

IVANILSON SOUSA DA COSTA

**USINABILIDADE DO AÇO DE CORTE FÁCIL BAIXO
CARBONO AO CHUMBO ABNT 12L14**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2014

IVANILSON SOUSA DA COSTA

**USINABILIDADE DO AÇO DE CORTE FÁCIL BAIXO CARBONO AO
CHUMBO ABNT 12L14**

Dissertação apresentada ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Mecânica**.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva

Uberlândia – MG

2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG, Brasil.

C837u Costa, Ivanilson Sousa da, 1991-
2014 Usinabilidade do aço de corte fácil baixo carbono ao chumbo ABNT
12L14 / Ivanilson Sousa da Costa. - 2014.
112 f. : il.

Orientador: Márcio Bacci da Silva.
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica.
Inclui bibliografia.

1. Engenharia mecânica - Teses. 2. Usinagem - Teses. 3.
Ferramentas para cortar metais - Teses. 4. Aço - Propriedades mecânicas
- Teses. I. Silva, Márcio Bacci da, 1964- II. Universidade Federal de
Uberlândia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. III.
Título.

IVANILSON SOUSA DA COSTA

USINABILIDADE DO AÇO DE CORTE FÁCIL BAIXO CARBONO AO CHUMBO
ABNT 12L14

Dissertação **APROVADA** pelo Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia.

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva – UFU – Orientador

Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva – UFU

Prof. Dr. Nelis Evangelista Luiz – SENAI/SP

Uberlândia, 20 de outubro de 2014

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Uberlândia (UFU), à Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) e ao Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU), pela oportunidade concedida.

Ao Prof. Dr. Márcio Bacci da Silva, pela orientação e confiança.

A todos os professores da Pós-graduação em Engenharia Mecânica da UFU, especialmente ao Prof. Dr. Rosemar Batista da Silva e ao Prof. Dr. Álisson Rocha Machado, pelo auxílio no decorrer deste curso.

A todos os professores do Departamento de Mecânica e Materiais (DMM) do Instituto Federal do Maranhão (IFMA), especialmente ao Prof. Dr. Rubens Soeiro, Prof. Dr. Waldemir Martins, Prof. Dr. Raimundo Barroso e Prof. Dr. Keyll Martins; também ao Prof. Dr. Fábio Sales do Departamento de Física (DEFIS) do IFMA. A todos agradeço pela orientação durante minha vida acadêmica.

Ao CNPq, pela bolsa de estudo concedida.

À CAPES e à FAPEMIG, pelo apoio financeiro às pesquisas do LEPU.

À Denise Corrêa de Oliveira, pela análise química dos materiais estudados.

À Ângela Andrade pelo auxílio nos ensaios de dureza.

Ao prof. Dr. Cleudmar Araújo, pelo auxílio nos ensaios de tração.

Aos amigos do LEPU, Jairo Montalvão, Saimon Vendrame, Armando Marques, Daniel Cunha, Marcelo Nascimento, Cleudes Guimarães, Ricardo Moura, Aécio Sousa, Maksym Ziberov, Hélio dos Santos, Antônio Vitor, Raphael Paiva, e aos técnicos do laboratório, Lázaro Vieira, Eurípides Alves, Thiago Pereira, Thiago Menezes e Cláudio Nascimento. Todos me auxiliaram neste trabalho.

Aos graduandos da FEMEC, Henrique Zini, Osmar Filho, Victor Rubin, pelo auxílio em atividades realizadas neste trabalho.

A todos os meus amigos de São Luís, especialmente, Álisson Figueiredo, Daniel Dominices, Leonardo Ribeiro, Peterson Silva, Prof. Tiago Neves (*in memorian*), Prof. Antônio Júnior, que contribuíram com seu apoio e amizade.

Aos meus pais, Raimundo Nonato e Auzenir de Sousa, à minha namorada Paula Tayse e a todos que, diretamente ou indiretamente, contribuíram para este trabalho acontecer.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Considerações iniciais	1
1.2. Objetivo geral	4
1.3. Objetivos específicos	4
1.4. Estruturação do trabalho	5
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	6
2.1. Mecanismo de formação do cavaco	6
2.1.1. <i>Grau de recalque dos cavacos e ângulo de cisalhamento</i>	8
2.1.2. <i>Tipos e formas dos cavacos</i>	9
2.2. Interface cavaco-ferramenta	15
2.3. Força de usinagem	18
2.4. Rugosidade da superfície usinada	19
2.5. Temperatura de usinagem	21
2.6. Método do termopar ferramenta-peça	22
2.7. Usinabilidade dos metais	27
2.8. Aços de corte fácil	28
2.8.1. <i>Influência de sulfetos na usinabilidade dos aços de corte fácil</i>	33
2.8.2. <i>Influência de inclusões metálicas na usinabilidade dos aços de corte fácil</i>	39
2.8.3. <i>Outros elementos químicos dos aços de corte fácil</i>	46
3. METODOLOGIA	50
3.1. Materiais utilizados	51
3.2. Ensaios de caracterização	51
3.2.1. <i>Ensaios de dureza</i>	51
3.2.2. <i>Ensaios de tração</i>	52
3.3. Ensaios de usinagem	53
3.3.1. <i>Ensaios de força de usinagem</i>	53
3.3.2. <i>Ensaios de temperatura de usinagem</i>	57
3.3.3. <i>Ensaios de rugosidade da superfície usinada</i>	62
3.3.4. <i>Características dos cavacos</i>	63
3.3.5. <i>Análise da interface cavaco-ferramenta</i>	64
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	66
4.1. Ensaios de caracterização dos materiais	66
4.1.1. <i>Ensaios de tração</i>	66
4.1.2. <i>Ensaios de dureza</i>	67

4.2. Ensaios de força de usinagem.....	68
4.2.1. Componentes da força de usinagem	68
4.2.2. Análise estatística do efeito das condições de corte na força de corte	75
4.2.3. Considerações finais	80
4.3. Ensaios de rugosidade da superfície usinada.....	82
4.3.1. Rugosidade em função da velocidade de corte	82
4.3.2. Análise estatística do efeito das condições de corte na rugosidade R_a	85
4.3.3. Considerações finais	87
4.4. Ensaios de temperatura de usinagem	88
4.4.1. Calibração do método termopar ferramenta-peça.....	88
4.4.2. Temperatura de usinagem.....	89
4.5. Características dos cavacos	91
4.5.1. Tipo e forma dos cavacos.....	91
4.5.2. Coloração dos cavacos	94
4.5.3. Influência do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos	96
4.5.4. Grau de recalque dos cavacos	98
4.5.5. Considerações finais	98
4.6. Análise da interface cavaco-ferramenta.....	99
5. CONCLUSÕES.....	104
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	102

COSTA, I. S. **Usinabilidade do Aço de Corte Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT 12L14.** 2014. 112f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

RESUMO

O objetivo desta dissertação foi avaliar a usinabilidade do aço de corte fácil baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14 em termos de força de usinagem, temperatura de usinagem, rugosidade da superfície usinada, caracterização dos cavacos, análise da interface cavaco-ferramenta e propriedades mecânicas do material. Para isso, foram realizados ensaios de torneamento cilíndrico externo na condição a seco utilizando ferramentas de corte de metal duro. Para comparação de resultados, o aço de corte fácil ressulfurado ABNT 1214 foi igualmente trabalhado. Os resultados mostram que os dois materiais apresentam propriedades mecânicas similares. As forças de usinagem e rugosidade das superfícies usinadas, na faixa de atuação dos experimentos, foram menores para o aço ABNT 1214. Porém, os resultados sugerem que as condições de corte ótimas para os dois materiais são distintas. O aço ABNT 12L14 apresentou menor temperatura na interface cavaco-ferramenta que o aço ABNT 1214. A forma, coloração e grau de recalque dos cavacos indicaram melhor desempenho em usinagem para o aço ABNT 12L14. Foram verificadas camadas de sulfeto de manganês na superfície de saída das ferramentas na usinagem de ambos os materiais e resquícios de chumbo sobre a superfície de saída na usinagem do aço ABNT 12L14. Embasado nos critérios de usinabilidade avaliados nesta dissertação, o aço ABNT 12L14 apresentou melhores respostas de usinagem que o aço ABNT 1214.

Palavras-chave: Aços de corte fácil. Aço ABNT 12L14. Usinabilidade. Propriedades mecânicas.

COSTA, I. S. **Machinability of low carbon free-machining leaded steel ABNT 12L14.** 2014. 112f. M.Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

ABSTRACT

The purpose of this dissertation was to evaluate the machinability of low carbon free-machining leaded steel ABNT 12L14 in terms of machining force, cutting temperature, surface roughness, chip characterization, analysis of tool-chip interface and mechanical properties of materials. For this, external cylindrical dry turning trials using cemented carbide tools were conducted. To comparison of results, the free-machining of steel resulphurated ABNT 1214 was also machined. The results show that the two materials had similar mechanical properties. Machining forces and surface roughness, in the conditions of the experiments, were lower for ABNT 1214 grade. However, the results indicate that the optimum cutting conditions for the two materials are different. The ABNT 12L14 grade showed lower temperature in the chip-tool interface than ABNT 1214 grade. The form, color and chip thickness ratio of the chips showed better performance in machining ABNT 12L14 grade. Layers of manganese sulfide were found on face the tool when machining both materials and traces of lead on the rake face after machining ABNT 12L14 grade. Based on the machinability criteria employed in this dissertation, ABNT 12L14 grade showed better response for machining ABNT 1214 grade.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 – Exemplos de componentes mecânicos fabricados com aços de corte fácil (BRAMEC INDUSTRIAL, 2013)	2
Figura 1.2 – Participação da produção de aço de corte fácil ao chumbo em relação ao peso total de aço produzido no período de janeiro/2004 a junho/2005 na empresa Aços Villares S.A. (MISKULIN, 2005 <i>apud</i> PIMENTEL, 2006).....	3
Figura 1.3 – Produção mensal dos tipos de aços de corte fácil da Aços Villares de janeiro a maio de 2004 (adaptado de PRADO; PIMENTEL, 2004)	3
Figura 1.4 – Produção total dos tipos de aços de corte fácil da Aços Villares de janeiro a maio de 2004 (adaptado de PRADO; PIMENTEL, 2004)	4
Figura 2.1 – Diagrama da cunha cortante (adaptado de TRENT; WRIGHT, 2000, p.22)	6
Figura 2.2 – Formação do cavaco: a) cavaco de cisalhamento ou cavaco de ruptura; b) cavaco contínuo (adaptado de FERRARESI, 1970, p.90).....	7
Figura 2.3 – Representação esquemática da formação do cavaco mostrando as zonas de cisalhamento (adaptado de MACHADO; DA SILVA, 2004, p.41)	8
Figura 2.4 – Cavaco do tipo contínuo (TRENT; WRIGHT, 2000, p.37)	9
Figura 2.5 – Cavaco do tipo parcialmente contínuo ou cavaco de cisalhamento (FERRARESI, 1970, p.100)	10
Figura 2.6 – Cavaco do tipo descontínuo ou cavaco de ruptura (FERRARESI, 1970, p.100)	10
Figura 2.7 – Cavaco do tipo segmentado (TRENT; WRIGHT, 2000, p.304).....	11
Figura 2.8 – Formas do cavaco classificados de acordo com Norma ISO 3685 (SANTOS JR., 2012).....	11
Figura 2.9 – Cavacos formados nos ensaios dos materiais: a) “0-Bi” (sem adições de bismuto); b) “1-Bi” (com 0,026 % de bismuto) (GRANDO, 2012)	12
Figura 2.10 – Cavacos formados em ensaios de campo: a) material “0-Bi”; b) materiais “1-Bi” e “2-Bi” (GRANDO, 2012)	13
Figura 2.11 – Cavacos formados na usinagem de aços com adições de Pb e Bi: a) aço com 0,1 % Pb a $V_c = 60,0$ m/min; b) aço com 0,1 % Pb a $V_c = 21,6$ m/min; c) aço com 0,3 % Pb a $V_c = 21,6$ m/min; d) aço com 0,2 % Bi a $V_c = 21,6$ m/min (YAGUCHI, 1989)	13
Figura 2.12 – Influência do avanço na forma do cavaco do aço de corte fácil ABNT 12L14. Condições de corte: $V_c = 141$ m/min e $a_p = 2,0$ mm (EVANGELISTA LUIZ, 2007).....	14
Figura 2.13 – Condições de interface cavaco-ferramenta: a) aderência e escorregamento; b) aresta postiça de corte (adaptado de TRENT; WRIGHT, 2000, pp.40, 44)	15

Figura 2.14 – Variação das dimensões da APC (altura “H” e largura “L”) com a velocidade de corte (adaptado de MACHADO; DA SILVA, 2004, p.75; SANTOS; SALES, 2007, p.56).....	16
Figura 2.15 – Presença de chumbo aderido na superfície de saída da ferramenta de metal após usinar latão de corte fácil à velocidade de corte de 180 m/min (TRENT; WRIGTH, 2000, p.265)	17
Figura 2.16 – Componentes da força de usinagem segundo Norma DIN 6584: a) no torneamento cilíndrico externo; b) no fresamento tangencial discordante (adaptado de DIN 6584, 1963 <i>apud</i> MACHADO; DA SILVA, 2004, p.86)	18
Figura 2.17 – Rugosidade R_a para amostras de aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 em função da velocidade de corte, $f = 0,138$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm (EVANGELISTA LUIZ, 2007)	20
Figura 2.18 – Zonas de geração de calor em usinagem (adaptado de MACHADO; DA SILVA, 2004, p.99)	21
Figura 2.19 – Princípio dos termopares, onde “p” e “q” representam as junções, “A” e “B” representam os materiais: a) corrente termoelétrica “i”; b) circuito termoelétrico onde a junção “q” foi aberta (adaptado de BORCHARDT; GOMES, 1979, p.11)	23
Figura 2.20 – Esquema geral do método do termopar ferramenta-peça utilizado na medição da temperatura de usinagem (adaptado de MACHADO <i>et al.</i> , 2011, p.165)	23
Figura 2.21 – Calibração do método do termopar ferramenta-peça utilizando banho de sal “B” aquecido por resistência elétrica “R” (adaptado de FERRARESI, 1970, p.148)	24
Figura 2.22 – Esquema geral da calibração do sistema termopar ferramenta-peça utilizando chama de maçarico e elemento de aquecimento (pino metálico)	25
Figura 2.23 – Componentes da conta ponta rotativa modificada para o método termopar ferramenta-peça (adaptado de KAMINISE, 2012).....	26
Figura 2.24 – Classificação geral dos aços especiais (adaptado de EVANGELISTA LUIZ, 2007)	28
Figura 2.25 – Operações típicas em que são usados os aços de corte fácil: a) torno automático (TRAUTEC, 2014); b) princípio de funcionamento de um torno automático de cabeçote fixo; c) princípio de funcionamento de um torno automático de cabeçote móvel (FERRARI, 2003).....	31
Figura 2.26 – Peças fabricadas com aços de corte fácil (LEADTECH PRECISION, 2009) ..	32
Figura 2.27 – Aço de corte fácil ao chumbo, nota-se as inclusões de sulfeto de manganês (escuras) e as inclusões de chumbo (brancas) (TRENT; WRIGTH, 2000, p.279)	33
Figura 2.28 – Micrografia de aço de corte fácil resulfurado: a) sulfeto do tipo I; b) sulfeto do tipo II (APPLE, 1989)	35

Figura 2.29 – Influência do fator de forma dos sulfetos sobre o índice de usinabilidade (traduzido de LESKOVAR; GRUM, 1986 <i>apud</i> EVANGELISTA LUIZ; MACHADO, 2007) ...	35
Figura 2.30 – Correlação entre a força de corte e o espaçamento entre os sulfetos (traduzido de JIANG; CUI; HÄNNINEN, 1996).....	36
Figura 2.31 – Inclusão de sulfeto de manganês circundada por telureto de manganês (BARRETOs <i>et al.</i> , 2000)	37
Figura 2.32 – Processo de desoxidação por cálcio modificando as inclusões de alumínio; a) baixo teor de enxofre, desoxidado ao alumínio; b) tratamento ao cálcio das inclusões “a”; c) alto teor de enxofre, desoxidado ao alumínio; d) tratamento ao cálcio das inclusões “c” (adaptado de HOLAPPA; HELLE, 1995).....	38
Figura 2.33 – Microanálise de uma inclusão de chumbo (BARRETOs <i>et al.</i> , 1999)	39
Figura 2.34 – Seção transversal da zona de corte evidenciando a formação do cavaco para os aços testados (traduzido de HASHIMURA; MIZUNO; MIYANISHI, 2007)	40
Figura 2.35 – Rugosidade da superfície usinada em função do número de peças usinadas para os aços testados (traduzido de HASHIMURA; MIZUNO; MIYANISHI, 2007)	41
Figura 2.36 – Microanálise de uma inclusão de MnS envelopada por uma capa de bismuto (BARRETOs <i>et al.</i> , 1999)	42
Figura 2.37 – Efeito do percentual de chumbo e bismuto no tamanho da aresta postiça de corte para velocidade de corte de até 30 m/min (traduzido de YAGUCHI, 1988)	43
Figura 2.38 – Efeito do chumbo e bismuto na força de usinagem: a) para velocidades de corte de 60 m/min a 150 m/min; b) para baixas velocidades de corte (abaixo de 30 m/min) (traduzido de YAGUCHI, 1989).....	44
Figura 2.39 – Efeito dos percentuais de elementos químicos na temperatura de usinagem: a) chumbo; b) bismuto (traduzido de YAGUCHI, 1989).....	44
Figura 2.40 – Curvas de Taylor para os ensaios realizados com ferramenta de corte de metal duro na usinagem dos aços ABNT “12Bi14” e ABNT 1214 (adaptado de AMORIM <i>et al.</i> , 2003).....	45
Figura 2.41 – Índices de usinabilidade para aços de corte fácil em operação de torneamento com ferramenta de corte de aço rápido (adaptado de KLUJSZO; SOARES, 2005)	46
Figura 2.42 – Vida da ferramenta de corte na usinagem do aço ABNT 1045 e aços de corte fácil com aditivos de boro e nitrogênio (“BN1” e “BN2” representam diferentes percentuais de B e N) com $a_p = 0,5$ mm e $f = 0,10$ mm/volta: a) desgaste de flanco da ferramenta de metal duro P20; b) desgaste de cratera de metal duro P30 (traduzido de TANAKA <i>et al.</i> , 2007)...	47
Figura 2.43 – Componentes da força de usinagem para torneamento do aço ABNT 1045 e do aço de corte fácil com aditivos de boro e nitrogênio (“BN1”). Condições de corte: $V_c = 90$ m/min - 300 m/min, $a_p = 0,5$ mm e $f = 0,10$ mm/volta (traduzido de TANAKA <i>et al.</i> , 2007)...	48

Figura 2.44 – Temperatura de usinagem para torneamento do aço ABNT 1045 e do aço de corte fácil com adições de nitrogênio e boro (“BN1”). Condições de corte: $V_c = 90$ m/min - 300 m/min, $a_p = 0,5$ mm e $f = 0,10$ mm/volta (traduzido de TANAKA <i>et al.</i> , 2007).....	48
Figura 2.45 – Efeito do percentual total de elementos químicos residuais na microdureza da matriz ferrítica e na vida da ferramenta de corte (traduzido de MILLS, 1980)	49
Figura 3.1 – Ensaios de caracterização e de usinagem realizados nesta dissertação	50
Figura 3.2 – Representação transversal da amostra utilizada nos ensaios de dureza e os perfis de endentação	52
Figura 3.3 – Corpo de prova para ensaio de tração	52
Figura 3.4 – Montagem experimental utilizada para medição da força de usinagem com dinamômetro piezelétrico	53
Figura 3.5 – Torno <i>Romi</i> [®] CNC <i>Multiplic</i> 35D utilizado nos ensaios de força de usinagem ..	54
Figura 3.6 – Torno eletrônico universal <i>Diplomat</i> [®] modelo <i>Revolution</i> RV-220 utilizado nos ensaios de temperatura de usinagem	57
Figura 3.7 – Montagem experimental da calibração do sistema termopar ferramenta-peça	58
Figura 3.8 – Geometria de pino metálico (elemento de aquecimento) utilizado na calibração do termopar ferramenta-peça	59
Figura 3.9 – Contato entre o pino metálico (elemento de aquecimento) e a ferramenta de corte durante a calibração do termopar ferramenta-peça.....	59
Figura 3.10 – Inserção de termopares do tipo K e fio de cobre para calibração do termopar ferramenta-peça	60
Figura 3.11 – Rugosímetro <i>Surtronic 3+</i> da <i>Taylor Hobson</i> [®] com resolução de 0,01 μm	62
Figura 3.12 – Microscópio eletrônico de varredura <i>TM-3000</i> e EDS <i>SwiftED-3000</i> , ambos da <i>Hitachi High-Technologies Corporation</i> [®]	64
Figura 3.13 – Estéreo microscópio <i>Olympus</i> [®] modelo <i>SZ61</i> com software de análise de imagens <i>Image-Pro</i> [®]	65
Figura 4.1 – Diagrama de tensão-deformação para material I e material II	66
Figura 4.2 – Componentes da força de usinagem, F_c , F_f e F_p , pela velocidade de corte para o material I. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	68
Figura 4.3 – Características dos cavacos colhidos durante a usinagem em função da velocidade de corte para o material I. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	69
Figura 4.4 – Componentes da força de usinagem, F_c , F_f e F_p , pela velocidade de corte para o material II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	70

Figura 4.5 – Superfície inferior do cavaco para o material II. Aumento de 25 vezes. Condições de corte: $V_c = 18$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	71
Figura 4.6 – Superfície inferior do cavaco para o material II. Aumento de 25 vezes. Condições de corte: $V_c = 100$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	71
Figura 4.7 – Características dos cavacos colhidos durante a usinagem em função da velocidade de corte para o material II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	72
Figura 4.8 – Componente da força de usinagem, F_c em função da velocidade de corte para os dois materiais estudados. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	73
Figura 4.9 – Efeito do avanço sobre a força de corte para o material I	76
Figura 4.10 – Efeito da profundidade de corte sobre a força de corte para o material I.....	76
Figura 4.11 – Efeito da interação entre avanço e profundidade de corte sobre a força de corte para o material I.....	77
Figura 4.12 – Efeito do avanço sobre a força de corte na usinagem do material II	78
Figura 4.13 – Efeito da profundidade de corte sobre a força de corte na usinagem do material II.....	79
Figura 4.14 – Efeito da velocidade de corte sobre a força de corte na usinagem do material II	79
Figura 4.15 – Efeito da interação entre avanço e profundidade de corte sobre a força de corte na usinagem do material II	80
Figura 4.16 – Parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_q e R_t) em função da velocidade de corte para material I. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	82
Figura 4.17 – Parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_q e R_t) em função da velocidade de corte para material II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	82
Figura 4.18 – Parâmetro de rugosidade R_t (μm) em função da velocidade de corte para os materiais I e II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	83
Figura 4.19 – Parâmetro de rugosidade R_a (μm) em função da velocidade de corte para os materiais I e II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm.....	84
Figura 4.20 – Efeito do avanço sobre a rugosidade R_a na usinagem do material I.....	86
Figura 4.21 – Efeito do avanço sobre a rugosidade R_a na usinagem do material II.....	87
Figura 4.22 – Curva de calibração do material I para $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	88
Figura 4.23 – Curva de calibração do material II para $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	88
Figura 4.24 – Temperatura de usinagem obtida pelo método do termopar ferramenta-peça para o material I e material II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	89
Figura 4.25 – Influência do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos para o material I. Condição de corte: $V_c = 140$ m/min.....	96

Figura 4.26 – Influência do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos para o material II. Condição de corte: $V_c = 140$ m/min.....	97
Figura 4.27 – Variação do grau de recalque pela velocidade de corte para material I e material II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	98
Figura 4.28 – Superfície de saída da ferramenta de corte: a) ensaio do material I, $V_c = 28$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm; b) ensaio do material II, $V_c = 55$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm. Direção do cavaco representada por V_{cavaco}	99
Figura 4.29 – Superfície de saída de ferramentas de corte: a) ensaio do material I, $V_c = 100$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm; b) ensaio do material II, $V_c = 100$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm. Direção do cavaco representada por V_{cavaco}	100
Figura 4.30 – Superfície de saída das ferramentas de corte: a) ensaio do material I, $V_c = 185$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm; b) ensaio do material II, $V_c = 185$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm. Direção do cavaco representada por V_{cavaco}	101
Figura 4.31 – Detalhe na superfície de saída de ferramentas de corte utilizadas no ensaio do material II: a) condições de corte: $V_c = 50$ m/min, $f = 0,20$ mm/volta e $a_p = 1,0$ mm; b) condições de corte: $V_c = 250$ m/min, $f = 0,20$ mm/volta e $a_p = 1,0$ mm. Direção do cavaco representada por V_{cavaco}	102

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Principais parâmetros de rugosidade segundo Norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002a)	19
Tabela 2.2 – Tipos de inclusões em aços de corte fácil (adaptado de APPLE, 1989)	28
Tabela 2.3 – Composições químicas para aços carbono de corte fácil ressulfurados (adaptado de ASM HANDBOOK, 1990).....	29
Tabela 2.4 – Composições químicas de aços carbono de corte fácil ressulfurados e refosforados (adaptado de ASM HANDBOOK, 1990)	30
Tabela 2.5 – Usinabilidade de aços de corte fácil (adaptado de CHIAVERINI, 2005, p.279)	30
Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas de aços de corte fácil (adaptado de PRADO; PIMENTEL, 2004).....	31
Tabela 2.7 – Propriedades físicas do chumbo e do bismuto (BARRETOS <i>et al.</i> , 1999)	41
Tabela 3.1 – Composição química dos materiais (realizada pela Aços Villares S.A.)	51
Tabela 3.2 – Dimensões dos corpos de prova para ensaios de tração (em mm)	52
Tabela 3.3 – Especificações da ferramenta de corte e suporte utilizados nos ensaios de força de usinagem (dados do fabricante)	54
Tabela 3.4 – Condições de corte para medição da força de usinagem para testes variando apenas a velocidade de corte	55
Tabela 3.5 – Planejamento de experimentos fatorial 2^3 para ensaios de força de usinagem	56
Tabela 3.6 – Geometria das ferramentas de metal duro utilizadas nos ensaios de temperatura de usinagem e na calibração do termopar ferramenta-peça	57
Tabela 3.7 – Condições de corte utilizados nos testes de medição de temperatura	61
Tabela 3.8 – Planejamento de experimentos para forma e grau de recalque dos cavacos ..	63
Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de tração para o material I e material II	67
Tabela 4.2 – Valores médios da dureza Brinell dos materiais estudados.....	67
Tabela 4.3 – Estimativa dos efeitos para força de corte na usinagem do material I	75
Tabela 4.4 – Estimativa dos efeitos para força de corte na usinagem do material I em nova análise de variância (em negrito os fatores significativos).....	75
Tabela 4.5 – Estimativa dos efeitos para força de corte na usinagem do material II (em negrito os fatores significativos).....	77
Tabela 4.6 – Estimativa dos efeitos para rugosidade R_a na usinagem do material I.....	85
Tabela 4.7 – Estimativa dos efeitos para rugosidade R_a na usinagem do material I em nova análise de variância (em negrito os fatores mais influentes)	85

Tabela 4.8 – Estimativa dos efeitos para rugosidade R_a na usinagem do material II (em negrito os fatores significativos).....	86
Tabela 4.9 – Influência da velocidade de corte e dos materiais na forma do cavaco. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	91
Tabela 4.10 – Classificação da forma do cavaco segundo Norma ISO 3685. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm	93
Tabela 4.11 – Influência da velocidade de corte na coloração do cavaco. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm.....	94
Tabela 4.12 – EDS realizado na superfície de saída das ferramentas de corte para o material I (EDS 1 e EDS 2) e para o material II (EDS 3 e EDS 4) conforme Figura 4.28.....	99
Tabela 4.13 – EDS realizado na superfície de saída das ferramentas de corte para o material I (EDS 1, EDS 2 e EDS 3) e para o material II (EDS 4 e EDS 5) conforme Figura 4.29	100
Tabela 4.14 – EDS realizado na superfície de saída das ferramentas de corte para o material I (EDS1 e EDS 2) e para o material II (EDS 3, EDS 4 e EDS 5) conforme Figura 4.30	101
Tabela 4.15 – EDS realizados na superfície de saída das ferramentas de corte para o material II conforme Figura 4.30	102

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIAÇÕES

Letras latinas	Significado (unidade utilizada)
A	Seção transversal de corte (mm ²)
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
Al	Alumínio
a_p	Profundidade de corte (mm)
APC	Aresta postiça de corte
b	Largura de corte (mm)
B	Boro
Bi	Bismuto
BN-h	Nitreto de boro hexagonal
C	Carbono
Ca	Cálcio
CNC	Comando Numérico Computadorizado
Cr	Cromo
Cu	Cobre
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EDS	<i>Energy Dispersive Spectroscopy</i>
f	Avanço (mm/volta)
F_c	Força de corte (N)
Fe	Ferro
FEMEC	Faculdade de Engenharia Mecânica
F_f	Força de avanço (N)
F_p	Força passiva (N)
F_u	Força de usinagem (N)
h	Espessura de corte (mm)
h'	Espessura do cavaco (mm)
HB	Dureza Brinell
HV	Dureza Vickers
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
LEPU	Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura

Mn	Manganês
Mo	Molibdênio
N	Nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
Ni	Níquel
O	Oxigênio
P	Fósforo
Pb	Chumbo
R^2	Coeficiente de determinação (adimensional)
R_a	Desvio aritmético médio (μm)
R_c	Grau de recalque do cavaco (adimensional)
r_ϵ	Raio de ponta da ferramenta (mm)
R_q	Desvio médio quadrático (μm)
R_t	Altura total do perfil (μm)
R_z	Altura máxima do perfil (μm)
S	Enxofre
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
Si	Silício
Sn	Estanho
Te	Telúrio
UFU	Universidade Federal de Uberlândia
V_c	Velocidade de corte (m/min)
V_{cavaco}	Velocidade do cavaco (m/min)
$V_{\text{ccrítica}}$	Velocidade de corte crítica (m/min)

Letras gregas

	Significado (unidade utilizada)
ϕ	Ângulo de cisalhamento (graus)
γ_o	Ângulo de saída da ferramenta (graus)
γ_n	Ângulo de saída normal da ferramenta (graus)
α_o	Ângulo de folga da ferramenta (graus)
χ_r	Ângulo de posição da ferramenta (graus)
ε_r	Ângulo de ponta da ferramenta (graus)
λ_s	Ângulo de inclinação da ferramenta (graus)

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1. Considerações iniciais

A usinagem abrange todos os processos de fabricação mecânica onde a peça final é obtida através da remoção de cavacos. Define-se cavaco como a porção de material da peça bruta em excesso, que é removida durante o processo através de ferramentas de corte, sendo um dos mais importantes processos de fabricação da indústria metal-mecânica (FERRARESI, 1977; TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2011).

Nos processos de usinagem, é economicamente interessante atingir maiores taxas de remoção de cavaco, maior vida útil das ferramentas de corte, melhor integridade superficial das peças produzidas, redução dos custos gerais e dos efeitos nocivos sobre o meio ambiente, além do aumento da produtividade nos processos de usinagem. A busca por estas características tem levado ao desenvolvimento da classe de aços especiais denominados “aços de livre corte” ou “aços de corte fácil”.

Na década de 1960, diante do crescimento do parque produtivo nacional, surgiram no Brasil os primeiros aços de corte fácil. A Companhia Siderúrgica Belgo-Mineira® (atual Siderúrgica ArcelorMittal Aços Longos®) produziu o primeiro aço de corte fácil ressulfurado. O primeiro aço de corte fácil ressulfurado ao chumbo foi produzido pela Siderúrgica Mannesmann® (atual Vallourec & Mannesmann Tubes®), denominado comercialmente de “Chumbaloy”. Posteriormente, a Siderúrgica Aparecida (mais tarde incorporada à Villares), a Companhia Aços Especiais de Itabira, na década de 1970 e, mais recentemente, a Gerdau Aços Finos Piratini (com aços ao bismuto) também passaram a produzir aços de corte fácil (TROIANI, 2004).

Os aços de corte fácil são projetados com o objetivo de obter máximo desempenho em operações de usinagem. Sua principal característica é um alto teor de enxofre, que pode ser ainda mais melhorada por adição de chumbo. Outros elementos químicos que podem

constar na composição dos aços de corte fácil são o fósforo, telúrio, selênio, bismuto, boro, etc. Estes aços são predominantemente aplicados na fabricação de peças que possuem poucas exigências de resistência mecânica, tais como: componentes para bombas, buchas, pistões de pequenos compressores, componentes de aparelhos domésticos, etc. (PRADO; PIMENTEL, 2004).

A Figura 1.1 apresenta exemplos de componentes mecânicos fabricados a partir de barras trefiladas de aço de corte fácil.



Figura 1.1 – Exemplos de componentes mecânicos fabricados com aços de corte fácil (BRAMEC INDUSTRIAL, 2013)

Em termos de mercado nacional, a produção dos aços de corte fácil é significante, por exemplo, no ano de 2005 houve uma produção da ordem de mil toneladas/mês de aços de corte fácil ressulfurados ao chumbo nas usinas de Pindamonhangaba-SP e Mogi das Cruzes-SP, pertencentes à empresa Aços Villares S.A. A Figura 1.2 mostra a participação da produção de aços ressulfurados ao chumbo em relação ao total de aços produzidos no período de janeiro/2004 a junho/2005 na empresa Aços Villares S.A. (MISKULIN, 2005 *apud* PIMENTEL, 2006).

Participação da produção de aço ao chumbo em relação ao peso total de aço produzido no período de Janeiro/2004 a Junho/2005

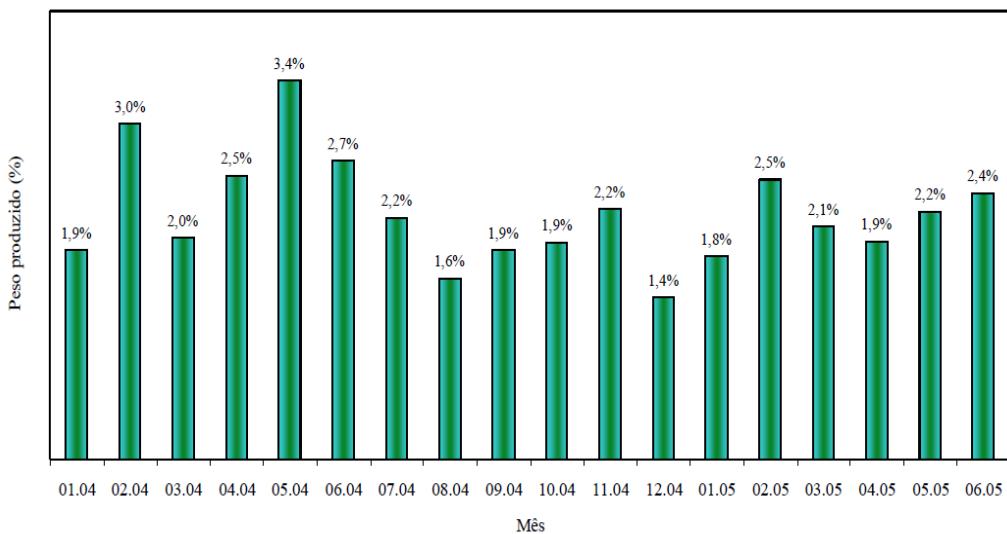


Figura 1.2 – Participação da produção de aço de corte fácil ao chumbo em relação ao peso total de aço produzido no período de janeiro/2004 a junho/2005 na empresa Aços Villares S.A. (MISKULIN, 2005 *apud* PIMENTEL, 2006)

Entre os tipos de aços de corte fácil, o aço ABNT 12L14 destaca-se por possuir uma demanda maior de produção em relação aos demais tipos. A Figura 1.3 mostra a produção mensal dos aços de corte fácil e a Figura 1.4 mostra a produção total, ambos no período de janeiro a maio de 2004, da empresa Aços Villares.

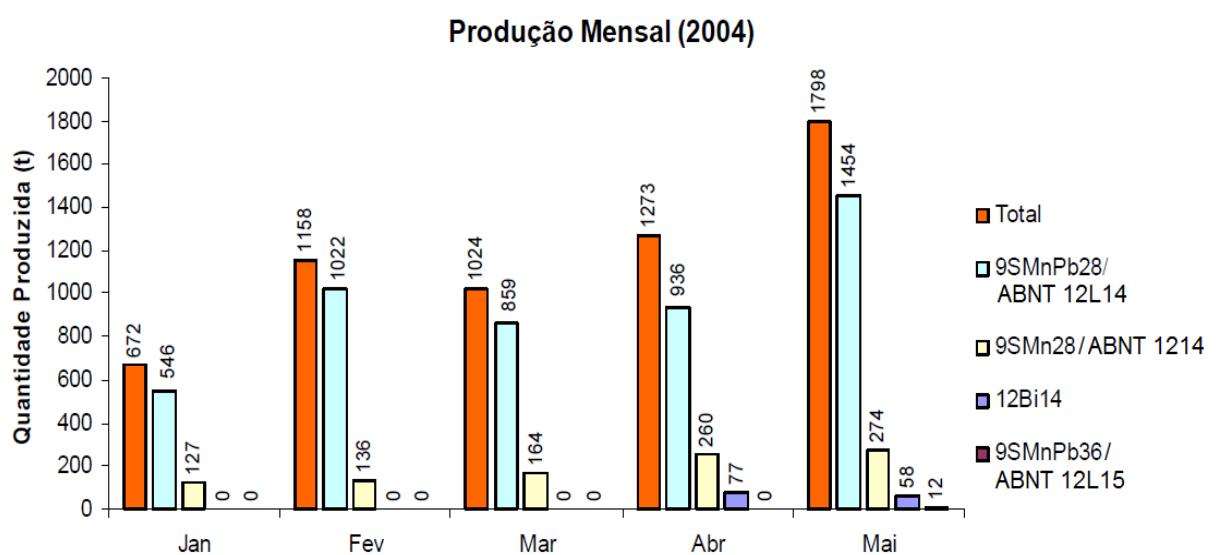


Figura 1.3 – Produção mensal dos tipos de aços de corte fácil da Aços Villares de janeiro a maio de 2004 (adaptado de PRADO; PIMENTEL, 2004)

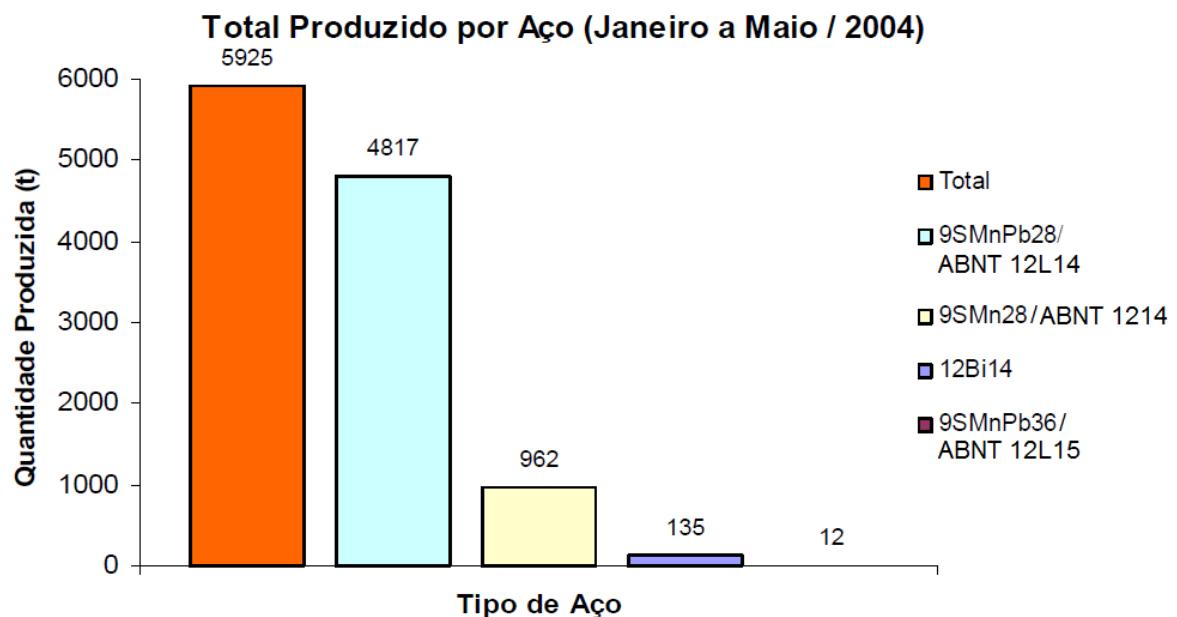


Figura 1.4 – Produção total dos tipos de aços de corte fácil da Aços Villares de janeiro a maio de 2004 (adaptado de PRADO; PIMENTEL, 2004)

Os dados de produção mostram a importância dos aços de corte fácil na indústria metal-mecânica e metalúrgica, especialmente o aço ABNT 12L14. Dentro desse contexto, avaliações de usinabilidade e de propriedades mecânicas direcionadas à classe de aços especiais de corte fácil tornam-se significativos, visando caracterizar e melhorar o desempenho desses importantes materiais em processos de usinagem.

