

UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
COORDENADORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM MATERIAIS

Variação Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças
Usinadas por Torneamento

Marcelo Evandro Tedesco

Orientador:

Prof. Dr. Eng Rodrigo Panosso Zeilmann

Co-Orientador:

Prof. Dr. Eduardo Kirinus Tentardini

Caxias do Sul, 2007

Marcelo Evandro Tedesco

Varição Dimensional e Microestrutural do Aço AISI 4140 em Peças Usinadas por Torneamento. “Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando à obtenção do grau de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais”, com a orientação do Prof. Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann, e a co-orientação do Prof. Dr. Eduardo Kirinus Tentardini.

Caxias do Sul, 2007

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Universidade de Caxias do Sul
UCS - BICE - Processamento Técnico

T256v Tedesco, Marcelo Evandro
Variação dimensional e microestrutural do aço AISI 4140
em peças usinadas por torneamento / Marcelo Evandro Tedesco,
2007.
xii, 69 f. : il. ; 30 cm.

Dissertação (Mestrado) – Universidade de Caxias do Sul,
Programa de Pós-Graduação em Materiais, 2007.
“Orientação: Prof. Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann”

1. Aço. 2. Usinagem - aço. 3. Lubri-refrigeração. I. Título.

CDU : 669.14

Índice para o catálogo sistemático:

1. Aço	669.14
2. Usinagem – aço	621.98
3. Lubri-refrigeração	621.895

Catalogação na fonte elaborada pela bibliotecária
Márcia Servi Gonçalves – CRB 10/1500

**“Variação dimensional e microestrutural do aço AISI 4140
em peças usinadas por torneamento”**

Marcelo Evandro Tedesco

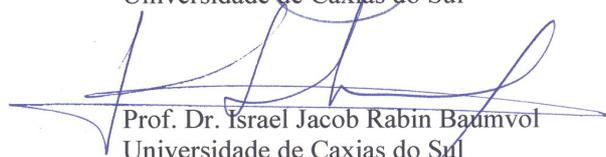
Dissertação de Mestrado submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia e Ciência dos Materiais, Área de Concentração: Processamento e Simulação de Materiais.

Caxias do Sul, 05 de junho de 2007.

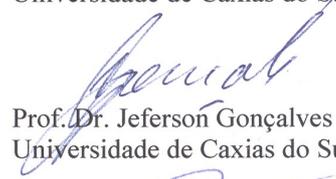
Banca Examinadora:



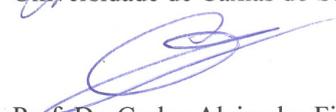
Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann (Orientador)
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Israel Jacob Rabin Baumvol
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Jeferson Gonçalves
Universidade de Caxias do Sul



Prof. Dr. Carlos Alejandro Figueroa
Universidade de Campinas

Dedico esta dissertação aos meus pais, Venclino Tedesco e Teresinha Pandolfo Tedesco, meus irmão Marcio Tedesco e Juliana Teresinha Tedesco e a minha namorada Eveline Angélica Balestro.

AGRADECIMENTOS

Várias pessoas me ajudaram e me deram força no decorrer deste trabalho, porém, algumas merecem destaque especial:

Aos meus pais, Venclino e Teresinha; irmãos Marcio e Juliana pelo incentivo, apoio e amor dedicado em todos os anos de minha vida.

A minha namorada Eveline Angélica Balestro pela compreensão nos momentos ausentes, pelo incentivo, amor, carinho e apoio demonstrados.

Aos Professores Dr. Eng. Rodrigo Panosso Zeilmann e Dr. Eduardo Kirinus Tentardini, respectivamente orientador e co-orientador deste trabalho, pela amizade, apoio e dedicação.

Ao Prof. Dr. Israel Jacob Rabin Baumvol, pela amizade e força.

Ao Prof. Dr. Walter Lindolfo Weingaertner pelas correções e troca de informações técnicas, que muito contribuíram para o enriquecimento teórico e prático deste trabalho.

A Arwi – Distribuidor Sandvik - pelo fornecimento das ferramentas para usinagem.

