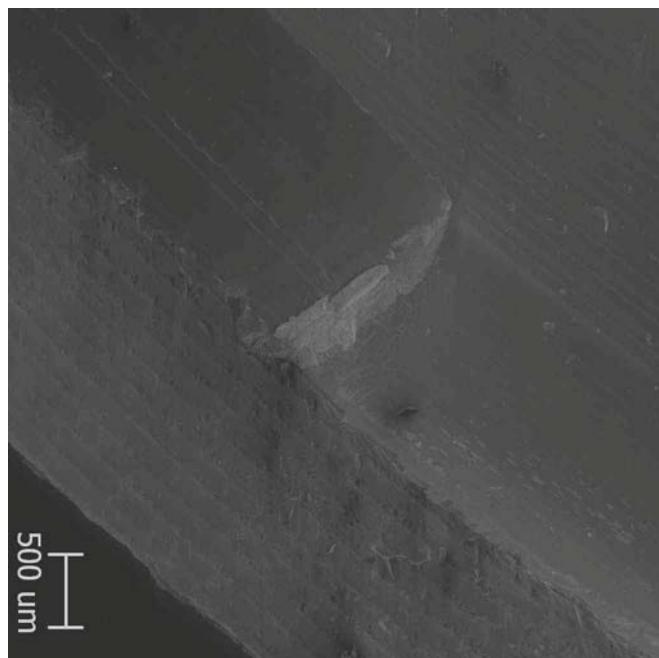


Figura 4.9 – Amostra da raiz do cavaco para $VB = 0,5\text{ mm}$; $V_c = 150\text{ m/min}$ (20 X)

A amostra da figura 4.9 também apresenta sinais fortes de adesão na raiz do cavaco, maiores do que na amostra da figura 4.8. Aqui, tem-se o maior raio de curvatura de cavaco das três amostras. Da mesma forma que nas anteriores, não apresenta sinais de APC.

Segundo Childs et al [2000], quando existe pequena adesão entre o cavaco e a ferramenta, observa-se uma separação limpa entre estes dois elementos nos testes com “quick-stop”. E este fato ocorre principalmente em ferramentas de metal duro. Através das fotos tiradas no MEV, pode-se perceber que com a ferramenta sem desgaste, a superfície posterior do cavaco e a raiz do cavaco possuem esse aspecto de separação limpa entre o cavaco e a ferramenta. Já para as outras duas amostras, que foram feitas com ferramentas desgastadas, apareceram sinais de adesão na raiz do cavaco, e a área de adesão aumentou com o aumento do desgaste. É por este motivo, que com o aumento do desgaste, o cavaco vai se tornando mais desconectado. A adesão aumenta na raiz do cavaco, tornando-a cada vez mais frágil, até seu rompimento.

A figura 4.10 mostra as metalografias feitas das amostras dos ensaios com “quick-stop”.

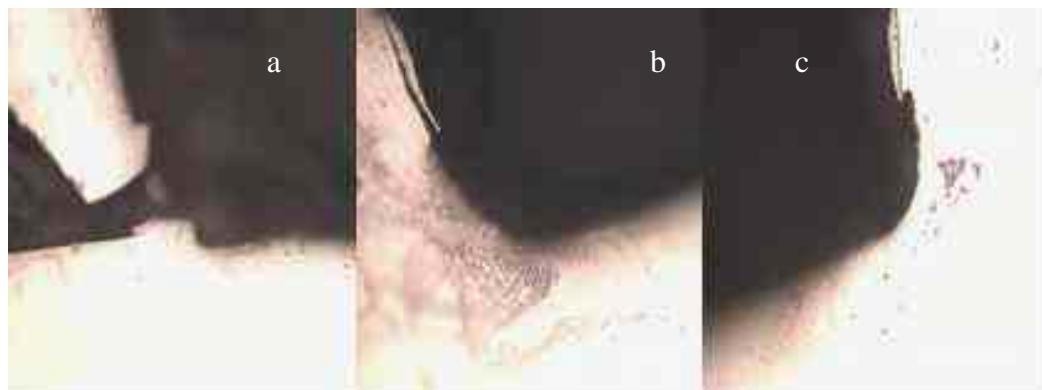


Figura 4.10 – (a) Metalografia da amostra usinada com $VB = 0$ mm; (b) Metalografia da amostra usinada com $VB = 0,2$ mm e (c) Metalografia da amostra usinada com $VB = 0,5$ mm (40 X)

Nas três metalografias podemos perceber a zona de fluxo dos cavacos, confirmando a presença da zona de aderência e que reforça a evidência de altas velocidades e ausência de APC.

4.4. FORMA DE DESGASTE DA FERRAMENTA

A figura 4.11 apresenta a ferramenta utilizada nos testes de desgaste.



Figura 4.11 – Ferramenta utilizada no teste de desgaste: (a) aresta 1, (b) aresta 2, (c) aresta 3

Como se pode observar, o desgaste predominante na ferramenta foi o desgaste de flanco. Na aresta 3 observa-se o desgaste de entalhe, porém este tipo de desgaste só apareceu no final dos testes, quando o desgaste de flanco já era bem avançado.

A figura 4.12 apresenta a ferramenta utilizada nos testes de temperatura.



Figura 4.12 – Ferramenta utilizada no teste de temperatura: (a) aresta 1, (b) aresta 2, (c) aresta 3

Mais uma vez, o desgaste de flanco é a forma de desgaste observada na ferramenta.

É importante ressaltar que não foi verificado desgaste de cratera em nenhuma ferramenta de nenhum dos testes realizados.

Através das fotos das ferramentas utilizadas e das fotos produzidas no MEV, aparentemente pode-se deduzir que o mecanismo de desgaste que ocorre nas pastilhas de metal duro é a abrasão. Porém, quando o desgaste de flanco já era avançado, iniciou-se a formação do desgaste de entalhe, que por alguns autores é considerado um mecanismo de desgaste.

CAPÍTULO V

CONCLUSÃO

Pela análise dos resultados apresentados neste trabalho, pode-se concluir que:

- A espessura do cavaco do aço inoxidável ABNT 304 no processo de torneamento cilíndrico externo sem a utilização de fluido de corte aumenta sensivelmente com o aumento do desgaste de flanco da ferramenta de metal duro, para as condições investigadas.
- A temperatura do cavaco do aço inoxidável ABNT 304 também aumenta com o aumento do desgaste de flanco da ferramenta de metal duro.
- A velocidade de corte não é um fator determinante da espessura e da temperatura do cavaco do aço inoxidável ABNT 304, porém pode ser um indicativo nos níveis avançados de desgaste, nas condições investigadas.
- O cavaco do aço inoxidável ABNT 304 no torneamento cilíndrico externo a seco é do tipo contínuo, independente do valor de desgaste de flanco da ferramenta, da velocidade de corte e da temperatura.
- Os cavacos do aço inoxidável ABNT 304 possuem formas diferentes quando se varia a velocidade de corte e o desgaste de flanco. Em geral, se tornam desconectados a condições extremas de corte, ou seja, altas velocidades e grandes valores de desgaste de flanco da ferramenta.
- A coloração dos cavacos do aço inoxidável ABNT 304 muda com o aumento da velocidade de corte e do desgaste de flanco, devido às temperaturas atingidas. Para temperaturas mais baixas, a coloração do cavaco é de tom amarelado. Para temperaturas mais altas, o tom é avermelhado.

- O mecanismo de desgaste atuante na ferramenta de metal duro usinando aço inoxidável ABNT 304, nas condições utilizadas, é de abrasão. E o tipo de desgaste predominante é de flanco, podendo aparecer o desgaste de entalhe em velocidades de corte mais altas.

CAPÍTULO VI

SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a relação entre as forças de corte e a morfologia do cavaco.
- Investigar a relação entre a temperatura da interface cavaco-ferramenta e a morfologia do cavaco.
- Investigar a relação entre a temperatura da ferramenta e seu desgaste.
- Fazer o monitoramento do desgaste da ferramenta através do cavaco no fresamento.
- Analisar a coloração dos cavacos através de microscopia própria para este fim.
- Fazer o monitoramento do desgaste da ferramenta através do cavaco com outros materiais.
- Definir os parâmetros otimizados para a usinagem do aço inoxidável ABNT 304.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BLUM, T.; SUZUKI, I.; INASAKI, I. Development of a Condition Monitoring System for Cutting Tools Using an Acoustic Emission Sensor. **Bulletin of the Japan Society of Precision Engineering**, v. 22, n. 4, p. 301-8, 1988.

BOOTHROYD, G. **Fundamentals of Metal Machining and Machine Tools**. International Student Edition, 2nd ed., Marcel Dekker Inc., New York, 1989.

BOUD, F. Bar Diameter as an Influencing Factor on Temperature in Turning. **International Journal of Machine Tools and Manufacture**. v. 47, n. 2, p. 223-228, 2007.

CALLISTER JR., W. D. **Fundamentals of Materials Science and Engineering**. John Wiley and Sons, Inc., 5th ed., 2001.

CARBÓ, H.M. Aço Inoxidável – Aplicações e Especificação. Acesita, 2001. Disponível em: <www.nucleoinox.com.br/new/download/Acesita_Aplica_Especificacao.pdf>. Acesso em: 12 mar. 2007.

CARVALHO, S. R.; LIMA E SILVA, S. M. M.; PINTO, F. A. A.; MACHADO, A. R.; GUIMARÃES, G. Determinação da Temperatura na Interface Cavaco-Peça-Ferramenta durante o Processo de Torneamento usando a Técnica do Simulated Annealing. In: 2º COBEF – CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO, Uberlândia, MG, Brasil, 2003. **Anais**.

CHILDS, T.H.C.; MAEKAWA, T; OBIKAWA, T; YAMANE, Y. **Metal Machining: Theory and Applications**. 1st ed. London: Arnolds, 2000. 408p.

COOK, N. H; FINNIE, I; SHAW, M. C. Discontinuous Chip Formation. **Trans of ASME**, pp. 153-162, Feb. 1954.

COOK, N. H. Chip Formation in Machining Titanium. In: WATERTOWN ARSENAL, Watertown 72, 31st March 1953, Massachussets, **Proc. Symp. On Mach Grindind Titanium**, pp. 1-7

DE MELO, A. C. A. **Estimação da Temperatura de Corte utilizando Problemas Inversos em Condução de Calor**, 1998, 116 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DEARNLEY, P. A.; TRENT, E. M. Wear Mechanisms of Coated Carbides Tools. **Metals Technology**, vol. 9, p. 60-75, 1982.