1.2. Objetivo geral

Avaliar a usinabilidade do aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 em processo de torneamento cilíndrico externo com ferramentas de corte de metal duro. Para comparação de resultados, o aço de corte fácil ressulfurado ABNT 1214 foi igualmente trabalhado.

1.3. Objetivos específicos

Determinar os seguintes indicadores de usinabilidade para o aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 e para o aço de corte fácil ressulfurado ABNT 1214:

- Força de usinagem.
- Temperatura de usinagem.
- Rugosidade superficial das peças usinadas (R_a , R_q , R_z e R_t).
- Características dos cavacos: forma, tipo, coloração e grau de recalque.

- Análise da interface cavaco-ferramenta.
- Propriedades mecânicas: dureza, deformação, estrição, módulo de elasticidade, tensão de escoamento e limite de resistência à tração.

1.4. Estruturação do trabalho

Esta dissertação está dividida em seis capítulos, incluindo este texto introdutório (Capítulo I), além da seção de Referências Bibliográficas.

O Capítulo II é constituído da revisão bibliográfica sobre o tema de pesquisa, no qual foram abordados os seguintes tópicos: mecanismo de formação do cavaco, interface cavaco-ferramenta, força de usinagem, rugosidade da superfície usinada, temperatura de usinagem, método do termopar ferramenta-peça, usinabilidade dos materiais e aços de corte fácil.

No Capítulo III é descrito o procedimento experimental, abordando os ensaios de caracterização dos materiais, ensaios de usinagem, equipamentos e instrumentos utilizados e métodos experimentais empregados.

No Capítulo IV são apresentados os resultados e a discussão dos resultados dos ensaios de caracterização e de usinagem.

No Capítulo V são apresentadas as conclusões do trabalho e sugeridos temas para trabalhos futuros.

Por fim, as Referências Bibliográficas, contendo a lista de trabalhos citados nesta dissertação.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Mecanismo de formação do cavaco

Segundo Ferraresi (1970) a formação do cavaco, nas condições normais de usinagem, se processa da seguinte forma (Figura 2.1):

- a) Durante a usinagem, devido à penetração da ferramenta na peça, uma pequena porção de material, ainda solidária à peça, representada na Figura 2.1 pelo elemento “klmn”, é recalcada contra a superfície de saída da ferramenta.

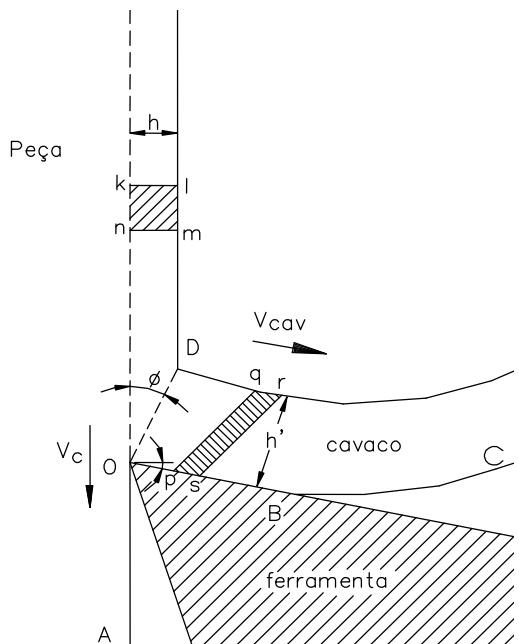


Figura 2.1 – Diagrama da cunha cortante (adaptado de TRENT; WRIGHT, 2000, p.22)

- b) O material recalcado sofre uma deformação plástica, a qual aumenta progressivamente, até que as tensões de cisalhamento se tornem suficientemente grandes, de modo a se iniciar um deslizamento entre a porção de material recalcado

e a peça. Esse deslizamento, sem perda de coesão, se realiza segundo os planos de cisalhamento dos cristais da porção de material recalcada. Durante a usinagem, estes planos instantâneos irão definir certa região entre a peça e o cavaco, chamada região de cisalhamento ou, de forma mais simples, plano de cisalhamento (plano definido pela linha OD na Figura 2.1). Este plano é tomado quanto possível paralelo aos planos de cisalhamento dos cristais dessa região e é definido pelo ângulo de cisalhamento ϕ .

c) Continuando com a penetração da ferramenta em relação à peça, haverá uma ruptura parcial ou completa da região de cisalhamento, dependendo da ductilidade e das condições de usinagem. Para os materiais frágeis, pode-se originar o cavaco de cisalhamento ou o cavaco de ruptura (Figura 2.2a). Para os materiais altamente deformáveis, a ruptura se realiza somente nas imediações da aresta cortante, o cavaco originado é denominado cavaco contínuo (Figura 2.2b).

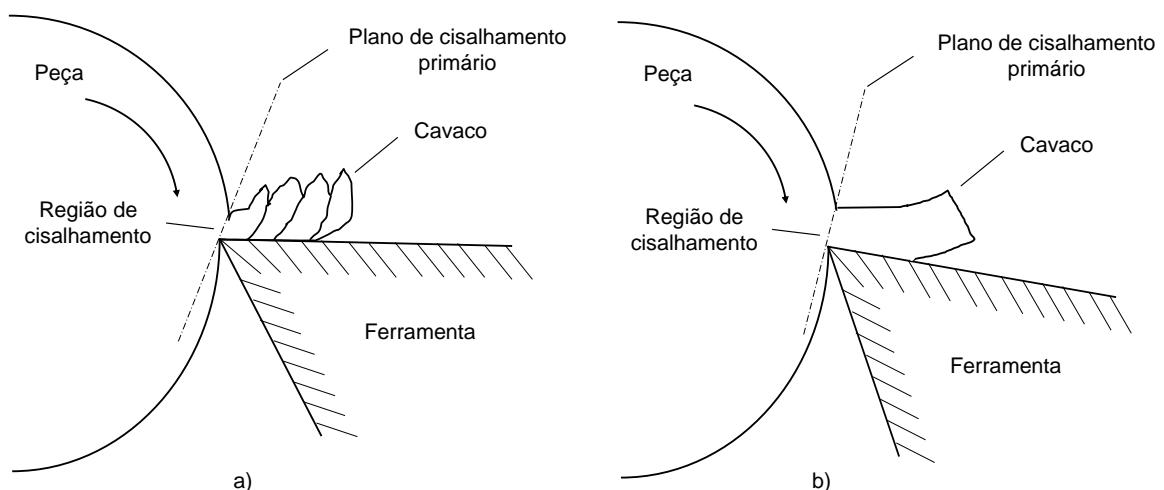


Figura 2.2 – Formação do cavaco: a) cavaco de cisalhamento ou cavaco de ruptura; b) cavaco contínuo (adaptado de FERRARESI, 1970, p.90)

d) Prosseguindo, devido ao movimento relativo entre a ferramenta e a peça, inicia-se um escorregamento da porção deformada e cisalhada (cavaco) sobre a superfície de saída da ferramenta. Enquanto tal ocorre, uma nova porção de material (imediatamente adjacente à porção anterior) está se formando e cisalhando. Esta nova porção de material irá também escorregar sobre a superfície de saída da ferramenta, repetindo novamente o fenômeno.

Desta forma, conclui-se que o fenômeno de formação do cavaco, nas condições normais de usinagem, é um fenômeno periódico, inclusive a formação do cavaco contínuo.

Tem-se alternadamente uma fase de recalque e uma fase de escorregamento, para cada pequena porção de material removido (FERRARESI, 1970; TRENT; WRITGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004).

Admite-se, na formação do cavaco, uma segunda região de cisalhamento localizada na interface cavaco-ferramenta denominada de zona de cisalhamento secundária (Figura 2.3), responsável pela altíssima geração de calor e desgaste por transferência de átomos entre ferramenta e cavaco (TRENT; WRITGHT, 2000; MACHADO; DA SILVA, 2004).

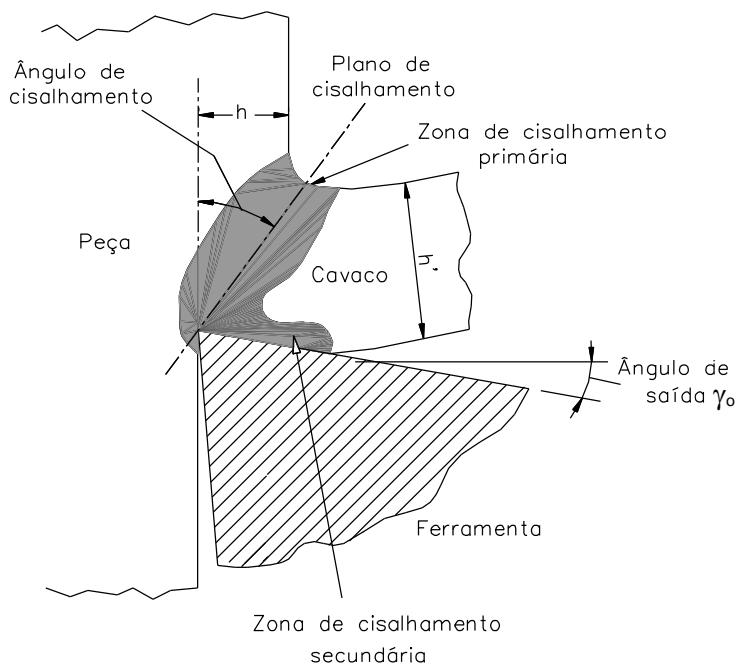


Figura 2.3 – Representação esquemática da formação do cavaco mostrando as zonas de cisalhamento (adaptado de MACHADO; DA SILVA, 2004, p.41)

2.1.1. Grau de recalque dos cavacos e ângulo de cisalhamento

O grau de recalque do cavaco é a razão entre a espessura do cavaco (h') e a espessura de corte (h). No corte ortogonal ele é uma medida da quantidade de deformação sofrida pelo cavaco e pode ser usado, entre outras coisas, para calcular o ângulo de cisalhamento e a velocidade de saída do cavaco (TRENT; WRITGHT, 2000; MACHADO et al., 2011).

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

Obtém-se o valor do grau de recalque através de medição direta da espessura do cavaco h' juntamente com a grandeza h , obtida pelas condições de usinagem ($h = f \cdot \operatorname{sen} \chi_r$, onde f é o avanço de corte e χ_r , o ângulo de posição principal; FERRARESI, 1970).

O ângulo de cisalhamento ϕ pode ser determinado pela medição direta da espessura do cavaco, h' , assim:

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

onde γ_n é o ângulo de saída normal, neste caso igual ao ângulo de saída γ_0 .

Os valores do grau de recalque, R_c , e do ângulo de cisalhamento, ϕ , fornecem uma boa indicação da quantidade de deformação dentro da zona de cisalhamento primária. Pequenos valores de ϕ (altos valores de R_c) significaram grande quantidade de deformação no plano de cisalhamento primário, e vice-versa (MACHADO; DA SILVA, 2004).

2.1.2. Tipos e formas dos cavacos

Para Machado *et al.* (2011) a classificação dos tipos de cavacos consiste na subdivisão: contínuos, parcialmente contínuos, descontínuos e segmentados.

- Cavacos contínuos. Formados em materiais dúcteis e homogêneos (Figura 2.4). O material cisalha na zona de cisalhamento primária com grandes deformações, permanecendo em uma forma homogênea, sem se fragmentar. Apresenta-se constituído de lamelas justapostas numa disposição contínua (FERRARESI, 1970).

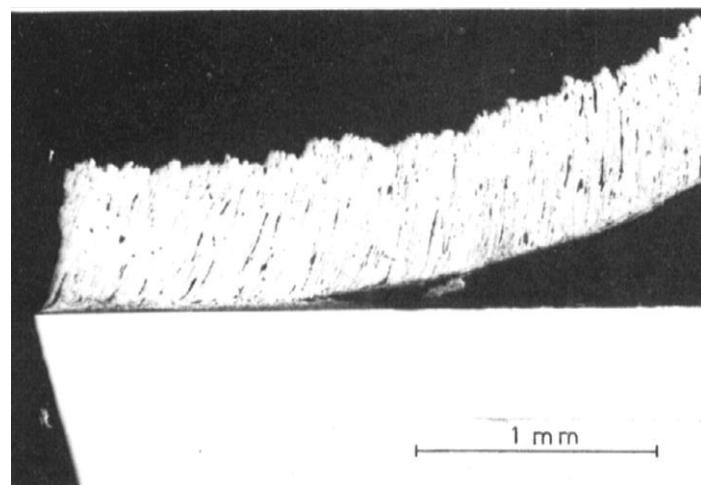


Figura 2.4 – Cavaco do tipo contínuo (TRENT; WRIGHT, 2000, p.37)

- Cavacos parcialmente contínuos. É um tipo intermediário entre os cavacos contínuos e descontínuos, onde a trinca se propaga só até uma parte do plano de cisalhamento primário. É muitas vezes denominado de cavaco de cisalhamento (Figura 2.5). Segundo Ferraresi (1970), este cavaco se forma usando-se grandes avanços, velocidades de corte geralmente inferiores a 100 m/min e ângulo de saída pequeno.

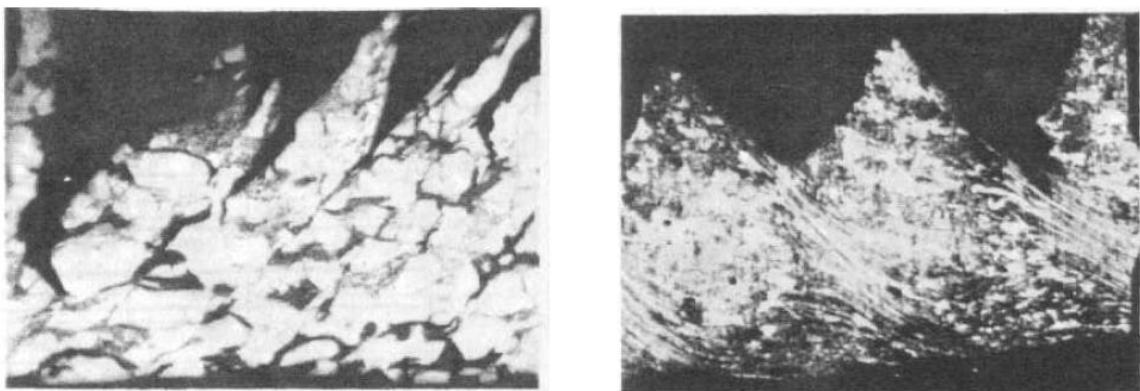


Figura 2.5 – Cavaco do tipo parcialmente contínuo ou cavaco de cisalhamento (FERRARESI, 1970, p.100)

- Cavacos descontínuos. Mais comuns quando usinando materiais frágeis, como o bronze e os ferros fundidos cinzentos, que não são capazes de suportarem grandes quantidades de deformações sem fratura. A trinca, neste caso, se propaga por toda a extensão do plano de cisalhamento primário, promovendo a fragmentação do cavaco. São também chamados de cavacos de ruptura (Figura 2.6);

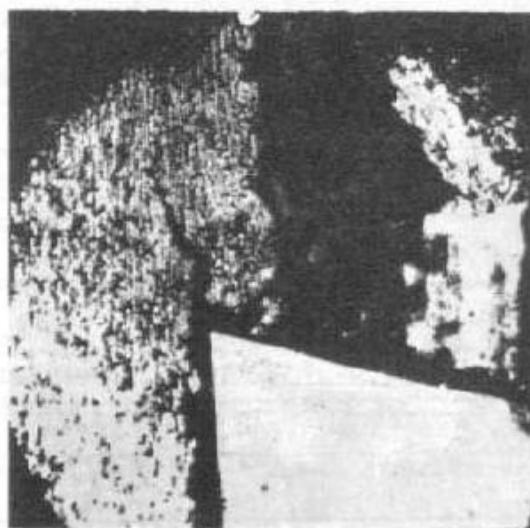


Figura 2.6 – Cavaco do tipo descontínuo ou cavaco de ruptura (FERRARESI, 1970, p.100)

- Cavacos segmentados. Caracterizados por grandes deformações continuadas em estreitas bandas entre segmentos com muita pouca, ou quase nenhuma deformação no interior destes segmentos. É um processo totalmente diferente da formação do cavaco contínuo, sendo característico a certos materiais com pobres propriedades térmicas, como o titânio e suas ligas (Figura 2.7).

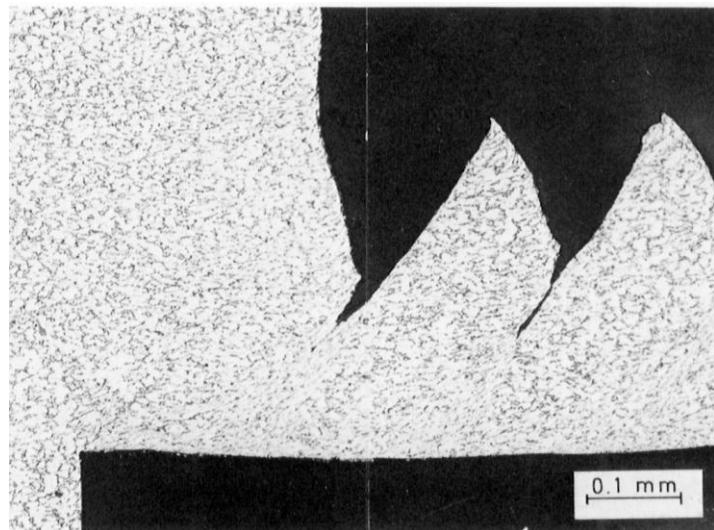


Figura 2.7 – Cavaco do tipo segmentado (TRENT; WRIGHT, 2000, p.304)

Quanto à forma dos cavacos, os mesmos são classificados em fita, helicoidal, espiral, lascas ou pedaços (FERRARESI, 1970). Entretanto, a Norma ISO 3685 classifica a forma dos cavacos segundo as formas básicas apresentadas na Figura 2.8.



Figura 2.8 – Formas do cavaco classificados de acordo com Norma ISO 3685 (SANTOS JR., 2012)

A forma do cavaco é um aspecto importante na usinagem, pois o cavaco em forma de fita carrega consigo muitos inconvenientes (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008; MACHADO *et al.*, 2011), como:

- Risco à segurança do operador.
- Danos à ferramenta e à peça, uma vez que o cavaco em forma de fita pode se enrolar a peça, danificando seu acabamento superficial.
- Dificuldade no manuseio e armazenagem.
- Afetar na vida da ferramenta devido à interação do cavaco com a aresta de corte e, consequentemente, afetar a força de corte e a temperatura de usinagem.
- Podem impedir o acesso regular do fluido de corte (“efeito guarda-chuva”).

A forma do cavaco pode ser controlada através de alterações no material da peça, esta é uma das vantagens dos aços de corte fácil. A influência da adição de bismuto sobre a usinabilidade do aço DIN-20MnCr5 foi verificada utilizando três amostras: material “0-Bi” sem o elemento Bi, material “1-Bi” com percentual de 0,026 % Bi e material “2-Bi” com percentual de 0,046 % Bi. Após usinagem das amostras, os materiais “1-Bi” e “2-Bi” apresentaram melhor controle do cavaco, resultante da formação de cavaco na forma de pequenos espirais cônicos (Figura 2.9; GRANDO, 2012).



a) material 0-Bi avanço de 0,066 mm/rot b) material 1-Bi avanço de 0,066 mm/rot

Figura 2.9 – Cavacos formados nos ensaios dos materiais: a) “0-Bi” (sem adições de bismuto); b) “1-Bi” (com 0,026 % de bismuto) (GRANDO, 2012)

Também foram realizados ensaios de campo, comparando o material “0-Bi” com os materiais “1-Bi” e “2-Bi”. Observou-se a formação de cavacos em forma de fita em maior quantidade para o material “0-Bi” e de cavacos em forma de lascas para os materiais “1-Bi” e “2-Bi”, confirmando a eficiência das adições de bismuto no controle do cavaco (Figura 2.10).



Figura 2.10 – Cavacos formados em ensaios de campo: a) material “0-Bi”; b) materiais “1-Bi” e “2-Bi” (GRANDO, 2012)

Yaguchi (1989) analisou o efeito de adições de até 0,3 % de Pb e 0,2 % de Bi na forma do cavaco de aços carbono. Os cavacos provenientes da usinagem desses aços apresentaram predominantemente a forma de lascas, apresentando um bom controle do cavaco (Figura 2.11).

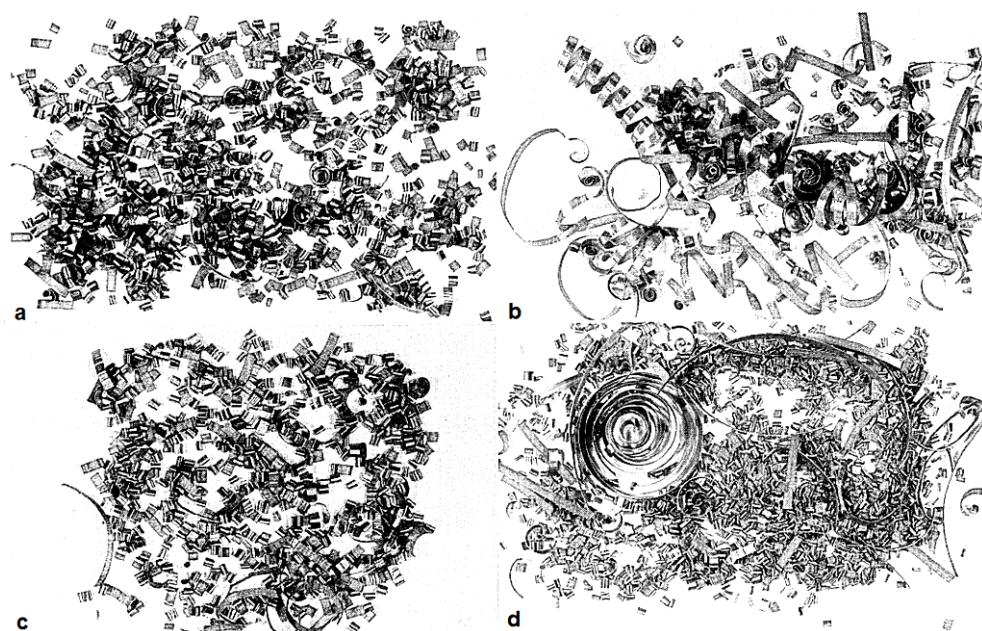


Figura 2.11 – Cavacos formados na usinagem de aços com adições de Pb e Bi: a) aço com 0,1 % Pb a $V_c = 60,0$ m/min; b) aço com 0,1 % Pb a $V_c = 21,6$ m/min; c) aço com 0,3 % Pb a $V_c = 21,6$ m/min; d) aço com 0,2 % Bi a $V_c = 21,6$ m/min (YAGUCHI, 1989)

Evangelista Luiz (2007) registrou a forma dos cavacos gerados na usinagem do aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 utilizando nove amostras com diferentes níveis dos elementos residuais cobre, níquel e cromo. A Figura 2.12 apresenta os cavacos colhidos na usinagem com ferramenta de metal duro (classe ISO K15 sem quebra-cavaco) em função do avanço, o parâmetro de usinagem mais influente na forma dos cavacos.

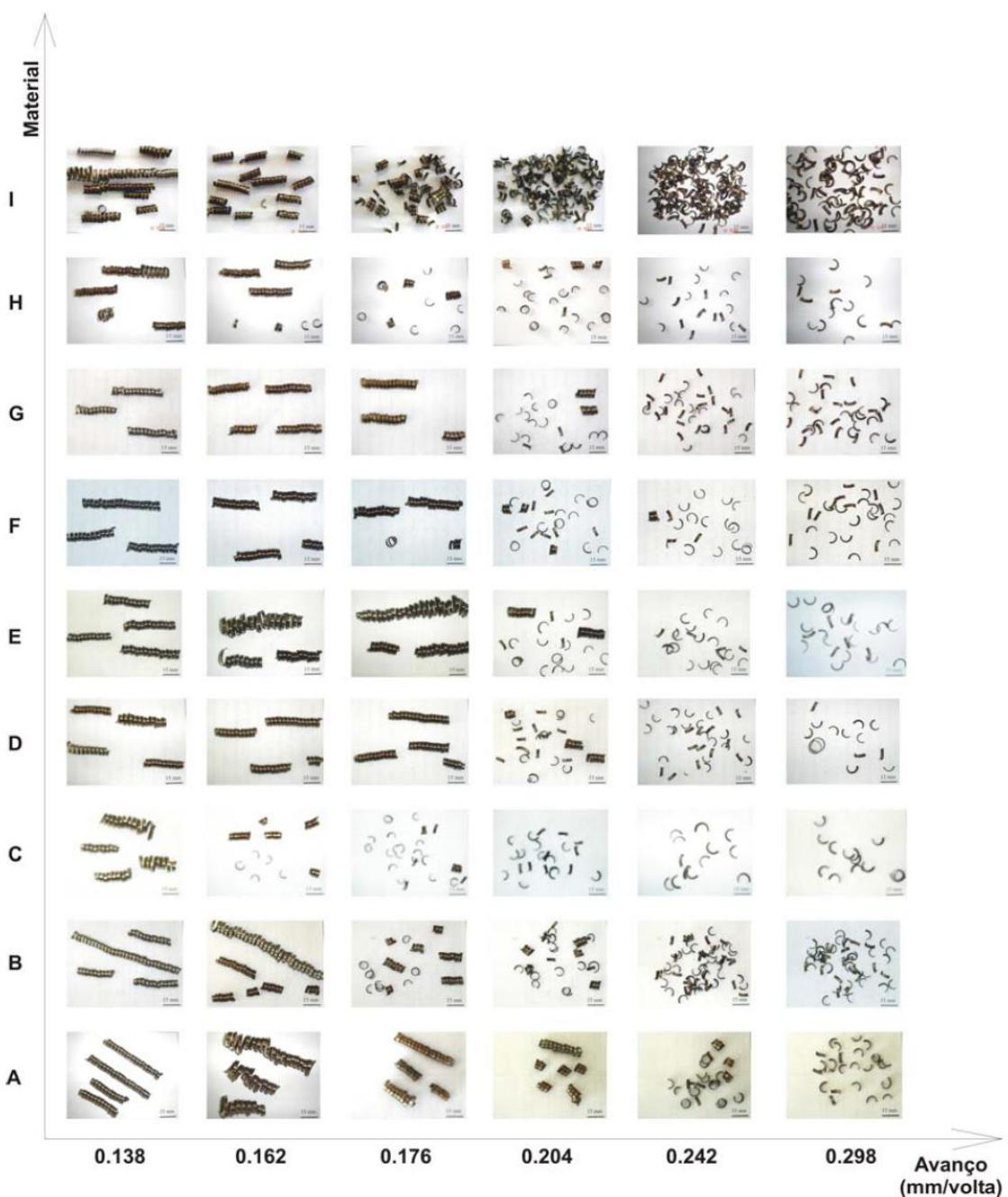


Figura 2.12 – Influência do avanço na forma do cavaco do aço de corte fácil ABNT 12L14. Condições de corte: $V_c = 141$ m/min e $a_p = 2,0$ mm (EVANGELISTA LUIZ, 2007)

2.2. Interface cavaco-ferramenta

O movimento da porção de cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta tem influência marcante em todo o processo de usinagem, particularmente no próprio mecanismo de formação de cavaco, na força de usinagem, no calor gerado durante o corte, nas temperaturas de usinagem e nos mecanismos e taxas de desgastes das ferramentas de corte (MACHADO *et al.*, 2011).

Segundo Trent e Wright (2000), na usinagem dos metais pelo menos três condições de interface cavaco-ferramenta podem ser encontradas: aderência e escorregamento, apenas escorregamento ou condição de aresta postiça de corte (APC).

Conforme a Figura 2.13a, a zona de aderência se estende da aresta de corte para dentro da superfície de saída da ferramenta, sendo característica a forte ligação atômica entre os materiais devido às altas taxas de deformação, às altas tensões de compressão e à elevada temperatura no local. O movimento na interface cavaco-ferramenta ocorre por cisalhamento dentro do material do cavaco formando uma zona de cisalhamento intenso próximo, mas não na interface, denominada zona de fluxo. A zona de escorregamento acontece após a zona de aderência, em que devido às ligações mais fracas entre o material da peça e o da ferramenta, o cavaco escorrega sobre a superfície de saída (TRENT; WRIGHT, 2000).

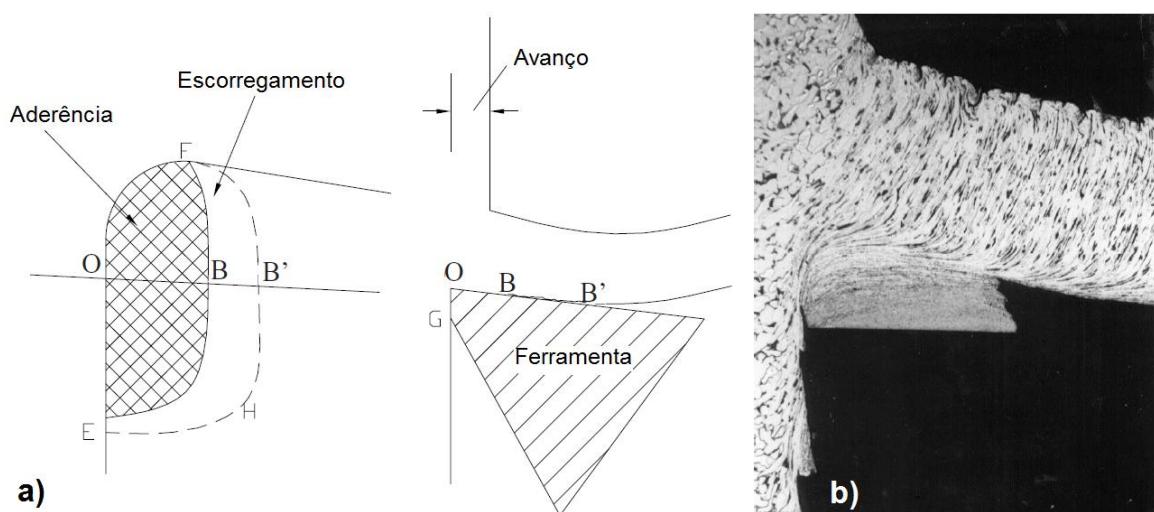


Figura 2.13 – Condições de interface cavaco-ferramenta: a) aderência e escorregamento; b) aresta postiça de corte (adaptado de TRENT; WRIGHT, 2000, pp.40, 44)

Além das condições de aderência e escorregamento, pode ocorrer na interface cavaco-ferramenta, quando a usinagem ocorre a baixas velocidades de corte, a formação da aresta postiça de corte, chamada de APC, conforme Figura 2.13b.

Segundo Trent e Wright (2000), a APC é formada ao se usinhar ligas com mais de uma fase presente em suas microestruturas. Durante o corte, o material da peça encruado se acumula sobre a cunha, aderindo ao redor da aresta de corte e sobre a superfície de saída da ferramenta, privando o cavaco de um contato direto com a ferramenta. A APC mostra-se indesejável devido ao acabamento irregular da superfície usinada, afetado principalmente por pequenas partículas de material que podem ser deslocadas da APC e da instabilidade do processo de corte nessa condição.

Quando o material da peça é aquecido, o amolecimento originado pela temperatura elimina o encruamento necessário para a formação e crescimento da APC. Desta forma, com o aumento da velocidade de corte, a APC desaparece. Ao valor de velocidade de corte no qual a APC é eliminada, denomina-se “velocidade de corte crítica, $V_{ccrítica}$ ” (MACHADO; DA SILVA, 2004).

O comportamento das dimensões da APC em função da velocidade de corte é mostrado na Figura 2.14. A APC cresce até atingir um valor máximo, a partir do qual começa a diminuir até o valor de velocidade de corte crítica, onde a APC desaparece completamente. Em velocidades de corte menores, à esquerda do valor de dimensão máxima, a APC se encontra em “regime estável”, enquanto em valores de velocidades de corte maiores, à direita do valor de dimensão máxima, ela se encontra em “regime instável” (MACHADO; DA SILVA, 2004; SANTOS; SALES, 2007).

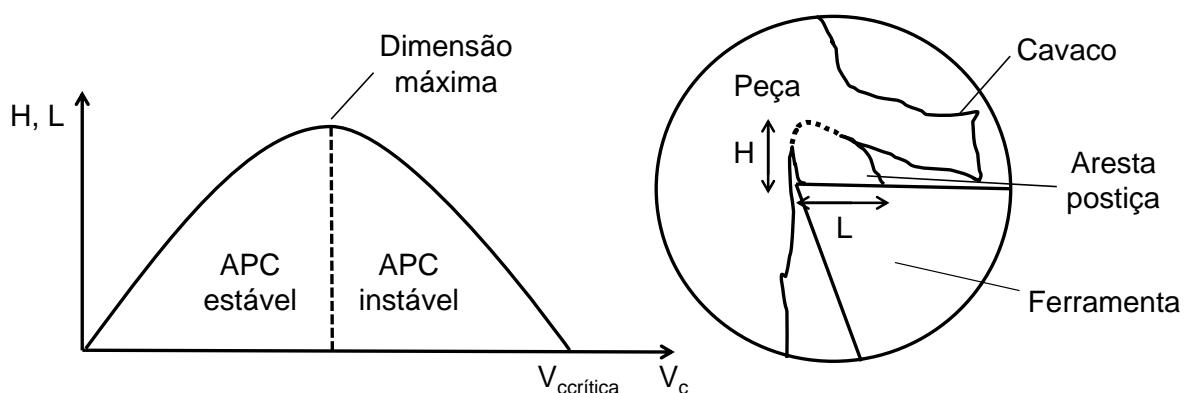


Figura 2.14 – Variação das dimensões da APC (altura “H” e largura “L”) com a velocidade de corte (adaptado de MACHADO; DA SILVA, 2004, p.75; SANTOS; SALES, 2007, p.56)

As condições de interface cavaco-ferramenta são influenciadas pelos aditivos de corte fácil, tais como, Pb, Se, Bi, Te, MnS. Durante a usinagem, estes aditivos funcionam como lubrificantes internos e podem restringir a formação da zona de aderência. Trent e Wright (2000) explicam que a zona de aderência não desaparece, mas é substituída por uma zona de fluxo formada por material de corte fácil aderido na interface.

A Figura 2.15 evidencia a presença de chumbo aderido na superfície de saída de uma ferramenta de metal duro após usinagem de latão com aditivos de corte fácil.

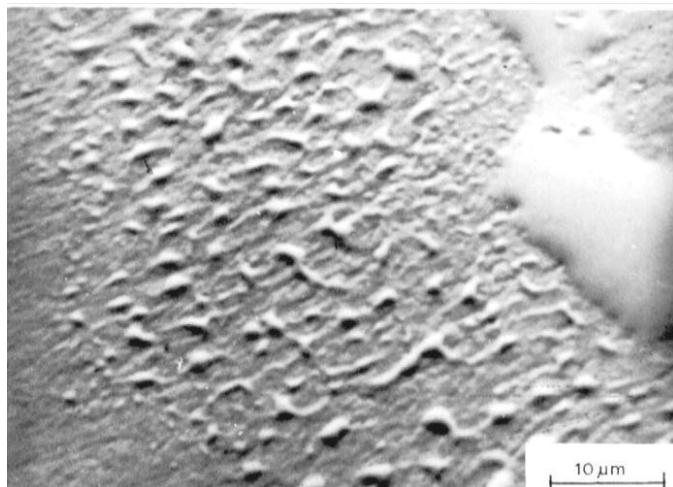


Figura 2.15 – Presença de chumbo aderido na superfície de saída da ferramenta de metal após usinar latão de corte fácil à velocidade de corte de 180 m/min (TRENT; WRIGTH, 2000, p.265)

Evangelista Luiz (2007) analisou as condições de interface na usinagem de aços de corte fácil ABNT 12L14 através de ensaios de parada-rápida (*quick-stop*), microscopia eletrônica de varredura (MEV) e espectroscopia de energia dispersiva (EDS, da língua inglesa *Energy Dispersive Spectroscopy*). O pesquisador observou que a condição de APC predominou até a velocidade de corte de 70 m/min. Além disso, para todas as condições ensaiadas, houve a presença de Mn e S na superfície de saída da ferramenta evidenciando uma película formada pelo sulfeto de manganês sobre a ferramenta. A presença do chumbo, em contrapartida, foi detectada em quantidades muito pequenas.

2.3. Força de usinagem

O conhecimento do comportamento e da ordem de grandeza dos esforços de corte nos processos de usinagem é de fundamental importância, pois eles afetam a potência necessária para o corte (a qual é utilizada para o dimensionamento do motor da máquina-ferramenta), a capacidade de obtenção de tolerâncias apertadas, a temperatura de corte e o desgaste da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008). Desta forma, conhecer a força de usinagem (F_u) torna-se um fator importante na determinação da usinabilidade de um material.

A força de usinagem é a força total que atua sobre a cunha cortante durante a usinagem. A componente da força de usinagem num plano ou numa direção qualquer é obtida mediante a projeção da força de usinagem sobre esse plano ou direção, ou seja, mediante uma decomposição ortogonal (FERRARESI, 1970):

- Força de corte F_c , projeção da força de usinagem F_u sobre a direção de corte (dada pela velocidade de corte).
- Força de avanço F_f , projeção da força de usinagem F_u sobre a direção de avanço.
- Força passiva F_p , projeção da força de usinagem F_u sobre uma direção perpendicular ao plano de trabalho.

A Figura 2.16 mostra as componentes da força de usinagem para os processos de torneamento cilíndrico externo e fresamento tangencial discordante.

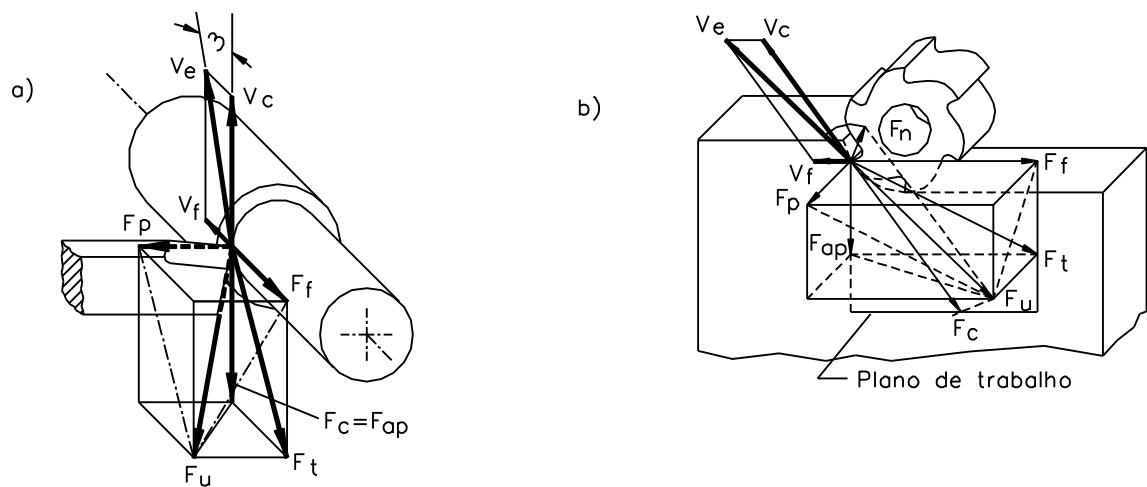


Figura 2.16 – Componentes da força de usinagem segundo Norma DIN 6584: a) no torneamento cilíndrico externo; b) no fresamento tangencial discordante (adaptado de DIN 6584, 1963 *apud* MACHADO; DA SILVA, 2004, p.86)

Em geral as componentes das forças de usinagem variam com as condições de trabalho como material da peça e com a geometria da ferramenta, além dos parâmetros de corte. Segundo Trent e Wright (2000), os fatores que contribuem para facilitar a movimentação do cavaco por sobre a superfície de saída da ferramenta, atuam no sentido de reduzir a força de usinagem e vice-versa.

2.4. Rugosidade da superfície usinada

A rugosidade de uma superfície é composta de irregularidades finas ou de erros microgeométricos resultantes da ação inerente ao processo de corte: marcas de avanço, aresta postiça de corte, desgaste da ferramenta, etc. A rugosidade depende de vários parâmetros, como a rigidez da máquina-ferramenta, propriedades do material da peça, geometria e material da ferramenta, operação de usinagem (MACHADO *et al.*, 2011).