A Maffeis Ferramentas, em especial ao Sr. Luis Carlos Maffeis, Sr. André Rossato e Sr. Rafael Vaccari, pela usinagem dos corpos-de-prova.

Ao Professor M. Sc. Eng. Gilmar Tonietto pelo tratamento térmico dos corpos-de-prova, Prof. Dr. Eduardo Blando pelas medições de nano-dureza e Eng. Cesar Aguzzoli pelo auxílio nas análises no MEV.

Aos colegas M. Eng. Juliano Oliveira, Eng. Gerson Nicola e M. Eng. Deives Baretta pela amizade e colaborações que ajudaram no trabalho.

Aos bolsistas do Grupo de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul – Alfredo, Andréia, Anderson, Diego, Eduardo, Elizangela, Gabriel, Kelen, Juliana, Maurício e Ricardo, e ao pessoal do LESTT – UCS pela amizade, colaboração e apoio durante o trabalho.

A todos que de uma forma ou outra contribuíram para realização deste trabalho, o meu agradecimento.

ÍNDICE

1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	4
2.1 Aços para beneficiamento	4
2.1.1 Estrutura e classificação dos aços	4
2.1.1.1 Aço AISI 4140.....	5
2.1.2 Microestrutura.....	6
2.1.3 Tratamento térmico.....	8
2.2 Torneamento.....	10
2.2.1 Mecânica do corte	12
2.2.2 Calor gerado na usinagem.....	13
2.2.3 Erros e tolerâncias na fabricação	14
2.2.4 Influência de aplicações de fluídos lubri-refrigerantes.....	16
2.3 Critérios de usinabilidade.....	18
2.3.1 Vida da ferramenta.....	19
2.3.2 Força de usinagem	19
2.3.3 Qualidade da superfície usinada	19
2.3.4 Formação de cavaco.....	20
2.4 Fatores influentes na usinabilidade do aço.....	20
2.4.1 Propriedades do material.....	21
2.4.2 Efeito dos elementos de liga	22
2.4.3 Tratamento térmico.....	23
2.4.4 Integridade da superfície usinada.....	23
2.4.4.1 Textura.....	24
2.4.4.2 Rugosidade	26

2.5 Técnicas de caracterização	28
2.5.1 Medição tridimensional	29
2.5.2 Caracterização da rugosidade	30
2.5.3 Análise metalográfica e microscopia Ótica	31
2.5.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	34
2.5.5 Micro e nanodureza.....	35
3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	38
3.1 Material ensaiado	38
3.2 Preparação dos corpos-de-prova	38
3.2.1 Tratamento térmico aplicado	39
3.3 Máquinas e equipamentos	40
3.3.1 Ferramenta	40
3.3.2 Máquina-ferramenta.....	41
3.4 Condições de usinagem dos corpos-de-prova	41
3.5 Análises experimentais.....	42
3.5.1 Desvio dimensional, circularidade e cilindridade	42
3.5.2 Qualidade da superfície usinada	43
3.5.3 Análises metalográficas e microscopia ótica	43
3.5.4 Microscopia eletrônica de varredura.....	44
3.5.5 Micro e nanodureza.....	44
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 Desvio dimensional, circularidade e cilindridade	46
4.2 Qualidade da superfície usinada.....	51
4.3 Metalografias e microscopia ótica.....	54
4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	56