DEARNLEY, P. A. New Technique for Determining Temperature Distribution in Cemented Carbide Tools. **Metals Technology**, vol. 10, pp. 205-214, 1983.

DENKENA, B.; FRIEMUTH, T.; GANDARIAS, A. Improving the Machinability of Stainless Steels. In: **5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON BEHAVIOR OF MATERIALS IN MACHINING**, 12-13 novembro, Chester, UK, 2002, **Anais**.

DINIZ, A. E.; PIGARI, A. Monitoramento do Processo de Torneamento em Desbaste Via Emissão Acústica. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA MECÂNICA – COBEM, Anais**.

DOLINSEK, S.; KOPAC, J., Acoustic Emission Signals for Tool Wear Identification. **Wear**. v. 225-229, pp. 295-303, 1999.

EVANGELISTA, N. L.; NAVES, V. T. G.; MACHADO, A. R.; VILARINHO, L. O. Determinação da Velocidade de Retração em Dispositivo “Quick-Stop” (QSD) usando Câmera de Alta Velocidade. In: **IV CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA – 22 a 25 de agosto, Recife, PE, 2006, Anais**.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, 1^a ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda., 1970. 754 f.

FERRAZ JR., F. F. **Desenvolvimento de um Sistema de Monitoramento e Supervisão para o Processo de Torneamento**. 2002. 79 f, Dissertação de Mestrado – Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos.

FONSECA, M. A.; BARBOSA, C. A.; ABRÃO, A. M. Influence of the Chemical Composition on the Machinability of AISI 304 Austenitic Stainless Steel. In: **5TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON BEHAVIOR OF MATERIALS IN MACHINING**, 12-13 novembro, Chester, UK, 2002, **Anais**.

GENNARI, W. J. R.; MACHADO, A. R.; BARBOSA, C. A. Fresamento dos Aços Inoxidáveis ABNT 304 e ABNT 316 com Usinabilidade Melhorada por Desoxidação pelo Cálcio. In: **1º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF**, 2 a 4 de abril, Curitiba, PR, 2001, **Anais**.

ISO 3685. Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools, 1977.

KNIGHT, C. E. The Finite Elements Method in Mechanical Design. PWS Kent Publishing Company, 325 pgs, 1993.

KOSA, T.; NEY, P. Machining of Stainless Steel. Metals Hand Book, 9th ed., vol.16:Machining, ASM International, Metals Park, 1989.

LIN, J.; LEE, S.; WENG, C. Estimation of Cutting Temperature in High Speed Machining. **Journal of Engineering Materials and Technology**, vol. 114, pp 289-296, 1992.

LOURENÇO, C. J. A Usinabilidade do Aço Inoxidável Austenítico ABNT 304. 1996. 110 f, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

MACHADO, A. R. Aspectos da Usinagem do Titânio e suas ligas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO – COBEF, 4, Abril de 2007, São Pedro, SP, **Mini-Curso**.

MACHADO, A. R.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais.** 8^a ed. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2004, 257 f.

MATOSINHOS, F. C. C. C. **Influência da Temperatura na Usinabilidade do Aço ABNT 1045.** 1999. 77 f, Dissertação de Mestrado – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MESQUITA, R. A.; SOKOPLOWSKI, A.; BARBOSA, C. A. Desenvolvimento de Aços Especiais com Usinabilidade Melhorada. **Revista Máquinas e Metais**, nº 448, maio de 2003, pág. 86-112.

METALS HANDBOOK. Atlas of Microstructures of Industrial Alloy. Ohio American Society for Metals, 8th ed., vol. 7, 1972.

NICHOLAS, J. V.; WHITE, D. R. **Traceable Temperatures:** An introduction to temperature measurement and calibration. Ed. John Wiley e Sons, 1994, 654 f.

RAMOS, C. A. D. **Usinabilidade de Aços Inoxidáveis para Matrizes ABNT 420 e VP 80 no Fresamento de Topo usando Superfícies de Resposta.** 2004. 229 f, Tese de Doutorado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RECHT, R. F. Catastrophic Thermoplastic Shear. **Journal Applied Mechanics**, Trans ASME, pp. 189-193, June of 1964.

SHAW, M. C. **Principles of Metal Cutting.** Oxford University Press, 1984.

TAY, A. O.; STEVENSON, M. G.; DAVIS, G. V. Using the Finite Element Method to Determine Temperature Distribution in Orthogonal Machining, **Proc. Inst. Mech. Eng.**, vol. 188, p. 627-638, 1974.

TRENT, E. W. Metal Cutting and the Tribology of Seizure: part I, II and III. **Wear**, 128, 1988.

TRENT, E. M.; WRIGHT, P. K. **Metal Cutting**. 4th edition, Boston, USA, Butterworths, 2000, 446 f.

TRIGGER, K. J.; CHAO, B. T. An Analytical Evaluation of Metal Cutting Temperatures. **Transactions of the ASME**, p. 57 – 68, 1951

YAJUN, L.; WEI, X. Temperature Field in the Chip and its Effect on Chip Curl. In: 4th CONFERENCE ON PROGRESS OF CUTTING AND GRINDING: WITH SOME TOPICS IN ADVANCED MANUFACTURE TECHNOLOGY, 5 – 9 de Outubro, 1998, China, **Proceedings**.

WICK, C. Coated Carbide Tools Enhances Performance. **Manufacturing Engineering**, p. 45-50, 1987.

WRIGHT, P.K.; TRENT, E.M. Metallurgical Appraisal of Wear Mechanisms and Processes on High-Speed Steel Tools. **Journal of Metals Technology**. The Metals Society, London, 1, pp. 13-25, 1974.

ZADEH, L. A.; JAMSHIDI, M.; TITLI, A. **Applications of Fuzzy Logic: Towards High Machine Intelligence Quotient Systems**. Environmental and Intelligent Manufacturing Series, Prentice Hall, 1997.

ANEXO I

As figuras seguintes mostram as micrografias dos cavacos do teste de análise das amostras de cavaco para cada condição pré-estabelecida de velocidade de corte, profundidade de corte e avanço e para os diversos níveis de desgaste determinados no item 4.1.

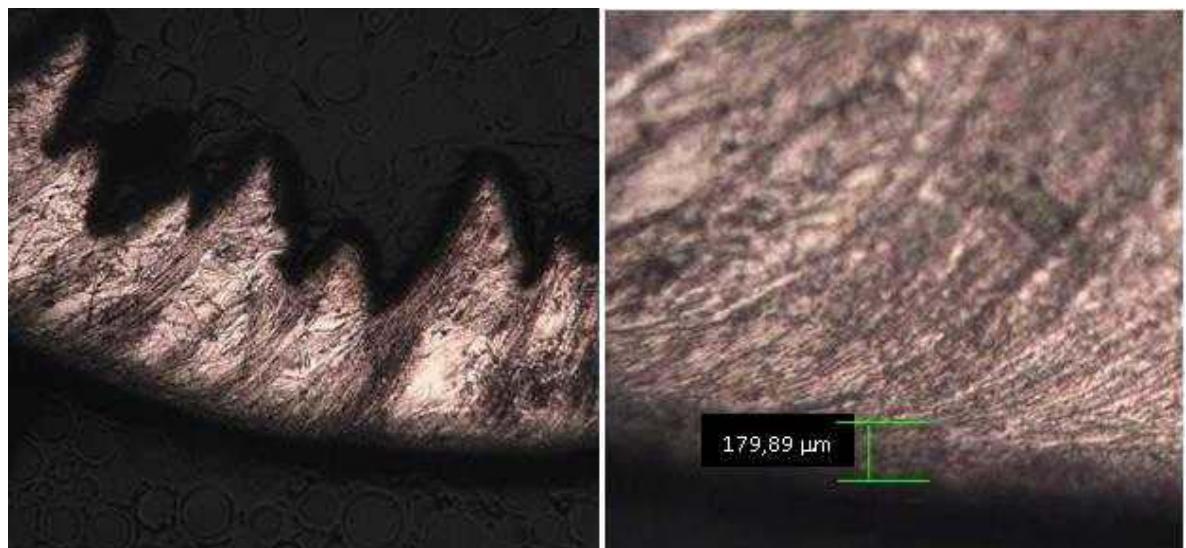


Figura I.1 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 1, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

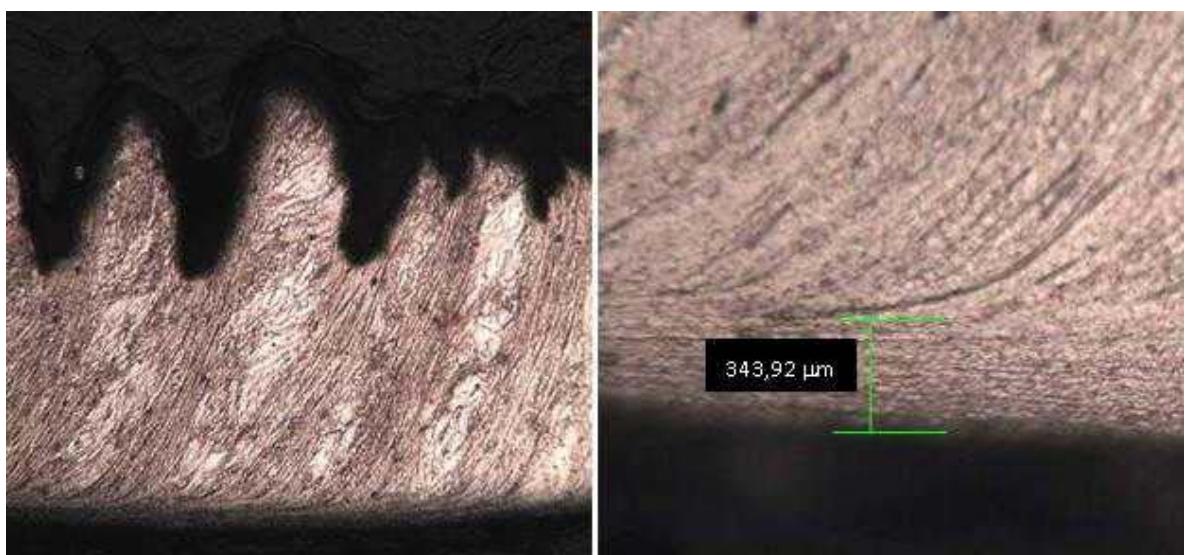


Figura I.2 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 2, utilizando as seguintes condições: $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,1 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