A usinabilidade de um material também pode ser avaliada pela rugosidade obtida em determinado processo de usinagem. A rugosidade pode ser medida por vários parâmetros, a Tabela 2.1 apresenta os parâmetros utilizados nesta dissertação, de acordo com a Norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002a).

Tabela 2.1 – Principais parâmetros de rugosidade segundo Norma NBR ISO 4287 (ABNT, 2002a)

Símbolo	Nome	Definição
R_a	Desvio aritmético médio do perfil avaliado	Média aritmética dos valores absolutos das ordenadas no comprimento de amostragem
R_q	Desvio médio quadrático do perfil avaliado	Raiz quadrada da média dos valores das ordenadas no comprimento de amostragem
R_t	Altura total do perfil avaliado	Soma da maior altura de pico do perfil e da maior profundidade do vale do perfil no comprimento de avaliação
R_z	Altura máxima do perfil avaliado	Soma da altura máxima dos picos e a maior das profundidades dos vales no comprimento de amostragem

Os parâmetro R_a e R_t podem ser calculados teoricamente para o processo de torneamento. Para o caso de avanço (f) menor que o raio de ponta (r_e) da ferramenta, os valores podem ser dados aproximadamente por:

$$R_a = \frac{f^2}{18\sqrt{3} \cdot r_e} = \frac{f^2}{31,2 \cdot r_e} \quad (2.3)$$

$$R_t = \frac{f^2}{8 \cdot r_e} \quad (2.4)$$

Evangelista Luiz (2007) avaliou o parâmetro de rugosidade R_a no torneamento do aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 em amostras com diferentes níveis dos elementos residuais cobre, níquel e cromo. A Figura 2.17 apresenta a rugosidade na usinagem com ferramenta de metal duro (classe ISO K15 sem quebra-cavaco) em função da velocidade de corte.

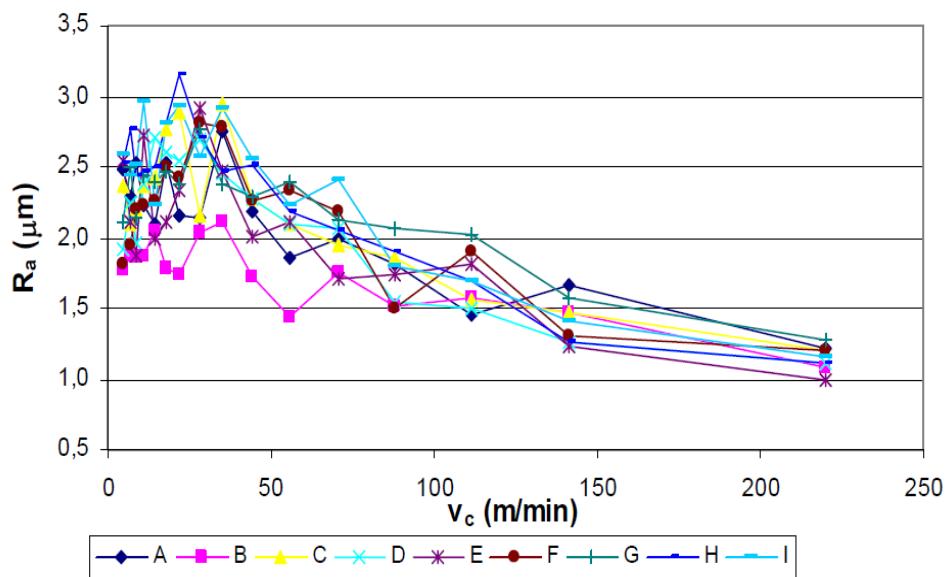


Figura 2.17 – Rugosidade R_a para amostras de aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14 em função da velocidade de corte, $f = 0,138$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm (EVANGELISTA LUIZ, 2007)

A rugosidade R_a foi influenciada pela APC em baixas velocidades de corte para os nove materiais usinados. Em velocidades de corte acima de 70 m/min, a APC desaparece e a rugosidade melhora. Foram obtidos valores de R_a inferiores a 1,5 µm para velocidades de corte acima de 150 m/min.

2.5. Temperatura de usinagem

Em usinagem praticamente toda a energia mecânica associada à formação do cavaco se transforma em energia térmica (calor). As fontes geradoras de calor no processo de usinagem são: a deformação e o cisalhamento do cavaco no plano de cisalhamento, o atrito do cavaco com a ferramenta e o atrito da ferramenta com a peça (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

A Figura 2.18 mostra as zonas distintas de geração de calor em usinagem.

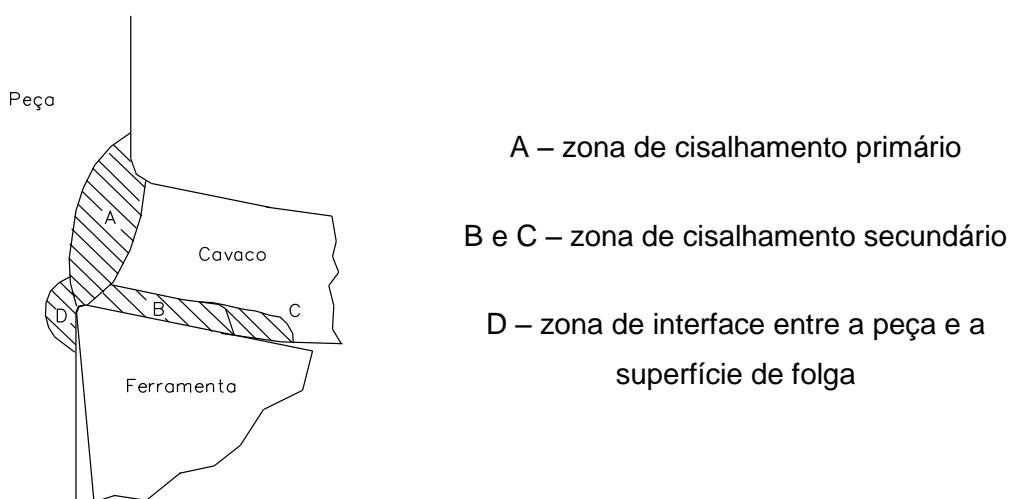


Figura 2.18 – Zonas de geração de calor em usinagem (adaptado de MACHADO; DA SILVA, 2004, p.99)

Grande parte deste calor gerado é dissipada pelo cavaco, uma pequena percentagem é dissipada pela peça e outra pelo ambiente. O restante vai para a ferramenta de corte (MACHADO *et al.*, 2011). Porém, como a região da ferramenta que recebe esse calor (região de contato ferramenta-peça e cavaco-ferramenta) é reduzida e não muda com o tempo, como ocorre com a peça, desenvolvem-se ali altas temperaturas (até 1200 °C), que muito contribuem para o desgaste da ferramenta (DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

Um forte indicativo das temperaturas nos cavacos de aços é a coloração apresentada por eles, quando a usinagem ocorre sem fluido de corte. Essa coloração, normalmente marrom ou azul, é promovida pela formação de uma fina camada de óxido poucos segundos após o corte. A hematita (Fe_2O_3), cuja dureza à temperatura ambiente atinge 1050 HV, é predominante até temperaturas da ordem de 200 °C, mantendo a cor cinza do aço; a magnetita (Fe_3O_4), cuja dureza à temperatura ambiente é da ordem de 540 HV, se forma entre as temperaturas de 200 °C e 570 °C, mudando a cor para marrom; a

wustita (FeO), cuja dureza à temperatura ambiente é da ordem de 460 HV, se forma em temperaturas acima de 570 °C, mudando a coloração para azul (LUONG; HEJKOOP, 1981; MACHADO; DA SILVA, 2004).

A zona de cisalhamento secundário é a principal fonte de calor na usinagem, responsável pelas temperaturas da ferramenta de corte. Desta forma, as temperaturas na superfície de saída da ferramenta são as maiores do sistema. Uma explicação para este comportamento é devido a uma combinação de grande quantidade de calor gerado na interface cavaco-ferramenta com o calor gerado na zona de cisalhamento primário, o qual é conduzido em sua grande parte pelo fluxo de cavacos (MACHADO; DA SILVA, 2004; DINIZ; MARCONDES; COPPINI, 2008).

A medição de temperatura em usinagem é um desafio experimental. Muitos métodos experimentais foram desenvolvidos ao longo do tempo e, talvez o mais utilizado seja o método do termopar ferramenta-peça. Por ser o método utilizado na etapa experimental desta dissertação, o método do termopar ferramenta-peça será apresentado com mais detalhes a seguir.

2.6. Método do termopar ferramenta-peça

O método do termopar ferramenta-peça foi utilizado pela primeira vez na década de 1920, tornando-se atualmente um dos métodos mais utilizados para medição de temperatura em usinagem (STEPHENSON; AGAPIOU, 2006). A temperatura medida no termopar ferramenta-peça caracteriza-se por ser a maior temperatura conseguida entre todos os tipos de medição e por estabilizar-se rapidamente, no tempo de 10 s a 20 s após início do corte (FERRARESI, 1970).

O método do termopar ferramenta-peça mede a temperatura da interface cavaco-ferramenta por meio do fenômeno físico denominado “efeito Seebeck”. A experiência mostra que um circuito constituído por dois materiais diferentes é percorrido por uma corrente elétrica “i” desde que os contatos ou junções destes materiais, “p” e “q”, estejam a temperaturas diferentes (Figura 2.19). Um circuito deste tipo, denominado par termoelétrico ou termopar, é uma fonte de força eletromotriz. O valor desta força eletromotriz gerada depende somente da natureza dos condutores e da diferença de temperatura entre os dois contatos (BORCHARDT; GOMES, 1979).

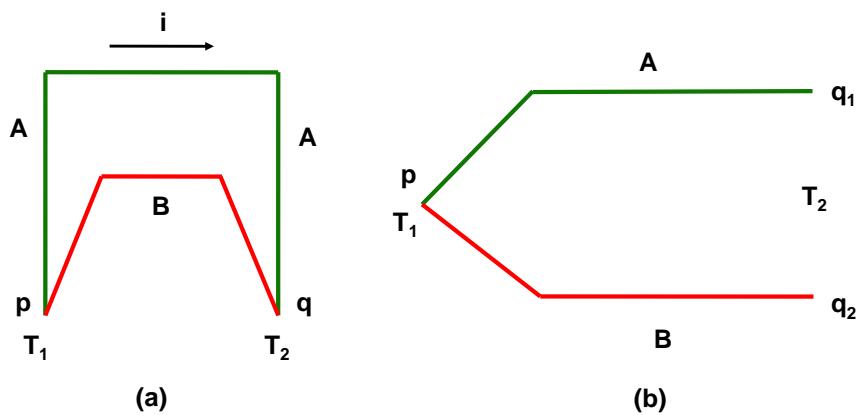


Figura 2.19 – Princípio dos termopares, onde “p” e “q” representam as junções, “A” e “B” representam os materiais: a) corrente termoelétrica “i”; b) circuito termoelétrico onde a junção “q” foi aberta (adaptado de BORCHARDT; GOMES, 1979, p.11)

Utilizando o princípio do “efeito Seebeck”, a temperatura de usinagem pode ser medida. O material da peça e o material da ferramenta constituem o termopar. Durante a usinagem, a zona de aderência entre a ferramenta e o cavaco garante a formação de uma junção (junta quente), enquanto uma conexão elétrica para uma parte de menor temperatura da ferramenta forma a junção fria (junta fria).

A Figura 2.20 mostra um esquema geral do método do termopar ferramenta-peça. O ponto “Q”, de contato da peça com a ferramenta, representa a junta quente. Os pontos “F1”, “F2”, “F3” e “F4” representam as juntas frias. A cuba é preenchida com mercúrio até que seja estabelecido o contato elétrico do disco de contato com o elemento “E”, garantindo desta forma o fechamento do circuito. Os fios “A1” e “A2” fazem a conexão do sistema com o milivoltímetro “V” que indica o valor da tensão elétrica gerada (MACHADO *et al.*, 2011).

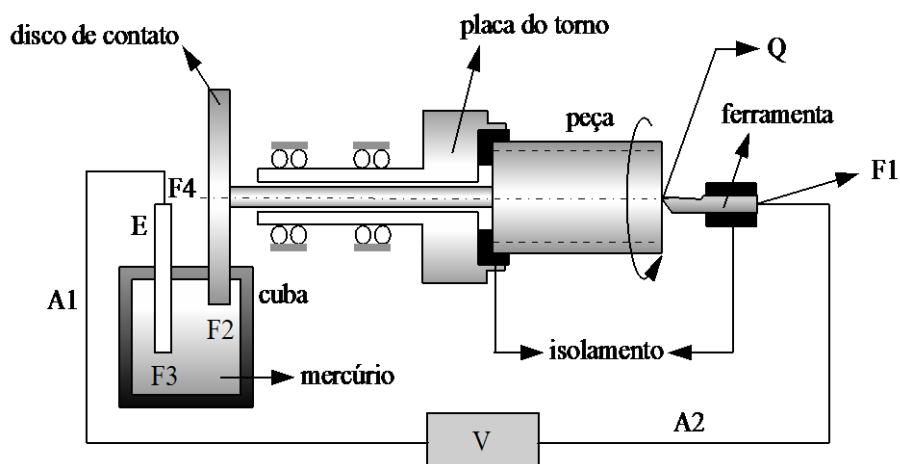


Figura 2.20 – Esquema geral do método do termopar ferramenta-peça utilizado na medição da temperatura de usinagem (adaptado de MACHADO *et al.*, 2011, p.165)

A relação entre a força eletromotriz gerada pelo termopar ferramenta-peça e a temperatura da junta é obtida através da calibração do sistema. Esta calibração é realizada para cada par de materiais e em faixas de temperaturas a que estes materiais estarão submetidos na usinagem. Um sistema de aquisição de dados é utilizado para medição da força eletromotriz e da temperatura gerada na junta quente, para posteriormente obter a curva de calibração.

Segundo Ferraresi (1970), o método de calibração do termopar cavaco-ferramenta mais simples consiste na imersão dos componentes “F”, “C” e “P” em um banho de sal “B”, aquecido pela resistência elétrica “R” (Figura 2.21). O elemento “F” é uma haste do mesmo material da ferramenta de corte, que deve ter um diâmetro de pelo menos 1/8” (3,17 mm) para garantir uma temperatura uniforme e limitar a quantidade de calor transferido à extremidade fria que, por sua vez, deve estar a uma boa distância da ponta aquecida, mantendo-se à temperatura ambiente durante a calibração. O elemento “C” representa o material da peça, podendo ser o próprio cavaco desta. 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 de cromel-alumel padrão “P”.

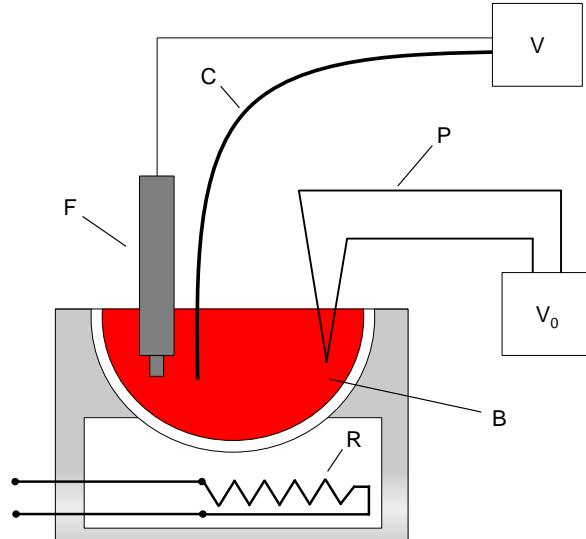


Figura 2.21 – Calibração do método do termopar ferramenta-peça utilizando banho de sal “B” aquecido por resistência elétrica “R” (adaptado de FERRARESI, 1970, p.148)

A calibração do sistema termopar ferramenta-peça também pode ser realizada através de um aquecimento produzido por chama de maçarico a gás oxi-acetileno (KAMINISE, 2012). O princípio é semelhante à calibração utilizando banho de sal aquecido por resistência elétrica, entretanto, a calibração com maçarico a gás oxi-acetileno pode ser realizada na própria máquina-ferramenta, com os mesmos elementos usados em um ensaio

de usinagem: ferramenta de corte, porta-ferramenta, corpo de prova e o elemento de aquecimento (pino metálico do material da peça ou cavaco).

A Figura 2.22 mostra esquematicamente o processo de calibração com maçarico a gás oxi-acetileno. Em seu trabalho, Kaminise (2012) utilizou uma contra ponta rotativa específica para a medição de temperatura.

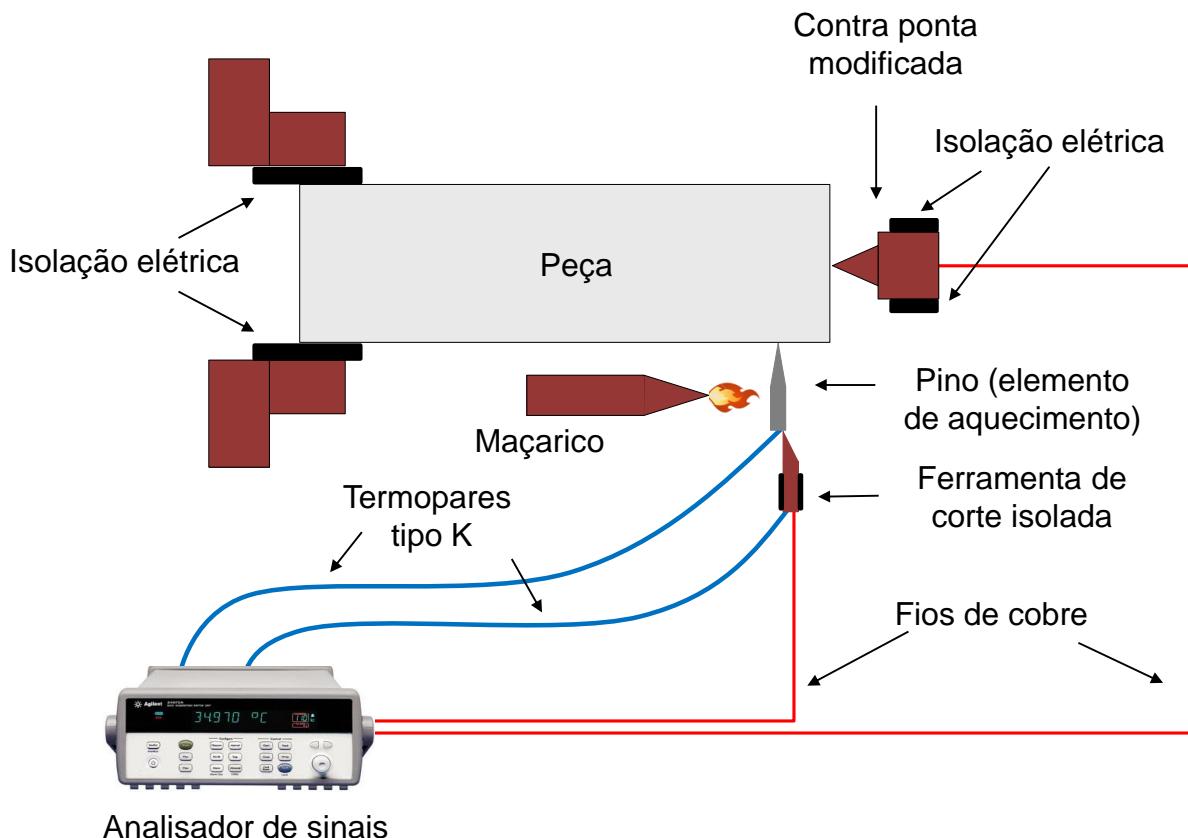


Figura 2.22 – Esquema geral da calibração do sistema termopar ferramenta-peça utilizando chama de maçarico e elemento de aquecimento (pino metálico)

A contra ponta utilizada por Kaminise (2012) foi modificada especialmente para conferir isolamento elétrico do corpo da máquina-ferramenta e permitir a continuidade do circuito elétrico, sem comprometer a sustentação do corpo de prova na usinagem. A continuidade elétrica do circuito foi obtida através do alojamento de uma cápsula de *Teflon*® com armazenamento de mercúrio no interior do cone *morse* da contra ponta. A Figura 2.23 apresenta os elementos da contra ponta rotativa modificada.

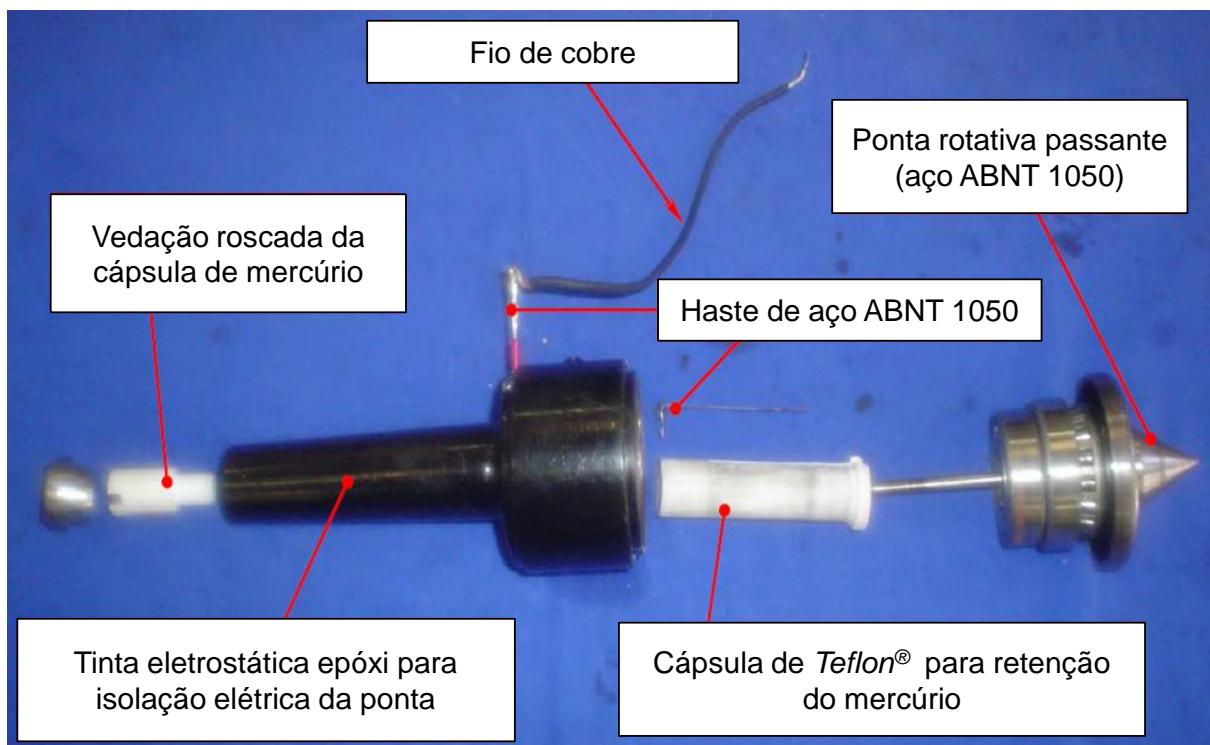


Figura 2.23 – Componentes da conta ponta rotativa modificada para o método termopar ferramenta-peça (adaptado de KAMINISE, 2012)

A ponta rotativa e a haste metálica da Figura 2.23 fazem contato com o mercúrio retido na cápsula de *Teflon*®, uma vez que ambos foram confeccionados com aço SAE 1050, a junta formada é de mesmo material. Desta forma, não há força eletromotriz adicional no sistema termopar ferramenta-peça proveniente desta junta. O cone *morse* foi isolado eletricamente através de pintura eletrostática à base de resina epóxi. O fio de cobre soldado à haste metálica da conta ponta fecha o circuito elétrico (KAMINISE, 2012).

2.7. Usinabilidade dos metais

A usinabilidade de um material pode ser definida como uma grandeza tecnológica, que expressa por meio de um valor numérico comparativo (índice ou porcentagem) um conjunto de propriedades de usinagem do metal, em relação a outro tomado como padrão (FERRARESI, 1970). Em outras palavras, a usinabilidade pode ser definida como a maneira que o material se comporta durante a usinagem. Desta forma, a usinabilidade é muito mais uma função do teste e não uma função de uma ou mais propriedades do material, sendo uma grandeza que indica a facilidade ou dificuldade de se usinar um material (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2011).

Força de corte, energia requerida na usinagem, vida da ferramenta, acabamento superficial, taxa de desgaste, temperatura de corte, controle do cavaco, e mesmo algumas propriedades físicas, etc. são variáveis que podem ser consideradas como medida de usinabilidade. Porém, o processo precisa ser selecionado arbitrariamente e especificado juntamente ao índice de usinabilidade. Por isto que a usinabilidade é uma função do teste, e qualquer número de usinabilidade deve acompanhar uma descrição completa do teste. Sem esta informação adicional, este número não tem significado (MACHADO *et al.*, 2011).

Os fatores que influenciam a usinabilidade dos materiais são aqueles ligados ao (FERRARESI, 1970):

- Material da peça - composição química, microestrutura, dureza, rigidez da peça, etc.
- Processo mecânico e condições de usinagem - material da ferramenta, fluido de corte, rigidez da máquina, ferramenta e do sistema de fixação da peça, parâmetros de corte (velocidade, avanço, profundidade), geometria da ferramenta, etc.
- Tipo de critério de avaliação - desgaste da ferramenta, força de usinagem, acabamento superficial, temperatura de corte, disposição do cavaco, etc.

Neste trabalho foi avaliada a usinabilidade do aço de corte fácil baixo carbono ao chumbo ABNT 12L14 comparando-o com o aço de corte fácil resulfurado ABNT 1214, segundo diferentes critérios: força de usinagem, temperatura de usinagem, rugosidade da superfície usinada, condições de interface cavaco-ferramenta e caracterização dos cavacos.

A seguir serão apresentadas informações sobre esta classe de aços e alguns resultados de usinabilidade da literatura.

2.8. Aços de corte fácil

Os aços de corte fácil são ligas ferro-carbono (com baixo ou médio teor de carbono) onde normalmente são adicionados enxofre e chumbo, além de outros elementos químicos. Estes elementos são considerados os principais aditivos de corte fácil e são responsáveis pela melhoria da usinabilidade (TROANI, 2004). A Figura 2.24 apresenta a classificação dos aços de corte fácil, inseridos na categoria dos aços especiais.

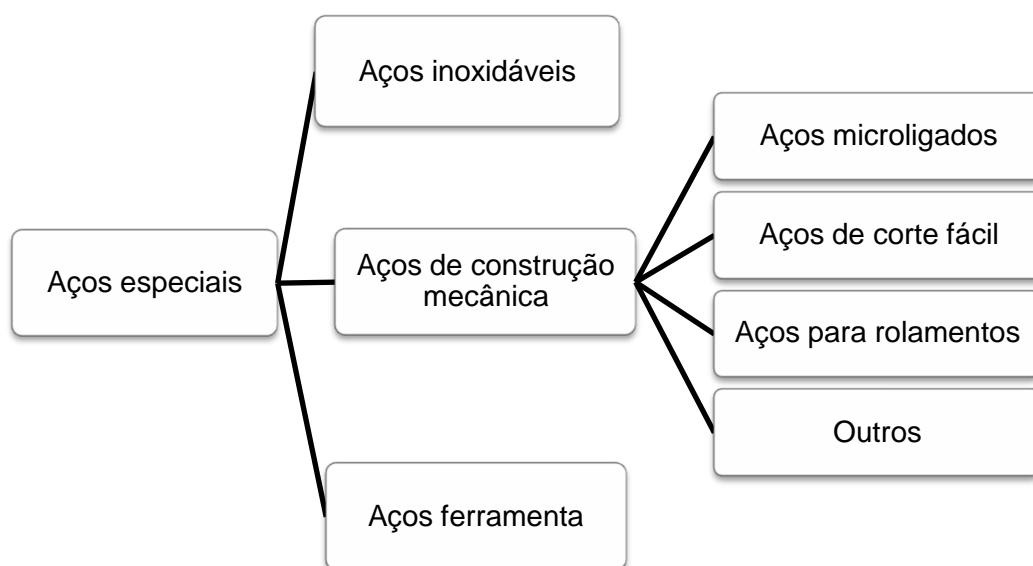


Figura 2.24 – Classificação geral dos aços especiais (adaptado de EVANGELISTA LUIZ, 2007)

Quaisquer inclusões, sendo adicionadas intencionalmente ou aquelas inerentes ao processo de fabricação, influenciam de alguma forma a usinabilidade (APPLE, 1989). As inclusões devem atuar de uma maneira que facilitem o cisalhamento do cavaco e iniciem a formação de trincas, fragilizando o cavaco. Os tipos de inclusões de maior relevância na usinabilidade dos aços de corte fácil são mostrados na Tabela 2.2.

Tabela 2.2 – Tipos de inclusões em aços de corte fácil (adaptado de APPLE, 1989)

Tipo de inclusão	Composição
Sulfetos, selenetos e teluretos	MnS, MnSe, MnTe
Inclusões metálicas	Pb e Bi
Inclusões de óxidos	Silicato de Ca-Al e Silicato de Ca-Al-Mn
Outras inclusões não metálicas	Aluminatos e nitretos

Segundo o sistema SAE/AISI de classificação os aços ao carbono de corte fácil são designados como se segue:

- 11xx: aços ressulfurados.
- 12xx: aços ressulfurados e refosforados,

onde “xx” indica o percentual de carbono.

O chumbo também pode ser adicionado na composição química do aço de corte fácil, neste caso sua designação passa a ser “xxLxx”, onde os algarismos antes do “L” representam o grupo de aço, os algarismos após o “L” representam a quantidade de carbono e o “L” vem de “lead” (chumbo em língua inglesa). A quantidade de chumbo adicionada varia entre 0,15 % e 0,35 % (ASM HANDBOOK, 1990).

Os aços de corte fácil são incluídos na classificação SAE, em número um pouco superior a 20 (Tabela 2.3 e Tabela 2.4). O aço considerado padrão é o aço de corte fácil SAE 1112 sendo utilizado para qualificar qualquer metal sob ponto de vista de usinabilidade, adotando-se para ele o índice 100. Assim, quando um material tem índice igual a 70, isso significa que sua usinabilidade é 70 % da usinabilidade do aço 1112 (CHIAVERINI, 2005).

Tabela 2.3 – Composições químicas para aços carbono de corte fácil ressulfurados (adaptado de ASM HANDBOOK, 1990)

Designação SAE-AISI	Faixas e limites de composição química			
	C	Mn	P (máx.)	S
1108	0,08 - 0,13	0,50 - 0,60	0,040	0,08 - 0,13
1110	0,08 - 0,13	0,30 - 0,60	0,040	0,08 - 0,13
1117	0,14 - 0,20	1,00 - 1,30	0,040	0,08 - 0,13
1118	0,14 - 0,20	1,30 - 1,60	0,040	0,08 - 0,13
1137	0,32 - 0,39	1,35 - 1,65	0,040	0,08 - 0,13
1139	0,35 - 0,43	1,35 - 1,65	0,040	0,13 - 0,20
1140	0,37 - 0,44	0,70 - 1,00	0,040	0,08 - 0,13
1141	0,37 - 0,45	1,35 - 1,65	0,040	0,08 - 0,13
1144	0,40 - 0,48	1,35 - 1,65	0,040	0,24 - 0,33
1146	0,42 - 0,49	0,70 - 1,00	0,040	0,08 - 0,13
1151	0,48 - 0,55	0,70 - 1,00	0,040	0,08 - 0,13

Tabela 2.4 – Composições químicas de aços carbono de corte fácil ressulfurados e refosforados (adaptado de ASM HANDBOOK, 1990)

Designação	Faixas e limites de composição química					
	SAE-AISI	C (máx.)	Mn	P	S	Pb
1211		0,13	0,60 - 0,90	0,07 - 0,12	0,10 - 0,15	-
1212		0,13	0,70 - 1,00	0,07 - 0,12	0,16 - 0,23	-
1213		0,13	0,70 - 1,00	0,07 - 0,12	0,24 - 0,33	-
1215		0,09	0,75 - 1,05	0,04 - 0,09	0,26 - 0,35	-
12L14		0,15	0,85 - 1,15	0,04 - 0,09	0,26 - 0,35	0,15 - 0,35

As composições químicas dos aços de corte fácil não se limitam apenas aos elementos carbono, manganês, fósforo, enxofre e chumbo. Existe também a presença de outros elementos como silício, molibdênio, alumínio, cromo, níquel, cobre e outros elementos chamados residuais. A adição de teores mínimos de telúrio, selênio ou cálcio contribuem para obtenção de inclusões esféricas de MnS que se transformarão em elipsóides na laminação, a forma elipsóide é a ideal para atuação de tais sulfetos. Procura-se também minimizar a presença de elementos de liga residuais (cromo, níquel, molibdênio, vanádio, tungstênio, etc.) que endurecem o aço, bem como a quantidade de óxidos (silicatos e aluminatos) provenientes da desoxidação do aço líquido, pois são altamente abrasivos (TROIANI, 2004).

A Tabela 2.5 indica a usinabilidade dos principais tipos de aços de corte fácil tomando-se como referência o aço de especificação ABNT/SAE 1212, assumido como usinabilidade 100 %.

Tabela 2.5 – Usinabilidade de aços de corte fácil (adaptado de CHIAVERINI, 2005, p.279)

Tipo do aço ABNT/SAE	Usinabilidade (%)	Dureza Brinell (HB)
1117	90	137
1118	85	143
1212	100	-
1213	136	-
1215	136	-
12L14	160	163
12L14 (a)	190	137
12L14 (b)	235	137
12L14 (c)	295	137

(a) Tipo alternativo ao 12L14.

(b) Tipo alternativo ao 12L14, contendo bismuto.

(c) Tipo alternativo ao 12L14, contendo bismuto, selênio e telúrio.

Observa-se que os aços de corte fácil possuem uma boa usinabilidade e essa característica pode ser aumentada através da adição de outros elementos como bismuto, selênio e telúrio (CHIAVERINI, 2005).

A Tabela 2.6 apresenta propriedades mecânicas de alguns aços de corte fácil.

Tabela 2.6 – Propriedades mecânicas de aços de corte fácil (adaptado de PRADO; PIMENTEL, 2004)

Tipo do aço ABNT/SAE	Dureza (HB)	Tensão de ruptura (kgf/mm ²)	Propriedades de tração		
			Tensão de escoamento (kgf/mm ²)	Redução de área (%)	Alongamento (%)
1213	114	38,6	21,8	58,0	26,3
1213 com Bi	117	40,8	25,0	59,5	32,9
12L14	114	40,1	21,3	47,0	27,2

Quanto à utilização dos aços de corte fácil, destaca-se a produção em massa de peças em tornos automáticos (Figura 2.25a), em especial o torneamento de mergulho (Figura 2.25b,c).

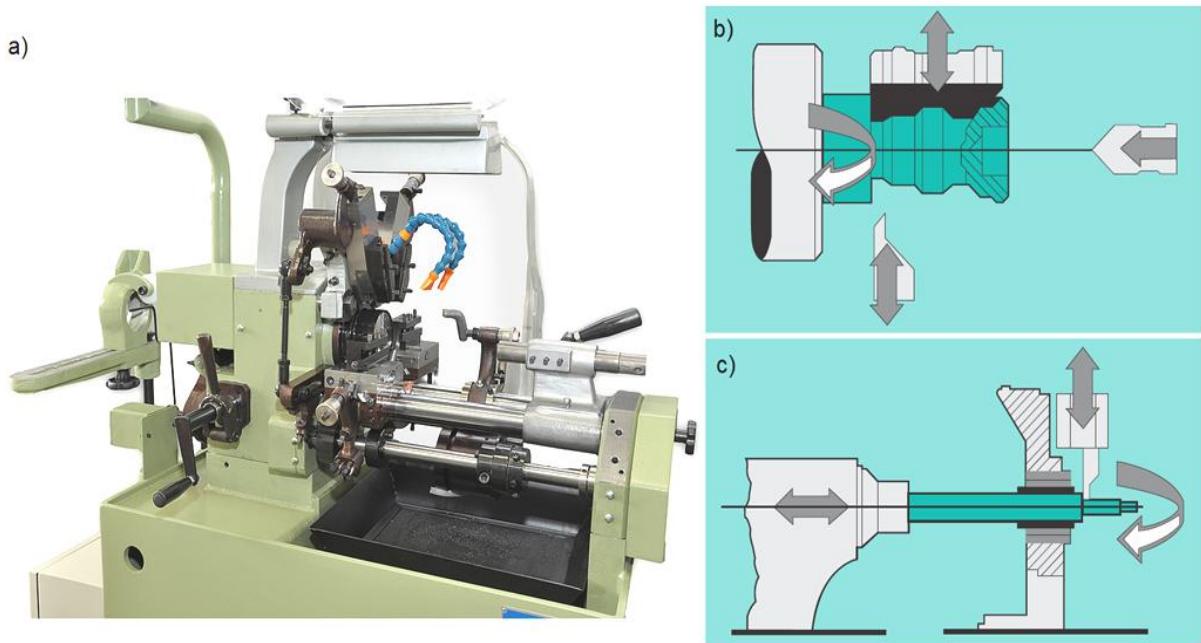


Figura 2.25 – Operações típicas em que são usados os aços de corte fácil: a) torno automático (TRAUTEC, 2014); b) princípio de funcionamento de um torno automático de cabeçote fixo; c) princípio de funcionamento de um torno automático de cabeçote móvel (FERRARI, 2003)

A aplicação dos aços de corte fácil é voltada para fabricação de peças que possuem poucas exigências de resistência mecânica (Figura 2.26), por exemplo, componentes para bombas, componentes de eletrodomésticos, buchas, pistões de pequenos compressores, etc. (PRADO; PIMENTEL, 2004; TROIANI, 2004; EVANGELISTA LUIZ, 2007).



Figura 2.26 – Peças fabricadas com aços de corte fácil (LEADTECH PRECISION, 2009)

Os aços de corte fácil trefilados (ou usinados) com diâmetro entre 4 mm e 50 mm representam quase a totalidade do consumo no Brasil. A prática da trefilação contribui para a usinabilidade dos aços de corte fácil de baixo carbono (os mais usados), pois o encruamento endurece a matriz ferrítica tornado-a menos plástica (mais frágil). Desta forma, obtém-se maior precisão dimensional, bom acabamento superficial e encruamento do metal (TROIANI, 2004).

2.8.1. Influência de sulfetos na usinabilidade dos aços de corte fácil

O principal responsável pelo aumento de usinabilidade dos aços de corte fácil são as inclusões não metálicas de sulfeto de manganês (MnS), obtidas pela introdução de enxofre em quantidades suficientes para combinar-se com o manganês e com o ferro, formando uma série de sulfetos de manganês e de ferro, principalmente o primeiro, insolúveis no aço (CHIAVERINI, 2005). É necessário um teor suficientemente alto ($Mn/S > 4$) para garantir que o enxofre esteja na forma de sulfeto de manganês, uma vez que o sulfeto de ferro fragiliza o aço durante a deformação a quente (APPLE, 1989).

Segundo Aborn (1977), o efeito do enxofre para melhoria da usinabilidade é conhecido há quase um século, uma vez que o enxofre é o mais barato dentre os aditivos de corte fácil. As inclusões de sulfeto de manganês (Figura 2.27) favorecem a usinabilidade porque causam a formação de um cavaco quebradiço e atuam com uma espécie de lubrificante, impedindo que o cavaco seja aderido à ferramenta de corte e destrua sua cunha cortante. Nestas condições, a máquina-ferramenta é menos solicitada, os esforços de corte são reduzidos e o acabamento superficial da peça é melhorado, além da velocidade de usinagem poder ser aumentada, às vezes duplicada, em comparação com o que acontece com aço carbono comum (TROIANI, 2004; CHIAVERINI, 2005).

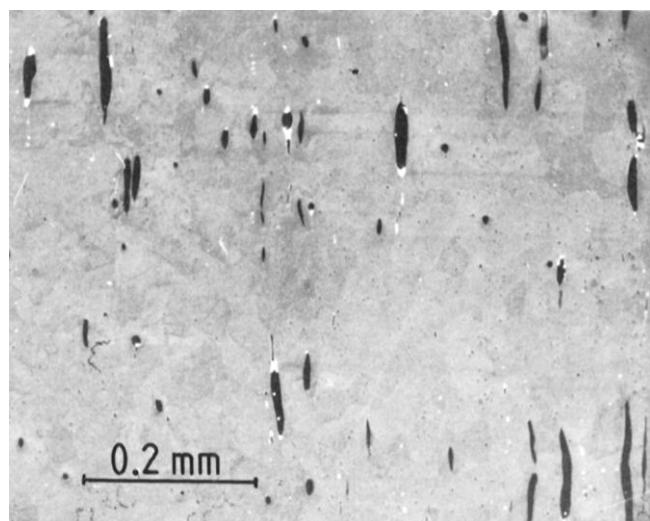


Figura 2.27 – Aço de corte fácil ao chumbo, nota-se as inclusões de sulfeto de manganês (escuras) e as inclusões de chumbo (brancas) (TRENT; WRIGHT, 2000, p.279)

A influência dos sulfetos sobre a usinabilidade é explicada por vários mecanismos de ação (BELLOT, 1978 *apud* EVANGELISTA LUIZ, 2007; TROIANI, 2004):

- O sulfeto apresenta propriedades bem diferentes da matriz do aço, ele tem o efeito de uma descontinuidade no material (vazio). Devido à deformação que o sulfeto

sofre durante a usinagem aparece um efeito de entalhe que aumenta localmente a tensão de cisalhamento aplicada e diminui a tensão de ruptura na zona de formação do cavaco, isto viabiliza a produção seriada em máquinas automáticas.