4.5 Micro e nanodureza.....	59
5. CONCLUSÕES.....	61
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	63
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Austenita ($Fe\gamma$ - CFC), (b) Ferrita ($Fe\alpha$ - CCC), (c) Célula tetragonal de corpo centrado (martensita) (Callister, 2002).....	7
Figura 2 - Camada modificada durante o processo de usinagem (Bethke, 2006).....	8
Figura 3 – Representação de torneamento (Ferraz, 2002).....	11
Figura 4 - Secção simulada da superfície de uma peça com suas camadas (SME, 1987).....	11
Figura 5 - Geração de calor e temperaturas na usinagem (König & Klocke, 2002).....	14
Figura 6 - Variação dimensional pelo comprimento de corte (Dhar, 2002).....	15
Figura 7 - Rugosidade média R_a (Mitutoyo).....	27
Figura 8 - Rugosidade máxima $R_{m\acute{a}x}$ (Mitutoyo, 2006).....	28
Figura 9 - Sistema de coordenadas tridimensional (Bibvirt, 2006).....	29
Figura 10 - Esquema de funcionamento de um rugosímetro.....	31
Figura 11 - Preparação para análise metalográfica.....	32
Figura 12 - Esquema de um Microscópio Eletrônico de Varredura (Tentardini, 2000).....	34
Figura 13 - Vista superior e corte transversal de perfurações feitas por indentadores Rockwell, Vickers e Knoop (Hubler, 1994).....	35
Figura 14 - Curva de resposta de ensaio de nano-indentação (Oliveira, 2006).....	37
Figura 15 - Curva de revenimento do aço AISI 4140 (Chandler, 1995).....	39
Figura 16 - Micrografias do AISI 4140.....	40
Figura 17 - Sistema de Fixação do Corpo-de-prova.....	42
Figura 18 - Pontos de medição do diâmetro nominal, circularidade e cilindridade da superfície usinada.....	43
Figura 19 - Impressões de micro-dureza em um corpo-de-prova.....	45
Figura 20 - Resultados da análise dimensional.....	47
Figura 21 - Resultados típicos da circularidade e cilindridade encontrados.....	49
Figura 22 - Resultados da circularidade.....	49
Figura 23 - Resultados relativos à cilindridade.....	50

Figura 24 - Comportamento da rugosidade média (R_a).....	52
Figura 25 - Comportamento da rugosidade máxima ($R_{máx}$).....	52
Figura 26: Perfil de rugosidade típico encontrado na usinagem com lubri-refrigeração.....	53
Figura 27: Perfil de rugosidade típico encontrado na usinagem sem lubri-refrigeração.....	53
Figura 28 - Micrografias amostras 1, 2, 3 e 4.....	55
Figura 29 - Deformações plásticas encontradas.....	56
Figura 30 - Microscopias da amostra 1.	57
Figura 31 - Microscopias da amostra 2.....	57
Figura 32 - Microscopias da amostra 3.....	58
Figura 33 - Microscopias da amostra 4.....	58
Figura 34 - Resultados da nanodureza.....	59

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Composição química do AISI 4140 (Favorit, 2006).....	5
Tabela 2 - Desvio de forma das superfícies técnicas (König & Klocke, 2002).....	25
Tabela 3 - Composição química dos corpos-de-prova.....	38
Tabela 4 - Tratamento térmico aplicado.....	40
Tabela 5 - Parâmetros de usinagem.....	42

LISTA DE SIGLAS E ABREVIACOES

AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Ao)
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i> (Sociedade de Engenheiros Automotiva)
SME	<i>Society of Manufacturing Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros de Manufatura)
a_p [mm]	Profundidade de corte
v_c [m/min]	Velocidade de corte
f [mm]	avano
AISI 4140	Classificao do ao Segundo norma AISI
R_a [μm]	Rugosidade mdia
$R_{\text{máx}}$ [μm]	Maior valor de rugosidade apresentado dentro da faixa de leitura
MEV	Microscópio Eletrônico de Varredura
HRC	Indicao de escala de dureza Rockwell
HV	Indicao de escala de dureza Vickers

RESUMO

Precisão dimensional e qualidade de superfície usinada são fundamentais em componentes de aplicações mecânicas. Dentre as variáveis que exercem influência sobre estes fatores, está a grande quantidade de calor gerado na usinagem, que deve ser reduzida, minimizando seus efeitos na ferramenta e na estrutura superficial e sub-superficial da peça. Reduzir este calor e seus efeitos é uma das funções da lubri-refrigeração, porém, intensificam-se as pesquisas com o objetivo de restringir ao máximo o uso destes fluídos.