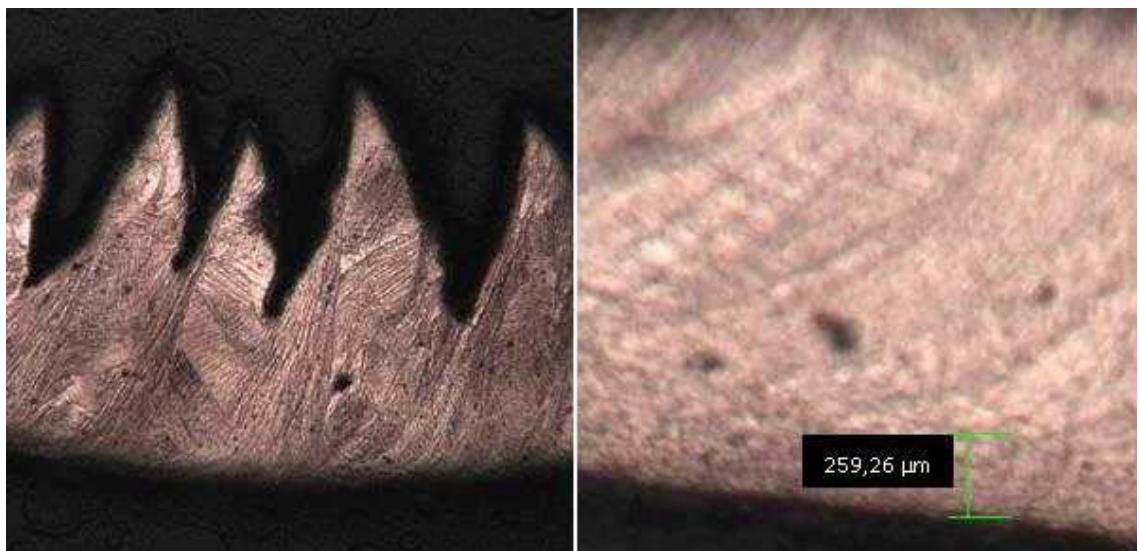


Figura I.3 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 3, utilizando as seguintes condições: $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,2 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

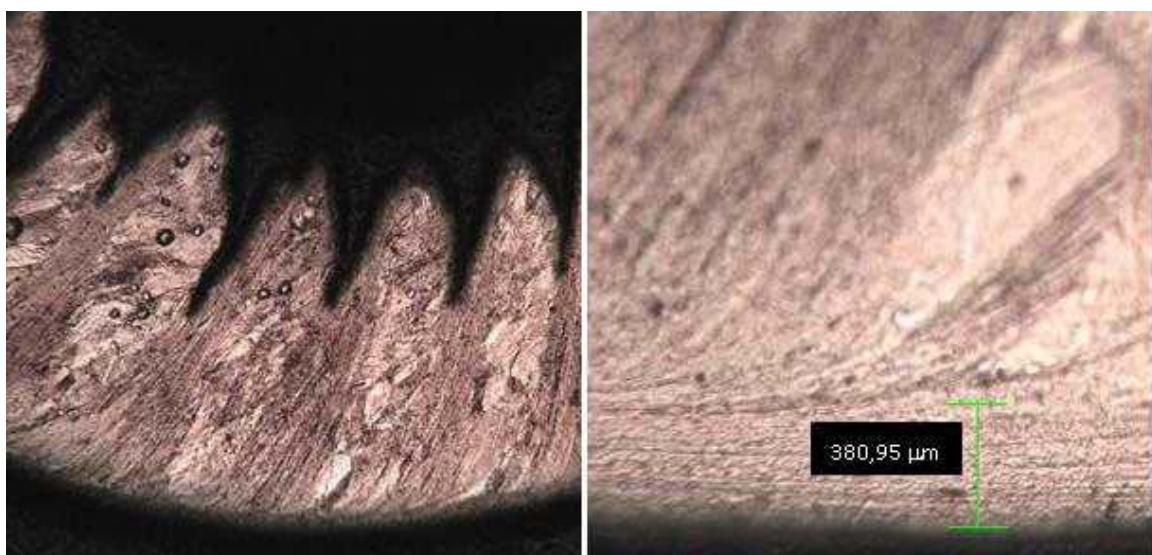


Figura I.4 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 4, utilizando as seguintes condições: $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,3 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

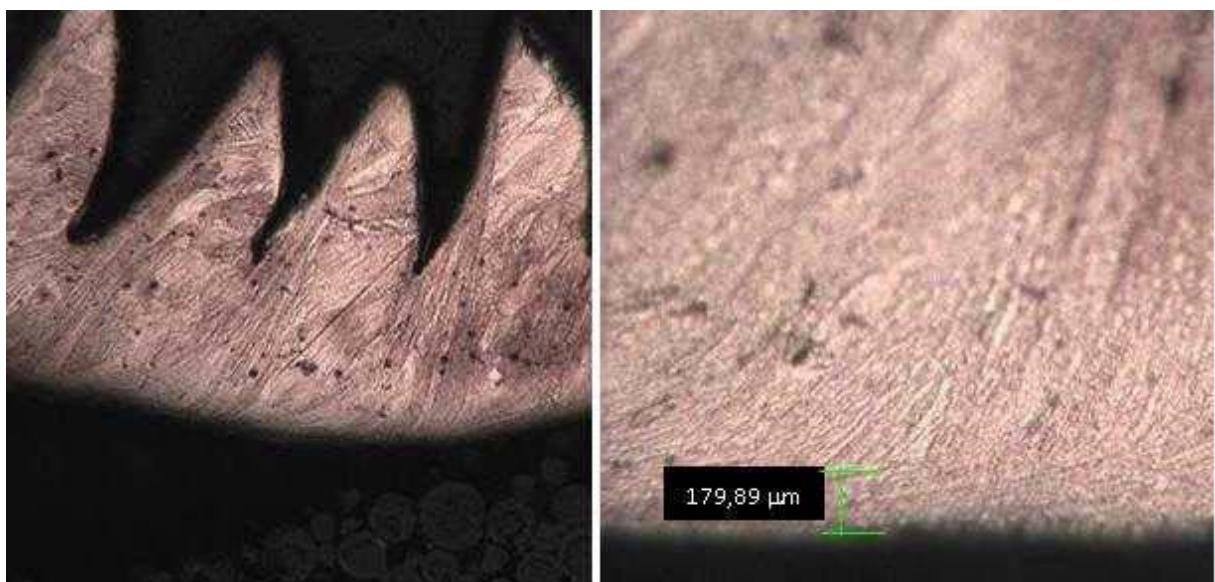


Figura I.5 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 5, utilizando as seguintes condições: $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,4 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

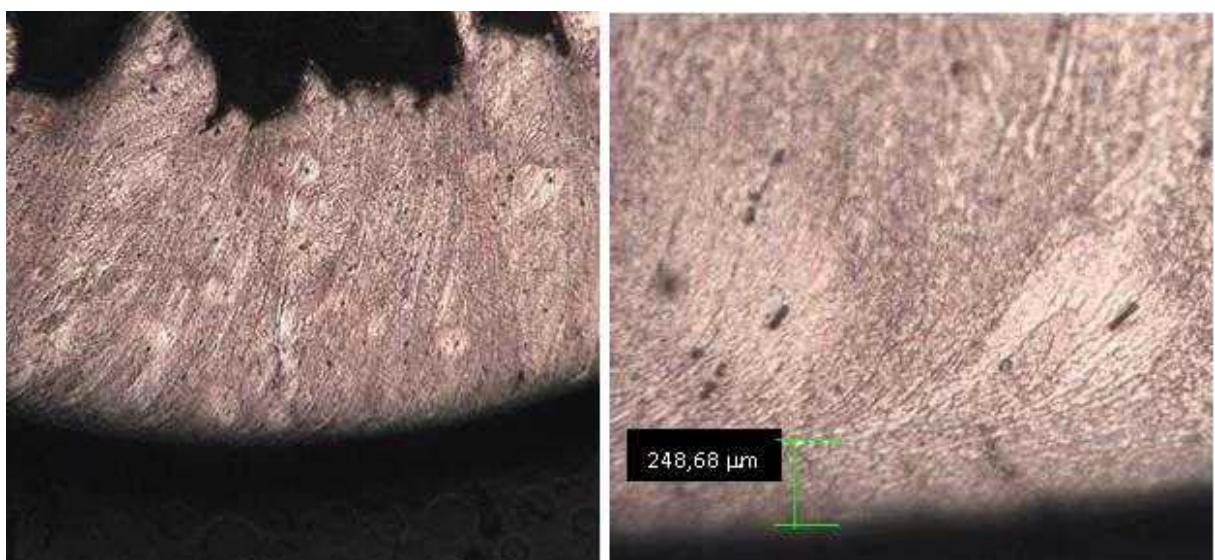


Figura I.6 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 6, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 125 \text{ m/min}$ e $VB = 0,5 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