- Reduz a força de corte, diminuindo a dimensões da aresta postiça de corte e aumentando a faixa de velocidade de corte em que ela ocorre.
- Forma uma camada protetora sobre a superfície de saída da ferramenta, reduzindo a força de atrito entre o cavaco e a ferramenta, agindo como lubrificante, desta forma a aresta da ferramenta de corte tem sua vida prolongada. O decréscimo na força de atrito resulta num ângulo de cisalhamento maior e produz um cavaco mais quebradiço.

Jiang; Cui; Hänninen (1996) explicam que as inclusões de sulfeto de manganês, sendo mais dúcteis que a matriz do aço, são mais deformadas na região primária e secundária de cisalhamento durante a formação do cavaco. Esta diferença de deformabilidade favorece a iniciação de microtrincas entre as inclusões e a matriz que consequentemente conduzem à fratura do cavaco. Assim, à medida que a fração de volume de MnS é aumentada na matriz, a ruptura do cavaco é melhorada.

Segundo Troiani (2004), um aumento do percentual de MnS na composição dos aços de corte fácil melhora de fato a usinabilidade, porém incrementa a fragilidade do aço e sua tendência à formação de trincas, dificultando a prática da laminação.

Nos aços com alto teor de enxofre, um aspecto importante é a forma, o tamanho e a distribuição das partículas de MnS. Aços com inclusões de sulfeto de manganês maiores apresentam índices de usinabilidade superiores em comparação a aços com inclusões mais alongadas e mais finas. A prática de laminação afeta as características dessas inclusões e influencia na usinabilidade (KATO *et al.*, 1981; CHIAVERINI, 2005).

Os sulfetos de manganês são classificados segundo sua morfologia em (APPLE, 1989):

- Sulfetos do tipo I, sulfetos globulares aleatoriamente distribuídos (Figura 2.28a).
- Sulfetos do tipo II, sulfetos finos precipitados na forma de rede (Figura 2.28b).

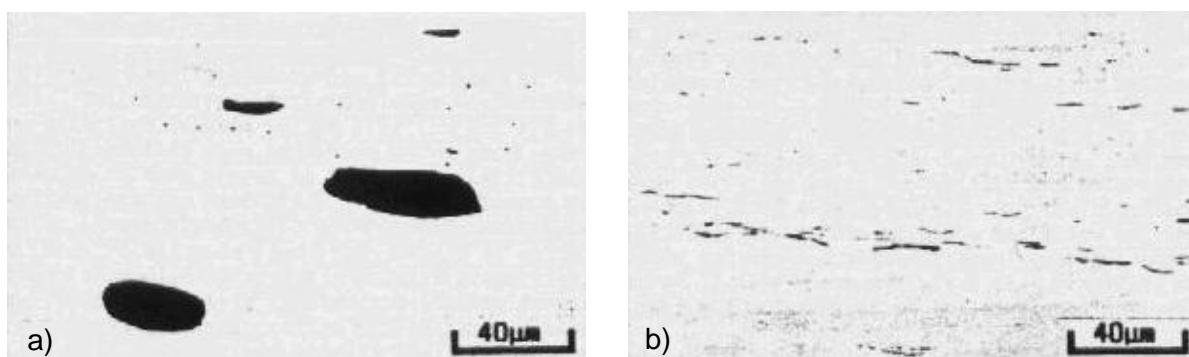


Figura 2.28 – Micrografia de aço de corte fácil ressulfurado: a) sulfeto do tipo I; b) sulfeto do tipo II (APPLE, 1989)

Os sulfetos do tipo I são os mais interessantes para a melhoria de usinabilidade isto porque as inclusões do tipo I normalmente não são acompanhadas por inclusões abrasivas (KATO *et al.*, 1981; APPLE, 1989).

Kato *et al.* (1981) estudaram o efeito da geometria dos sulfetos de manganês sobre a usinabilidade de aços de corte fácil. Os pesquisadores constataram experimentalmente que as inclusões de sulfeto mais eficientes apresentavam a relação comprimento/largura, denominada “fator de forma”, igual ou inferior a cinco, concluindo que as partículas de sulfeto mais arredondadas tendem a conferir uma melhor usinabilidade ao aço (Figura 2.29).

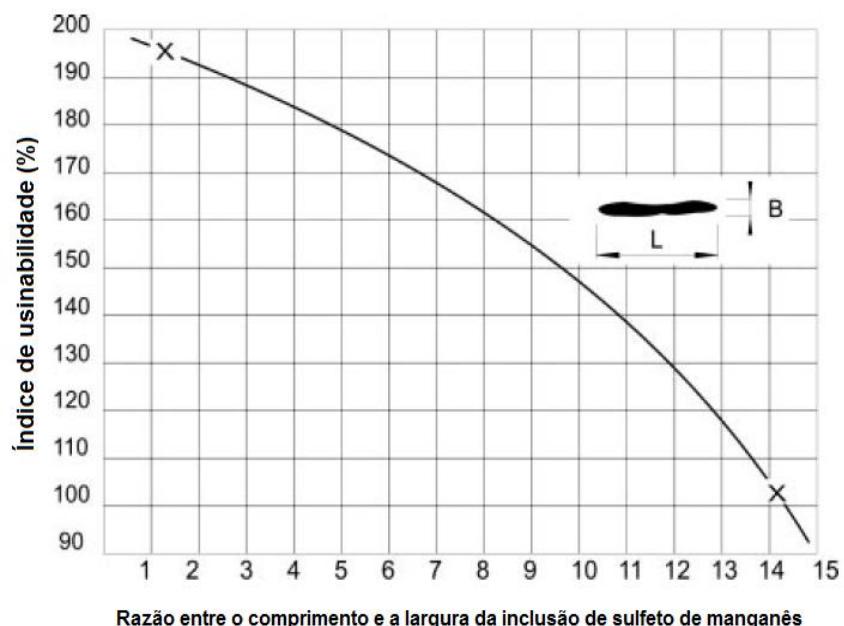


Figura 2.29 – Influência do fator de forma dos sulfetos sobre o índice de usinabilidade (traduzido de LESKOVAR; GRUM, 1986 *apud* EVANGELISTA LUIZ; MACHADO, 2007)

A Figura 2.30 mostra a influência do espaçamento entre os sulfetos de manganês na força de corte. Jiang; Cui; Hänninen (1996) concluíram que menores espaçamentos entre as inclusões (maior fração de inclusões presente na matriz) reduzem a força de corte pelo efeito benéfico das inclusões na dinâmica do processo de usinagem.

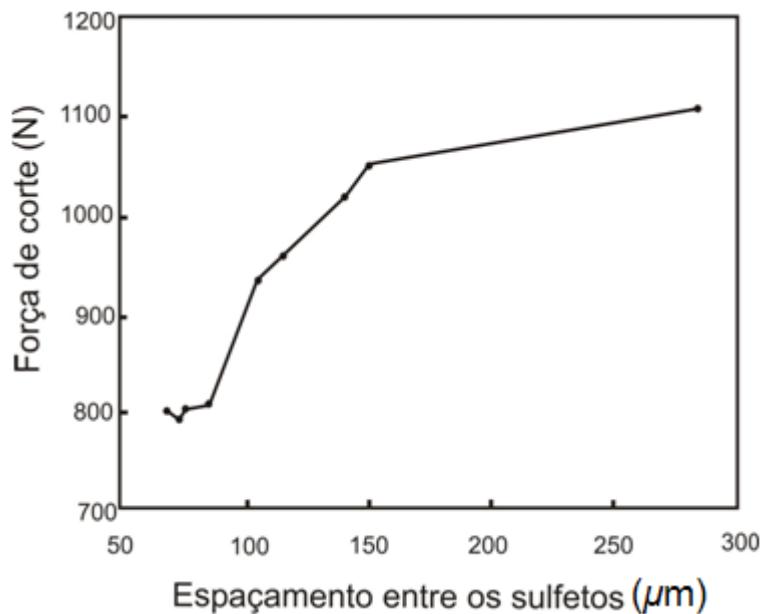


Figura 2.30 – Correlação entre a força de corte e o espaçamento entre os sulfetos (traduzido de JIANG; CUI; HÄNNINEN, 1996)

Foi provado que inclusões de sulfetos de manganês causam uma mudança na faixa de velocidade de corte em que ocorre a aresta postiça de corte, aumentando e transferindo essas velocidades de corte para valores maiores. Este efeito é amplamente relacionado com a habilidade dos sulfetos, especialmente os maiores, em reduzir as temperaturas de usinagem, para uma dada velocidade de corte (YAGUCHI, 1988).

O telúrio e o selênio são elementos químicos que atuam no controle da forma das inclusões de sulfeto de manganês, promovendo uma melhoria na usinabilidade dos aços. Este controle da morfologia dos sulfetos realizado pela adição destes elementos provoca um decréscimo na deformabilidade a quente dos sulfetos de manganês. As inclusões de sulfeto de manganês estariam envelopadas por MnTe ou PbTe (em aços com chumbo), os quais formam eutéticos com o MnS (Figura 2.31). Desta forma, o envelope líquido acomodaria as altas tensões e restringiria a deformação dos MnS. Entretanto, nem todos os sulfetos apresentam um envelope de teluretos (BARRETOS, 1999; AKASAWA *et al.*, 2003; KLUJSZO; SOARES, 2004).

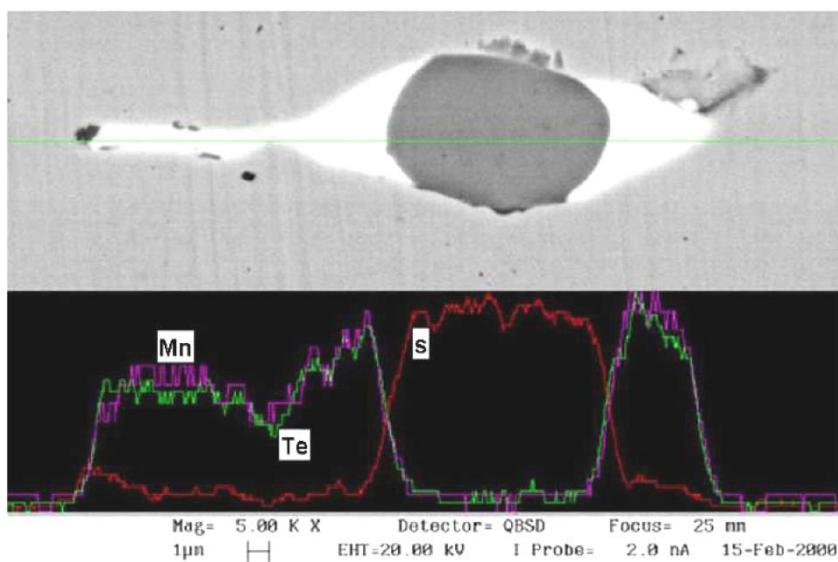


Figura 2.31 – Inclusão de sulfeto de manganês circundada por telureto de manganês (BARRETOES *et al.*, 2000)

O mecanismo de melhoria de usinabilidade proveniente das adições de telúrio no aço de corte fácil é proposto por Yaguchi (1988):

- Aumenta a usinabilidade devido à obtenção de sulfetos mais globulares.
- Reduz o atrito entre a ferramenta e o cavaco, devido aos baixos pontos de fusão dos compostos de telúrio.
- Reduz a resistência ao cisalhamento aparente pelo aumento do número de trincas nucleadas, devido ao líquido fragilizante do telúrio metálico e seus compostos.
- Apresenta superfícies extremamente ativas, formando um filme entre a matriz e a outra face como carbonetos, sulfetos ou teluretos.

Desta forma, o telúrio produz uma redução do atrito entre a ferramenta e o cavaco, diminuindo a força de corte e melhorando o acabamento da superfície usinada, principalmente devido aos baixos pontos de fusão dos compostos formados por ele (ABORN, 1977).

O selênio é um elemento muito utilizado para melhoria da usinabilidade devido as suas propriedades serem similares ao enxofre, destacando-se a tendência de formar selenetos de manganês (MnSe) que possuem propriedades semelhantes ao MnS. Assim como o telúrio, adições de selênio nos aços de corte fácil proporcionam sulfetos mais globulares. Esta globularização dos sulfetos provoca uma melhoria nas propriedades transversais dos aços com enxofre e uma maior isotropia. O selênio também reduz a

resistência ao cisalhamento do material, iniciando a formação de microtrincas, facilitando a fratura do cavaco (ABORN, 1977).

O tratamento ao cálcio é uma forma de controlar as composições, propriedades e morfologia de óxidos presentes no material. O tratamento proporciona uma morfologia mais adequada dos sulfetos que estão na matriz do aço, aumentando a usinabilidade dos aços sem afetar outras propriedades (APPLE, 1989). A Figura 2.32 apresenta o processo de desoxidação por cálcio modificando as inclusões de alumínio em inclusões menos abrasivas.

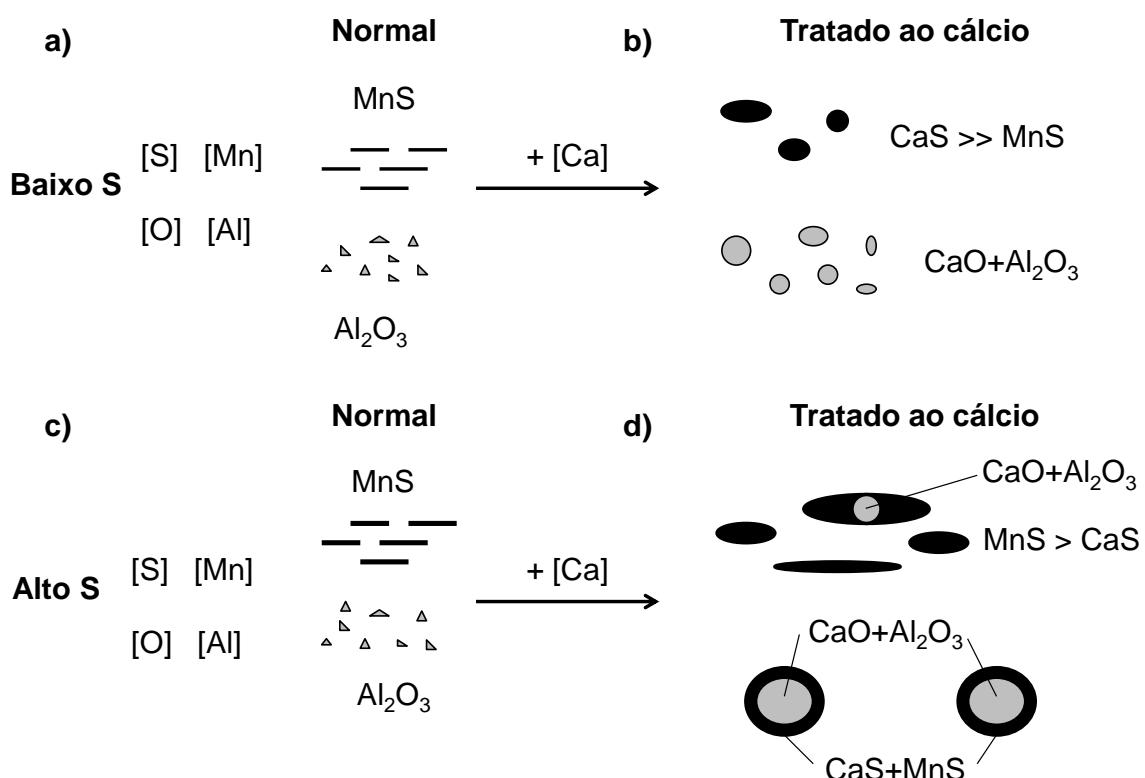


Figura 2.32 – Processo de desoxidação por cálcio modificando as inclusões de alumínio; a) baixo teor de enxofre, desoxidado ao alumínio; b) tratamento ao cálcio das inclusões “a”; c) alto teor de enxofre, desoxidado ao alumínio; d) tratamento ao cálcio das inclusões “c” (adaptado de HOLAPPA; HELLE, 1995)

2.8.2. Influência de inclusões metálicas na usinabilidade dos aços de corte fácil

A adição de chumbo constitui um meio de melhorar a usinabilidade dos aços carbono. A maioria dos aços de corte fácil podem ser encontrados com adição de chumbo, em teores variáveis de 0,15 % a 0,35 %. No processo de fabricação do aço, o chumbo é adicionado no aço líquido durante seu vazamento nos moldes; como esse metal é insolúvel no aço fundido, forma-se uma fina dispersão de partículas de chumbo. Esses aços devem, entretanto, ser empregados em condições em que não se desenvolvem temperaturas elevadas, pois o chumbo funde a 327 °C, de modo que, acima dessa temperatura, ocorre queda da resistência à tração e do limite de fadiga do aço (CHIAVERINI, 2005).

As inclusões de chumbo podem ser observadas associadas ao MnS ou de forma isolada (Figura 2.33).

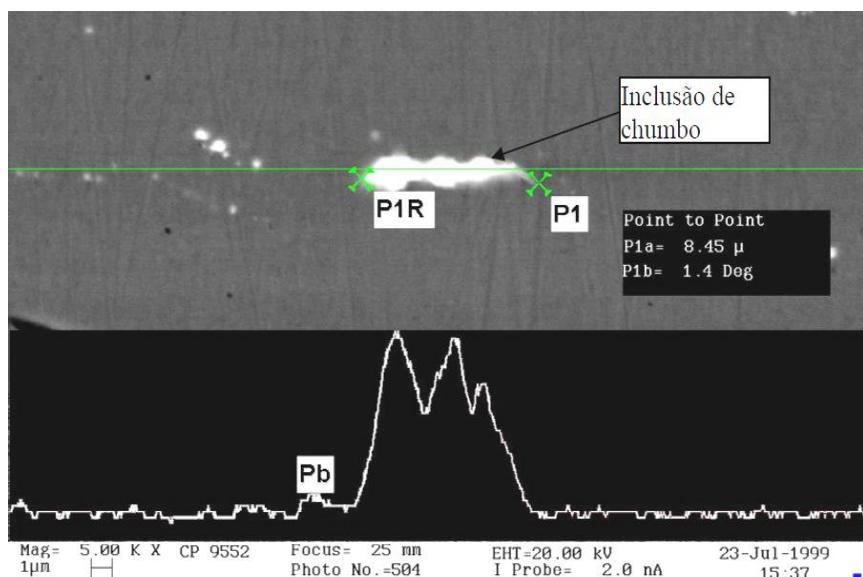


Figura 2.33 – Microanálise de uma inclusão de chumbo (BARRETOES *et al.*, 1999)

Nos aços contendo chumbo em sua composição, tem-se o efeito lubrificante, porque o chumbo é aquecido a uma temperatura além de seu ponto de fusão durante a usinagem. Desta forma, o chumbo age reduzindo o atrito entre a ferramenta e o cavaco. Há também o efeito da fragilização por metal líquido, devido às altas temperaturas alcançadas na usinagem, a área deformada na zona de cisalhamento primária torna-se frágil, reduzindo a tensão de cisalhamento e o cavaco torna-se mais suscetível às trincas (YAGUCHI, 1988).

Somekawa; Kaiso; Matsushima (2001) verificaram que o chumbo não é efetivo em diminuir o desgaste da ferramenta em altas velocidades de corte. Eles sugerem que isto se deve ao fato de que em altas velocidades as temperaturas alcançadas durante a usinagem são extremamente altas, e o comprimento de contato entre a ferramenta e o cavaco é

reduzido. Nestas condições o chumbo assumirá a função de agente corrosivo da ferramenta a base de carbonetos (especialmente carboneto de tungstênio), prejudicando a usinagem.

O chumbo tem sido usado tradicionalmente nos aços ressulfurados, como no caso das famílias SAE 12LXX e DIN 9SMnPb28/36. Entretanto, devido à elevada toxicidade do chumbo, quando inalado pelos vapores gerados na fabricação e usinagem desses aços, alguns países estabelecem restrições quanto à fabricação e utilização dos aços ao chumbo, além de severas leis ambientais e de saúde humana (BARRETOS *et al.*, 1999; HASHIMURA *et al.*, 2003).

Hashimura; Mizuno; Miyanishi (2007) propuseram um aço de corte fácil de baixo carbono sem chumbo, que apresentou ótimo desempenho em usinagem, tanto quanto os aços de corte fácil ao chumbo. O mecanismo de melhoria de usinabilidade do aço proposto provém da morfologia dos sulfetos de manganês. Essas inclusões se apresentam mais finas e homogeneamente dispersas na matriz, chamadas de “sulfetos micro-dispersos”. O aço desenvolvido segundo esta tecnologia apresentou melhores desempenhos em termos de redução da APC (Figura 2.34), vida da ferramenta e rugosidade da superfície usinada (Figura 2.35) que os aços de corte fácil tradicionais.

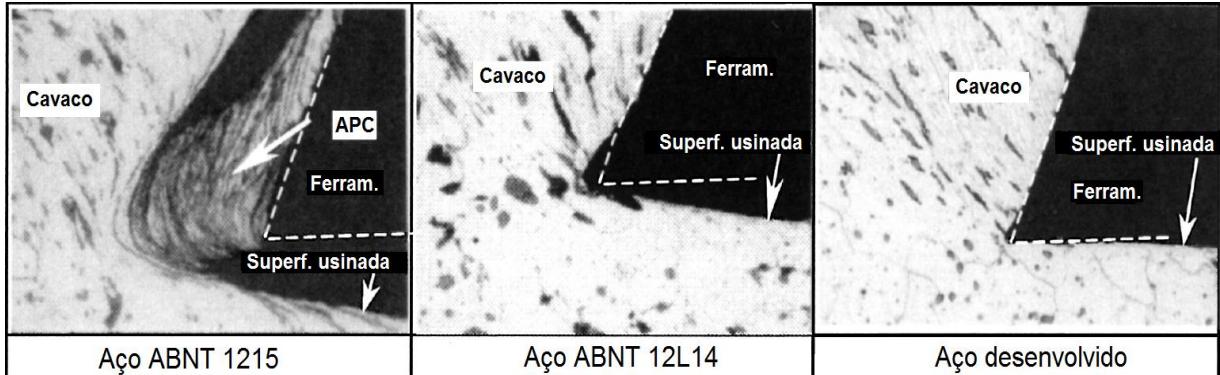


Figura 2.34 – Seção transversal da zona de corte evidenciando a formação do cavaco para os aços testados (traduzido de HASHIMURA; MIZUNO; MIYANISHI, 2007)

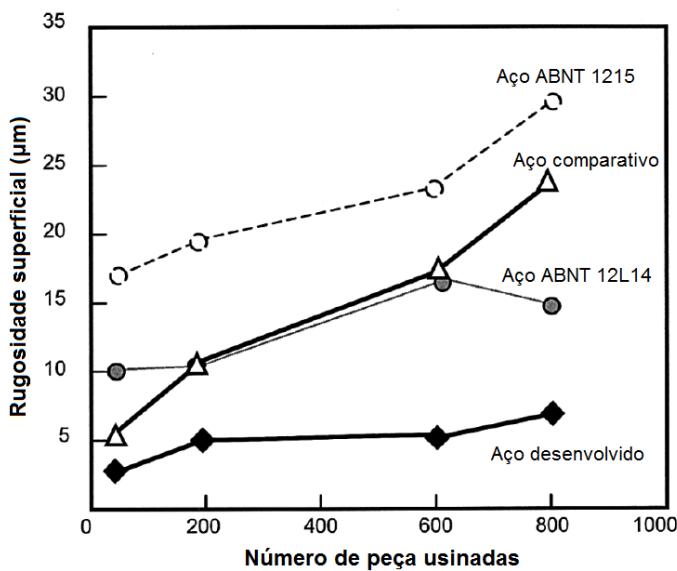


Figura 2.35 – Rugosidade da superfície usinada em função do número de peças usinadas para os aços testados (traduzido de HASHIMURA; MIZUNO; MIYANISHI, 2007)

O bismuto pode substituir o chumbo na composição química dos aços de corte fácil. O chumbo e o bismuto são elementos com características físico-químicas muito semelhantes (Tabela 2.7) e formam inclusões metálicas no aço, as quais possuem mecanismo de atuação na usinagem parecido com as inclusões de sulfeto de manganês. A diferença do chumbo e bismuto para o enxofre é que aqueles estão no aço sob a forma de pequenas inclusões metálicas (faixa de 5 μm ou menos) disseminadas na matriz, não se combinando com nenhum outro elemento (KLUJSZO; SOARES, 2004).

Tabela 2.7 – Propriedades físicas do chumbo e do bismuto (BARRETOES *et al.*, 1999)

Elemento químico	Densidade (g/cm ³)	Ponto de fusão (°C)	Ponto de ebulação (°C)	Pressão de vapor a 1600 °C (atm)
Pb	11,36	327	1725	0,44
Bi	9,80	271	1560	-
Eutético Pb/Bi	-	125	-	-

Assim como o chumbo, o bismuto pode estar livre na matriz do aço ou associado aos sulfetos de manganês (Figura 2.36). Uma das vantagens do bismuto é que o chumbo é um elemento bastante tóxico, enquanto que não existem evidências que atribuam tal característica deletéria ao bismuto, não é cancerígeno e não é considerado perigoso para a saúde do homem (SOMEKAWA; KAISO; MATSUSHIMA, 2001; KLUJSZO; SOARES, 2004).

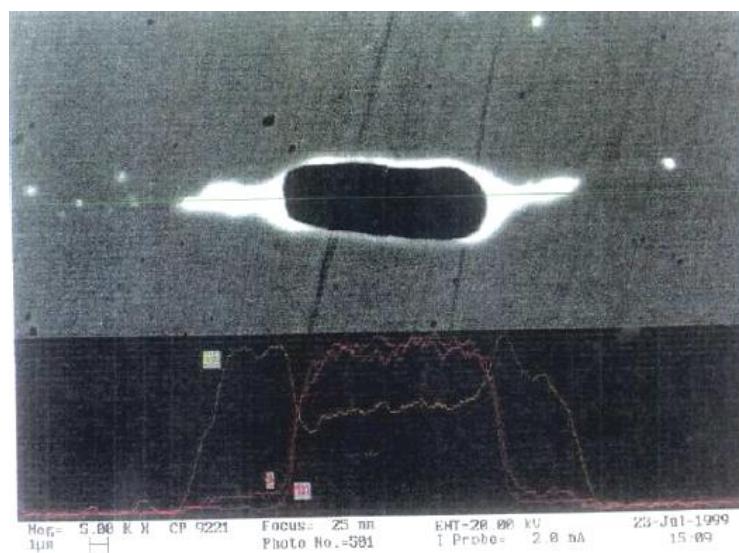


Figura 2.36 – Microanálise de uma inclusão de MnS envelopada por uma capa de bismuto (BARRETOES *et al.*, 1999)

Devido ao fato das partículas de bismuto serem de tamanho reduzido e estarem bem dispersas na matriz do aço, sua influência sobre a anisotropia é bem menor daquela exercida pelos sulfetos. Com isto, o bismuto não diminui de maneira significante as propriedades transversais do material (SOMEKAWA; KAIKO; MATSUSHIMA, 2001).

O efeito destes elementos formadores de inclusões metálicas (Pb e Bi) na usinabilidade dos aços está amplamente discutido no meio científico. Segundo Yaguchi (1988), as teorias defendidas são:

- As inclusões metálicas de Pb e Bi têm um efeito lubrificante entre o cavaco e a aresta de corte da ferramenta, onde as partículas atuam como lubrificantes na interface.
- As inclusões metálicas de Pb e Bi quando líquidas fragilizam o aço, reduzindo a resistência ao cisalhamento aparente, ocorrendo a formação de microtrincas a partir do metal líquido fragilizante.
- As propriedades mecânicas diferentes entre as inclusões metálicas de Pb e Bi em contraste com a matriz do aço promovem um efeito de concentração de tensões. Este argumento sugere um efeito semelhante à formação de vazios na interface, reduzindo a resistência aparente ao cisalhamento (efeito de entalhe) do MnS que está envelopado pelas inclusões metálicas. Adicionalmente, sugere-se que as inclusões metálicas que estão em pequenas adições acomodariam as deformações, reduzindo a energia necessária para obter a deformação total.

Yaguchi (1988) investigou o efeito da adição de bismuto e chumbo na formação da aresta postiça de corte. Para comparação, foi utilizado aço de corte fácil ressulfurado ABNT 1215. Conforme a Figura 2.37, conclui-se que o tamanho da aresta postiça é reduzido com o acréscimo do percentual de chumbo e bismuto, sendo o bismuto mais eficaz para esta redução. Este fenômeno foi observado mais claramente em testes de usinagem a baixas velocidades de corte (inferiores a 30 m/min).

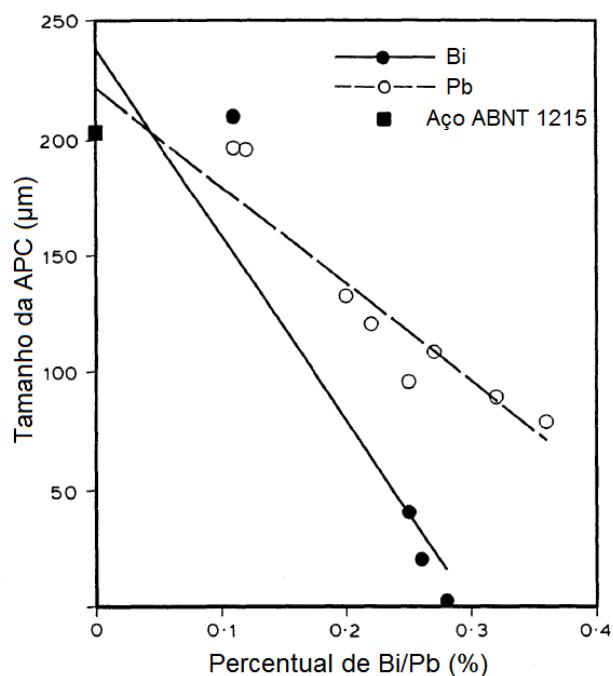


Figura 2.37 – Efeito do percentual de chumbo e bismuto no tamanho da aresta postiça de corte para velocidade de corte de até 30 m/min (traduzido de YAGUCHI, 1988)

Yaguchi (1989) investigou o efeito das adições de bismuto e chumbo na usinabilidade de aços de corte fácil em comparação ao aço de corte fácil ressulfurado ABNT 1215 em termos de força de usinagem (Figura 2.38) e de temperatura de usinagem (Figura 2.39). As inclusões metálicas se mostraram benéficas para redução da força e temperatura de usinagem.

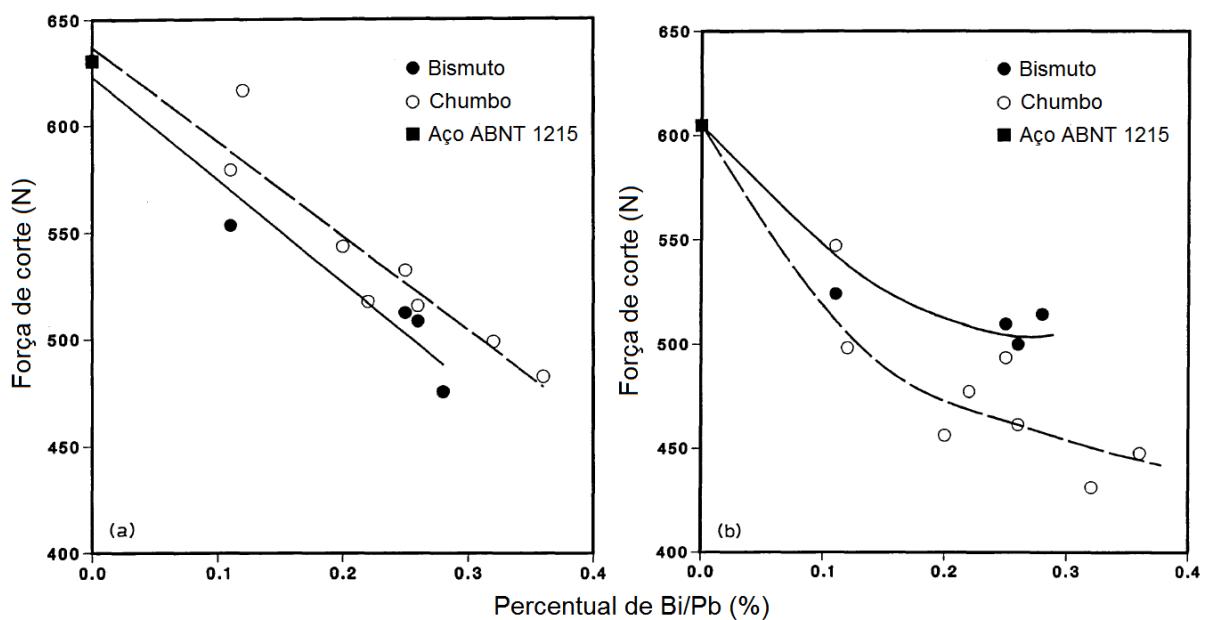


Figura 2.38 – Efeito do chumbo e bismuto na força de usinagem: a) para velocidades de corte de 60 m/min a 150 m/min; b) para baixas velocidades de corte (abaixo de 30 m/min) (traduzido de YAGUCHI, 1989)

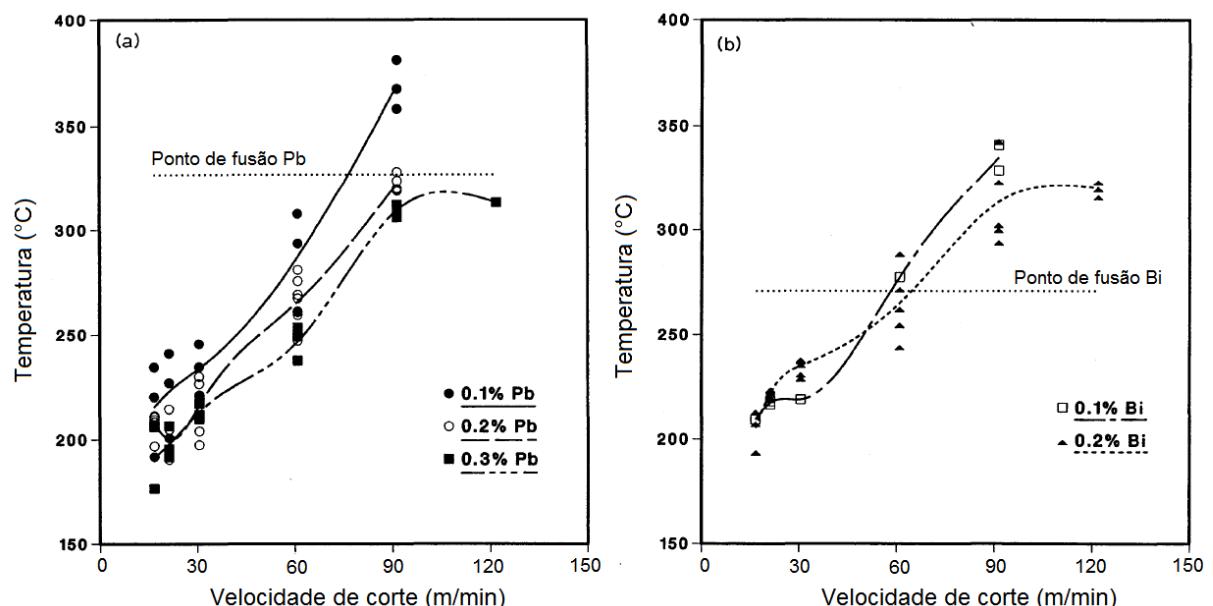


Figura 2.39 – Efeito dos percentuais de elementos químicos na temperatura de usinagem: a) chumbo; b) bismuto (traduzido de YAGUCHI, 1989)

Os efeitos dos aditivos de chumbo e bismuto sobre os vários aspectos da usinabilidade diferem dependendo das velocidades de corte dos testes. Para velocidades de corte acima de 60 m/min, os efeitos dos aditivos estão em conformidade com o conhecimento geral, ou seja, há melhoria da usinabilidade com o aumento dos teores de

chumbo ou bismuto, sendo o bismuto mais eficaz. Por outro lado, a velocidades de corte mais baixas, inferiores a 30 m/min, alguns resultados diferem daqueles, por exemplo, o chumbo pode ser mais eficaz do que a mesma quantidade de bismuto adicionado ao aço (YAGUCHI, 1989).

Amorim *et al.* (2003) também verificaram a influência benéfica do bismuto em aços de corte fácil. Os pesquisadores utilizaram um aço ressulfurado com adições de bismuto (aço ABNT “12Bi14”) e um aço ressulfurado sem adições de bismuto (aço ABNT 1214). A usinabilidade dos materiais foi avaliada para o processo de torneamento cilíndrico externo, em ensaios de usinagem de longa duração. O critério de fim de vida da ferramenta de corte foi um desgaste de flanco máximo de 0,3 mm.

A Figura 2.40 apresenta as equações de Taylor obtidas para o torneamento com ferramenta de metal duro. Observa-se que o aço ABNT “12Bi14” apresenta um melhor comportamento em usinagem para a maior parte da faixa de velocidades ensaiadas, isto é, na maioria dos casos a ferramenta apresenta maior vida quando usina o aço com adição de bismuto. Para velocidades próximas a 350 m/min o comportamento dos dois aços é similar (AMORIM *et al.*, 2003).

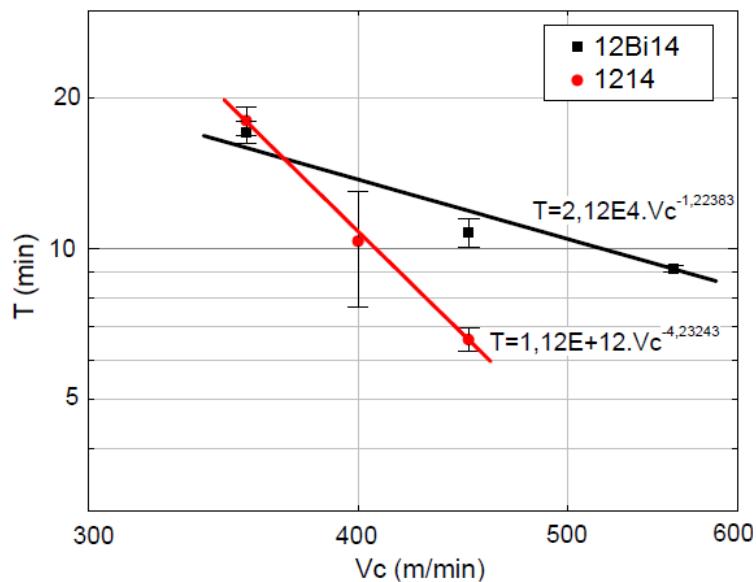


Figura 2.40 – Curvas de Taylor para os ensaios realizados com ferramenta de corte de metal duro na usinagem dos aços ABNT “12Bi14” e ABNT 1214 (adaptado de AMORIM *et al.*, 2003)

A fim de verificar a possibilidade de deposição de uma camada protetora na superfície da ferramenta, os pesquisadores realizaram análises de EDS nas superfícies de folga e saída dos insertos de metal duro. Foi detectado em todas as ferramentas de corte

traços de enxofre e manganês (além de ferro), porém não foi encontrado resíduo de bismuto (AMORIM *et al.*, 2003).

2.8.3. Outros elementos químicos dos aços de corte fácil

O boro é utilizado nos aços de corte fácil em que o nível de oxigênio ativo no aço líquido é alto (com objetivo de controlar o tipo de sulfeto formado). Desta forma o boro se combina preferencialmente com o oxigênio formando o óxido de boro (B_2O_3). Este é um óxido de baixo ponto de fusão ($450\text{ }^{\circ}\text{C}$) e a partir dos $210\text{ }^{\circ}\text{C}$ se encontra no estado viscoso. Assim, apresenta-se como lubrificante e protetor da ferramenta durante a usinagem (KLUJSO; SOARES, 2004).