Neste trabalho, analisou-se a eficiência da lubri-refrigeração na qualidade da superfície usinada, no desvio dimensional e na variação microestrutural de amostras do aço AISI 4140 com diferentes microestruturas, usinado pelo processo de torneamento longitudinal. Observou-se que a lubri-refrigeração não teve efeito considerável sobre a qualidade da superfície usinada, não apresentando uma melhora significativa na rugosidade. Na questão dimensional observou-se que, em mais de 60% dos ensaios realizados, os resultados com e sem a presença da lubri-refrigeração mantiveram-se dentro da faixa de tolerância pré-especificada, e na avaliação microestrutural, avaliando a deformação plástica, observou-se que houve uma queda na dureza da borda do material, em comparação com regiões mais próximas do centro do corpo-de-prova.

Palavras-chave: rugosidade, diâmetro, lubri-refrigeração, microestrutura.

ABSTRACT

Dimensional deviation and surface quality are fundamental components for mechanical applications. The variables that influence these factors, the quantity of heat generated must be reduced in order to minimize their effects on tool and on the superficial and sub-superficial structure of the piece. Reducing this heat and its effects is one of the cooling functions; however, the researches trying to restrict the use of those fluids.

In this work, the cooling efficiency was analyzed on the surface quality, dimensional deviation and microstructural variation of AISI 4140 steel samples machined with different microstructure by longitudinal turning process. As a result, it was found that the cooling is not a significant effect on surface quality, not improving the roughness. In regard to dimensional, it was noticed in more than 60% of tests that the results with and without the presence of cooling kept between the pre-specified tolerance ranges. In the microstructural analysis, analyzing the plastic deformation, it was noticed that the hardness decrease in the edge of the sample, comparing with the center.

Key-words: roughness, diameter, cooling, microstructure.

1. INTRODUÇÃO

Historicamente, o desenvolvimento e o avanço das sociedades têm estado intimamente ligados às habilidades dos seus membros em produzir e manipular materiais para satisfazer as suas necessidades.

Pela grande diversidade de materiais existentes atualmente, a escolha adequada destes para a execução de projetos em todas as áreas tornou-se uma das mais importantes fases no desenvolvimento de produtos, máquinas e equipamentos.

Dentre todos os materiais disponíveis, o aço é a mais versátil e a mais importante das ligas metálicas conhecidas pelo ser humano, isso porque este material apresenta uma interessante combinação de propriedades mecânicas que podem ser modificadas dentro de uma ampla faixa variando-se o tipo e a concentração dos elementos de liga por intermédio de tratamentos térmicos (Chiaverini, 2005 e Infomet, 2005).

A produção mundial de aço bruto somou 962,5 milhões de toneladas no ano de 2003, conforme levantamento divulgado pelo International Iron and Steel Institute (IISI). Segundo a IISI, a produção mundial está prestes a alcançar um bilhão de toneladas/ano. No Brasil, a produção chega a 31,1 milhões de toneladas, valor que o mantém na oitava posição mundial no ranking mundial dos produtores de aço (ABM, 2005 e Pannoni, 2001).

Dentre vários processos utilizados para modificar a estrutura dos aços destaca-se a usinagem, que consiste de qualquer processo mecânico onde a peça é o resultado de um processo de remoção de material, como torneamento, fresamento, furação, etc.

Mesmo com os avanços no desempenho dos aços produzidos atualmente existe, por parte da indústria, uma incessante busca em produzir materiais resistentes a ambientes cada mais agressivos, além de suportar cargas elevadas com faixas de tolerâncias cada vez mais estreitas (Ferraz, 2002, e Carrino, 2002).

Outro fator de suma importância na utilização do aço é o tempo de fabricação, sendo que o conhecimento das condições e a escolha de processos adequados proporcionam uma redução significativa nos tempos de fabricação, baixando o custo de produção. Parâmetros como velocidade de corte, lubri-refrigeração e tratamento térmico, se não controlados, podem comprometer o desempenho do material e a vida útil do produto. O alto grau de precisão dimensional, aliado a uma excelente qualidade de superfície usinada faz com que os processos de usinagem muitas vezes não possam ser substituídos por outros processos de fabricação.