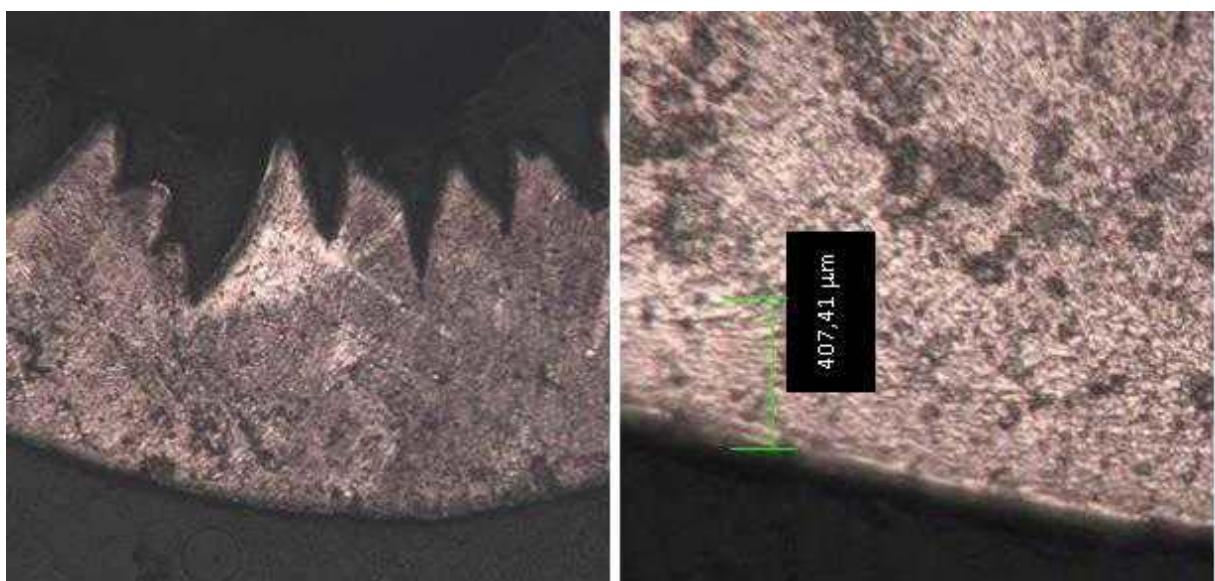


Figura I.7 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 9, utilizando as seguintes condições:
 $V_c = 130 \text{ m/min}$ e $VB = 0,2 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente



Figura I.8 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 12, utilizando as seguintes condições: $V_c = 130 \text{ m/min}$ e $VB = 0,5 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

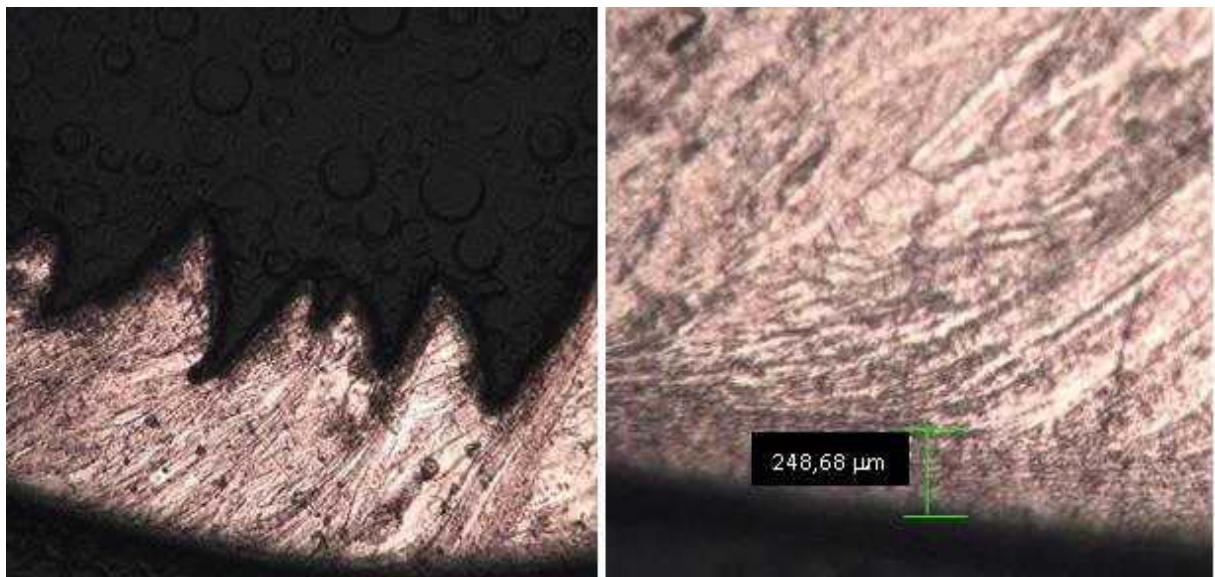


Figura I.9 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 13, utilizando as seguintes condições: $V_c = 150 \text{ m/min}$ e $VB = 0 \text{ mm}$, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

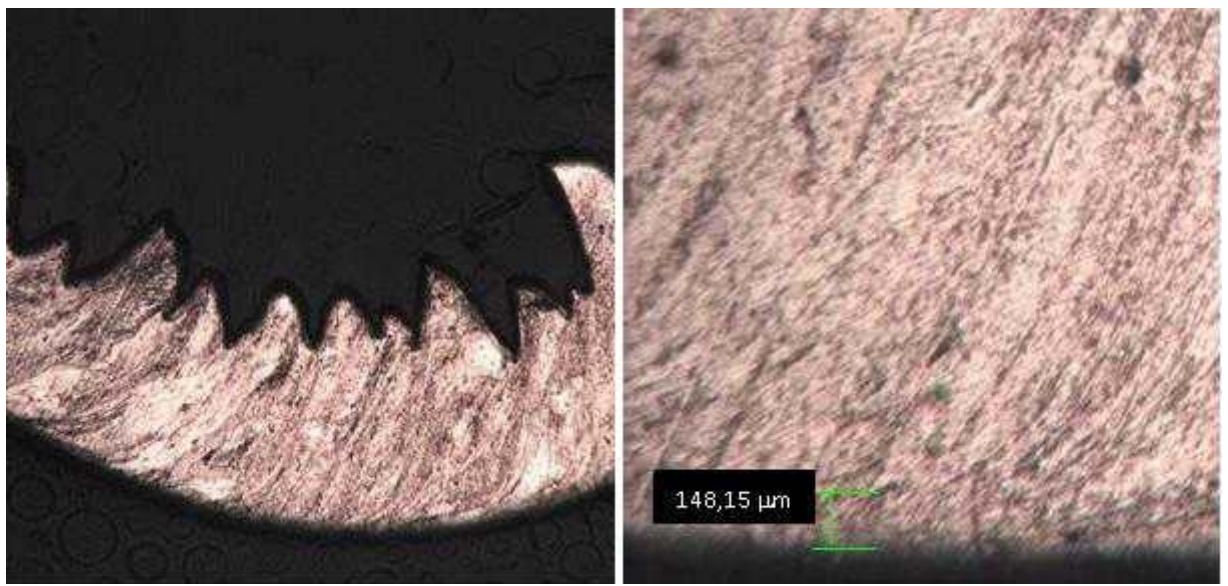


Figura I.10 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 13, utilizando as seguintes condições: $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,1$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

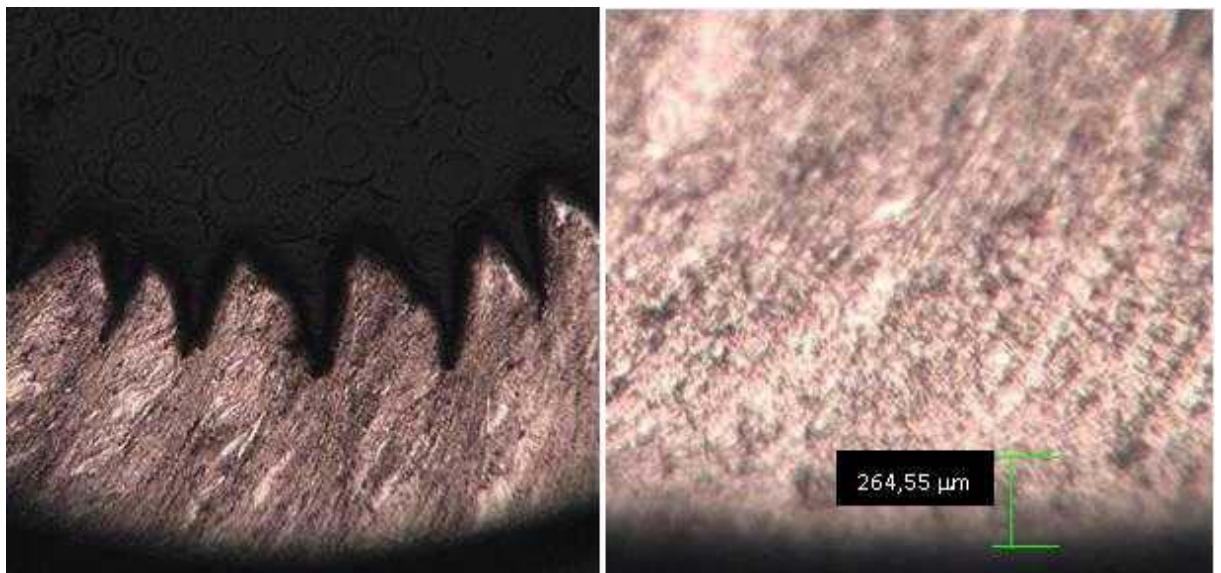


Figura I.11 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 17, utilizando as seguintes condições: $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,4$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

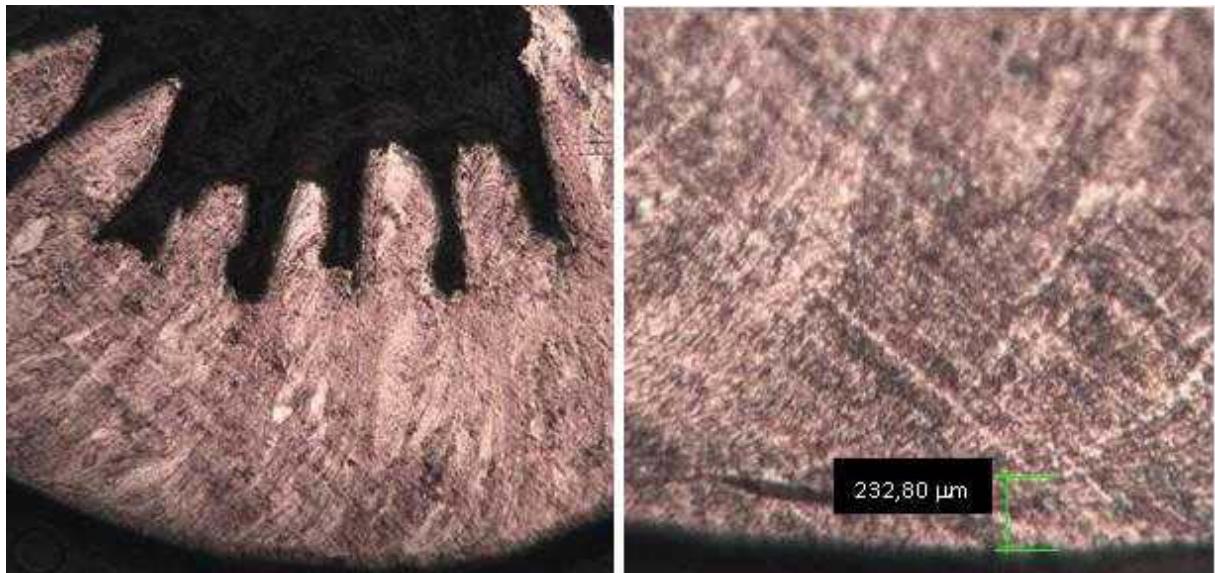


Figura I.12 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 18, utilizando as seguintes condições: $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,5$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