A Figura 2.41 evidencia a influência do boro na usinabilidade dos aços de corte fácil de médio carbono. Os índices de usinabilidade para as velocidades de corte de 15 m/min, 20 m/min e 60 m/min foram obtidos através de torneamento com ferramenta de corte de aço rápido, segundo norma ISO 3685, com critério de fim de vida da ferramenta sendo a destruição da aresta de corte (KLUJSZO; SOARES, 2005).

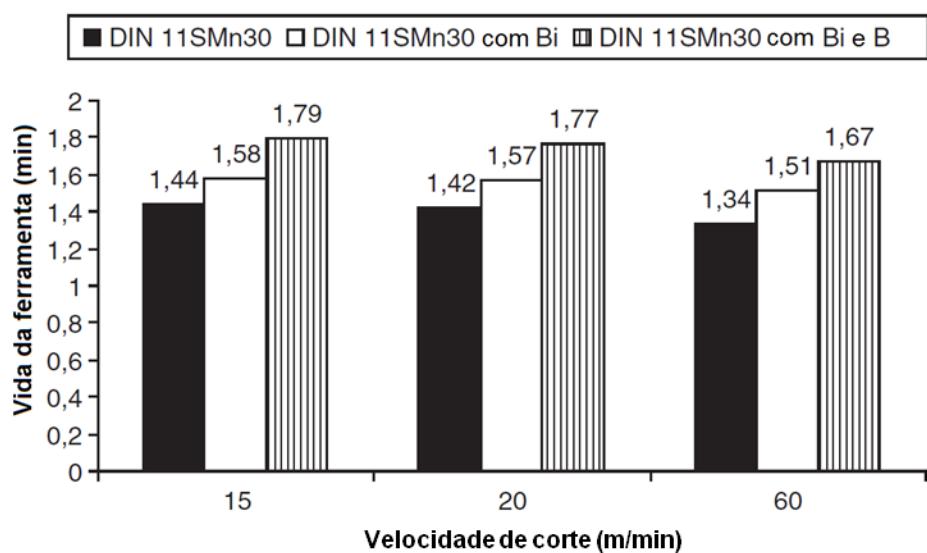


Figura 2.41 – Índices de usinabilidade para aços de corte fácil em operação de torneamento com ferramenta de corte de aço rápido (adaptado de KLUJSZO; SOARES, 2005)

Os resultados da Figura 2.41 evidenciam o efeito positivo das adições de bismuto e boro na usinabilidade. Nestes ensaios o mecanismo de desgaste predominante foi o mecanismo de abrasão. Os aditivos de corte fácil atuam na prevenção deste tipo de desgaste. Ressalta-se que o aço de corte fácil sem aditivos de bismuto e boro (somente

com enxofre e manganês) já apresenta um desempenho superior durante a usinagem (KLUJSZO; SOARES, 2005).

O fósforo é um elemento utilizado nos aços de corte fácil que provoca a fragilização do material. Essa fragilização, benéfica para a usinagem, produz cavacos quebradiços durante o corte (KLUJSZO; SOARES, 2004).

Tanaka *et al.* (2007) desenvolveram um aço de corte fácil com aditivos de nitreto de boro hexagonal (BN-h). Este material foi usinado e comparado ao aço carbono ABNT 1045. Os critérios de avaliação da usinabilidade foram: temperatura de usinagem, força de usinagem e vida da ferramenta de corte. Os resultados obtidos no torneamento cilíndrico externo com ferramentas de metal duro mostraram que a vida da ferramenta foi aumentada em até 50 % em relação à usinagem do aço carbono ABNT 1045 (Figura 2.42).

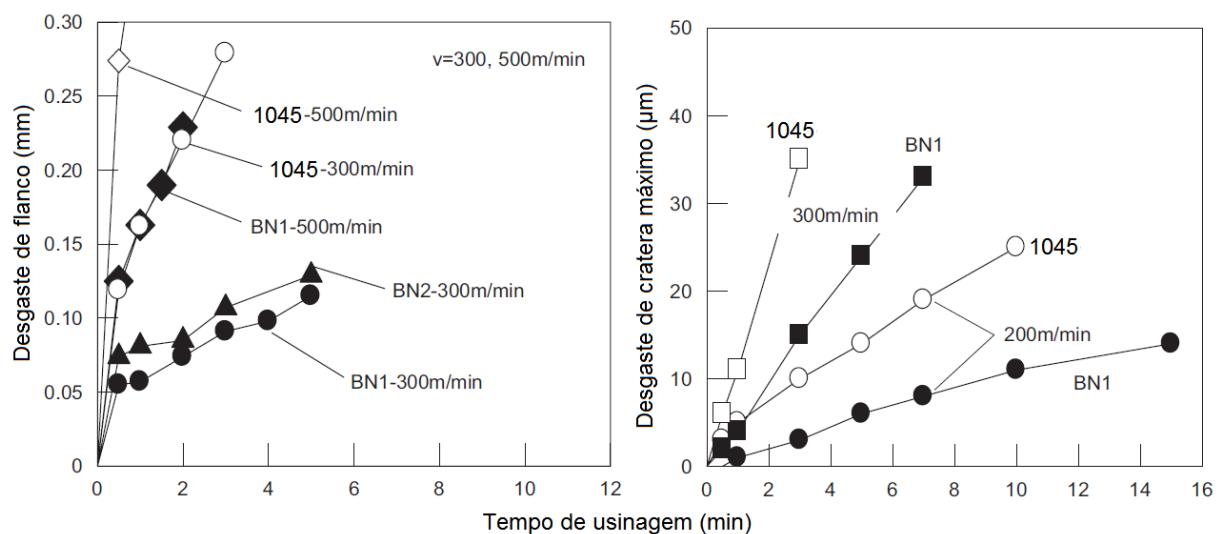


Figura 2.42 – Vida da ferramenta de corte na usinagem do aço ABNT 1045 e aços de corte fácil com aditivos de boro e nitrogênio (“BN1” e “BN2” representam diferentes percentuais de B e N) com $a_p = 0,5$ mm e $f = 0,10$ mm/volta: a) desgaste de flanco da ferramenta de metal duro P20; b) desgaste de cratera de metal duro P30 (traduzido de TANAKA *et al.*, 2007)

As componentes da força de usinagem (Figura 2.43) e a temperatura de usinagem (Figura 2.44) medida pelo método do termopar ferramenta-peça, foram ligeiramente menores na usinagem dos aços de corte fácil (“BN1”), demonstrando o efeito benéfico das adições de nitrogênio e boro para melhoria da usinabilidade do material.

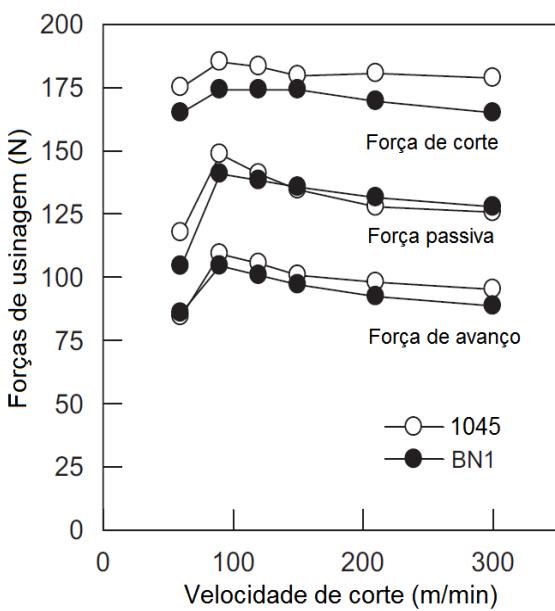


Figura 2.43 – Componentes da força de usinagem para torneamento do aço ABNT 1045 e do aço de corte fácil com aditivos de boro e nitrogênio (“BN1”). Condições de corte: $V_c = 90$ m/min - 300 m/min, $a_p = 0,5$ mm e $f = 0,10$ mm/volta (traduzido de TANAKA *et al.*, 2007)

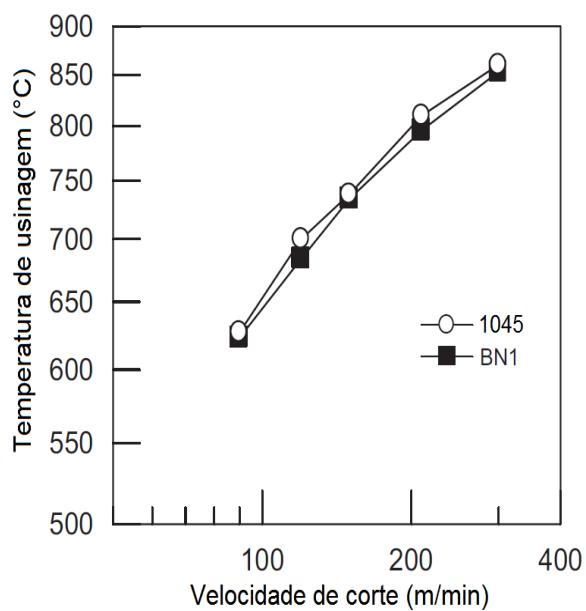


Figura 2.44 – Temperatura de usinagem para torneamento do aço ABNT 1045 e do aço de corte fácil com adições de nitrogênio e boro (“BN1”). Condições de corte: $V_c = 90$ m/min - 300 m/min, $a_p = 0,5$ mm e $f = 0,10$ mm/volta (traduzido de TANAKA *et al.*, 2007)

Com objetivo de reduzir custos de fabricação, muitos aços de corte fácil são fabricados a partir de sucatas, sem o controle dos elementos químicos. Esse procedimento implica na presença de elementos químicos residuais na composição final do material, tais

como cobre, níquel, cromo, molibdênio, etc. Estes elementos residuais, isoladamente, afetam pouco as propriedades mecânicas da liga. Entretanto, como a maioria desses elementos aumenta a endurecibilidade dos aços, seu efeito adicionado pode ter consequências indesejáveis, principalmente quando a ductilidade é fator crítico.

Mills (1980) avaliou o efeito de elementos residuais na usinabilidade de aços de corte fácil ao chumbo. A Figura 2.45 mostra a velocidade de corte V_{c240} (velocidade para vida útil de 240 minutos) e a dureza da matriz de ferrita em função do percentual total de elementos residuais. Fica evidente que o desgaste da ferramenta de corte é influenciado negativamente pelos elementos residuais: fósforo, cromo, níquel, molibdênio, cobre, além do excesso de manganês. O aumento na dureza da ferrita é causado pelo endurecimento por solução sólida, influenciando as propriedades mecânicas do material da peça durante a formação do cavaco.

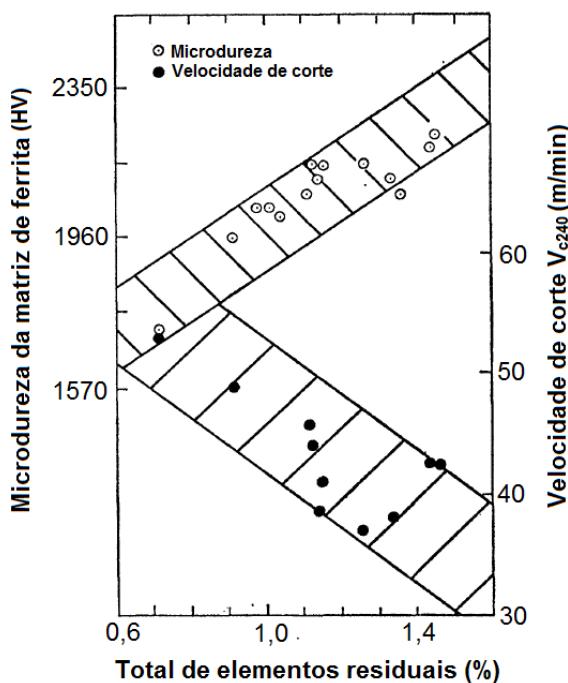


Figura 2.45 – Efeito do percentual total de elementos químicos residuais na microdureza da matriz ferrítica e na vida da ferramenta de corte (traduzido de MILLS, 1980)

Almeida (2005), Evangelista Luiz (2007) e Sousa *et al.* (2012) estudaram o efeito dos elementos químicos cromo, níquel e cobre na usinabilidade do aço de corte fácil ABNT 12L14. Os autores concluíram que os elementos residuais possuem influência negativa na usinabilidade do aço ABNT 12L14, isolados e/ou através de interações. Entretanto, a presença de cobre na composição química pode contribuir para o aumento da usinabilidade, atuando como um elemento causador de fragilidade a quente (ALMEIDA, 2005).

CAPÍTULO III

METODOLOGIA

Com objetivo de avaliar a usinabilidade do aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14, o procedimento experimental foi dividido em duas etapas: caracterização do material e ensaios de usinagem. Também foi usinado o aço de corte fácil resulfurado ABNT 1214 para comparação dos resultados. O trabalho experimental foi realizado no Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem (LEPU) da Faculdade de Engenharia Mecânica (FEMEC) na Universidade Federal de Uberlândia (UFU).

A Figura 3.1 apresenta um mapa geral dos ensaios de caracterização e de usinagem realizados nesta dissertação, os quais serão expostos com mais detalhes na sequência.

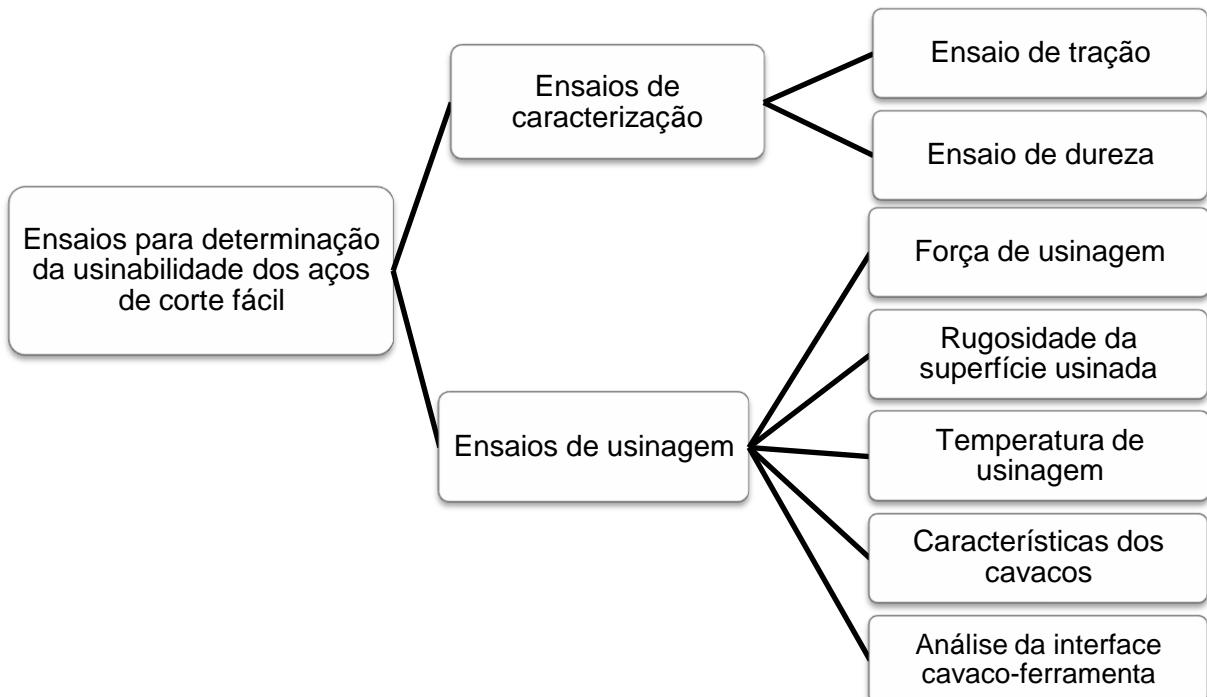


Figura 3.1 – Ensaios de caracterização e de usinagem realizados nesta dissertação

3.1. Materiais utilizados

Os materiais utilizados foram o aço de corte fácil ressulfurado (aço ABNT 1214) e o aço de corte fácil ao chumbo (aço ABNT 12L14), fornecidos pela Aços Villares S.A. na forma de barras de seção circular com diâmetro de 76,2 mm e comprimento de 3,0 m. A Tabela 3.1 mostra a composição química dos materiais estudados nesta dissertação.

Tabela 3.1 – Composição química dos materiais (realizada pela Aços Villares S.A.)

Mat.	Composição química (% peso)											
	%C	%Si	%Mn	%P	%S	%Cr	%Ni	%Cu	%Mo	%Al	%Pb	%Sn
I	0,10	0,02	1,12	0,071	0,315	0,15	0,11	0,17	0,02	0,002	0,005	0,013
II	0,08	0,02	1,21	0,053	0,295	0,11	0,05	0,17	0,01	0,003	0,256	0,011

Para facilitar as referências aos materiais estudados no decorrer do texto, convencionou-se nesta dissertação, a nomenclatura do aço de corte fácil ressulfurado (aço ABNT 1214) como “material I” e do aço de corte fácil ao chumbo (aço ABNT 12L14) como “material II”.

3.2. Ensaios de caracterização

3.2.1. Ensaios de dureza

Para medição de dureza foi utilizado o método Brinell, através de durômetro universal *Wolpert*[®] com carga máxima de 250,0 kg. O penetrador utilizado foi esfera de aço de 2,5 mm de diâmetro e a carga utilizada nos ensaios foi de 187,5 kg, segundo Norma DIN 50134. A dureza dos materiais foi determinada na superfície transversal dos corpos de prova.

O diâmetro dos corpos de prova utilizados foi 75,0 mm. Foram feitas doze endentações em cada material (Figura 3.2):

- Quatro endentações dispostas a 10 mm de distância da borda lateral do corpo de prova (Perfil 1), separadas entre si por ângulo de 90°.
- Quatro endentações dispostas a 20 mm de distância da borda lateral do corpo de prova (Perfil 2), separadas entre si por ângulo de 90°.
- Quatro endentações dispostas a 30 mm de distância da borda lateral do corpo de prova (Perfil 3), separadas entre si por ângulo de 90°.

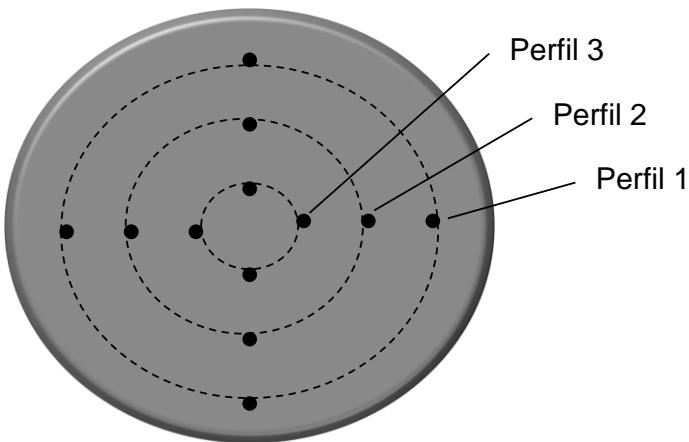


Figura 3.2 – Representação transversal da amostra utilizada nos ensaios de dureza e os perfis de endentação

Cada endentação formou uma impressão circular na superfície do material. As diagonais das impressões foram medidas para cálculo da dureza Brinell dos materiais, segundo Norma DIN 50134.

3.2.2. Ensaios de tração

Os ensaios de tração foram realizados com máquina universal de ensaios *MTS Systems Corporation*[®] 810 com capacidade de 250 kN, conforme Norma ABNT NBR ISO 6152 (ABNT, 2002b). Foram tracionados três corpos de prova para cada material estudado, extraídos do núcleo das barras (Figura 3.3), cujas dimensões estão listadas na Tabela 3.2.

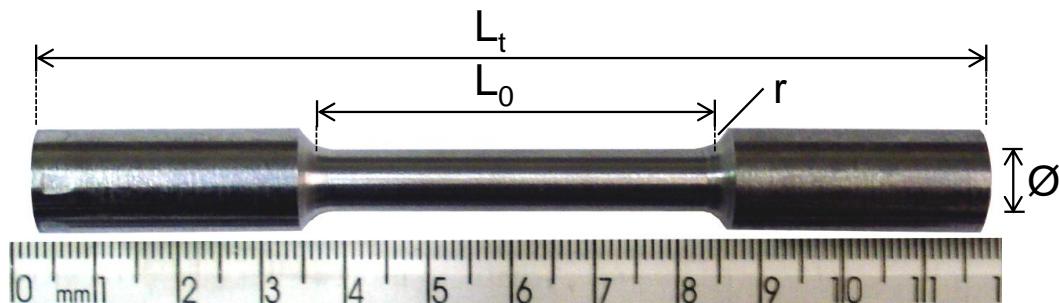


Figura 3.3 – Corpo de prova para ensaio de tração

Tabela 3.2 – Dimensões dos corpos de prova para ensaios de tração (em mm)

Diâmetro “Ø”	Comprimento de medida “L ₀ ”	Comprimento total “L _t ”	Raio de concordância “r”
6,0	43,4	111,2	3,0

3.3. Ensaios de usinagem

3.3.1. Ensaios de força de usinagem

As componentes da força de usinagem foram obtidas através de dinamômetro piezelétrico *Kistler*[®] modelo 9265-B. Durante a usinagem, o sinal de saída do dinamômetro é enviado para um amplificador de sinais *Kistler*[®] modelo 5070A que reenvia o sinal, já amplificado, para placa de aquisição *National Instrument*[®] modelo *USB-6221*, transferindo o resultado da medição em tempo real para um computador através de programa em linguagem *LabVIEW*.

A Figura 3.4 mostra a montagem experimental utilizada para medição da força de usinagem com dinamômetro piezelétrico.

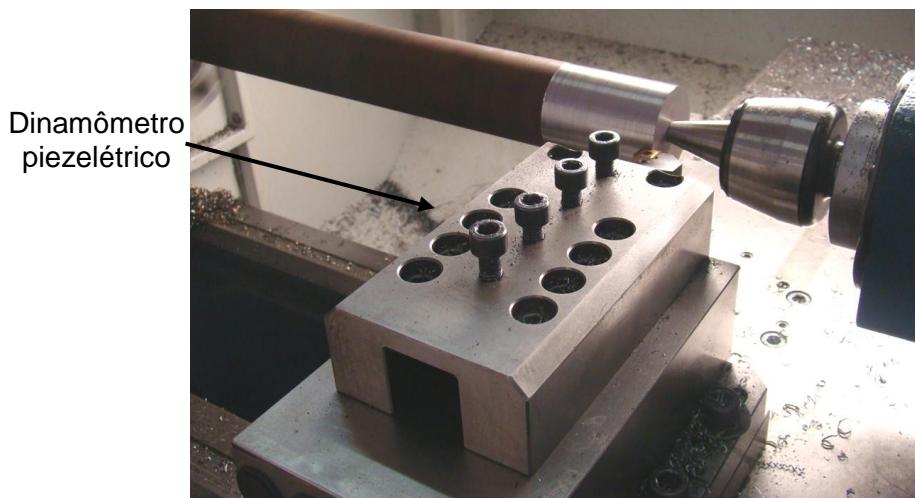


Figura 3.4 – Montagem experimental utilizada para medição da força de usinagem com dinamômetro piezelétrico

Os ensaios de força de usinagem foram realizados em torno *Romi*[®] CNC *Multiplic 35D* com rotação máxima de 3000 rpm, potência de 15 kW e comando numérico *GE*[®] *FANUC Series 21i-T* (Figura 3.5).



Figura 3.5 – Torno Romi® CNC Multiplic 35D utilizado nos ensaios de força de usinagem

As ferramentas utilizadas foram insertos de metal duro cuja especificação está descrita na Tabela 3.3. As faixas dos parâmetros de corte recomendadas pelo fabricante para a usinagem de aços são: $V_c = 125$ m/min a 155 m/min, $f = 0,10$ mm/volta a $0,24$ mm/volta e $a_p = 0,5$ mm a $4,0$ mm. Cada ensaio foi realizado com uma nova aresta de corte da ferramenta. Todos os ensaios foram realizados sem fluido de corte.

Tabela 3.3 – Especificações da ferramenta de corte e suporte utilizados nos ensaios de força de usinagem (dados do fabricante)

Especificação	SNMG 12 04 04-MF
Fabricante	Sandvik Coromant®
Ângulo de saída (γ_o)	6°
Ângulo de posição (χ_i)	75°
Ângulo de inclinação (λ_s)	6°
Ângulo de ponta (ε_r)	90°
Ângulo de folga (α_o)	5°
Revestimento	Nitreto de titânio (TiN)
Raio de ponta (r_e)	0,4 mm
Classe ISO	M
Suporte	DSBNR 2525M 12

O tempo de aquisição do sinal de força de usinagem foi de 5 segundos e a taxa de aquisição foi de 6 mil pontos/segundo, contabilizando 30 mil pontos totais. A força de usinagem foi medida três vezes para cada condição de corte.

Inicialmente foram realizados testes variando apenas a velocidade de corte. Os parâmetros de corte para esses testes estão listados na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 – Condições de corte para medição da força de usinagem para testes variando apenas a velocidade de corte

Ensaio	V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	Variável de resposta
1	5	0,15	2,0	Força de usinagem, Rugosidade da superfície, Características do cavaco (forma, tipo, coloração, grau de recalque)
2	8			
3	11			
4	14			
5	18			
6	22			
7	28			
8	35			
9	44			
10	55			
11	70			
12	85			
13	100			
14	120			
15	150			
16	185			
17	250			

Além dos testes de força de usinagem variando apenas a velocidade de corte, foram realizados testes utilizando um planejamento de experimentos fatorial 2^3 . As variáveis de entrada foram os parâmetros de usinagem velocidade de corte (V_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p). Os valores dos níveis das variáveis de entrada foram baseados em trabalhos da literatura (EVANGELISTA LUIZ, 2007).

A matriz de planejamento destes experimentos, com as respostas analisadas, é mostrada na Tabela 3.5.

Tabela 3.5 – Planejamento de experimentos fatorial 2^3 para ensaios de força de usinagem

Ensaio	V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	Variável de resposta
1	250	0,20	2,0	Força de corte (F_c), Rugosidade da superfície usinada (R_a)
2	250	0,20	1,0	
3	250	0,10	2,0	
4	250	0,10	1,0	
5	50	0,20	2,0	
6	50	0,20	1,0	
7	50	0,10	2,0	
8	50	0,10	1,0	

O objetivo do planejamento de experimentos foi analisar a influência da variação dos parâmetros de usinagem nas variáveis de resposta, além de obter uma análise estatística sobre o processo de usinagem dos aços de corte fácil utilizados, em termos de força de corte, a principal parcela responsável pela força de usinagem, e rugosidade da superfície usinada (R_a).

3.3.2. Ensaios de temperatura de usinagem

Nos ensaios de temperatura de usinagem foi utilizado torno eletrônico universal *Diplomat*[®] modelo *Revolution RV-220* com rotação máxima de 2500 rpm e potência de 8 kW (Figura 3.6).



Figura 3.6 – Torno eletrônico universal *Diplomat*[®] modelo *Revolution RV-220* utilizado nos ensaios de temperatura de usinagem

A medição de temperatura de usinagem foi realizada com o método do termopar ferramenta-peça. Os ensaios de temperatura e a calibração do termopar ferramenta-peça foram realizados com ferramentas de metal duro classe P, na forma de barra, cuja geometria é apresentada na Tabela 3.6.

Tabela 3.6 – Geometria das ferramentas de metal duro utilizadas nos ensaios de temperatura de usinagem e na calibração do termopar ferramenta-peça

Classe ISO	P
Ângulo de saída (γ_0)	0°
Ângulo de posição (χ_r)	75°
Ângulo de inclinação (λ_s)	0°
Ângulo de ponta (ε_r)	90°
Ângulo de folga (α_0)	5°
Raio de ponta (r_e)	-
Dimensões (mm)	100 x 10 x 10

O equipamento para medição de temperatura em usinagem consistiu de uma unidade de aquisição, comutação e registro de dados *Agilent Technologies*® modelo 34970A comandado por computador através do programa *Agilent BenchLink Data Logger*. Este sistema foi utilizado para adquirir os sinais dos termopares-padrão e de força eletromotriz gerada pelo termopar ferramenta-peça, na calibração do método e na execução dos experimentos de usinagem.

Nesta dissertação foi utilizada a calibração do termopar ferramenta-peça através do aquecimento gerado por chama de maçarico a gás oxi-acetileno, de acordo com Kaminise (2012). A montagem experimental utilizada na calibração do termopar ferramenta-peça é apresentada na Figura 3.7.

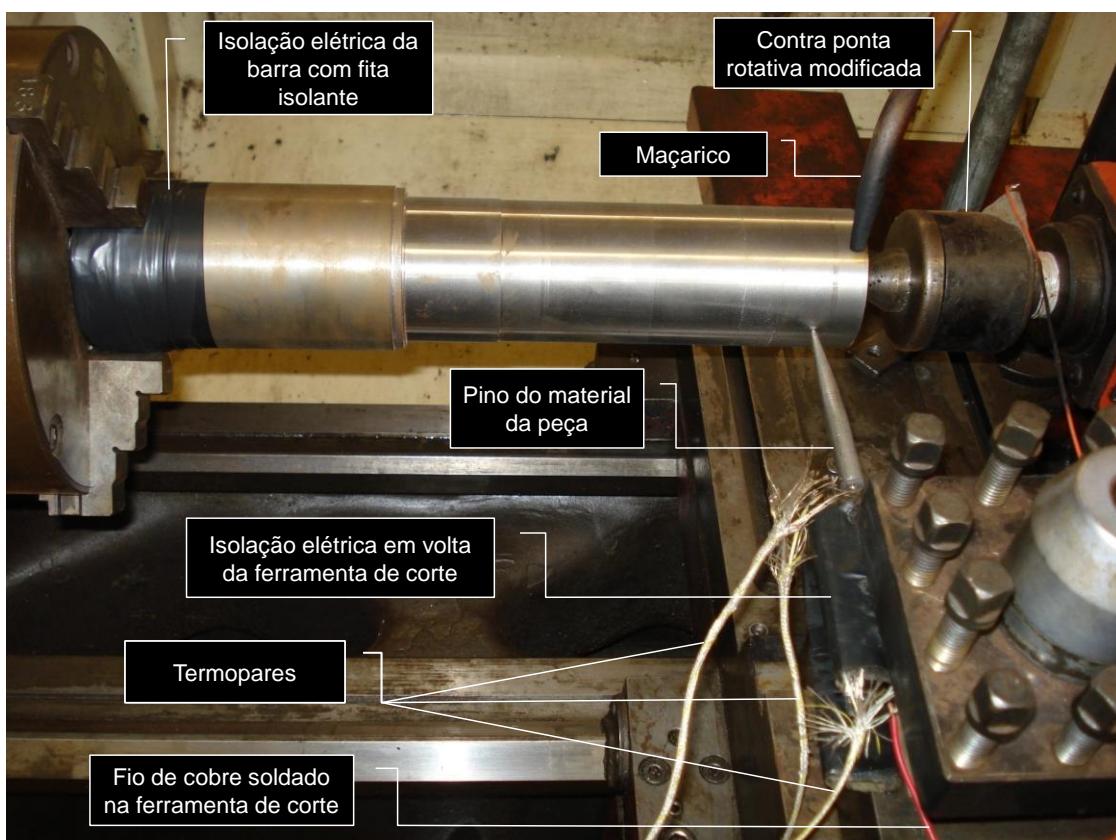


Figura 3.7 – Montagem experimental da calibração do sistema termopar ferramenta-peça

Um pino metálico do material da peça foi utilizado como elemento de aquecimento (Figura 3.8). A função deste elemento de aquecimento é receber diretamente o calor (chama do maçarico) e conduzi-lo até a junta formada pelo contato entre pino metálico e ferramenta. Foi produzido um pino para cada material estudado.

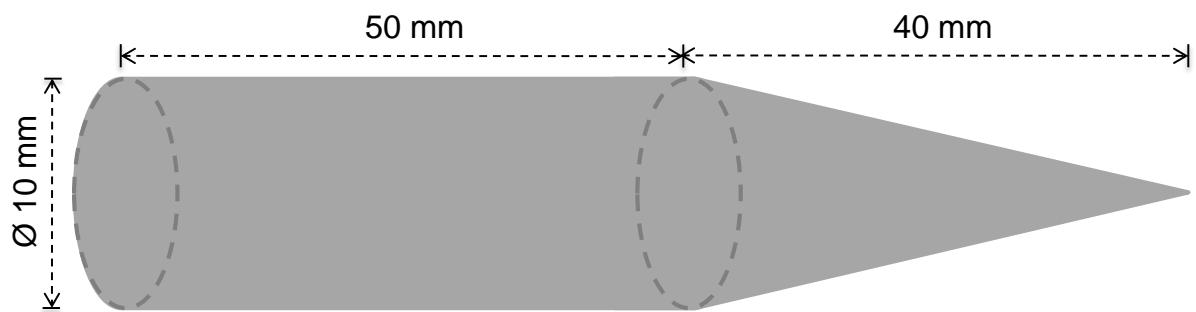


Figura 3.8 – Geometria de pino metálico (elemento de aquecimento) utilizado na calibração do termopar ferramenta-peça

O contato estabelecido entre o pino metálico e a ferramenta de corte durante a calibração do termopar ferramenta-peça está ilustrado na Figura 3.9. A ferramenta de corte foi posicionada perpendicularmente à superfície transversal oposta à ponta do pino, sendo levemente encostada através do sistema de avanço transversal do torno.

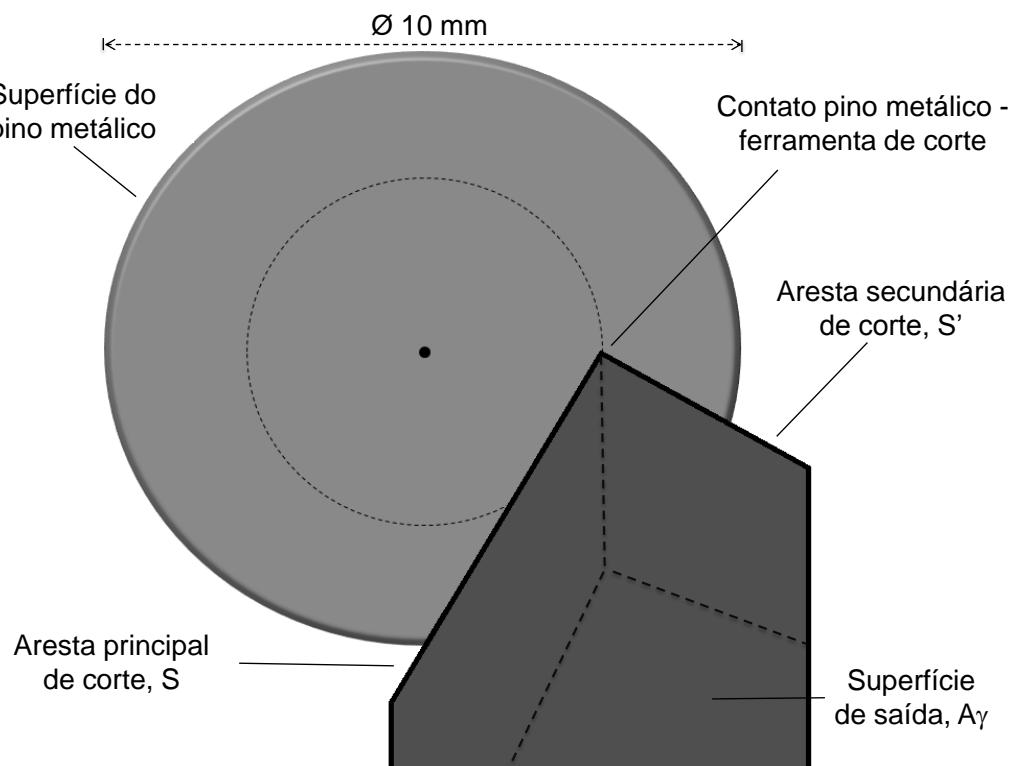


Figura 3.9 – Contato entre o pino metálico (elemento de aquecimento) e a ferramenta de corte durante a calibração do termopar ferramenta-peça

A ferramenta de corte foi posicionada de forma simétrica ao centro da superfície transversal oposta à ponta do pino metálico. Esta metodologia leva em consideração a formação de isoterma concêntricas naquela superfície.

Durante a calibração, o aumento de temperatura induzido na junta pino metálico-ferramenta através da chama do maçarico é medido através de termopares do tipo K. Estes termopares foram soldados sobre a cunha cortante da ferramenta, na superfície principal de folga e na superfície de saída, visando obter os valores de temperatura gerados na ponta da ferramenta. Também foi soldado um termopar na face oposta à cunha da ferramenta, para controle da temperatura desta região (Figura 3.10). A inserção dos termopares foi realizada através de soldagem por descarga capacitiva.

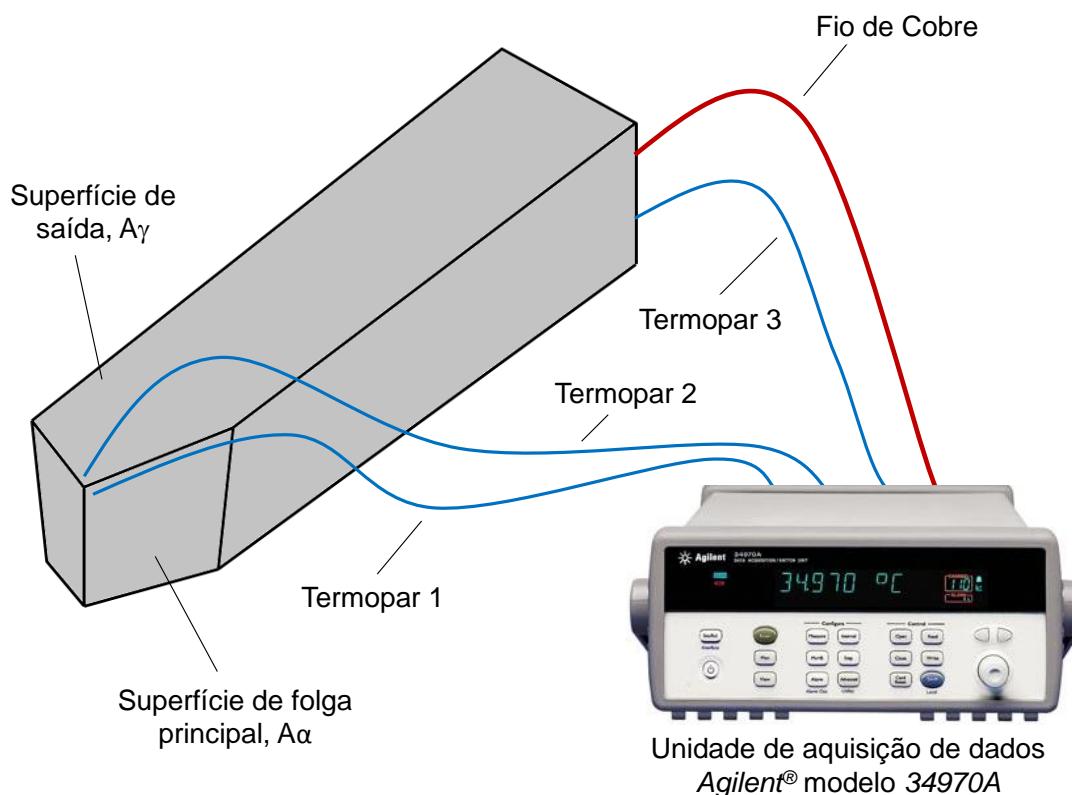


Figura 3.10 – Inserção de termopares do tipo K e fio de cobre para calibração do termopar ferramenta-peça

A força eletromotriz originada pela variação de temperatura imposta pela calibração foi medida através do sistema de aquisição de sinais utilizando um fio de cobre (bitola de 2 mm) soldado por descarga capacitiva na face oposta à cunha cortante (Figura 3.10). De posse dos valores de temperatura da junta pino metálico-ferramenta e da força eletromotriz gerada, essas variáveis são correlacionadas, obtendo-se a curva de calibração do termopar ferramenta-peça.

A isolação elétrica foi realizada utilizando folhas de lixa e fita isolante, entre a peça e a placa do torno. Da mesma forma, a ferramenta de corte foi isolada do carro porta-ferramenta. A eficiência da isolação foi examinada por meio de testes de continuidade elétrica utilizando multímetro digital.

As condições de cortes utilizadas nos ensaios de temperatura estão apresentadas na Tabela 3.7, o objetivo foi analisar o comportamento da temperatura em função da velocidade de corte. Não foi utilizado fluido de corte.

Tabela 3.7 – Condições de corte utilizados nos testes de medição de temperatura

Ensaio	V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)
1	10		
2	20		
3	30		
4	40		
5	50		
6	60		
7	70		
8	80	0,15	2,0
9	90		
10	100		
11	120		
12	140		
13	160		
14	180		
15	200		

A usinagem do corpo de prova foi mantida até a estabilização da força eletromotriz originada pelo termopar ferramenta-peça, desta forma, o tempo de duração dos ensaios de temperatura foi variável. Ademais, a execução dos experimentos mostrou que, em todos os ensaios de temperatura, o tempo de duração total foi inferior a 20 s após início do corte.