A lubri-refrigeração, em especial, tem recebido cada vez maior atenção de diversos setores da sociedade, desde o âmbito industrial até questões ambientais, pois pesquisas recentes mostram que o uso destes fluidos refrigerantes é prejudicial à saúde e ao meio ambiente (Ferraz, 2002).

A utilização destes fluidos lubri-refrigerantes pela indústria é necessária devido a grande quantidade de calor que se desenvolve durante a usinagem, sendo que este precisa ser reduzido a fim de minimizar o desgaste da ferramenta, a dilatação térmica e o dano térmico à estrutura superficial da peça. Existem outras opções, como a mínima quantidade de fluido e a usinagem a seco (Shackelford, 2000).

Uma aplicação em que a qualidade de superfície usinada e a precisão dimensional é imprescindível é a produção de peças e eixos de precisão para usinagem. A haste é um eixo cilíndrico de precisão, responsável pela fixação de componentes mecânicos. Da perfeita fixação entre a haste e o componente depende, entre outros fatores, o bom funcionamento do conjunto.

Após o processo produtivo, é necessário determinar as dimensões da peça pronta e verificar os desvios relacionados com as dimensões pré-determinadas pelo projetista. Estes desvios devem estar situados dentro certas tolerâncias, que definem a utilização da peça para sua função específica (König & Klocke, 2002; Risbood, 2003 e Poulachon, 2005).

De acordo com sua aplicação, a tolerância dimensional muitas vezes não permite variações maiores do que 0,03 mm. A falta de controle sobre parâmetros tais como usinagem e tratamento térmico, ou a própria seqüência de aplicação dos mesmos, pode resultar em um eixo fora das faixas de tolerâncias especificadas, ocasionando produtos classificados como refugo.

Este trabalho tem como objetivo principal verificar a importância da lubri-refrigeração na qualidade da superfície usinada, no desvio dimensional e na variação microestrutural de hastes de aço AISI 4140 submetidos ao processo de torneamento longitudinal, em diferentes microestruturas.

Estas hastes foram usinadas na empresa Maffei Ferramentas para Usinagem. Os parâmetros utilizados foram determinados de acordo com a microestrutura do material, com e sem lubri-refrigeração. Estas hastes foram então caracterizadas por medição tridimensional, rugosidade, análises metalográficas, microscopia ótica, microscopia eletrônica de varredura e nanodureza, a fim de analisar as variações dimensionais, a qualidade da superfície usinada, as deformações plásticas e a variação microestrutural (caracterizada pela nanodureza) na superfície usinada.

Este trabalho propõe uma metodologia para verificar a influência do lubri-refrigerante na usinagem de hastes, utilizando técnicas específicas que determinam os fenômenos que ocorrem na superfície da haste. Busca-se estabelecer correlações entre variação dimensional, microestrutura e usinagem. Espera-se obter informações técnicas para otimização do processo, que resulte em um produto com variações dimensionais minimizadas, dentro das faixas de tolerâncias especificadas.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Aços para beneficiamento

Por definição, aço é a liga ferro-carbono contendo geralmente 0,008% até aproximadamente 2,0% de carbono, além de certos elementos residuais, resultantes dos processos de fabricação, ou adicionados propositalmente. A introdução de outros elementos de liga nos aços carbono é feita quando se deseja um dos seguintes efeitos:

- aumentar a dureza e resistência mecânica;
- conferir resistência uniforme através de toda a secção em peças de grandes dimensões;
- diminuir o peso (como consequência do aumento da resistência);
- conferir resistência à corrosão;
- aumentar resistência ao calor;
- aumentar a resistência ao desgaste;
- aumentar a capacidade de corte; e
- melhorar as propriedades elétricas e magnéticas (Chiaverini, 2005).

2.1.1 Estrutura e classificação dos aços

Devido à grande variedade de tipos de aços, existem sistemas para sua classificação. A classificação mais generalizada é a que considera a composição química dos aços e dentre os sistemas conhecidos, os mais usados são os da AISI (*American Iron and Steel Institute*) e da SAE (*Society of Automotive Engineers*). Quatro números são utilizados para designar os aços, os dois primeiros indicam o tipo e o teor aproximado de elementos de liga, ao passo que os dois últimos especificam o teor de carbono.