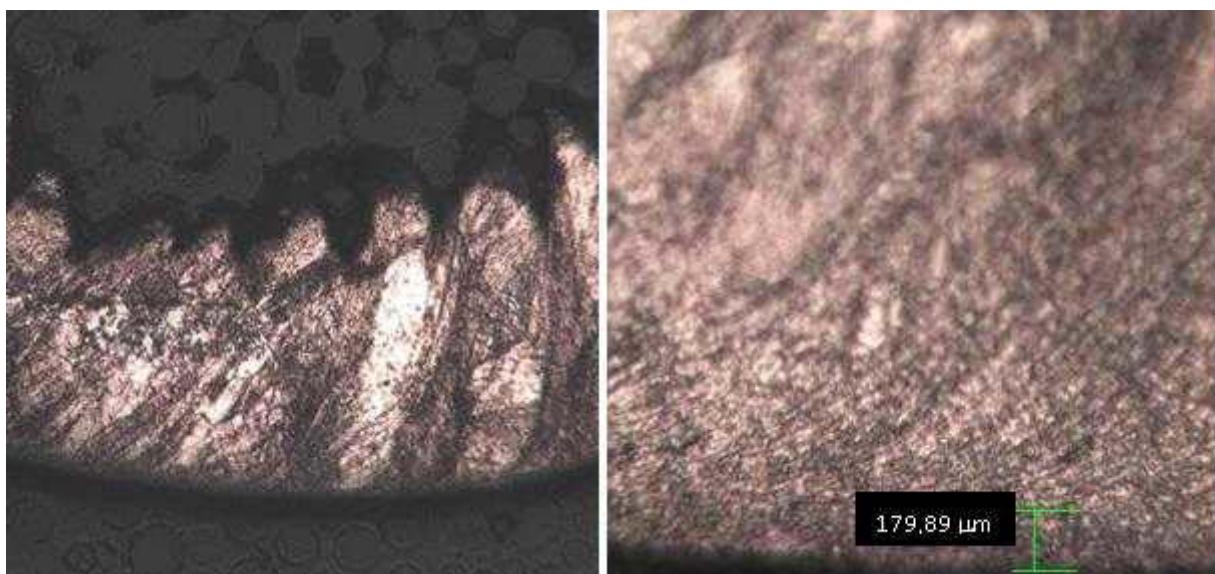


Figura I.13 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 21, utilizando as seguintes condições: $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,2$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

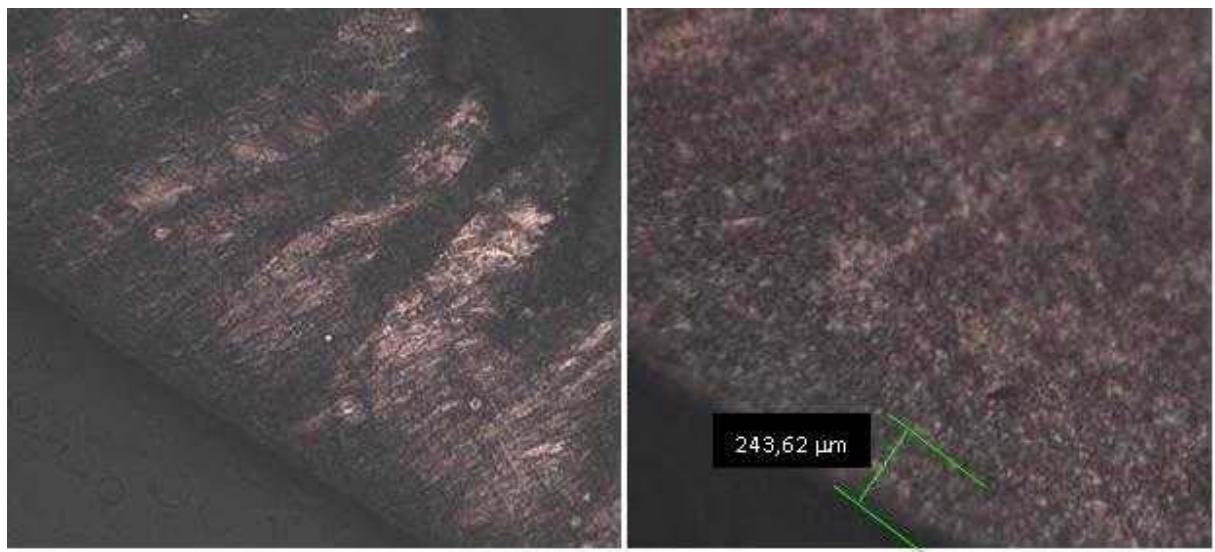


Figura I.14 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 24, utilizando as seguintes condições: $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,5$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

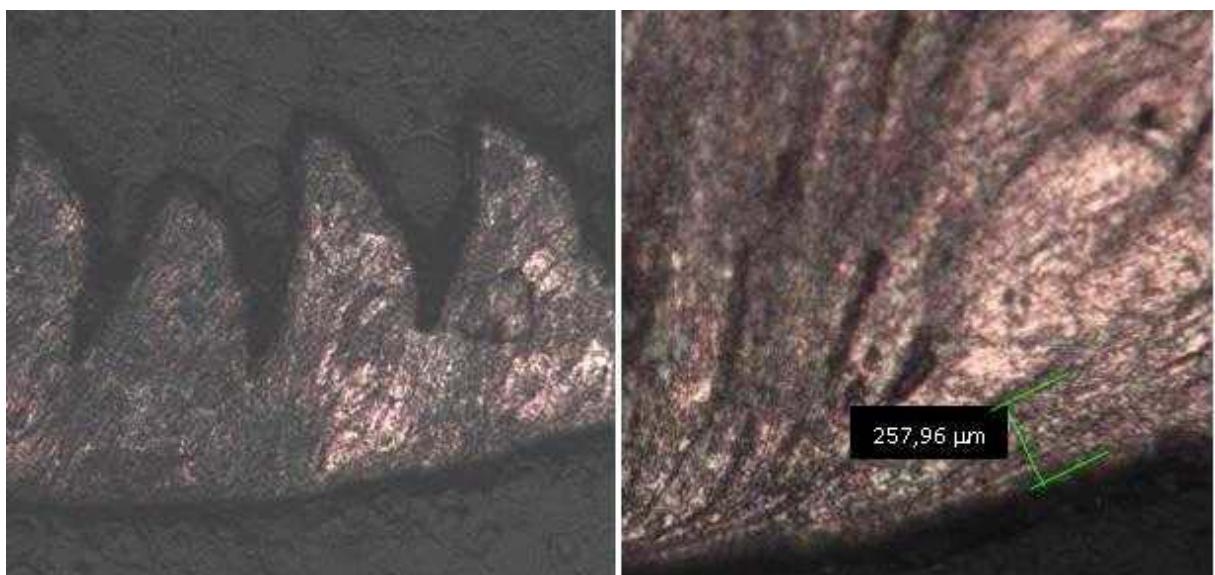


Figura I.15 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 25, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

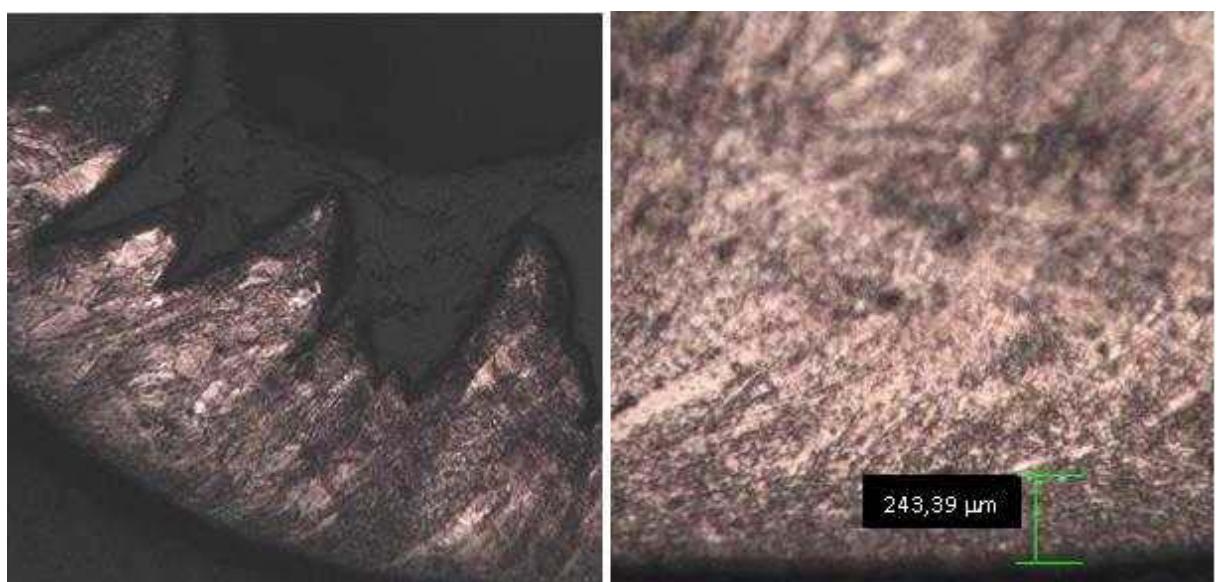


Figura I.16 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 26, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,1$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