Nos ensaios de temperatura de usinagem não foi utilizada a metodologia de planejamento de experimentos. Isso ocorreu devido à menor influência do avanço e da profundidade de corte na temperatura de usinagem de aços de corte fácil, conforme informa a literatura (NAVES, *et al.*, 2006; EVANGELISTA LUIZ, 2007; MACHADO *et al.*, 2011).

3.3.3. Ensaios de rugosidade da superfície usinada

A rugosidade da superfície usinada foi medida perpendicularmente às marcas de avanço utilizando rugosímetro *Surtronic 3+* da *Taylor Hobson*® com resolução de 0,01 μm (Figura 3.11). O comprimento de amostragem e comprimento de avaliação foram, respectivamente, 2,5 mm e 12,5 mm, segundo Norma ABNT NBR ISO 4288 (2008).

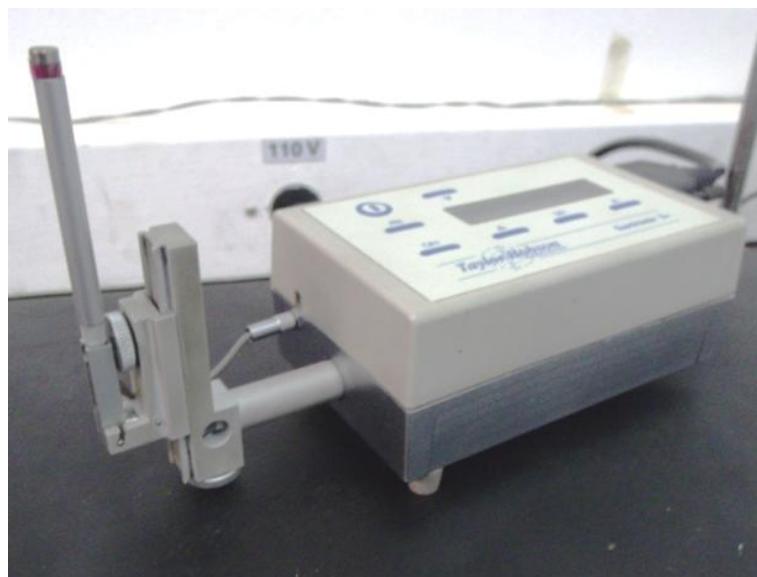


Figura 3.11 – Rugosímetro *Surtronic 3+* da *Taylor Hobson*® com resolução de 0,01 μm

As superfícies usinadas utilizadas na medição de rugosidade foram provenientes dos testes de força de usinagem, as condições de corte estão descritas na Tabela 3.4 e na Tabela 3.5. Foram efetuadas três medições de rugosidade (afastadas aproximadamente em 120° entre si), totalizando nove medições para cada condição de teste.

Os parâmetros analisados foram R_a (desvio aritmético médio do perfil avaliado), R_q (desvio médio quadrático do perfil avaliado), R_z (altura máxima do perfil avaliado) e R_t (altura total do perfil avaliado), de acordo com Norma ABNT NBR ISO 4287 (2002).

3.3.4. Características dos cavacos

A caracterização dos cavacos consistiu do registro da forma, tipo e coloração dos cavacos através de fotografia e do cálculo do grau de recalque através de medição da espessura do cavaco.

Os cavacos utilizados nesta etapa foram provenientes dos testes de medição da temperatura de usinagem. Desta forma, o equipamento experimental foi o mesmo utilizado nos ensaios de temperatura, cujas condições de corte estão descritas na Tabela 3.7.

Por fim, foi realizado um planejamento de experimentos para estudo da forma e grau de recalque dos cavacos (Tabela 3.8).

Tabela 3.8 – Planejamento de experimentos para forma e grau de recalque dos cavacos

V_c (m/min)	f (mm/volta)	a_p (mm)	Variável de resposta
140	0,05		
	0,10	1,0	Forma e grau de recalque dos cavacos
	0,15	2,0	
	0,20	3,0	
	0,25		

Para classificação da forma, tipo e coloração dos cavacos, foi utilizado máquina fotográfica digital Sony® modelo *Cyber-shot* com 7,2 megapixels e régua de aço com faixa nominal de 200 mm e resolução de 1 mm.

Para medição da espessura dos cavacos, foi utilizado paquímetro digital Zaas® com faixa nominal de 150 mm e resolução de 0,01 mm. Foram efetuadas cinco medições diferentes para cavacos de cada condição avaliada. O cálculo do grau de recalque foi realizado através da Equação 3.1:

$$R_c = \frac{h'}{f \cdot \operatorname{sen} \chi_r} \quad (3.1)$$

Onde h' representa a espessura do cavaco medida, f representa o avanço e χ_r representa o ângulo de posição principal.

3.3.5. Análise da interface cavaco-ferramenta

A superfície de saída das ferramentas foi analisada com objetivo de avaliar a deposição de uma camada protetora sobre esta superfície, como sugerido por diversos autores (YAGUCHI, 1988; TRENT; WRIGHT, 2000; TROANI, 2004; BELLOT, 1978 *apud* EVANGELISTA LUIZ, 2007).

As análises foram realizadas através de microscópio eletrônico de varredura (MEV) modelo *TM-3000* e EDS modelo *SwiftED-3000*, ambos da *Hitachi High-Technologies Corporation*® (Figura 3.12).



Figura 3.12 – Microscópio eletrônico de varredura *TM-3000* e EDS *SwiftED-3000*, ambos da *Hitachi High-Technologies Corporation*®

As ferramentas de corte analisadas nesta etapa foram os insertos de metal duro utilizados nos ensaios de força de usinagem. Desta forma, as condições de corte submetidas estão descritas na Tabela 3.4 e Tabela 3.5. Todas as arestas de corte utilizadas nos ensaios de força de usinagem foram analisadas no MEV e no EDS.

A superfície inferior do cavaco também foi analisada utilizando estéreo microscópio *Olympus*® modelo *SZ61* (Figura 3.13). O software de análise de imagens foi o *Image-Pro® Express*. O aumento utilizado nas análises foi de 25 vezes.

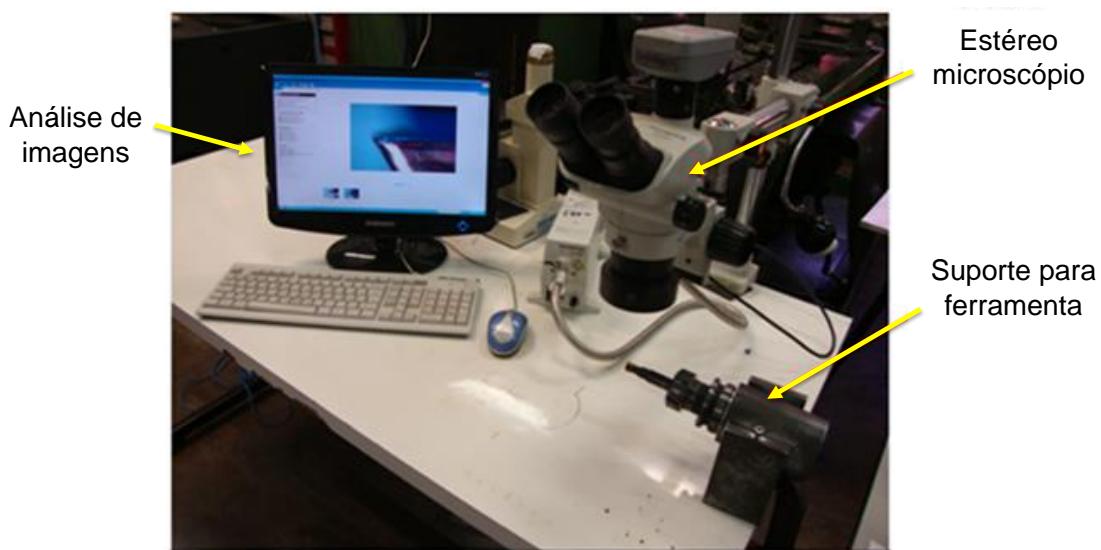


Figura 3.13 – Estéreo microscópio *Olympus*® modelo *SZ61* com software de análise de imagens *Image-Pro*®

Os cavacos utilizados nesta análise foram colhidos nos ensaios de força de usinagem. As condições de corte submetidas estão descritas na Tabela 3.4. O objetivo desta análise foi detectar escamas na superfície inferior do cavaco, resultantes da formação não uniforme da APC. Assim, escamas na superfície inferior do cavaco apontam a presença de aresta postiça durante a usinagem (DA SILVA, 1998; TRENT; WRIGHT, 2000).

CAPÍTULO IV

RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Ensaios de caracterização dos materiais

Nesta seção serão apresentados e discutidos os resultados dos ensaios de dureza e ensaios de tração dos materiais utilizados.

4.1.1. Ensaios de tração

A Figura 4.1 apresenta os diagramas de tensão-deformação para ensaios de tração dos materiais. Os resultados mostram que as resistências dos materiais são muito próximas e o material I, que não contém chumbo, tem maior deformação total.

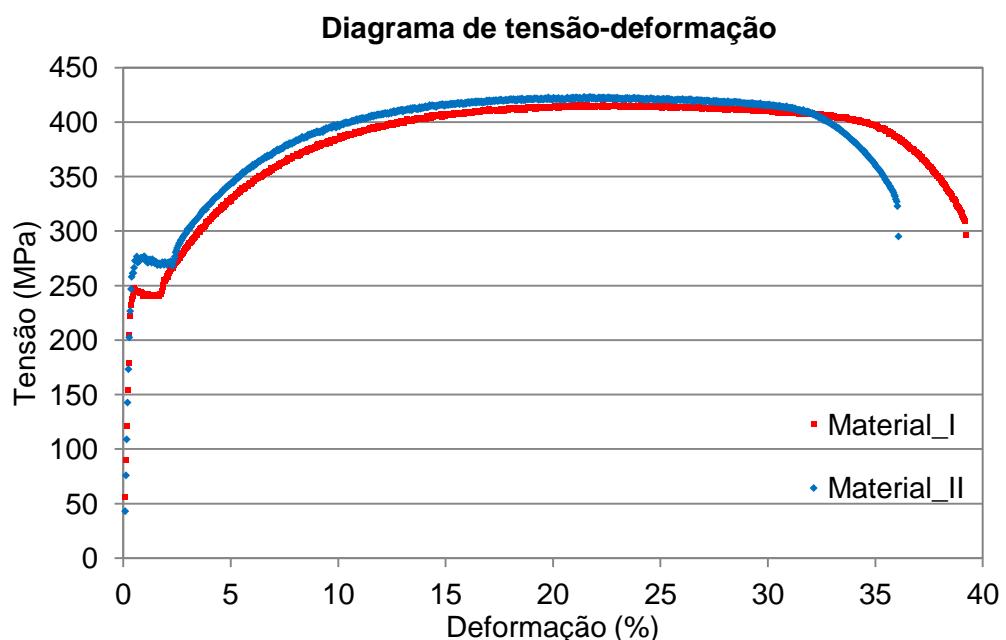


Figura 4.1 – Diagrama de tensão-deformação para material I e material II

A Tabela 4.1 apresenta as propriedades mecânicas dos dois materiais resultantes dos ensaios de tração. A estrição foi avaliada após os ensaios através de medição da seção fraturada dos corpos de prova.

Tabela 4.1 – Resultados dos ensaios de tração para o material I e material II

Propriedades mecânicas	Material I		Material II	
	Média	Desvio-padrão	Média	Desvio-padrão
Tensão máxima (MPa)	413,8	3,5	420,3	4,0
Deformação na tensão máxima (%)	38,2	1,4	33,1	4,2
Tensão de ruptura (MPa)	301,4	6,7	293,8	1,8
Tensão de escoamento (MPa)	244,0	5,3	276,4	0,6
Módulo de elasticidade (GPa)	75,6	3,3	74,2	3,5
Estricção (%)	55,7	1,8	53,9	2,0

Os dois materiais apresentaram um comportamento dúctil, observado pelos valores de deformação na tensão máxima (acima de 30 %) e estrição (acima de 50 %). Entretanto, o material II apresentou ductilidade ligeiramente inferior ao material I. Para os dois materiais a tensão máxima em torno de 420 MPa os caracterizou como materiais de baixa resistência mecânica.

4.1.2. *Ensaio de dureza*

A Tabela 4.2 mostra os valores de dureza Brinell dos materiais. Os dois materiais apresentaram durezas similares, com o material II apresentando dureza ligeiramente superior.

Tabela 4.2 – Valores médios da dureza Brinell dos materiais estudados

Amostra	Dureza (HB 2,5/187,5/30)	Desvio Padrão (HB)
Material I	114,7	3,1
Material II	119,0	1,8

4.2. Ensaios de força de usinagem

4.2.1. Componentes da força de usinagem

A Figura 4.2 mostra o comportamento das componentes da força de usinagem: força de corte (F_c), força de avanço (F_f) e a força passiva (F_p), quando se varia a velocidade de corte, para o material I.

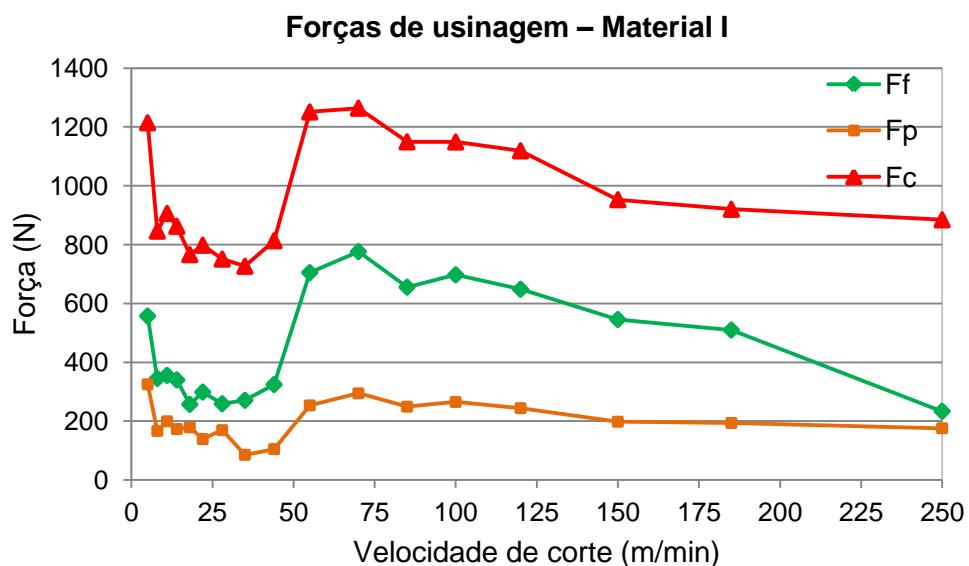


Figura 4.2 – Componentes da força de usinagem, F_c , F_f e F_p , pela velocidade de corte para o material I. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

O comportamento das forças de usinagem para o material I é característico de materiais que apresentam aresta postiça de corte durante a usinagem. Os resultados indicam que a formação da APC deve ocorrer entre as velocidades de corte de 11 m/min e 55 m/min. Em velocidades superiores a 55 m/min, o aumento de temperatura gerado no corte inibe a formação da APC, reduzindo as forças de usinagem naquelas velocidades. Desta forma, a velocidade de corte crítica para formação da APC para o material I é de aproximadamente 55 m/min.

A formação, crescimento e desaparecimento da APC podem ser relacionados com as características dos cavacos colhidos durante a usinagem do material I (Figura 4.3).

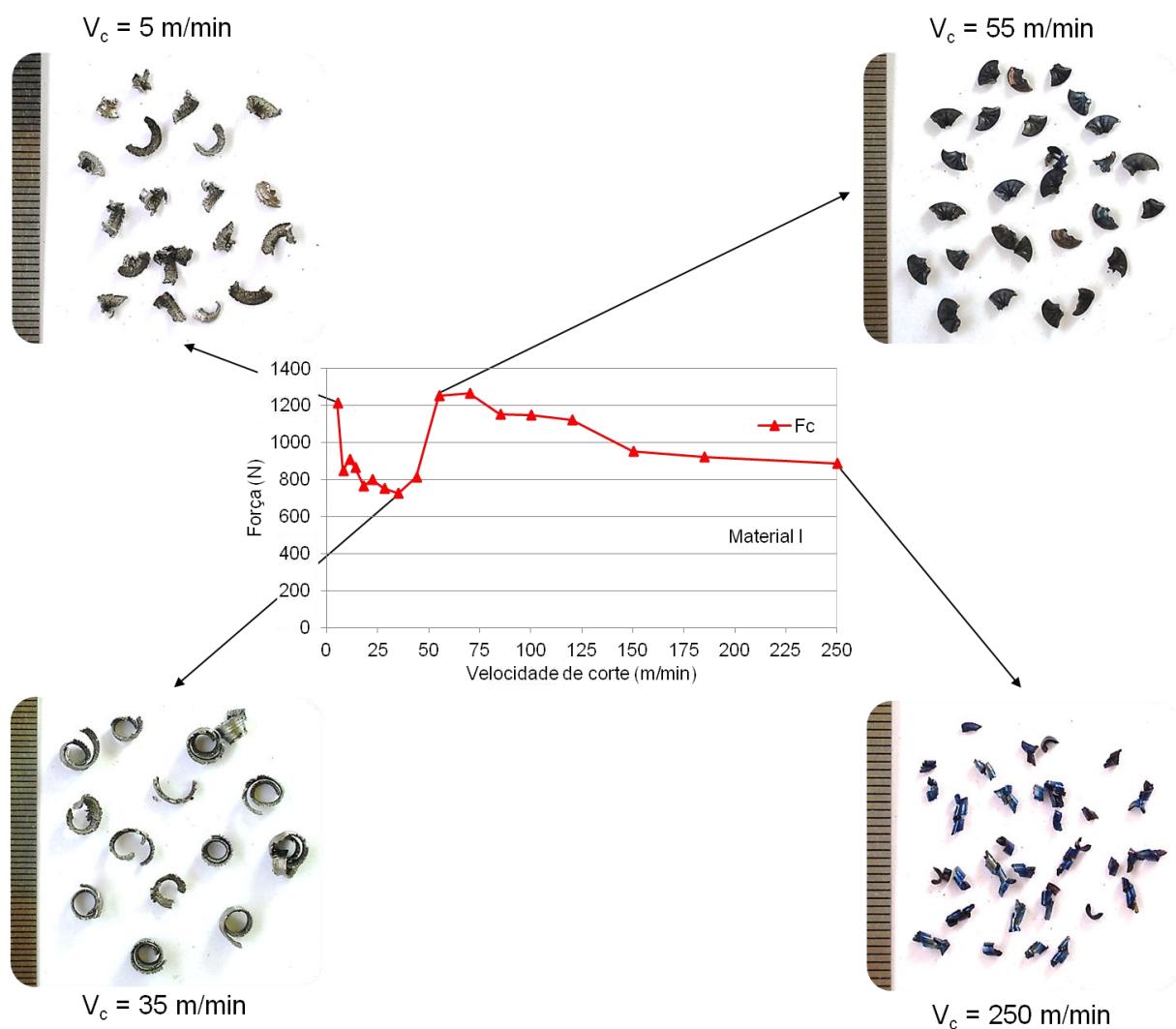


Figura 4.3 – Características dos cavacos colhidos durante a usinagem em função da velocidade de corte para o material I. Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

A formação da APC ocorre em baixas velocidades de corte, proporcionando a redução da força de corte na faixa de 11 m/min a 35 m/min devido à estabilidade da APC. Os cavacos formados apresentaram coloração acinzentada, caracterizando baixos esforços de corte e baixas temperaturas do cavaco.

A partir da velocidade de corte de 35 m/min, a APC está no regime instável, reduzindo suas dimensões, desta forma a força de corte aumenta até a velocidade de corte crítica aproximada de 55 m/min, onde a APC desaparece. Esta transição parece ser indicada pela coloração cinza-azulada apresentada pelos cavacos, ocorrendo a partir de 44 m/min até 120 m/min. Essa coloração caracteriza maiores esforços de corte e maiores temperaturas do cavaco.

Acima da velocidade crítica aproximada de 55 m/min, o acréscimo de temperatura originado no corte impossibilita a formação da APC. Nesta faixa de velocidades de corte

com APC ausente, a força de corte decresce devido à maior geração de calor e, consequente, redução da resistência ao cisalhamento do material da peça, além da redução da área de contato cavaco-ferramenta (MACHADO *et al.*, 2011). Esse comportamento é acompanhado da formação de cavacos de coloração preto-azulada, obtidos na faixa de velocidade de corte entre 150 m/min e 250 m/min, caracterizando temperaturas do cavaco relativamente altas.

A Figura 4.4 mostra a variação das componentes da força de usinagem para o material II.

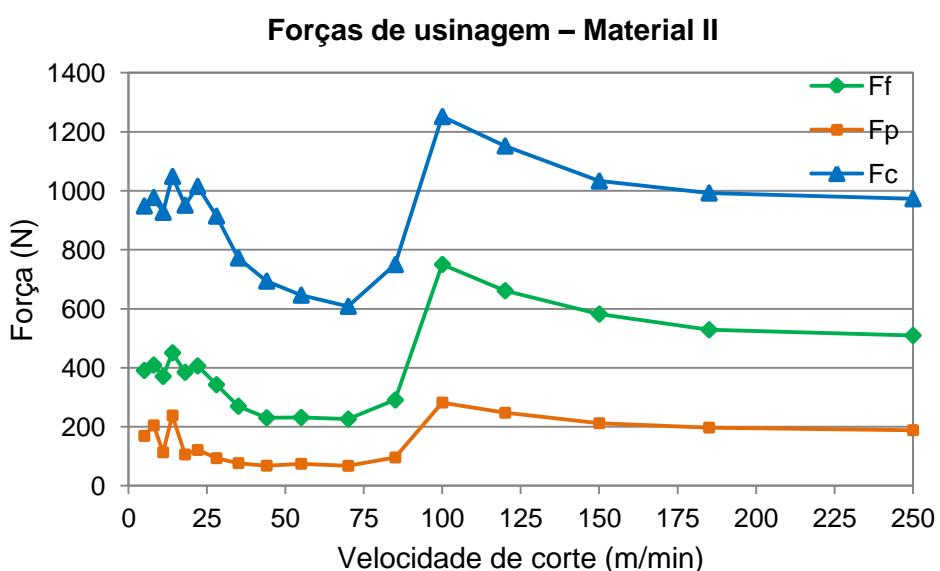


Figura 4.4 – Componentes da força de usinagem, F_c , F_f e F_p , pela velocidade de corte para o material II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

O comportamento das forças de usinagem para o material II também é característico de materiais que apresentam APC durante a usinagem. Entretanto, foram feitas considerações sobre o mecanismo de atuação do chumbo na interface cavaco-ferramenta. Inicialmente, considerou-se sobre a atuação do chumbo na forma líquida, devido ao seu ponto de fusão de 327 °C, responsabilizando este elemento químico pelas variações da força de usinagem observadas até a velocidade de corte de 100 m/min.

Através de análises da superfície inferior dos cavacos formados em condições de corte entre 5 m/min e 250 m/min, para o material II, foram observadas escamas dispostas no sentido do deslocamento do cavaco na faixa de velocidade de corte entre 5 m/min e 70 m/min. Essas escamas são resultantes da formação não uniforme da APC, apontando sua presença como condição de interface predominante (Figura 4.5).

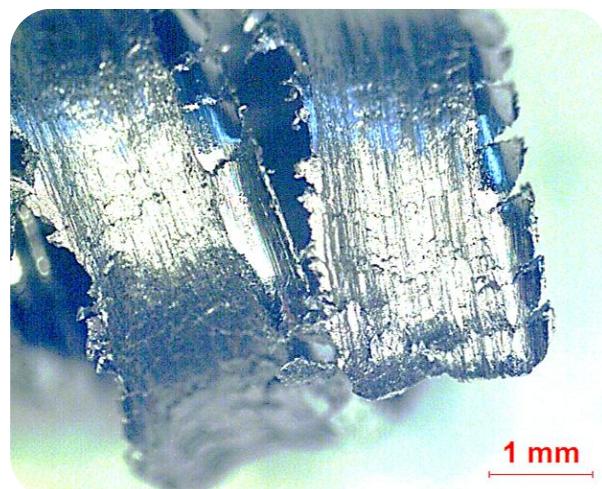


Figura 4.5 – Superfície inferior do cavaco para o material II. Aumento de 25 vezes. Condições de corte: $V_c = 18$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

Em condições de corte acima de 100 m/min, a superfície inferior do cavaco se mostrou lisa, apontando a presença de zona de fluxo e/ou escorregamento como condição de interface predominante (Figura 4.6).

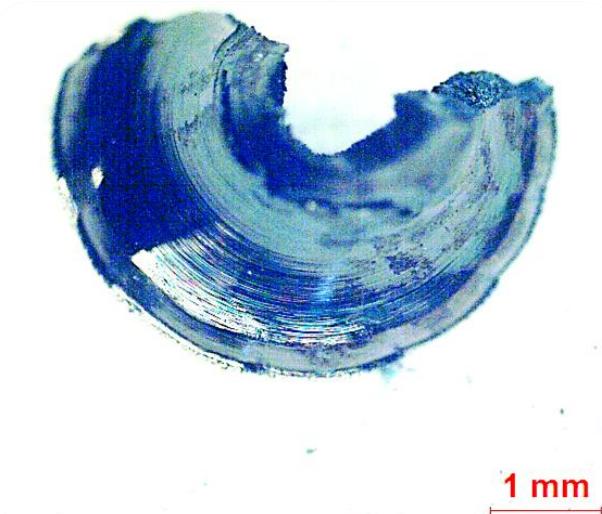


Figura 4.6 – Superfície inferior do cavaco para o material II. Aumento de 25 vezes. Condições de corte: $V_c = 100$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

Felizmente, um conjunto de autores importantes como Bellot (1978, *apud* Evangelista Luiz, 2007), Yaguchi (1988), Trent e Wright (2000) sugeriram outras formas de atuação do chumbo, tais como a fragilização pelo “efeito de entalhe” e a formação de microtrincas a partir do metal líquido, além da atuação deste no estado líquido como lubrificante da

interface cavaco-ferramenta. Em qualquer desses mecanismos de atuação propostos, o chumbo não eliminou a presença de APC na usinagem do material II.

Diante desse esclarecimento, a formação da APC deve ocorrer entre as velocidades de corte de 22 m/min e 100 m/min. Em velocidades de corte superiores a 100 m/min, a formação da APC foi inibida devido ao aumento de temperatura, reduzindo as forças de usinagem. Desta forma, a velocidade de corte crítica para formação da APC para o material II é de aproximadamente 100 m/min.

A formação, crescimento e desaparecimento da APC podem ser relacionados com as características dos cavacos colhidos durante a usinagem do material II (Figura 4.5).

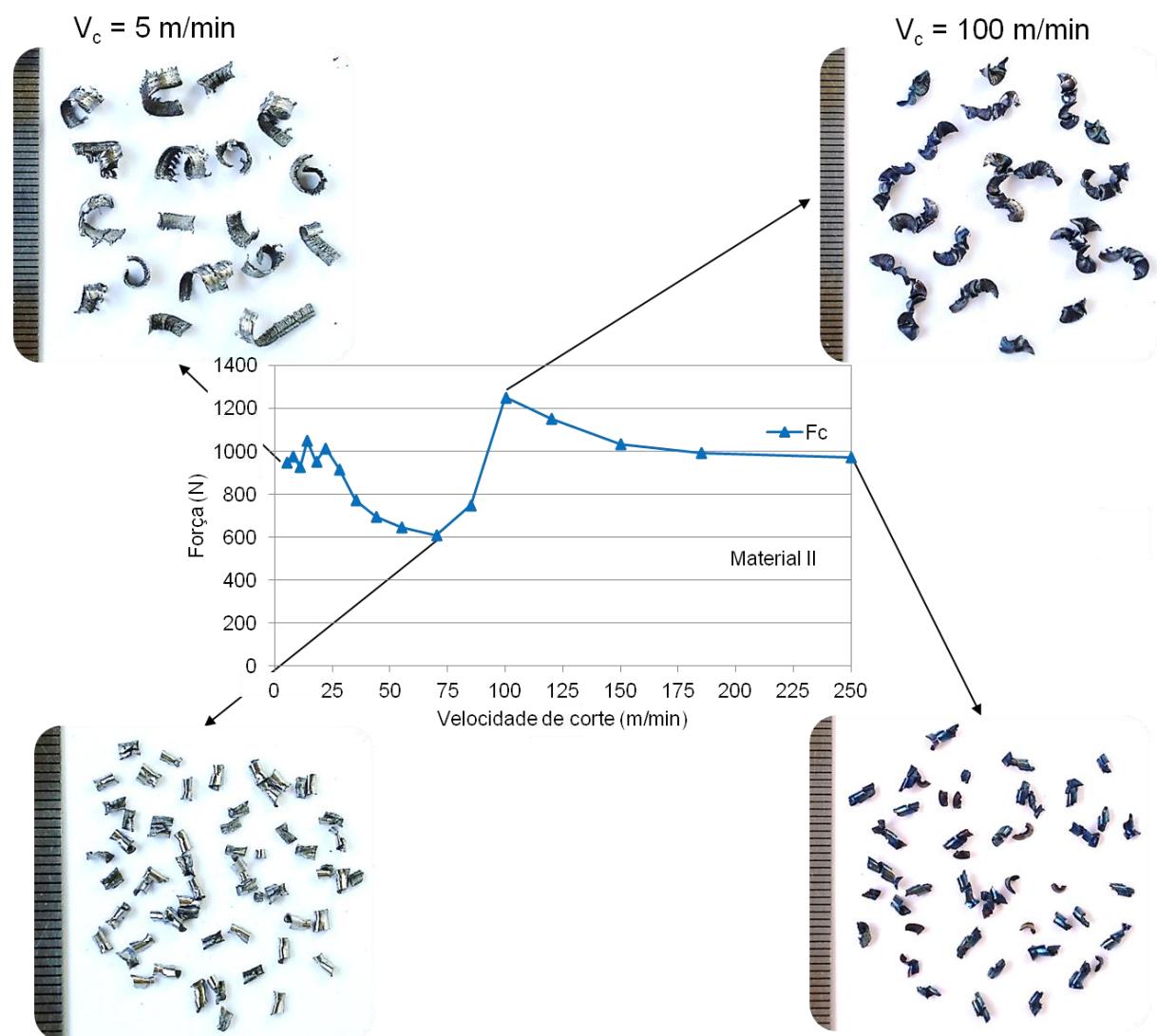


Figura 4.7 – Características dos cavacos colhidos durante a usinagem em função da velocidade de corte para o material II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

A formação da APC ocorre em baixas velocidades de corte, proporcionando a redução da força de corte na faixa de 22 m/min a 70 m/min devido à estabilidade da APC. Os cavacos formados apresentaram coloração acinzentada, evidenciando baixos esforços de corte e baixas temperaturas do cavaco.

A partir da velocidade de corte de 70 m/min, a APC reduz suas dimensões. Assim, a força de corte aumenta até a velocidade de corte crítica de 100 m/min, onde a APC desaparece. Esta transição é observada pela coloração cinza-azulada apresentada pelos cavacos a partir de 100 m/min. Essa coloração caracteriza maiores temperaturas do cavaco.

Acima da velocidade de corte crítica, o acréscimo de temperatura originado no corte impossibilita a formação de APC, reduzindo a força de corte. Nesta faixa de velocidades de corte com APC ausente, entre 150 m/min e 250 m/min, os cavacos formados apresentaram coloração preto-azulada, caracterizando temperaturas do cavaco relativamente altas.

Para os dois materiais estudados, a coloração dos cavacos parece indicar a mudança no processo de corte, provavelmente a transição da condição de APC para condição de zona de fluxo na interface cavaco-ferramenta. Para o material I a velocidade de corte correspondente é de aproximadamente 55 m/min e para o material II é de aproximadamente 100 m/min.

A Figura 4.8 apresenta a variação da força de corte (F_c) para os dois materiais estudados.

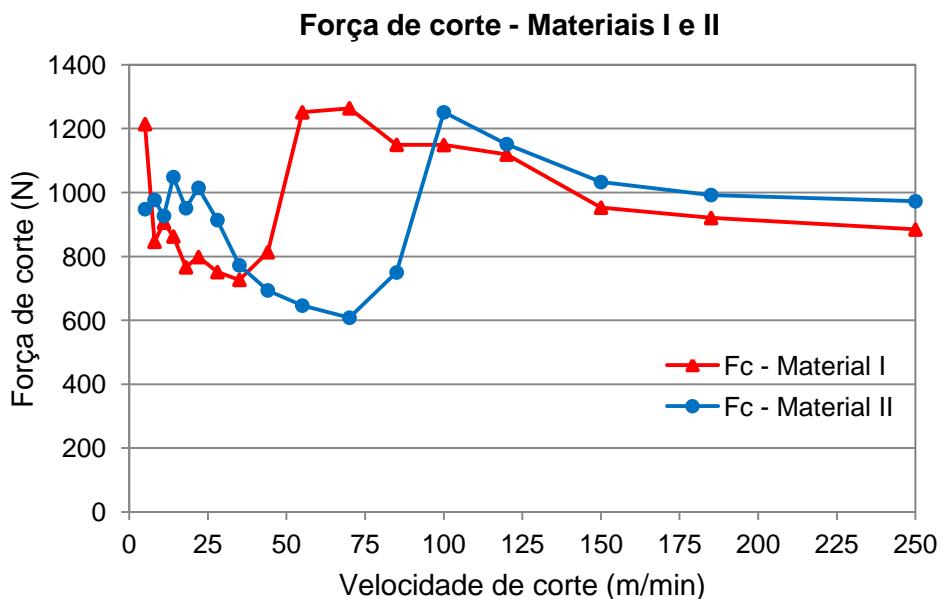


Figura 4.8 – Componente da força de usinagem, F_c em função da velocidade de corte para os dois materiais estudados. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

A faixa de atuação da APC ocorreu em velocidades de corte maiores para o material II. Esse comportamento pode ter ocorrido devido às menores temperaturas de usinagem apresentadas pelo material II (evidenciadas pela coloração dos cavacos), uma vez que, o aumento da temperatura é responsável pelo desaparecimento da APC.

Em termos de grandeza da força de corte, o material I apresentou menores forças de corte na faixa de velocidade de corte onde prevalece a zona de fluxo, até 250 m/min. Isto pode ter ocorrido devido ao efeito benéfico do aumento da temperatura de usinagem sobre a resistência ao cisalhamento do material da peça, uma vez que o material I apresentou maior temperatura de usinagem em toda faixa de velocidade de corte usinada.

Vale ressaltar que a força de corte tende a se estabilizar em altas velocidades de corte. Desta forma, medições de força em testes de usinagem com velocidades de corte maiores que 250 m/min seriam necessários para analisar o comportamento de força de usinagem do material II e compará-lo com o material I, uma vez que as condições ótimas para os dois materiais são distintas.

4.2.2. Análise estatística do efeito das condições de corte na força de corte

Nas tabelas apresentadas a seguir os resultados do parâmetro estatístico valor-p abaixo de 0,05 representam variáveis e interações entre variáveis significativas. A análise de variância utilizada considerou até as interações de segunda ordem. O nível de confiança adotado foi de 95 %.

A estimativa dos efeitos para a força de corte na usinagem do material I mostra que, para uma probabilidade máxima de erro de 5 %, não houve fatores significativos (Tabela 4.3).

Tabela 4.3 – Estimativa dos efeitos para força de corte na usinagem do material I

Fator	Efeitos	Valor-p	Erro padrão
Média	635,3	0,076	±76,66
V_c	-96,9	0,641	±153,33
f	568,2	0,168	±153,33
a_p	648,6	0,148	±153,33
$V_c \times f$	-173,8	0,460	±153,33
$V_c \times a_p$	-126,7	0,560	±153,33
$f \times a_p$	356,7	0,258	±153,33

A análise de variância foi novamente realizada descartando as variáveis menos influentes (maiores valores do parâmetro estatístico valor-p), a saber, a velocidade de corte (V_c) e a interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte ($V_c \times a_p$). Desta forma, a estimativa dos efeitos para a força de corte na usinagem do material I mostra que, para uma probabilidade máxima de erro de 5 %, os fatores significativos foram o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) (Tabela 4.4).

Tabela 4.4 – Estimativa dos efeitos para força de corte na usinagem do material I em nova análise de variância (em negrito os fatores significativos)

Fator	Efeitos	Valor-p	Erro padrão
Média	635,3	0,003	±72,51
f	568,2	0,030	±145,02
a_p	648,6	0,021	±145,02
$V_c \times f$	-126,7	0,447	±145,02
$f \times a_p$	356,7	0,091	±145,02

A Figura 4.9 mostra o efeito do avanço sobre a força de corte para o material I. O aumento da força de corte foi de, em média, 568,2 N, quando o nível do avanço passa de -1 (0,10 mm/volta) para +1 (0,20 mm/volta).

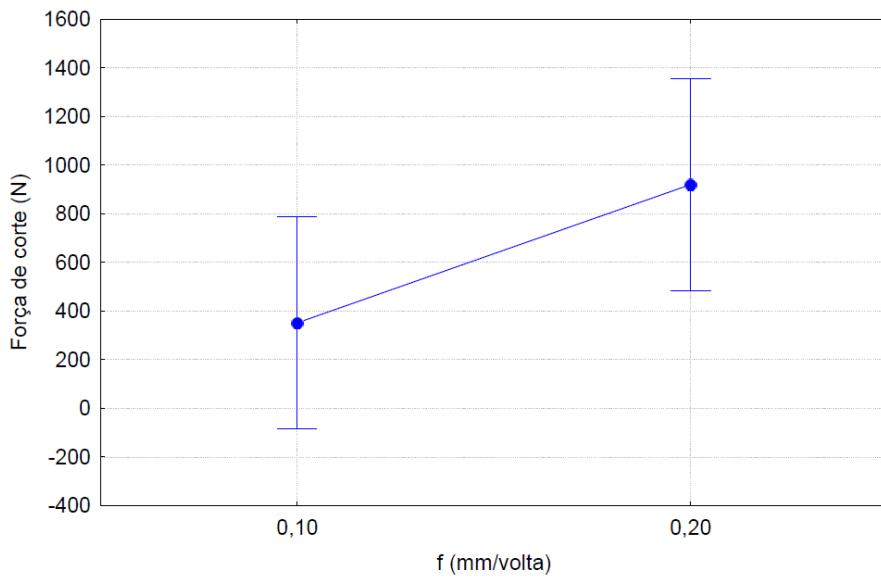


Figura 4.9 – Efeito do avanço sobre a força de corte para o material I

A Figura 4.10 mostra o efeito da profundidade de corte sobre a força de corte para o material I. O aumento da força de corte foi de, em média, 648,6 N, quando o nível da profundidade de corte passa de -1 (1,0 mm) para +1 (2,0 mm). Nesta análise de variância, a profundidade de corte foi a variável mais influente na força de corte.

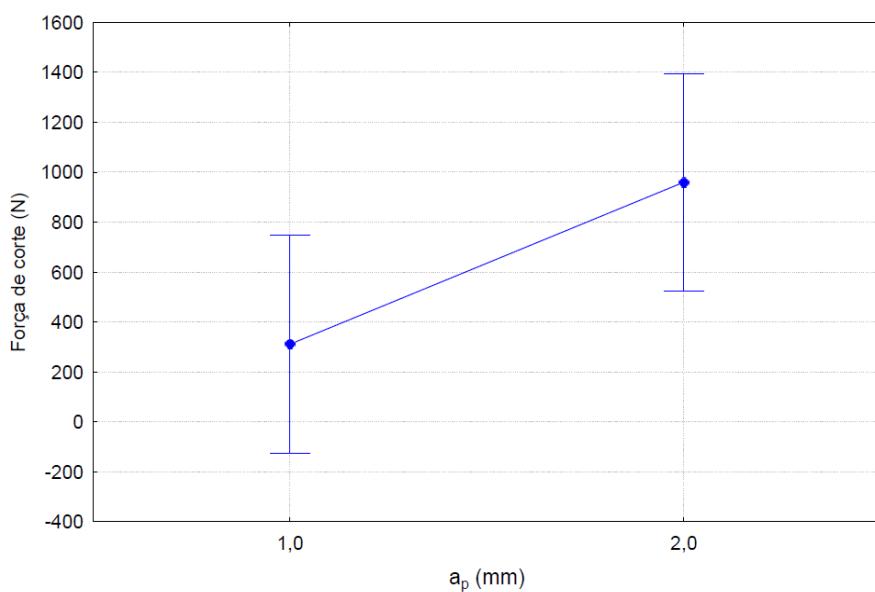


Figura 4.10 – Efeito da profundidade de corte sobre a força de corte para o material I

O efeito médio da interação entre avanço e profundidade de corte foi de 356,7 N (Figura 4.11).