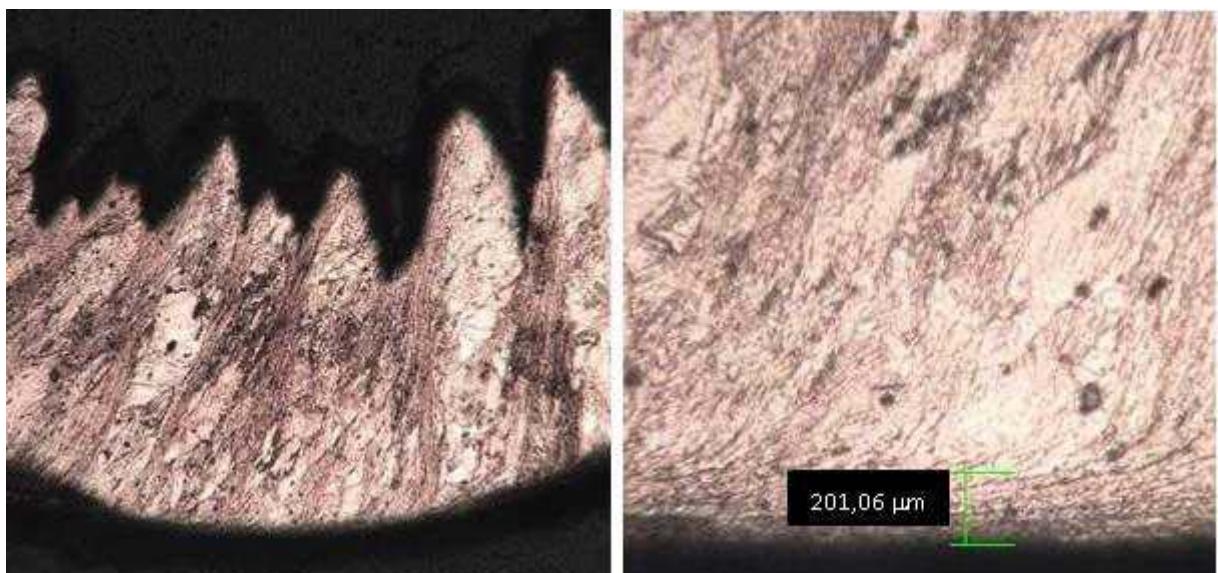


Figura I.17 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 27, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,2$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

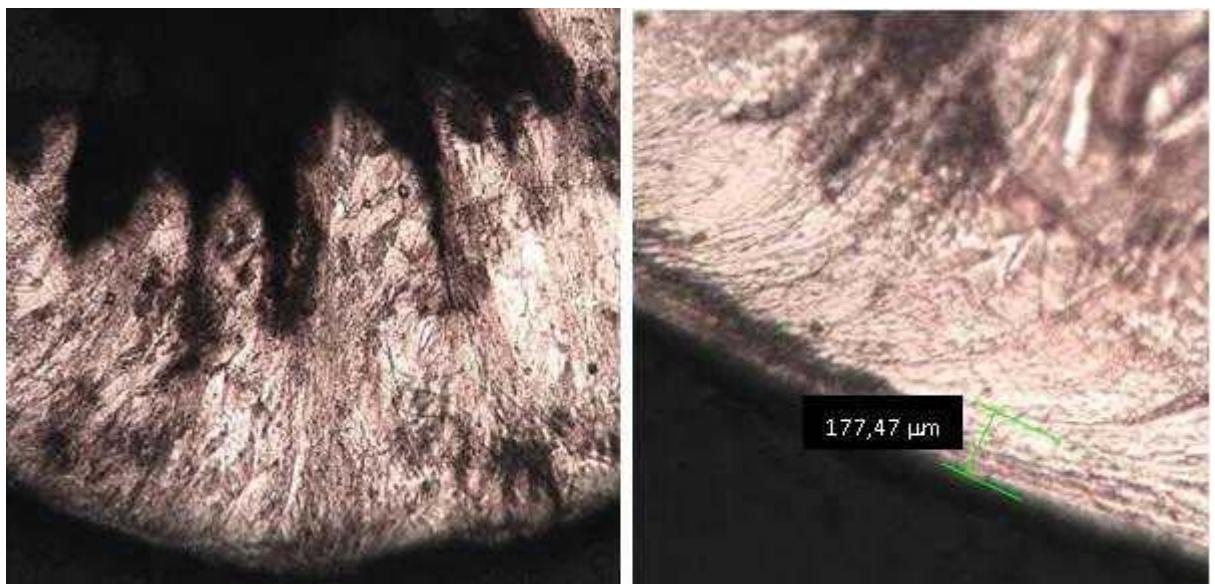


Figura I.18 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 29, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,4$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

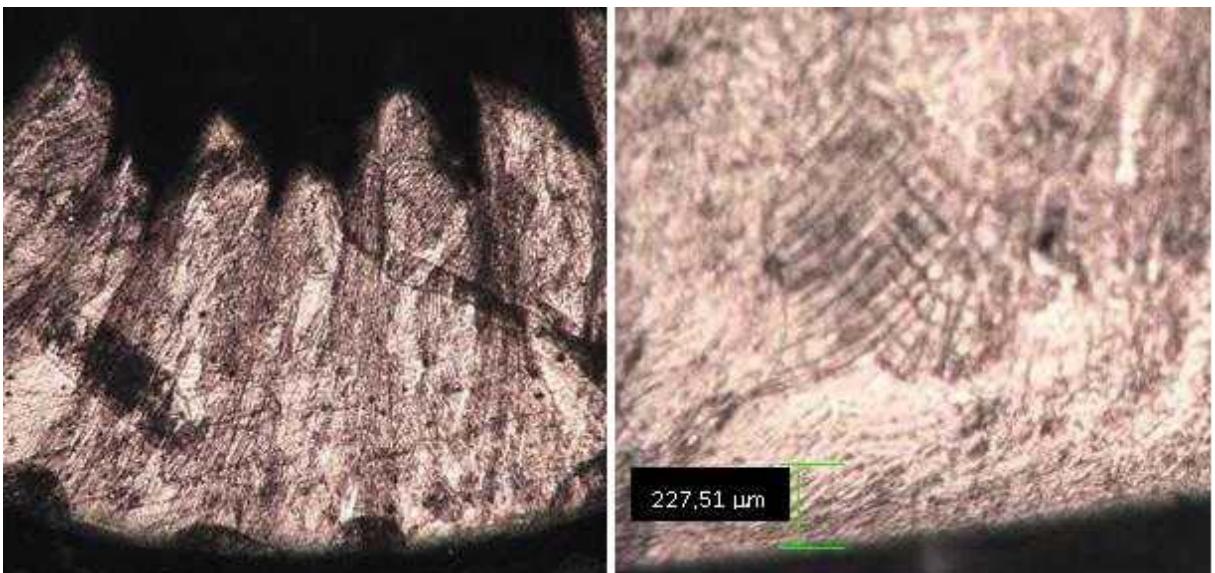


Figura I.19 – Micrografias da amostra de cavaco do teste 30, utilizando as seguintes condições: $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,5$ mm, utilizando aumentos de 100X e 400X, respectivamente

ANEXO II

Os seguintes gráficos mostram a variação dos valores de temperatura medidos durante 30 segundos de usinagem do aço inoxidável ABNT 304, para cada condição pré-estabelecida de velocidade de corte, profundidade de corte e avanço e para os diversos níveis de desgaste determinados no item 3.2.2.

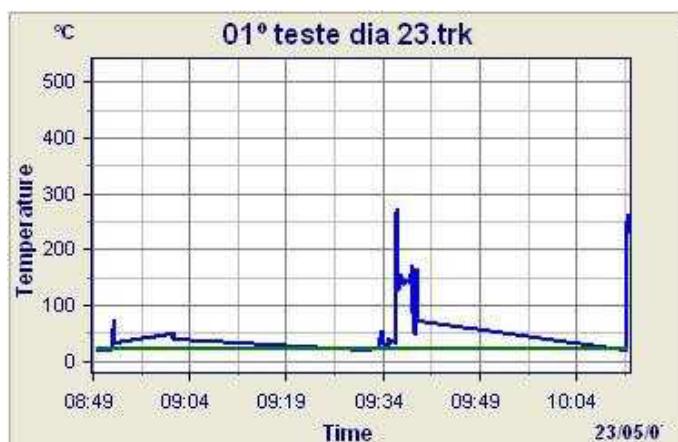


Figura II.1. Sinal de temperatura do cavaco durante o 1º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min e $VB = 0$ mm



Figura II.2. Sinal de temperatura do cavaco durante o 2º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min e $VB = 0$ mm

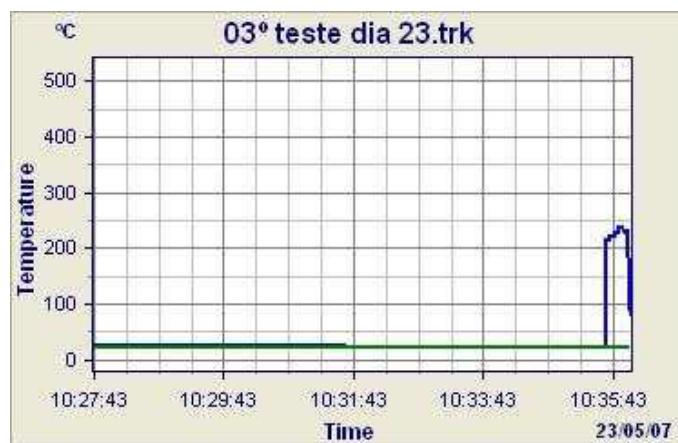


Figura II.3. Sinal de temperatura do cavaco durante o 3º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min e $VB = 0$ mm

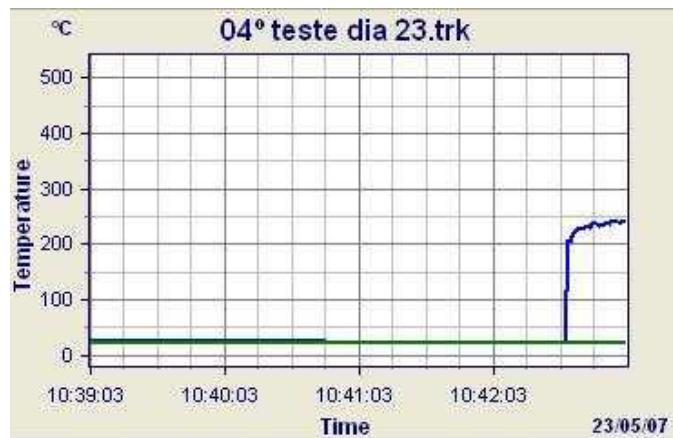


Figura II.4. Sinal de temperatura do cavaco durante o 4º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min e $VB = 0$ mm

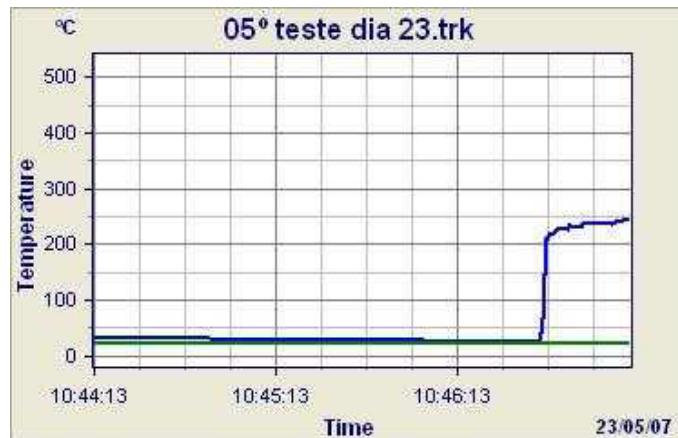


Figura II.5. Sinal de temperatura do cavaco durante o 5º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min e $VB = 0$ mm

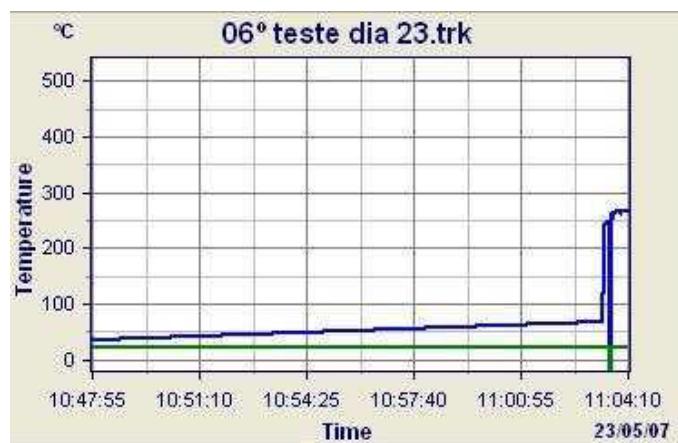


Figura II.6. Sinal de temperatura do cavaco durante o 6º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min e $VB = 0,1$ mm

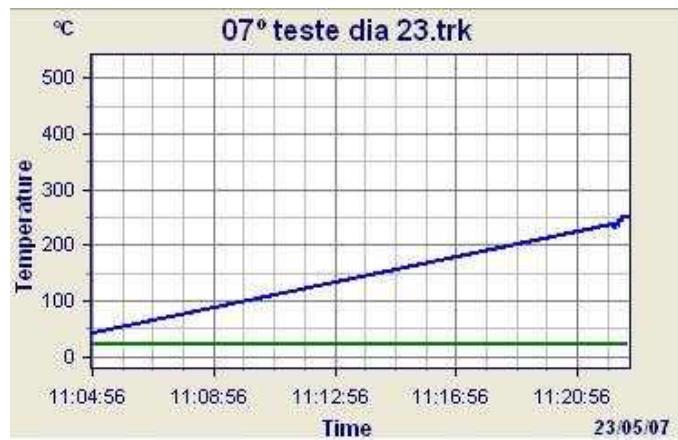


Figura II.7. Sinal de temperatura do cavaco durante o 7º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min e $VB = 0,1$ mm

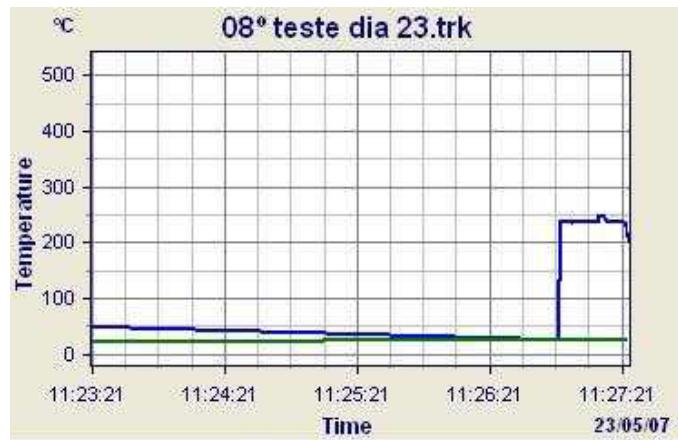


Figura II.8. Sinal de temperatura do cavaco durante o 8º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,1$ mm

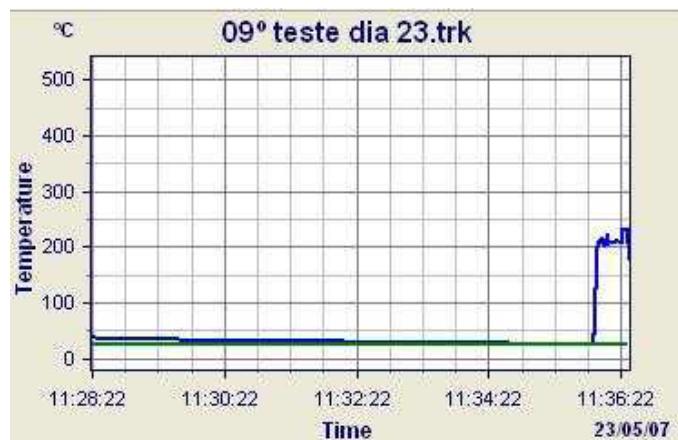


Figura II.9. Sinal de temperatura do cavaco durante o 9º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,1$ mm

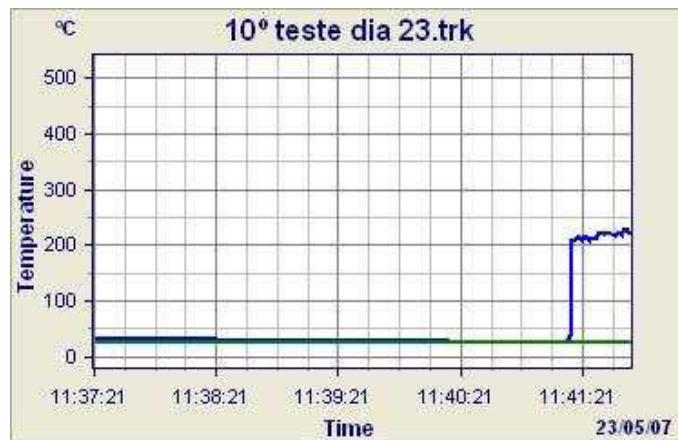


Figura II.10. Sinal de temperatura do cavaco durante o 10º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,1$ mm

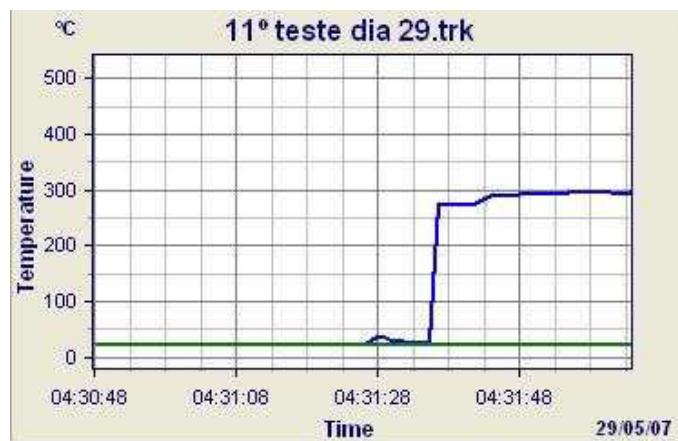


Figura II.11. Sinal de temperatura do cavaco durante o 11º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min e $VB = 0,2$ mm



Figura II.12. Sinal de temperatura do cavaco durante o 12º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min e $VB = 0,2$ mm



Figura II.13. Sinal de temperatura do cavaco durante o 13º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,2$ mm

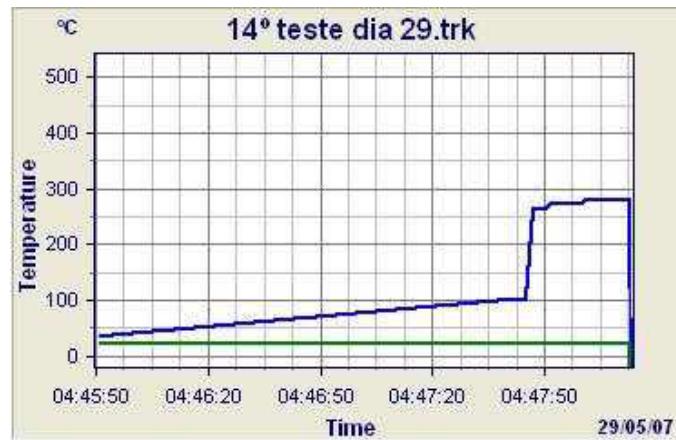


Figura II.14. Sinal de temperatura do cavaco durante o 14º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,2$ mm

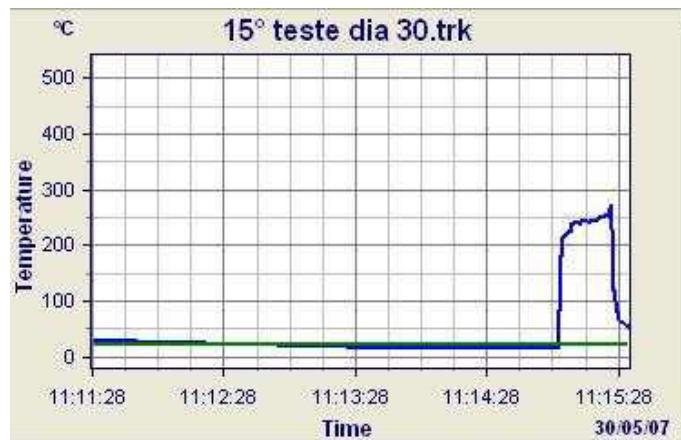


Figura II.15. Sinal de temperatura do cavaco durante o 15º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,2$ mm