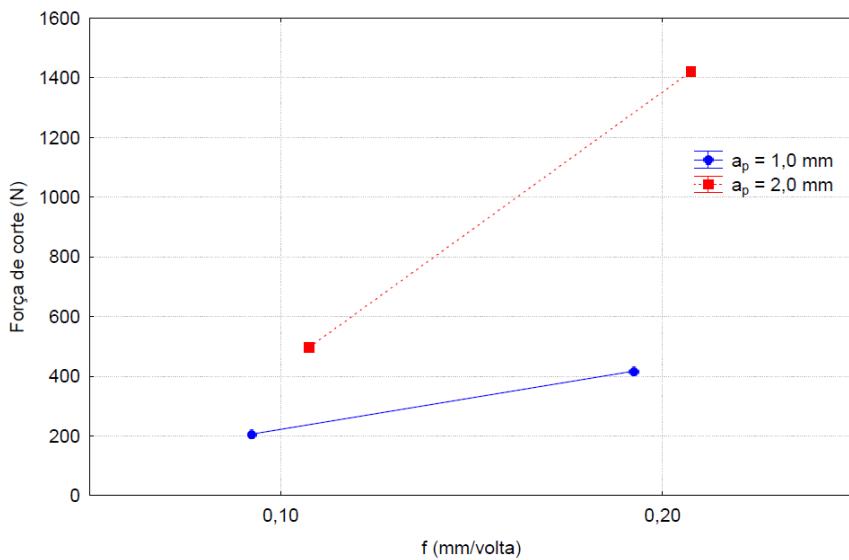


Figura 4.11 – Efeito da interação entre avanço e profundidade de corte sobre a força de corte para o material I

As maiores forças de corte ocorreram quando ambos os fatores estão no nível +1 ($a_p = 2,0$ mm e $f = 0,20$ mm/volta). As menores forças de corte ocorreram quando o sinal de ambos os fatores é -1 ($a_p = 1,0$ mm e $f = 0,10$ mm/volta). Esse comportamento está de acordo com a literatura, pois a força de corte é proporcional à seção de corte A, definida diretamente pelo avanço e pela profundidade de corte (TRENT; WRIGHT, 2000; MACHADO *et al.*, 2011).

A estimativa dos efeitos para a força de corte do material II mostra que, para uma probabilidade máxima de erro de 5 %, os fatores significativos foram: a profundidade de corte (a_p), o avanço (f), a velocidade de corte (V_c) e a interação entre avanço e profundidade de corte ($a_p \times f$) (Tabela 4.5).

Tabela 4.5 – Estimativa dos efeitos para força de corte na usinagem do material II (em negrito os fatores significativos)

Fator	Efeitos	Valor-p	Erro padrão
Média	494,1	0,006	±4,48
V_c	140,1	0,041	±8,95
f	350,0	0,016	±8,95
a_p	444,8	0,013	±8,95
$V_c \times f$	68,4	0,083	±8,95
$V_c \times a_p$	89,8	0,063	±8,95
$a_p \times f$	143,4	0,040	±8,95

Observa-se que, o erro padrão associado à análise estatística da força de corte do material II é inferior ao erro padrão associado ao material I. Este dado demonstra que houve menos desvios nos resultados experimentais da força de corte para o material II, ou seja, houve um padrão mais aceitável para o material II. Logo, a confiabilidade da análise estatística realizada é maior para este material.

A Figura 4.12 mostra o efeito do avanço sobre a força de corte na usinagem do material II. O aumento da força de corte foi de, em média, 350,0 N, quando o nível do avanço passa de -1 (0,10 mm/volta) para +1 (0,20 mm/volta).

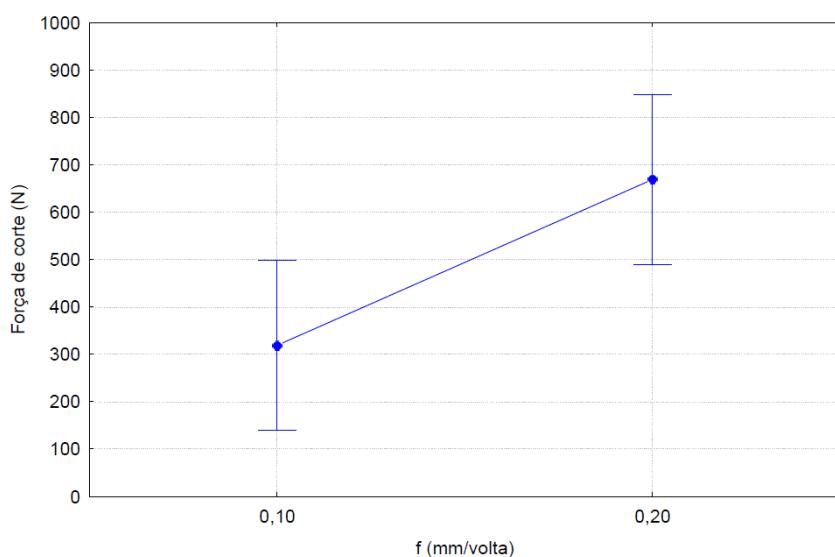


Figura 4.12 – Efeito do avanço sobre a força de corte na usinagem do material II

A Figura 4.13 mostra o efeito da profundidade de corte sobre a força de corte na usinagem do material II. O aumento da força de corte foi de, em média, 444,8 N, quando o nível da profundidade de corte passa de -1 (1,0 mm) para +1 (2,0 mm). Nesta análise estatística, a profundidade de corte foi a variável mais influente na força de corte.

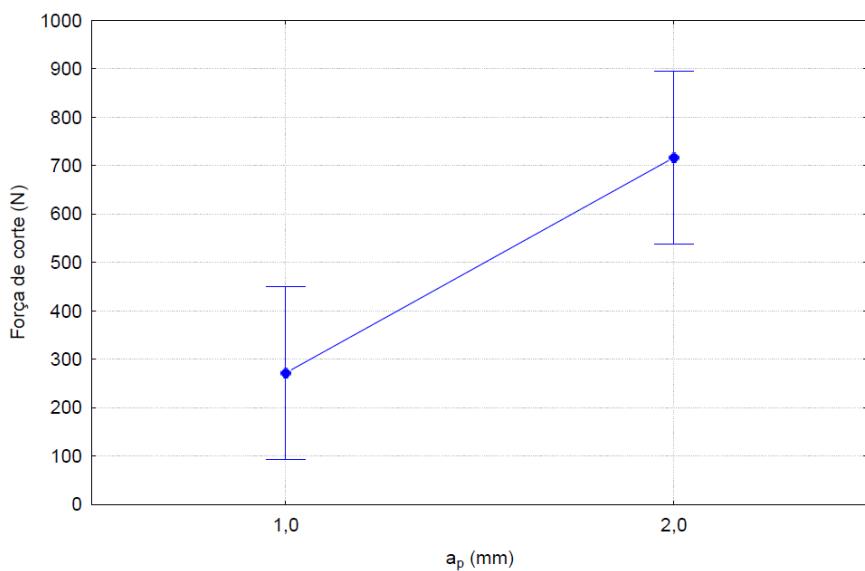


Figura 4.13 – Efeito da profundidade de corte sobre a força de corte na usinagem do material II

A Figura 4.14 mostra o efeito da velocidade de corte sobre a força de corte na usinagem do material II. O aumento da força de corte foi de, em média, 140,1 N, quando o nível da velocidade de corte passa de -1 (50 m/min) para +1 (250 m/min).

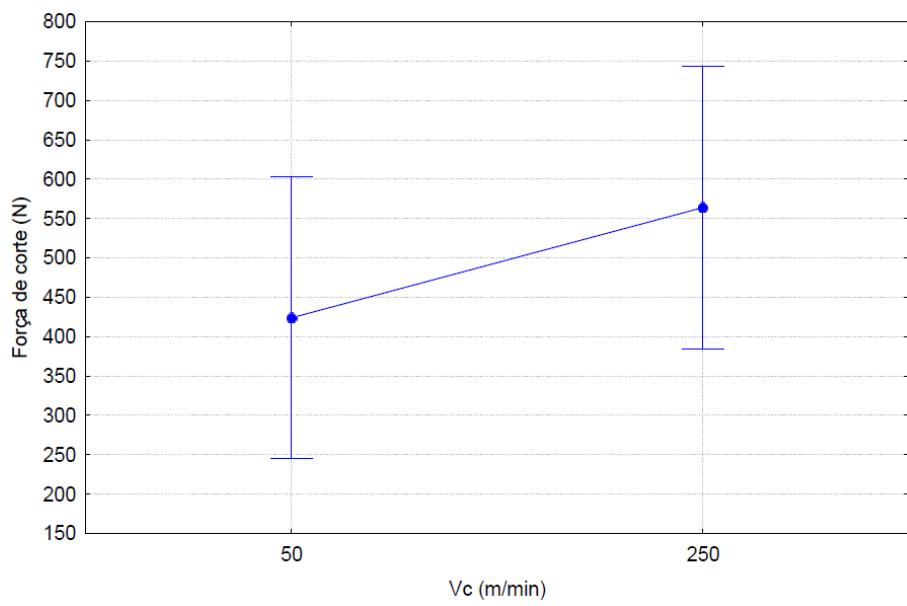


Figura 4.14 – Efeito da velocidade de corte sobre a força de corte na usinagem do material II

O efeito da velocidade de corte sobre a força de corte para o material II pode estar relacionado à formação da APC em baixas velocidades de corte. A maior faixa de atuação da APC para o material II em relação ao material I pode indicar a mesma conclusão, pois a

velocidade de corte não foi influente para o material I. A velocidade de corte de 50 m/min, para o material II, indica a região de atuação da APC. É sabido que a influência da APC é marcante na redução dos esforços de corte (TRENT; WRIGHT, 2000). Em contrapartida, para velocidade de corte de 250 m/min, este efeito de redução da força de corte através da APC é inexistente.

O efeito médio da interação entre avanço e profundidade de corte na usinagem do material II foi de 143,4 N (Figura 4.15).

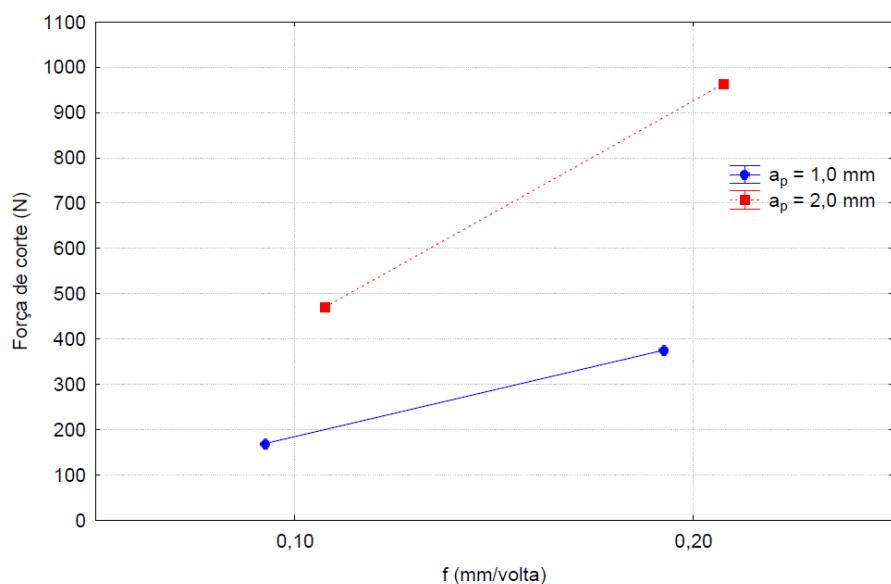


Figura 4.15 – Efeito da interação entre avanço e profundidade de corte sobre a força de corte na usinagem do material II

Observa-se que, as maiores forças de corte ocorreram quando ambos os fatores estavam no nível +1 ($a_p = 2,0\text{ mm}$ e $f = 0,20\text{ mm/volta}$) e as menores forças de corte ocorreram quando o nível dos fatores foi -1 ($a_p = 1,0\text{ mm}$ e $f = 0,10\text{ mm/volta}$). Da mesma forma que o material I, a força de corte para o material II é diretamente influenciada pelo avanço e pela profundidade de corte.

4.2.3. Considerações finais

Diante das análises estatísticas realizadas para os dois materiais, podemos concluir que:

- Para o material I, as variáveis mais influentes na força de corte foram o avanço (f) e a profundidade de corte (a_p).

- Para o material II, as variáveis mais influentes na força de corte foram o avanço (f), a profundidade de corte (a_p), a velocidade de corte e a interação entre avanço e profundidade de corte ($a_p \times f$).
- A variável mais influente na força de corte foi a profundidade de corte (a_p), para os dois materiais estudados.
- A influência das variáveis avanço (f) e a profundidade de corte (a_p) na força de corte se deu porque a seção de corte A é definida por aqueles parâmetros de usinagem.
- A velocidade de corte (V_c) apenas foi significante na usinagem do material II, possivelmente devido à maior faixa de atuação da APC para este material. No entanto, o efeito da velocidade de corte para o material I é indiscutível quando se analisa apenas a região de atuação da APC.

4.3. Ensaios de rugosidade da superfície usinada

4.3.1. Rugosidade em função da velocidade de corte

A Figura 4.16 e a Figura 4.17 mostram a variação dos parâmetros de rugosidade em função da velocidade de corte, respectivamente, para o material I e material II.

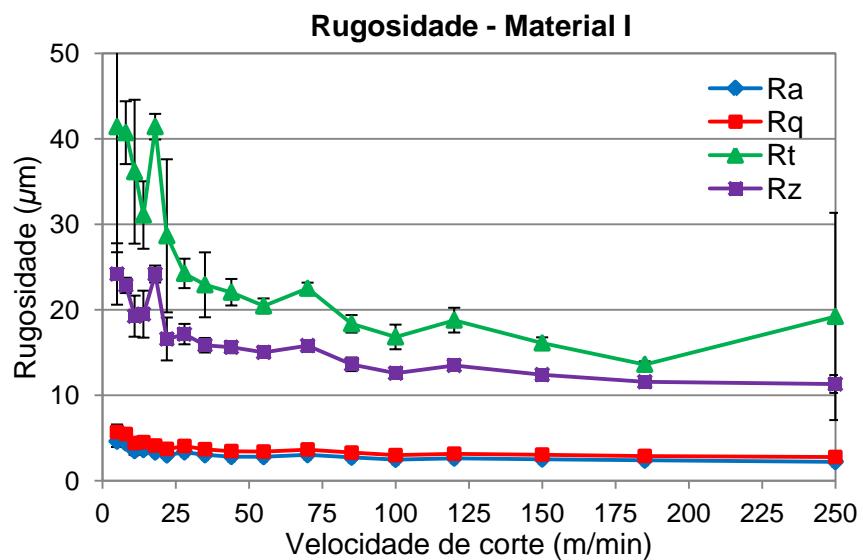


Figura 4.16 – Parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_q e R_t) em função da velocidade de corte para material I. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

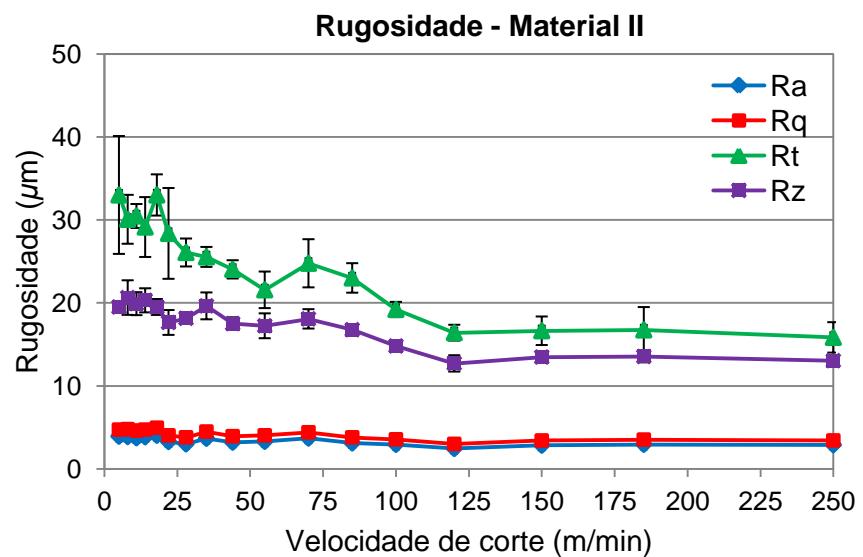


Figura 4.17 – Parâmetros de rugosidade (R_a , R_z , R_q e R_t) em função da velocidade de corte para material II. Condições de corte: $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

Para comparação, a Figura 4.18 mostra o parâmetro R_t obtido para os dois materiais. O comportamento dos parâmetros de rugosidade R_z foi similar.

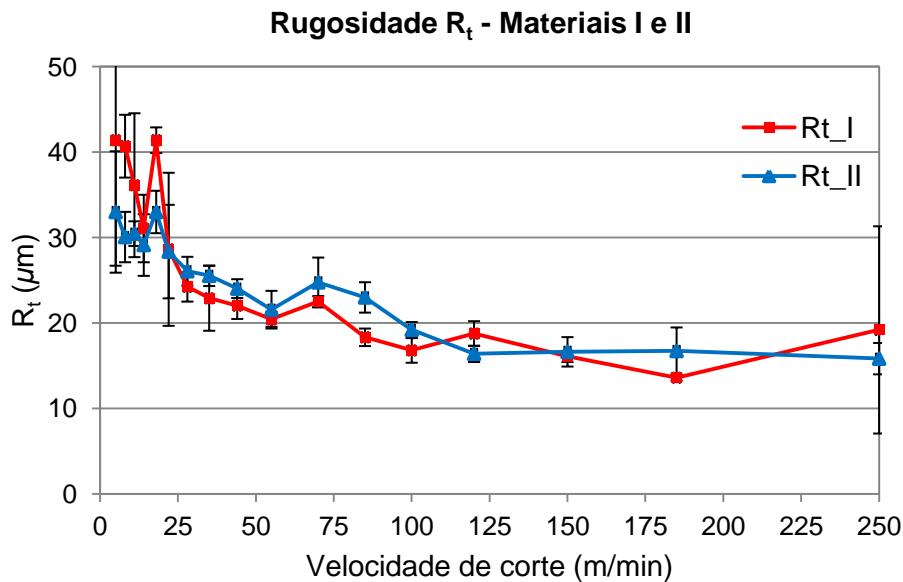


Figura 4.18 – Parâmetro de rugosidade R_t (μm) em função da velocidade de corte para os materiais I e II. Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

Os parâmetros de rugosidade são influenciados pelas condições da interface cavaco-ferramenta. Quando se analisa a rugosidade R_t , para o material I, a presença de APC na faixa de velocidade de corte de 11 m/min a 55 m/min, foi determinante para os maiores valores de rugosidade. Igualmente para o material II, na faixa de velocidade de corte de 22 m/min a 100 m/min. Acima das respectivas velocidades de corte críticas, a rugosidade de ambos os materiais tende a se estabilizar, com alguma variação pontual, sendo influenciada pelo avanço e raio de ponta da ferramenta.

Para comparação, a Figura 4.19 mostra o parâmetro R_a obtido para os dois materiais. O comportamento dos parâmetros de rugosidade R_q foi similar.

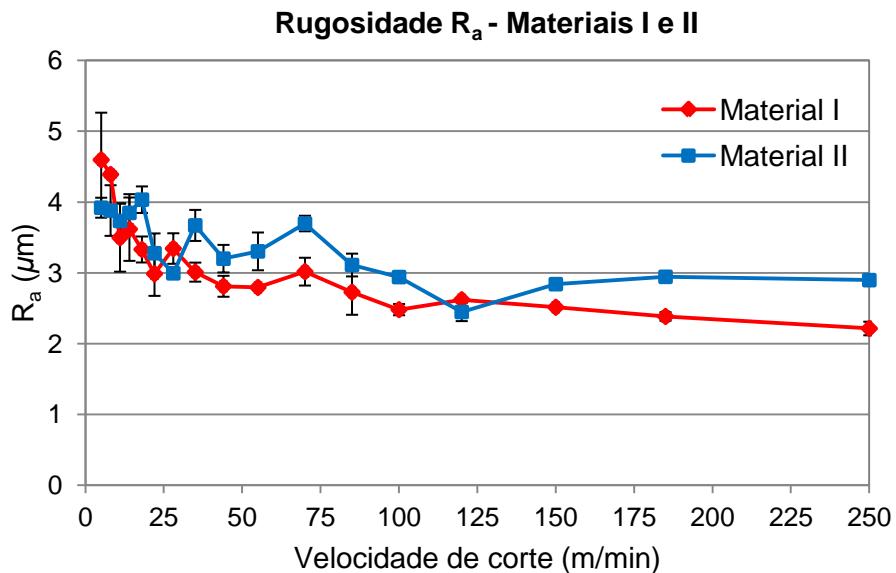


Figura 4.19 – Parâmetro de rugosidade R_a (μm) em função da velocidade de corte para os materiais I e II. Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

Quando se analisa a rugosidade R_a , o comportamento anterior não é tão evidente. Isso ocorre porque o parâmetro R_a é caracterizado por uma média aritmética. Considerando que ocorre a formação da APC no material II na faixa de velocidades de corte até 100 m/min, os valores de rugosidade em baixas velocidades de corte são comparáveis aos valores de rugosidade para altas velocidades de corte.

Da Silva (1998) sugere um mecanismo de lubrificação na presença de APC e que pode afetar a rugosidade na região de baixas velocidades de corte. Mas este efeito deve ser investigado em trabalhos futuros, ainda mais considerando que a rugosidade é, em geral, maior para o material II, que contém chumbo em sua composição química.

Em geral, os valores de rugosidade R_a foram abaixo de 5 μm para os dois materiais, independente da velocidade de corte empregada.

4.3.2. Análise estatística do efeito das condições de corte na rugosidade R_a

Nas tabelas apresentadas a seguir os resultados do parâmetro estatístico valor-p abaixo de 0,05 representam variáveis e interações entre variáveis significativas. A análise de variância utilizada considerou até as interações de segunda ordem. O nível de confiança adotado foi de 95 %.

A estimativa dos efeitos para a rugosidade R_a na usinagem do material I mostra que, para uma probabilidade máxima de erro de 5 % não houve fatores significativos (Tabela 4.6).

Tabela 4.6 – Estimativa dos efeitos para rugosidade R_a na usinagem do material I

Fator	Efeitos	Valor-p	Erro padrão
Média	3,41	0,125	±0,68
V_c	-1,91	0,394	±1,36
f	3,75	0,222	±1,36
a_p	1,46	0,478	±1,36
$V_c \times f$	-1,96	0,387	±1,36
$V_c \times a_p$	-1,73	0,424	±1,36
$a_p \times f$	2,02	0,378	±1,36

A análise de variância foi novamente realizada descartando as variáveis menos influentes (maiores valores do parâmetro estatístico valor-p), a saber, a profundidade de corte (a_p) e a interação entre a velocidade de corte e a profundidade de corte ($V_c \times a_p$). A estimativa dos efeitos para a rugosidade R_a na usinagem do material I mostra que, para probabilidade máxima de erro de 5 %, a variável mais influente foi o avanço (f), apesar de ainda não estar com a significância esperada (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 – Estimativa dos efeitos para rugosidade R_a na usinagem do material I em nova análise de variância (em negrito os fatores mais influentes)

Fator	Efeitos	Valor-p	Erro padrão
Média	3,41	0,021	±0,76
V_c	-1,91	0,299	±1,52
f	3,75	0,091	±1,52
$V_c \times f$	-1,96	0,290	±1,52
$a_p \times f$	2,02	0,277	±1,52

A Figura 4.20 mostra o efeito do avanço sobre a rugosidade R_a na usinagem do material I. O aumento da rugosidade foi de, em média, 3,75 μm , quando o nível do avanço

passa de -1 (0,10 mm/volta) para +1 (0,20 mm/volta). Apesar de não ser significativo com um erro máximo de 5 %, o avanço foi a variável mais influente desta análise estatística.

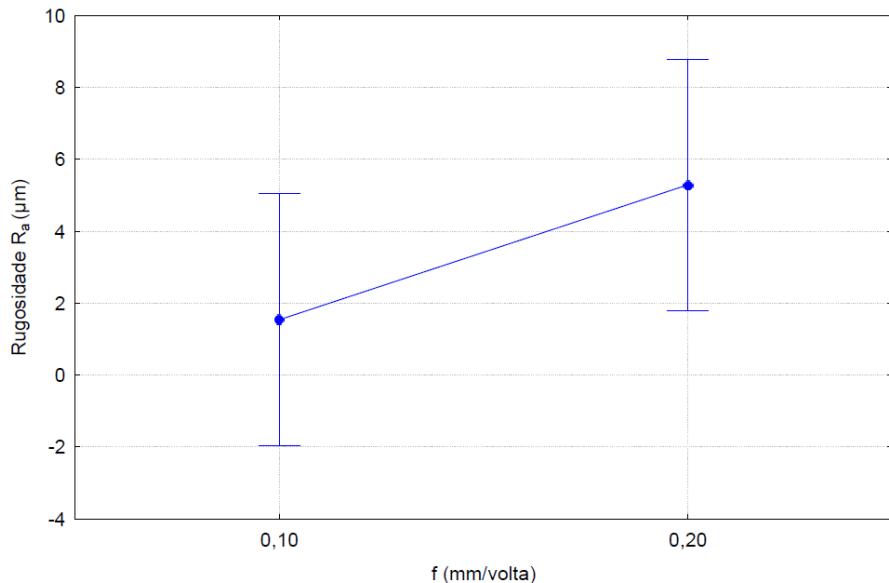


Figura 4.20 – Efeito do avanço sobre a rugosidade R_a na usinagem do material I

A estimativa dos efeitos para a rugosidade R_a na usinagem do material II mostra que, para uma probabilidade máxima de erro de 5 %, o único fator significativo foi o avanço (f) (Tabela 4.8).

Tabela 4.8 – Estimativa dos efeitos para rugosidade R_a na usinagem do material II (em negrito os fatores significativos)

Fator	Efeitos	Valor-p	Erro padrão
Média	2,48	0,014	$\pm 0,06$
V_c	-0,49	0,142	$\pm 0,11$
f	2,47	0,028	$\pm 0,11$
a_p	0,04	0,785	$\pm 0,11$
$V_c \times f$	0,07	0,644	$\pm 0,11$
$V_c \times a_p$	-0,18	0,356	$\pm 0,11$
$a_p \times f$	-0,01	0,969	$\pm 0,11$

Observa-se que, o erro padrão associado à análise estatística da rugosidade R_a do material II é inferior ao erro padrão associado ao material I. Este dado demonstra que houve menos desvios nos resultados experimentais da rugosidade R_a para o material II, ou seja, houve um padrão mais aceitável para o material II. Logo, a confiabilidade da análise estatística realizada é maior para este material.

A Figura 4.21 mostra o efeito do avanço sobre a rugosidade R_a na usinagem do material II. O aumento da rugosidade é de, em média, $2,47 \mu\text{m}$, quando o nível do avanço passa de -1 (0,10 mm/volta) para +1 (0,20 mm/volta). O avanço foi a variável mais influente desta análise estatística.

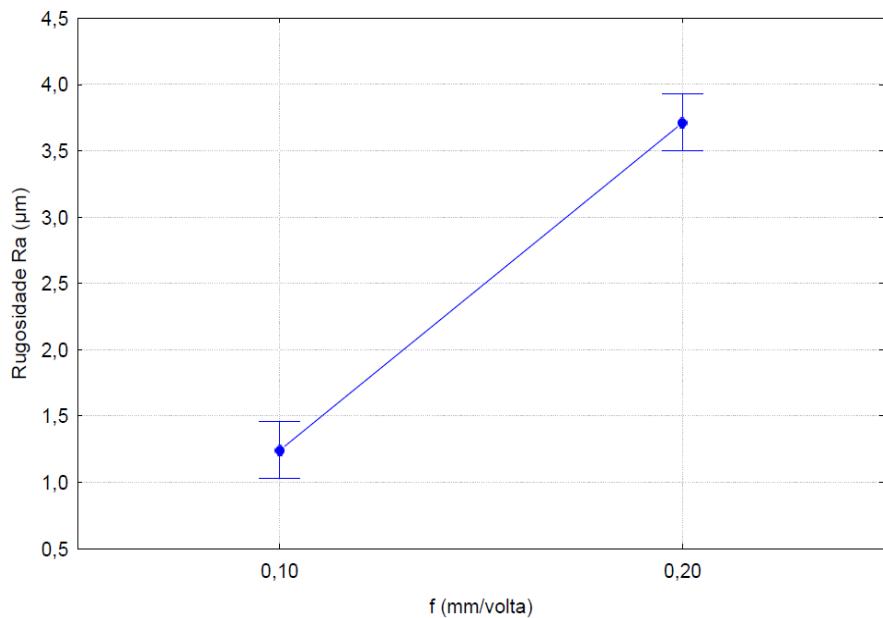


Figura 4.21 – Efeito do avanço sobre a rugosidade R_a na usinagem do material II

4.3.3. Considerações finais

Através das análises estatísticas realizadas, pode-se constatar que a variável mais influente na rugosidade R_a foi o avanço (f), para os dois materiais. Isto ocorre porque a altura dos picos e a profundidade dos vales das marcas de avanço tendem a aumentar com o avanço, refletindo nos valores de rugosidade medidos (MACHADO; DA SILVA, 2004).

4.4. Ensaios de temperatura de usinagem

4.4.1. Calibração do método termopar ferramenta-peça

A calibração do termopar ferramenta-peça foi realizada para os dois materiais estudados, com mesma ferramenta utilizada nos ensaios de medição de temperatura. As curvas de calibração estão apresentadas na Figura 4.22 e Figura 4.23.

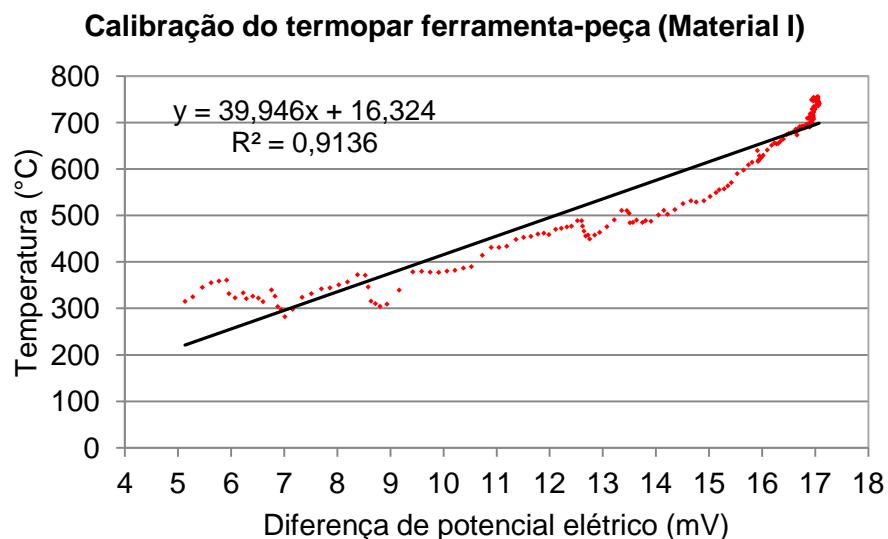


Figura 4.22 – Curva de calibração do material I para $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

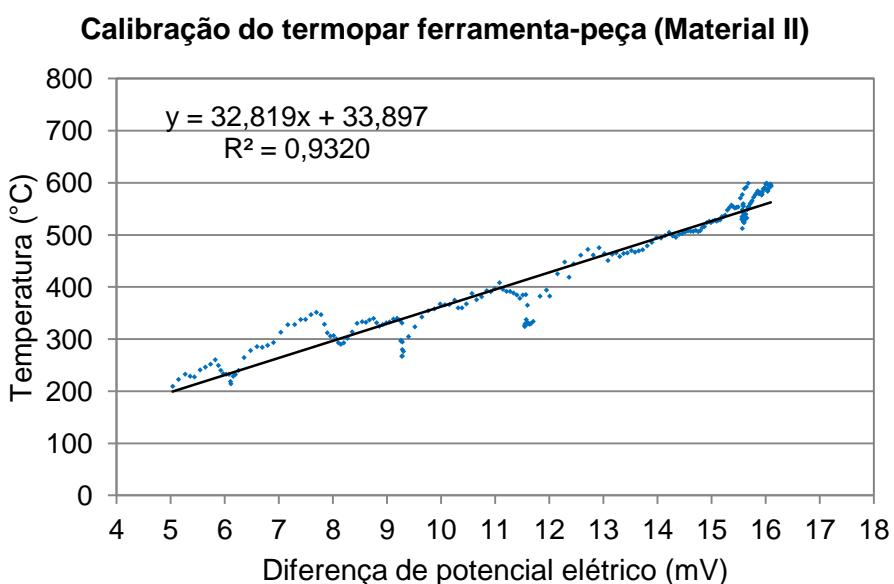


Figura 4.23 – Curva de calibração do material II para $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm

Através de regressão linear foram obtidas as seguintes curvas de calibração:

$$T = 39,946x + 16,324 \text{ (material I)} \quad (4.1)$$

$$T = 32,819x + 33,897 \text{ (material II)} \quad (4.2)$$

A variável “x” representa a diferença de potencial elétrico em mV e a variável “T” representa a temperatura média da interface cavaco-ferramenta em °C.

4.4.2. Temperatura de usinagem

A Figura 4.24 apresenta os valores de temperatura de usinagem em função da velocidade de corte obtidos pelo método do termopar ferramenta-peça para o material I e material II. A temperatura de usinagem aumenta com a velocidade de corte.

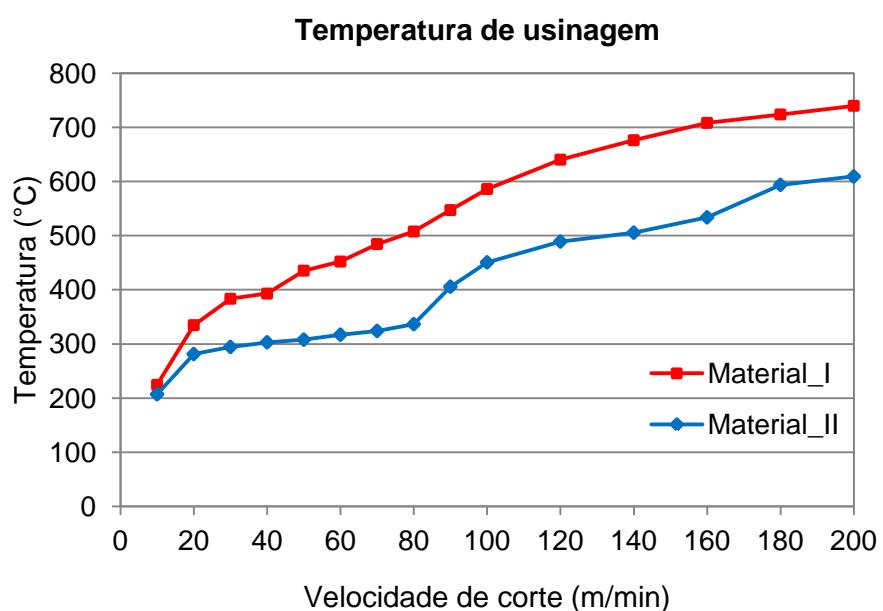


Figura 4.24 – Temperatura de usinagem obtida pelo método do termopar ferramenta-peça para o material I e material II. Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

O material I apresentou maiores temperaturas médias na interface cavaco-ferramenta em toda faixa de velocidade de corte. Desconsiderando os erros do sistema, a temperatura máxima alcançada pelo material I foi ligeiramente superior a 700 °C, enquanto que para o material II a temperatura de usinagem máxima foi de 600 °C, ambos à velocidade de corte de 200 m/min.

Em termos de força de usinagem, para velocidades de corte acima de 100 m/min, as forças de corte para o material II são maiores que o material I. Este comportamento pode estar relacionado ao efeito da temperatura na resistência ao cisalhamento dos materiais.

Por outro lado, as propriedades mecânicas dos dois materiais foram similares (Tab. 4.1 e Tab. 4.2), com o material II apresentando resistência mecânica ligeiramente superior. Diante desses resultados, pode-se inferir que as menores temperaturas de interface cavaco-ferramenta são resultantes da atuação do chumbo ou da interação entre chumbo e sulfeto de manganês na interface cavaco-ferramenta.

Os erros experimentais não foram quantificados. A medição de temperaturas através de termopares pode apresentar erros relacionados à calibração, ao sistema de fixação dos termopares, ao tempo de resposta dos termopares e ao sistema de aquisição. Erros experimentais podem surgir durante o método e a calibração do termopar ferramenta-peça através do aquecimento concomitante das demais juntas do sistema termopar ferramenta-peça e das distribuições de calor desconhecidas no elemento de aquecimento e na ferramenta.

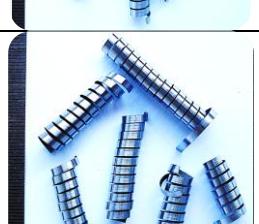
4.5. Características dos cavacos

4.5.1. Tipo e forma dos cavacos

A Tabela 4.9 mostra a influência da velocidade de corte na forma do cavaco para os dois materiais estudados.

Tabela 4.9 – Influência da velocidade de corte e dos materiais na forma do cavaco.

Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

$V_c (\text{m/min})$	Material I	Material II
20		
40		
60		
80		
100		

Continuação da Tabela 4.9 – Influência da velocidade de corte e dos materiais na forma do cavaco. Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

$V_c (\text{m/min})$	Material I	Material II
120		
140		
160		
180		
200		

Com o aumento da velocidade de corte, a tendência do cavaco é se formar em fita, tubular ou espiral. Isto ocorre porque, em velocidades de corte maiores o calor gerado também é maior, facilitando a usinagem devido à redução da resistência ao cisalhamento da peça. A classificação da forma dos cavacos foi realizada segundo Norma ISO 3685 (Tabela 4.10).

Tabela 4.10 – Classificação da forma do cavaco segundo Norma ISO 3685. Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

Faixa de V_c (m/min)	Material I	Faixa de V_c (m/min)	Material II
10 a 50	Arcos soltos	10 a 40	Arcos soltos
60 a 100	Arcos soltos e tubulares curtos	50 a 160	Tubulares médios
110 a 200	Arcos soltos	180 a 200	Arcos soltos

Quanto ao tipo dos cavacos, a classificação para os dois materiais foi contínuo. A característica dúctil dos materiais e sua deformação plástica aparente na superfície superior do cavaco são evidências de grandes deformações desenvolvidas na zona de cisalhamento primário, caracterizando-os como cavacos contínuos.

A forma dos cavacos em arcos soltos, colhidos em algumas condições de corte, ocorreu devido à quebra periódica destes quando, durante sua formação, encontram a superfície da peça a ser usinada, a superfície de folga principal ou o carro porta-ferramenta.

4.5.2. Coloração dos cavacos

A Tabela 4.11 mostra a influência da velocidade de corte na coloração do cavaco. Estes foram classificados em acinzentados, amarelados e azulados.

Tabela 4.11 – Influência da velocidade de corte na coloração do cavaco. Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

Coloração	Material I	Coloração	Material II
Acinzentada		Acinzentada	
	$V_c: 10 \text{ m/min a } 80 \text{ m/min}$		$V_c: 10 \text{ m/min a } 40 \text{ m/min}$
Cinza/ Amarelada		Acinzentada	
	$V_c: 90 \text{ m/min a } 100 \text{ m/min}$		$V_c: 50 \text{ m/min a } 160 \text{ m/min}$
Azulada		Amarela/ Azulada	
	$V_c: 110 \text{ m/min a } 200 \text{ m/min}$		$V_c: 180 \text{ m/min a } 200 \text{ m/min}$

Os esforços de corte necessários para a formação do cavaco, especialmente no plano de cisalhamento primário, influenciam a temperatura do cavaco e, por conseguinte, sua coloração. Com o aumento da velocidade de corte, o padrão de coloração observado para ambos os materiais foi, de acordo com Luong e Heijkoop (1981):

- Cavacos de coloração acinzentada para velocidades de corte mais baixas, caracterizando baixas temperaturas do cavaco, até 200 °C.
- Cavacos de coloração amarelada para velocidades de corte intermediárias, caracterizando temperaturas do cavaco da ordem de 200 °C a 500 °C.
- Cavacos de coloração preto-azulada para velocidades de corte mais altas, caracterizando baixas temperaturas do cavaco superiores a 500 °C.

4.5.3. Influência do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos

A Figura 4.25 e a Figura 4.26 são mapas de cavacos mostrando a influência do avanço e da profundidade de corte na forma e no grau de recalque dos cavacos para o material I e material II, respectivamente.