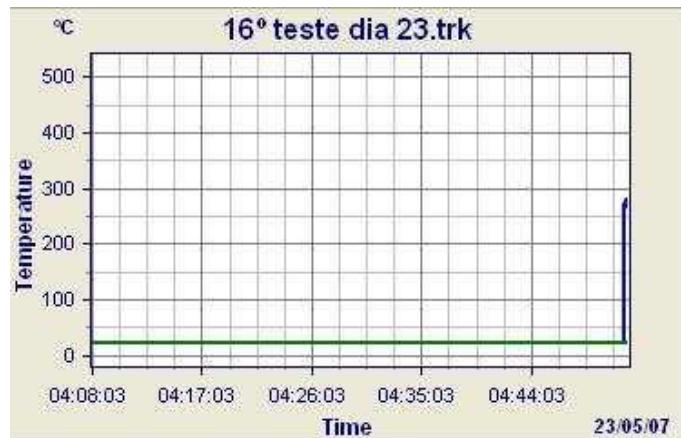


Figura II.16. Sinal de temperatura do cavaco durante o 16º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min e $VB = 0,3$ mm



Figura II.17. Sinal de temperatura do cavaco durante o 17º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min e $VB = 0,3$ mm



Figura II.18. Sinal de temperatura do cavaco durante o 18º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,3$ mm



Figura II.19. Sinal de temperatura do cavaco durante o 19º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,3$ mm



Figura II.20. Sinal de temperatura do cavaco durante o 20º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,3$ mm

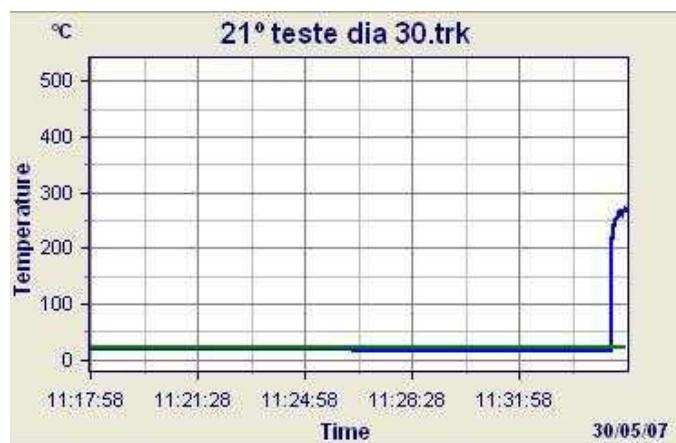


Figura II.21. Sinal de temperatura do cavaco durante o 21º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min e $VB = 0,4$ mm

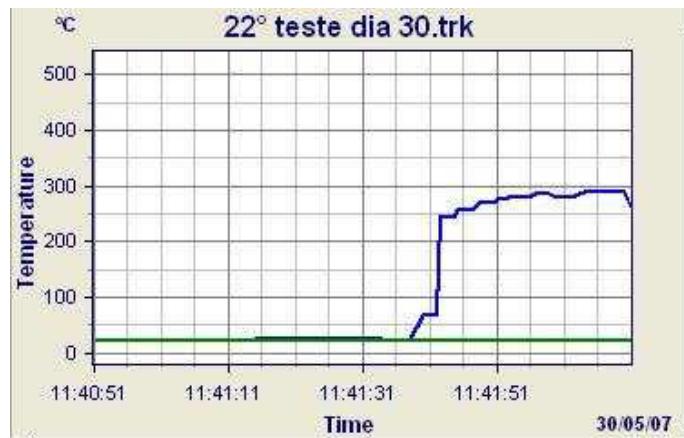


Figura II.22. Sinal de temperatura do cavaco durante o 22º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min e $VB = 0,4$ mm

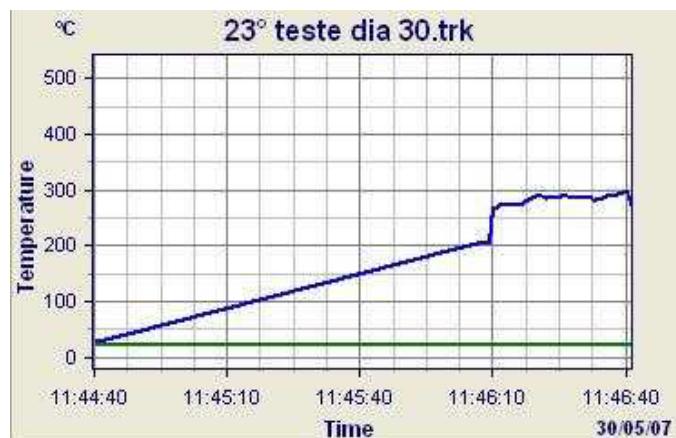


Figura II.23. Sinal de temperatura do cavaco durante o 23º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,4$ mm



Figura II.24. Sinal de temperatura do cavaco durante o 24º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,4$ mm

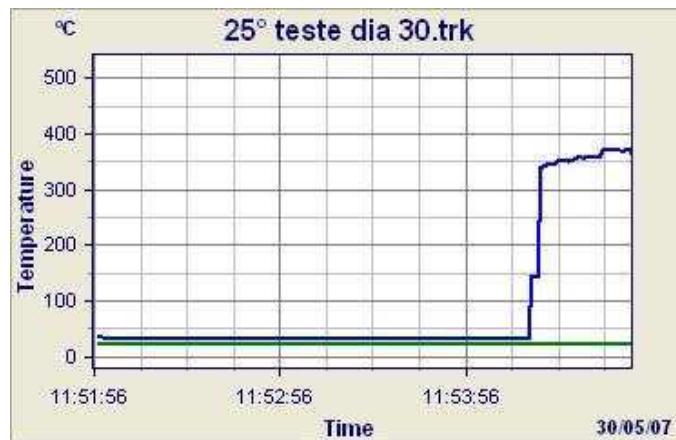


Figura II.25. Sinal de temperatura do cavaco durante o 25º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,4$ mm



Figura II.26. Sinal de temperatura do cavaco durante o 26º ensaio utilizando $V_c = 120$ m/min e $VB = 0,5$ mm

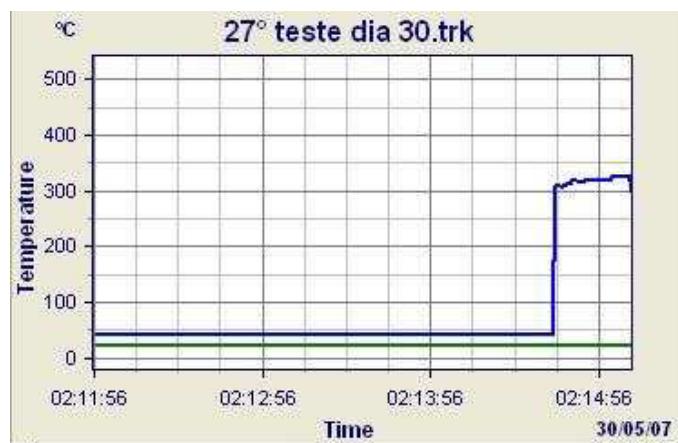


Figura II.27. Sinal de temperatura do cavaco durante o 27º ensaio utilizando $V_c = 130$ m/min e $VB = 0,5$ mm

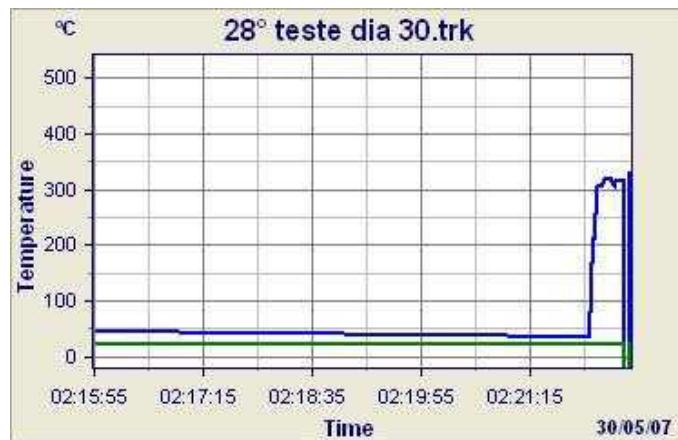


Figura II.28. Sinal de temperatura do cavaco durante o 28º ensaio utilizando $V_c = 150$ m/min e $VB = 0,5$ mm

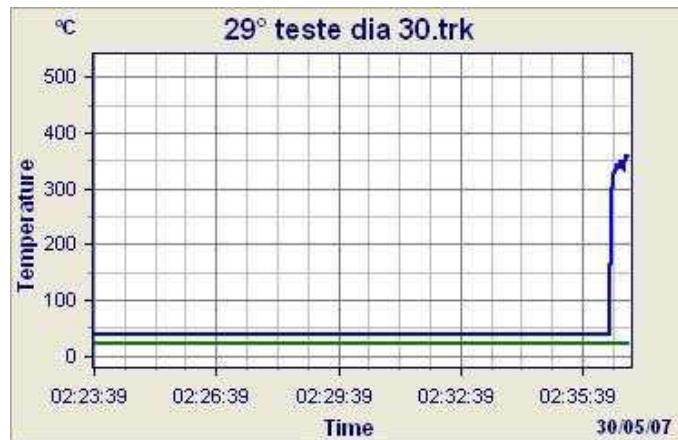


Figura II.29. Sinal de temperatura do cavaco durante o 29º ensaio utilizando $V_c = 160$ m/min e $VB = 0,5$ mm

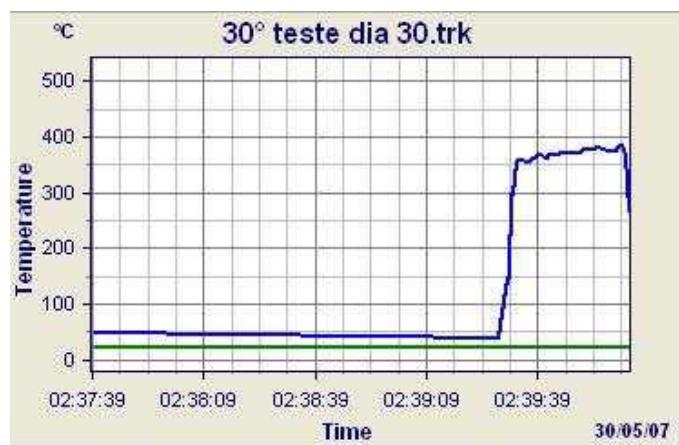


Figura II.30. Sinal de temperatura do cavaco durante o 30º ensaio utilizando $V_c = 170$ m/min e $VB = 0,5$ mm