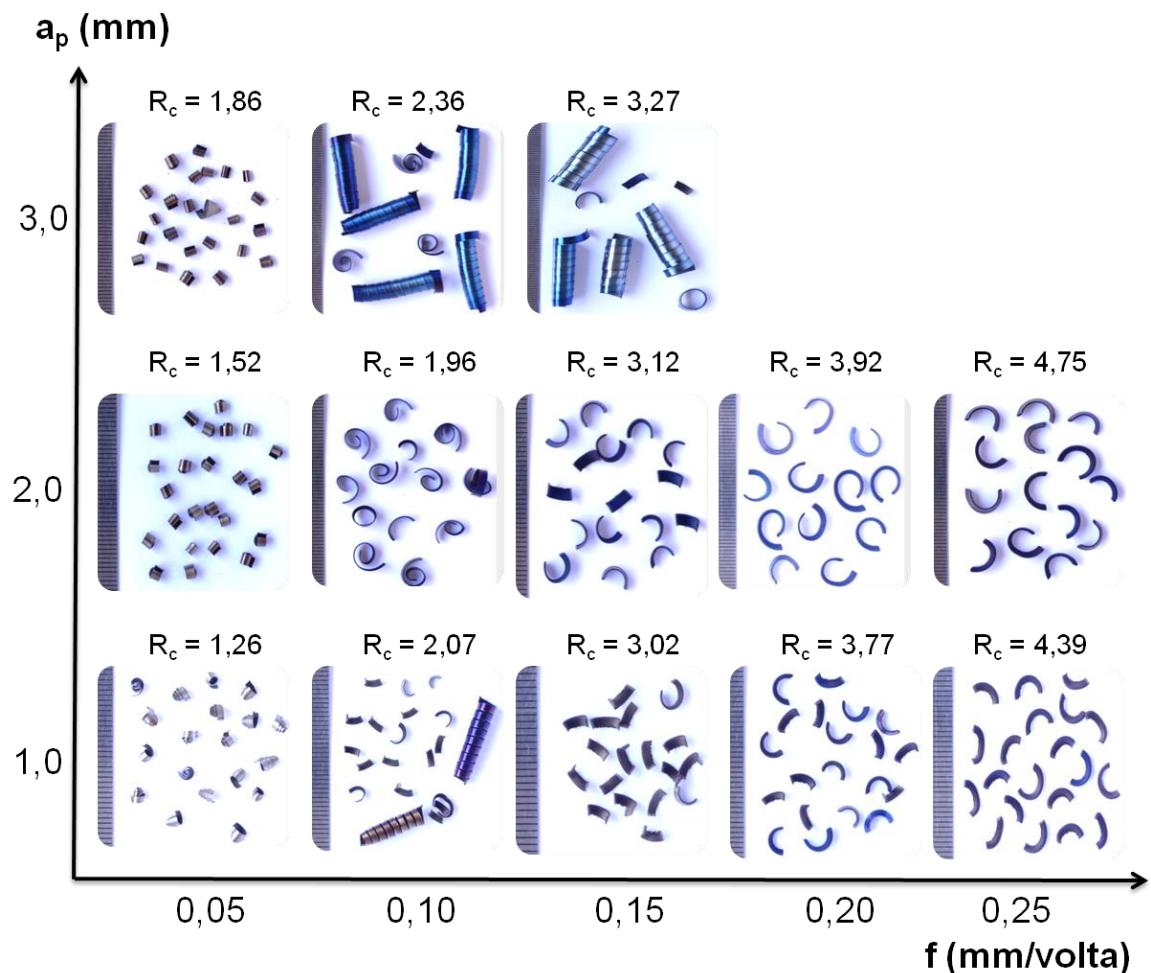


Figura 4.25 – Influência do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos para o material I. Condição de corte: $V_c = 140$ m/min

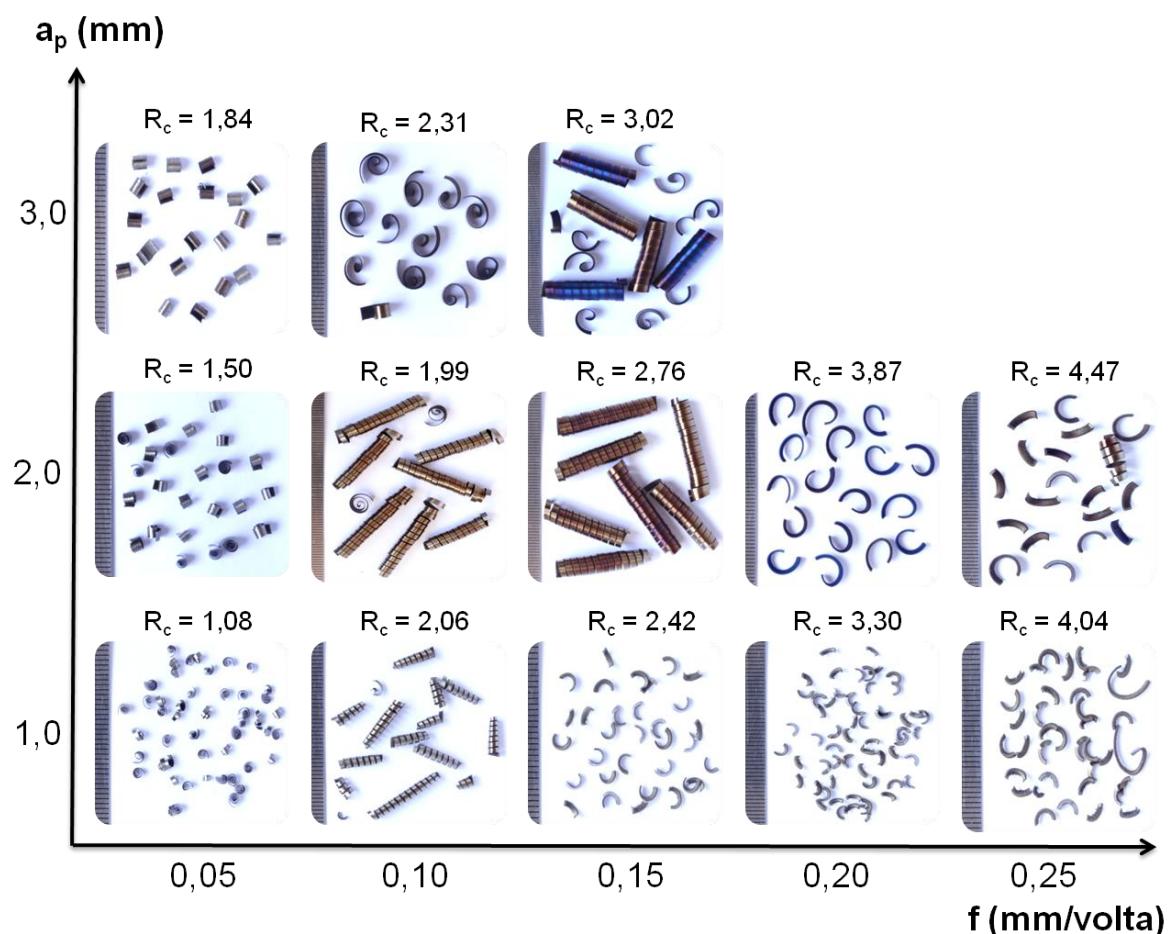


Figura 4.26 – Influência do avanço e da profundidade de corte na forma dos cavacos para o material II. Condição de corte: $V_c = 140$ m/min

Os aumentos do avanço e da profundidade de corte geraram cavacos mais robustos, devido ao aumento da seção de corte, além de cavacos com maior grau de recalque, indicando maiores quantidades de deformação no plano de cisalhamento primário.

Para os dois materiais foram obtidos cavacos na forma de espirais curtos, tubulares e arcos soltos, dependendo da condição de corte. Os valores de grau de recalque foram menores para o material II em praticamente todas as condições ensaiadas. Para os dois materiais, a variável mais influente no grau de recalque dos cavacos foi o avanço.

4.5.4. Grau de recalque dos cavacos

Os valores de grau de recalque calculados em função da velocidade de corte são apresentados na Figura 4.27, para os dois materiais estudados.

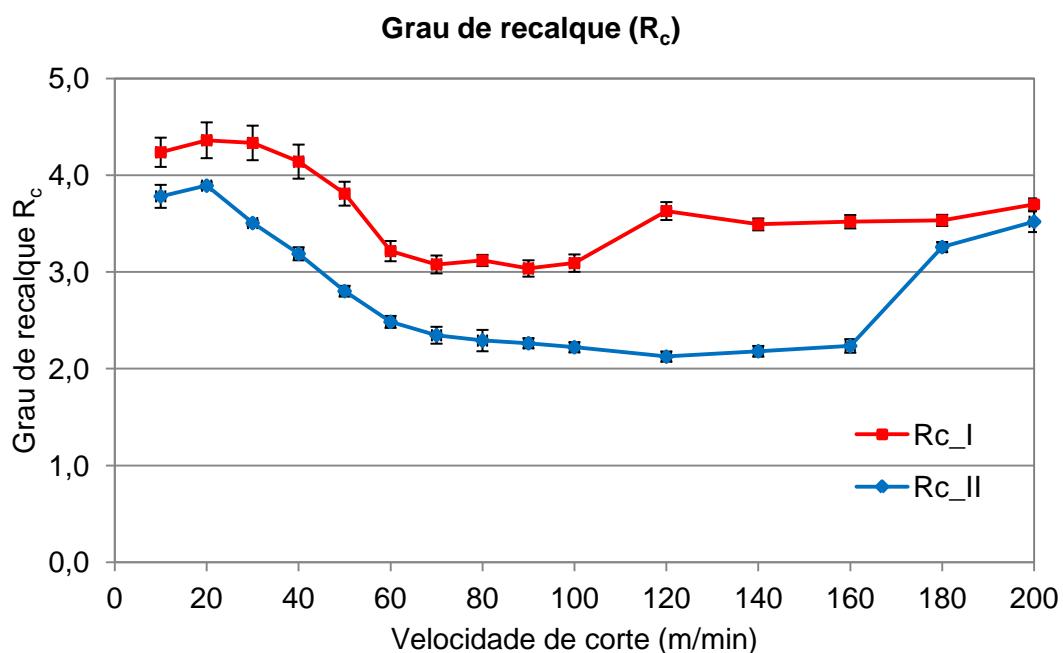


Figura 4.27 – Variação do grau de recalque pela velocidade de corte para material I e material II. Condições de corte: $f = 0,15 \text{ mm/volta}$ e $a_p = 2,0 \text{ mm}$

Em toda faixa de velocidades de corte o material I apresentou maiores valores de grau de recalque, evidenciando maiores deformações na usinagem. O grau de recalque é fortemente influenciado pelas condições da interface cavaco-ferramenta. Menores valores de grau de recalque estão associados ao maior ângulo de cisalhamento primário e a menor resistência ao movimento do cavaco sobre a superfície de saída da ferramenta. Desta forma, o material II apresentou melhores resultados.

4.5.5. Considerações finais

Os cavacos dos dois materiais foram classificados quanto ao tipo em cavacos contínuos e, quanto à forma, em arcos e/ou tubular. Os cavacos formados na usinagem do material II foram mais interessantes em termos grau de recalque, coloração e, apesar de apresentar na forma tubular em algumas condições de corte, houve um bom controle dos cavacos em todos os ensaios.

4.6. Análise da interface cavaco-ferramenta

As superfícies de saída das ferramentas de corte foram avaliadas utilizando microscopia eletrônica de varredura e análise de composição química através de EDS.

O perfil da superfície de saída na usinagem do material I com as condições de corte $V_c = 28$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm é mostrado na Figura 4.28a. O perfil da superfície de saída na usinagem do material II com as condições de corte $V_c = 55$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm é mostrado na Figura 4.28b.

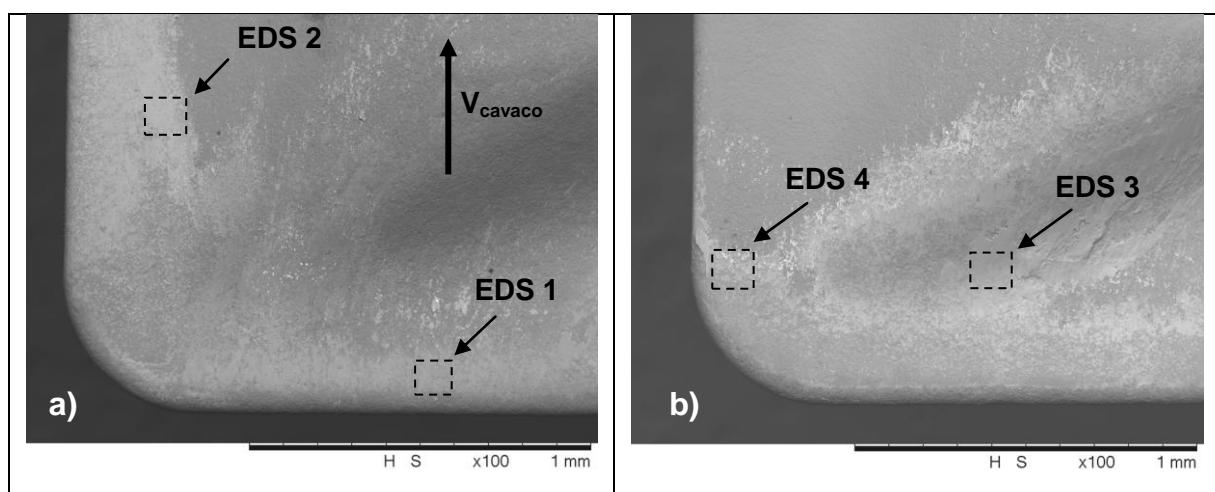


Figura 4.28 – Superfície de saída da ferramenta de corte: a) ensaio do material I, $V_c = 28$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm; b) ensaio do material II, $V_c = 55$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm. Direção do cavaco representada por V_{cavaco}

A Tabela 4.12 apresenta os resultados das análises de EDS realizadas na superfície de saída das ferramentas de corte. Os locais das análises estão numerados de acordo com as indicações da Figura 4.28.

Tabela 4.12 – EDS realizado na superfície de saída das ferramentas de corte para o material I (EDS 1 e EDS 2) e para o material II (EDS 3 e EDS 4) conforme Figura 4.28

Composição química (% em peso)						
EDS	C	N	S	Ti	Mn	Fe
1	9,3	6,5	15,4	33,1	31,1	4,5
2	9,2	-	19,2	3,4	41,8	26,4
3	13,2	-	25,5	3,7	56,1	1,6
4	10,9	8,6	18,9	17,8	34,4	9,5

Observa-se que, para ambos os materiais, houve presença de enxofre e manganês em regiões próximas à aresta principal de corte, se estendendo para dentro da ferramenta. A região do EDS 3 apresenta uma nítida camada de material da peça aderido, rica em sulfeto de manganês. Esta camada influencia positivamente a usinagem, sendo responsável pela melhoria de usinabilidade nos aços de corte fácil ressulfurados.

Os perfis de superfície de saída mostrados na Figura 4.29 mostram ferramentas de corte utilizadas na usinagem do material I (a) e material II (b). As condições de corte para ambos os ensaios foram: $V_c = 100$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm.

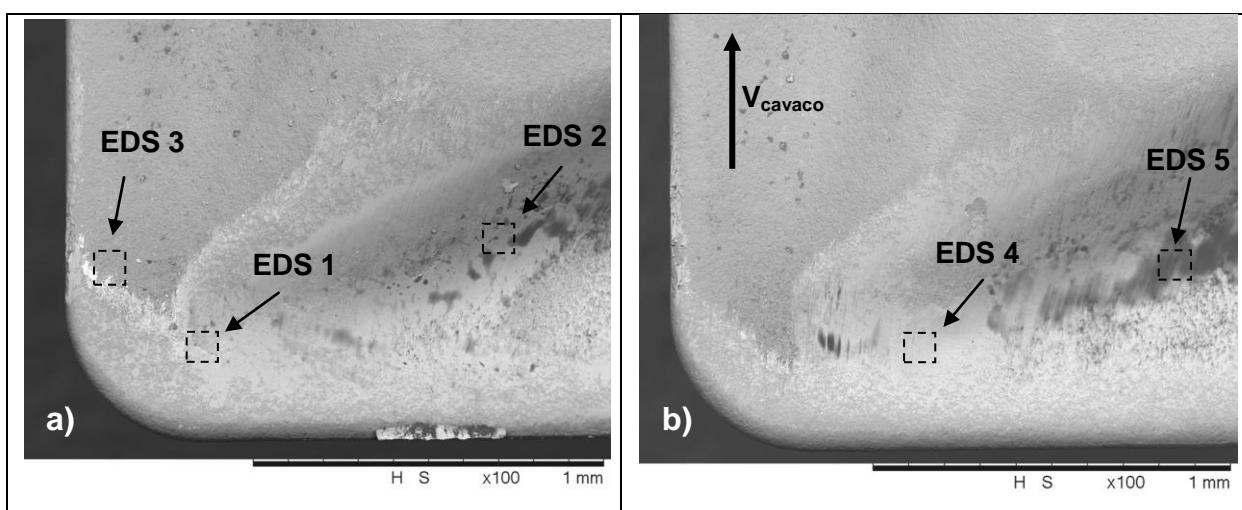


Figura 4.29 – Superfície de saída de ferramentas de corte: a) ensaio do material I, $V_c = 100$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm; b) ensaio do material II, $V_c = 100$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm. Direção do cavaco representada por V_{cavaco}

A Tabela 4.13 apresenta os resultados das análises de EDS realizadas na superfície de saída das ferramentas de corte. Os locais das análises estão numerados de acordo com as indicações da Figura 4.29.

Tabela 4.13 – EDS realizado na superfície de saída das ferramentas de corte para o material I (EDS 1, EDS 2 e EDS 3) e para o material II (EDS 4 e EDS 5) conforme Figura 4.29

Composição química (% em peso)						
EDS	C	N	S	Ti	Mn	Fe
1	15,2	-	25,4	6,6	48,6	4,0
2	38,2	-	12,7	1,7	45,5	1,9
3	10,3	14,3	5,5	38,4	11,9	8,9
4	13,4	-	26,2	3,4	55,9	1,2
5	70,3	-	9,0	2,6	17,2	0,9

Houve presença de enxofre e manganês, além de ferro e carbono na região apóis a aresta de corte no sentido de deslocamento do cavaco. Esta camada de material da peça aderido sobre a superfície de saída ocorreu na usinagem dos dois materiais estudados.

Os perfis de superfície de saída mostrados na Figura 4.30 mostram ferramentas de corte utilizadas na usinagem do material I (a) e material II (b). As condições de corte para ambos os ensaio foram: $V_c = 185$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm.

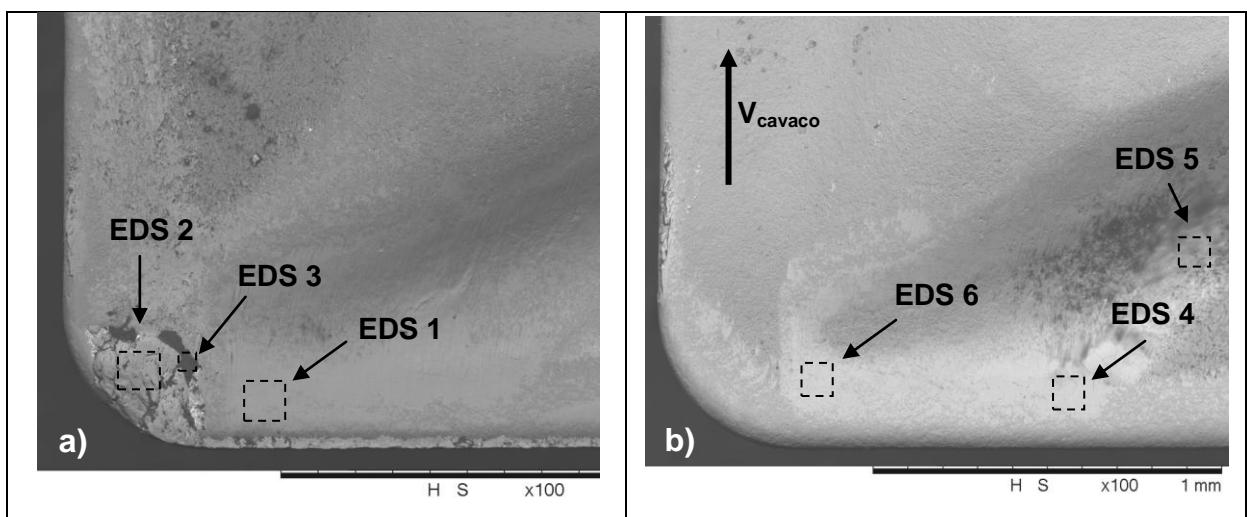


Figura 4.30 – Superfície de saída das ferramentas de corte: a) ensaio do material I, $V_c = 185$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm; b) ensaio do material II, $V_c = 185$ m/min, $f = 0,15$ mm/volta e $a_p = 2,0$ mm. Direção do cavaco representada por V_{cavaco}

A Tabela 4.14 apresenta os resultados das análises de EDS realizadas na superfície de saída das ferramentas de corte, de acordo com as indicações da Figura 4.30.

Tabela 4.14 – EDS realizado na superfície de saída das ferramentas de corte para o material I (EDS1 e EDS 2) e para o material II (EDS 3, EDS 4 e EDS 5) conforme Figura 4.30

Composição química (% peso)					
EDS	C	S	Ti	Mn	Fe
1	11,9	24,9	10,5	49,6	2,6
2	20,8	0,9	-	1,3	77,1
3	61,0	7,3	7,4	13,2	11,0
4	12,3	28,8	1,8	55,8	1,3
5	55,4	8,8	12,8	20,6	2,4
6	13,3	29,5	1,7	54,0	1,5

Observa-se a presença de enxofre e manganês nas regiões indicadas, além de ferro e carbono. Isto ocorreu na usinagem dos dois materiais estudados.

Foram encontradas resquícios de chumbo apenas em situações pontuais. A Figura 4.31 apresenta análises de duas ferramentas de corte utilizadas na usinagem do material II com velocidade de corte de 50 m/min (a) e 250 m/min (b). Os resultados das análises de EDS para estas ferramentas de corte são apresentados na Tabela 4.15.

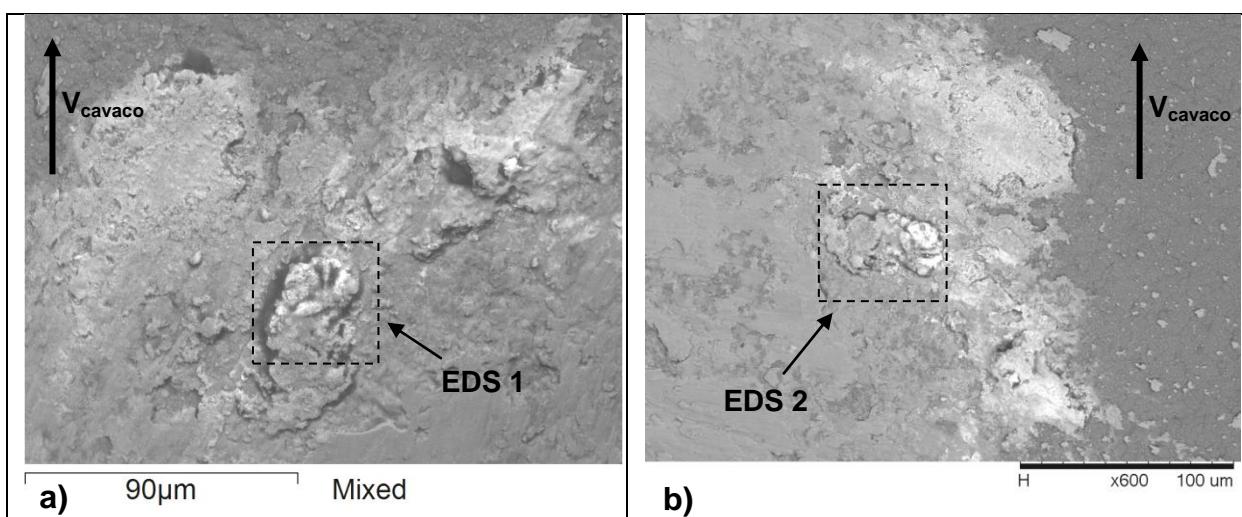


Figura 4.31 – Detalhe na superfície de saída de ferramentas de corte utilizadas no ensaio do material II: a) condições de corte: $V_c = 50$ m/min, $f = 0,20$ mm/volta e $a_p = 1,0$ mm; b) condições de corte: $V_c = 250$ m/min, $f = 0,20$ mm/volta e $a_p = 1,0$ mm. Direção do cavaco representada por V_{cavaco}

Tabela 4.15 – EDS realizados na superfície de saída das ferramentas de corte para o material II conforme Figura 4.30

Composição química (% peso)					
EDS	C	Pb	S	Mn	Fe
1	41,2	39,6	6,2	9,4	3,0
2	-	79,2	6,3	10,4	4,2

O chumbo está presente na composição do material II na forma de inclusões metálicas e possui temperatura de fusão de 327 °C. As evidências pontuais de chumbo indicam que a atuação do chumbo pode ocorrer na forma líquida devido às temperaturas de corte presentes na interface cavaco-ferramenta. As temperaturas de usinagem obtidas em torno de 600 °C para o material II a velocidade de corte de 200 m/min apoiam este mecanismo de atuação.

Entretanto, a análise da superfície de saída das ferramentas revela que é duvidoso propor a presença de uma camada de chumbo fundida sobre a superfície da ferramenta,

lubrificando a interface cavaco-ferramenta. Talvez o chumbo esteja facilitando a usinagem através da fragilização pela formação de microtrincas decorrente do metal líquido e/ou pelo “efeito de entalhe”, que aumenta localmente a tensão de cisalhamento aplicada na zona de formação do cavaco devido às diferentes propriedades mecânicas da inclusão de chumbo e da matriz ferrítica do aço.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Através dos ensaios de caracterização e ensaios de usinagem realizados com o material I (aço de corte fácil ressulfurado ABNT 1214) e com o material II (aço de corte fácil ao chumbo ABNT 12L14), pode-se concluir:

- Os dois materiais apresentaram dureza e propriedades mecânicas similares, com o material II apresentando resistência mecânica ligeiramente superior e ductilidade ligeiramente inferior ao material I.
- Os dois materiais apresentaram comportamento da força de usinagem característico de materiais que apresentam aresta postiça de corte (APC).
- A velocidade de corte crítica para o material I foi de aproximadamente 55 m/min.
- A velocidade de corte crítica para o material II foi de aproximadamente 100 m/min.
- Para o material I, as variáveis mais influentes na força de corte, segundo a análise estatística realizada, foram a profundidade de corte (a_p) e o avanço (f), nesta ordem.
- Para o material II, as variáveis mais influentes na força de corte, segundo a análise estatística realizada, foram a profundidade de corte (a_p), o avanço (f), a interação entre avanço e profundidade de corte ($a_p \times f$) e a velocidade de corte (V_c), nesta ordem.
- Para o material I, os parâmetros de rugosidade (R_a , R_t , R_q e R_z) foram influenciados pela presença da APC na faixa de velocidade de corte de 11 m/min a 55 m/min.
- Para o material II, os parâmetros de rugosidade (R_a , R_t , R_q e R_z) foram influenciados pela presença da APC na faixa de velocidade de corte de 22 m/min a 100 m/min, para o material II.
- Em geral, os valores de rugosidade R_a foram abaixo de 5 μm para os dois materiais, independente da velocidade de corte empregada.

- Acima da velocidade de corte crítica, os parâmetros de rugosidade de ambos os materiais tendem a se estabilizar, sendo influenciados pelo avanço e raio de ponta da ferramenta de corte.
- Para os dois materiais, a variável mais influente na rugosidade R_a , segundo as análises estatísticas realizadas, foi o avanço (f).
- O material I apresentou maiores temperaturas de usinagem que o material II em toda faixa de velocidade de corte ensaiada.
- Para o material I, os cavacos foram classificados em arcos soltos e tubulares curtos, de acordo com a condição de corte empregada.
- Para o material II, os cavacos foram classificados em arcos soltos e tubulares médios, de acordo com a condição de corte empregada.
- Para os dois materiais, os cavacos foram classificados quanto ao tipo em cavacos contínuos.
- Para os dois materiais, a coloração dos cavacos pareceu indicar a temperatura dos cavacos durante o corte. Cavacos acinzentados indicaram temperaturas do cavaco mais brandas, cavacos amarelados indicaram temperaturas intermediárias e cavacos azulados indicaram maiores temperaturas.
- Para os dois materiais, o aumento do avanço e da profundidade de corte produziu cavacos mais robustos e de maiores graus de recalque.
- Para os dois materiais, a variável mais influente na forma e no grau de recalque dos cavacos foi o avanço.
- O material II apresentou melhores resultados em termos de grau de recalque que o material I.
- Para os dois materiais foram observados presença de enxofre e manganês, além de ferro e carbono, na superfície de saída de ferramentas de corte utilizadas.
- Para os dois materiais, o sulfeto de manganês atuou na interface cavaco-ferramenta através da formação de uma camada de baixa resistência ao cisalhamento na superfície de saída da ferramenta de corte.
- Para o material II, o chumbo foi encontrado apenas em situações pontuais sobre a superfície de saída da ferramenta de corte.
- O mecanismo de atuação do chumbo é incerto. Este elemento químico pode ter atuado na interface cavaco-ferramenta na forma líquida, devido ao baixo ponto de fusão, apresentando-se como um lubrificante na interface. Entretanto, o chumbo pode estar facilitando a usinagem através da fragilização pela formação de microtrincas decorrente do metal líquido e/ou pelo “efeito de entalhe”.

Seguem abaixo sugestões para trabalhos futuros:

- Analisar a usinabilidade do aço de corte fácil em processos de fresamento e furação, com aplicação de diferentes mecanismos de lubri-refrigeração.
- Estudar outras variáveis que caracterizam a usinabilidade do aço de corte fácil 12L14: vida da ferramenta, condições de interface através de ensaios de parada-rápida (*quick-stop*), caracterização das inclusões metálicas e não metálicas, etc.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 4287: Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.** Setembro de 2002.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 4288: Especificações geométricas de produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Regras e procedimentos para avaliação de rugosidade.** Setembro de 2008.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR 6152: Materiais Metálicos – Determinação das Propriedades Mecânicas à Tração.** Maio de 2002.

ABORN, R. A. Role Additives in the Machinability of Steel. **International Symposium on Influence of Metallurgy on Machinability of Steel.** Tokyo, Japan, p. 381-395, 1977.

ALMEIDA, M. C. **Estudo do Efeito dos Elementos Residuais (Cr, Ni e Cu) na usinabilidade do Aço-de-corte-fácil SAE 12L14.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Itajubá. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Itajubá, 2005.

AMORIM, H. J.; MOMBRU, R. G.; COLEMBERGUE, L. A.; SOARES, R. B.; KUNRATH NETO, A. O. **A Influência da Adição de Bismuto na Usinabilidade de Aços Ressulfurados.** 2º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação, ABCM, 18 a 21 de Maio de 2003, Uberlândia-MG.

APPLE, C. A. The Relationship between Inclusions and the Machinability of Steel. **Mechanical Working and Steel Processing Conference, Iron and Steel Society**, pp. 415 - 429, 1989.

AKASAWA, T.; SAKURAI, H.; NAKAMURA, M.; TANAKA, T.; TANAKO, K. Effects of free-cutting additives on the machinability of austenitic stainless steels. **Journal of Materials Processing Technology** 143 - 144 (2003) 66 - 71.

ASM HANDBOOK. **Properties and selection: irons, steels, and high-performance alloys.** Vol. 1, 1990, pp. 145 - 155 (ASM International).

BARRETOS, M. S. **Influência das inclusões metálicas de bismuto na tenacidade e fadiga de um aço SAE 1045 com usinabilidade melhorada.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Escola de Engenharia. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais. Porto Alegre, 1999.

BARRETOS, M.; EVANGELISTA, N.; CAPPUCIO, G.; BAS, J. **Aços de Corte Livre com Inclusões Metálicas: uma Tecnologia CORFAC®.** Trabalho a ser apresentado no 54º Congresso da ABM, 25 a 28 de julho de 1999, São Paulo-SP, Brasil.

BELLOT, J. **Aciers pour construction mécanique – Problèmes de mise en forme par usinage.** CESSID – Centre d'études supérieures de la sidérurgie française. Mai, 1978.

BORCHARDT, I. G.; GOMES, A. F. **Termometria Termoelétrica – Termopares.** Ed. Sagra S/A, Porto Alegre, 1979.

BRAMEC INDUSTRIAL Ltda. São Paulo-SP, 2013. Disponível em:
<http://www.bramec.com.br/> Acessado em julho de 2013.

CHIAVERINI, V. **Aços e Ferros Fundidos**, 6ª Edição, ABM, São Paulo, 2005.

DA SILVA, M. B. **Lubrication in Metal Cutting Under Built-up Edge Conditions.** Tese de Doutorado. University of Warwick. Warwick, Inglaterra, 1998.

DIN 6584 (ENTWRF). **Kräfte und Leistungen.** Berlim, Beuthvertrieb GmbH, outubro, 1963.

DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C.; COPPINI, N. L. **Tecnologia da Usinagem dos Materiais.** São Paulo, Artliber Editora, 2008, 6ª edição, 262p.

EVANGELISTA LUIZ, N. **Usinabilidade do Aço de Corte-Fácil Baixo Carbono ao Chumbo ABNT 12L14 com Diferentes Níveis de Elementos Químicos Residuais (Cromo, Níquel e Cobre).** Tese de Doutorado. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia-MG, Brasil, 2007.

EVANGELISTA LUIZ, N., MACHADO, A. R. **Development Trends and Review of Free-Machining Steels.** Review Paper, DOI: 10.1243/09544054JEM861, 2007.

FERRARESI, D. **Fundamentos da Usinagem dos Metais**, Editora Edgard Blücher Ltda, São Paulo, 1970, 751p.

FERRARI, A. V. F. **A evolução dos tornos automáticos: do came ao CNC.** Material didático produzido sob o patrocínio da Ergomat Ind. e Com. Ltda., 2006. Disponível em: <<http://www.ergomat.com.br/treinamento.htm>> Acessado em julho de 2014.

GRANDO, G. C. S. **Estudo da Influência do Bismuto Sobre a Usinabilidade de Aços DIN-20MnCr5.** Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre-RS, 2012.

HASHIMURA, M.; HIRATA, H.; KANISAWA, H.; NAITO, K. Development of Lead Free Micro Alloyed Steel for Crank Shafts. **Nippon Steel Technical Report**, nº 88 July, p. 76 - 80, 2003.

HASHIMURA, M.; MIZUNO, A.; MIYANISHI, K. Development of Low-carbon Lead-Free Free-Cutting Steel Friendly to Environment. **Nippon Steel Technical Report**, nº 96 July, p. 45 - 49, 2007.

HOLAPPA, L. E. K.; HELLE, A. S. Inclusion Control in High-Perfomance Steels. **Journal of Materials Processing Technology**, 53 (1995) 177 - 186.

ISO (International Standard Organization). **Tool Life Testing with Single-Point Turning Tools.** ISO 3685, 1993.

JIANG, L.; CUI, K.; HÄNNINEN, H. Effects of the Composition, Shape Factor and Area Fraction of Sulfide Inclusions on the Machinability of Re-sulfurized Free-machining Steel. **Journal of Materials Processing Technology**, pp. 160 - 165, 1996.

KAMINISE, A. K. **Estudo da Influência do Material do Porta-ferramenta sobre as Temperaturas de Usinagem no Torneamento.** 2012, 105 f., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

KATO, T.; ABEYAMA, S.; KIMURA, A.; NAKAMURA, S. **Free Cutting Steel Containing Sulfide Inclusion Particles with Controlled Aspect, Size and Distribution.** USA, Patent 4, 279, 646. July 21, 1981. Disponível em: <<http://www.google.com/patents/US4279646>> Acessado em julho de 2013.

KLUJSZO, L. A. C.; SOARES, R. B. **Aços de Usinabilidade Melhorada CORFAC® na Gerdau Açominas S.A. Aços Finos Piratini.** 2004. Disponível em: <www.gerdau.com.br/arquivos-tecnicos> Acesso em julho de 2013.

KLUJSZO, L. A. C.; SOARES, R. B. **Elementos que melhoram a usinabilidade dos aços.** Revista Máquinas e Metais, XLI (471), pp.76 - 99, 2005.

LESKOVAR, P., GRUM, J. The metallurgical aspects of machining. **CIRP Reports and News**, Ann. CIRP, 1986, 35(2), 537 - 550.

LUONG, L. H. S.; HEJKOOP, T. The Influence of the Scale on Friction in Hot Metal Work. **Wear**, 71, pp. 93 - 102.

LEADTECH PRECISION. Catálogo Eletrônico. 2009. Disponível em:<<http://leadtechprecision.com/index-2.html>> Acesso em dezembro de 2013.

MACHADO, Á. R.; DA SILVA, M. B. **Usinagem dos Metais.** Laboratório de Ensino e Pesquisa em Usinagem. Faculdade de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Versão 8. Abril de 2004, 257p.

MACHADO, Á. R.; ABRÃO, A. M.; COELHO, R. T.; DA SILVA, M. B. **Teoria da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Blucher, 2011, 2^a Edição, 397p.

MILLS, B. Effect of Residual Elements on the Machinability of Leaded Free Machining Steels. **Philosophical Transactions of the Royal Society A.** Doi: 10.1098/rsta.1980.0077, pp. 87 - 88. Disponível em: <<http://rsta.royalsocietypublishing.org/>> Acesso em julho de 2014.

NAVES, V. T. G.; EVAGELISTA LUIZ, N.; MACHADO, Á. R.; DANTAS, N. O. **Calibração de um Sistema Termopar Ferramenta-Peça para Medição de Temperatura de Usinagem.**

16º POSMEC - Simpósio de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Uberlândia. Faculdade de Engenharia Mecânica. Uberlândia, 2006.

PIMENTEL, M. F. **Influência da Composição Química e da Microestrutura na Usinabilidade do Aço de Corte Fácil com Adição de Chumbo (SAE12L14).** Dissertação de mestrado. Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá-SP, 2006.

PRADO, E. L., PIMENTEL, M. F. **Usinabilidade de Aços de Corte Fácil baixo carbono.** Revista Siderúrgica Brasil, Grips Editora – Ano 5, Nº 20, setembro/outubro de 2004.

SANTOS, S. C.; SALES, W. F. **Aspectos Tribológicos da Usinagem dos Materiais.** São Paulo: Artliber Editora, 2007.

SANTOS JR., M. C. **Emprego de Ferramentas Estatísticas para Avaliação da Usinabilidade de Ligas de Alumínio.** 2012, 230 f., Tese de Doutorado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

SOMEKAWA, M.; KAISO, M.; MATSUSHIMA, Y. Free Cutting Non-Lead Steels. **Kobelco Techonology** Review nº 24, pp. 9 - 13, 2001.

SOUSA, M. N.; EVANGELISTA LUIZ, N.; OLIVEIRA, D. C.; BARROZO, M. A. S.; MACHADO, Á. R. Effect of residual chemical elements (Cr, Ni and Cu) on machinability of leaded low carbon free machining steels. **Materials Science and Technology**, Volume 28, Number 2, pp. 220 - 226 (7), February 2012.

STEPHENSON, D. A., AGAPIOU, J. S. **Metal Cutting Theory and Practice.** 2nd ed. New York, Marcel Dekker, Inc., 2006.

TANAKA, R.; YAMANE, Y.; SEKIYA, K.; NARUTAKI, N.; SHIRAGA, T. Machinability of BN free-machining steel in turning. **International Journal of Machine Tools & Manufacture.** 47 (2007) 1971 - 1977.

TRAUTEC MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS. Indaiatuba-SP, 2014. Disponível em: < <http://www.trautecmaquinas.com.br/>> Acesso em julho de 2014.

TRENT, E. M., WRIGHT, P.K. **Metal Cutting**. 4rd Edition, Butterwords, London, ISBN 0408108568, 2000.

TROIANI, F. **Aços Ressulfurados de Corte Fácil**. Revista "O Mundo da Usinagem". Publicação da Divisão Coromant da Sandvik do Brasil, ISSN 1518-6091, pp.19-20, 2004. Disponível em: < <http://www.omundodausinagem.com.br/pdf/17.pdf> >

YAGUCHI, H. Effect of Soft Additives (Pb, Bi) on Formation of Built-up-edge. **Materials Science and Technology**, v. 4, pp. 926 - 931, October 1988.

YAGUCHI, H. Effect of Soft Additives (Pb/Bi) on Machinability of Low Carbon Resulphurised Free Machining Steels. **Materials Science and Technology**, v. 5, n° 3, pp. 255 - 267(13), March 1989.