A engenharia e a indústria brasileira também dispõem de um sistema de classificação de aços para construção mecânica, elaborado pela Associação Brasileira de Normas Técnicas, (ABNT), baseado nos sistemas americanos SAE e AISI (Chiaverini, 2005) .

Os aços de baixo carbono possuem um máximo de 0,3% deste elemento, são aços de grande ductilidade, bons para o trabalho mecânico e soldagem, não sendo temperáveis. São utilizados na construção de edifícios, pontes, navios, automóveis, dentre outras aplicações. Os aços de médio carbono possuem de 0,3% a 0,6% de carbono e são utilizados em engrenagens, bielas e outros componentes mecânicos. Quando temperados e revenidos, atingem boa tenacidade e resistência. Aços de alto carbono possuem mais que 0,6% de carbono, elevada dureza e resistência após têmpera, e são comumente utilizados em trilhos, molas, engrenagens, componentes agrícolas sujeitos ao desgaste, pequenas ferramentas, etc (Pannoni, 2001).

2.1.1.1 Aço AISI 4140

O aço AISI 4140 (42CrMo4), também chamado de aço-cromo-molibdênio, é classificado como aço ligado para beneficiamento. A composição química pode ser observada na Tabela 1.

Tabela 1 - Composição química do AISI 4140 (Favorit, 2006).

C%	Cr%	Mo%	Si%	Mn%
0,38 a 0,4	0,8 a 1,1	0,15 a 0,25	0,15 a 0,35	0,75 a 1,00

O carbono é o elemento de liga mais importante nos aços e muito influente em sua composição. É ele que, ligado a outros elementos, permite uma deformação por forjamento e laminação, alongamentos e soldabilidade, não influenciando na resistência à corrosão com água, ácido e gases, formando compostos que permitem garantir resistência a desgaste e durezas elevadas (Usinagem Brasil, 2005).

A adição do cromo (Cr) aumenta a resistência à corrosão e oxidação, aumenta a endurecibilidade, melhora a resistência em altas temperaturas e torna o aço mais resistente ao desgaste. Já a adição de molibdênio (Mo), ajuda a diminuir o crescimento do grão, aumenta a profundidade de têmpera, eleva a dureza e a resistência a quente, melhora a resistência à corrosão nos aços inoxidáveis.

2.1.2 Microestrutura

Durante a fase de produção ou análise de materiais, é necessário analisar a sua microestrutura. Esta análise microestrutural é muito importante, pois permite entender as correlações microestrutura - defeitos – propriedades, e prever as propriedades do material quando estas correlações são estabelecidas. Os processos de usinagem podem trazer modificações na microestrutura do material usinado. Conforme procedem estas alterações, o material perde propriedades mecânicas, o que na maioria dos casos não é desejável que ocorra.

A microestrutura está relacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas da peça. Segundo Ferraresi (2003), em função da possibilidade da transformação da microestrutura do aço ou ferro fundido, sem alteração da composição química, ela se constitui num importante fator de influência na usinabilidade. Os microconstituintes alteram as características de ductilidade e de fragilidade em função da sua presença, quantidade e forma, promovendo diferentes condições de quebra de cavaco (uma porção de material da peça retirada pela ferramenta que se caracteriza por apresentar uma forma geométrica irregular), abrasividade, força e temperatura de corte (König & Klocke, 2002).

O tamanho de grão deve ser controlado em função da fragilização do cavaco, produzido devido a uma estrutura de grãos grosseiros. Porém, com uma estrutura mais refinada, menores são as fronteiras intergranulares e maiores serão os contatos de natureza química e

eletrostática, melhorando o comportamento frente a solicitações mecânicas impostas ao trabalho de usinagem (Baptista, 2005, Oliveira 2006).

A fase martensita da liga Fe-C é obtida através de um resfriamento rápido a partir da temperatura de austenitização, a tendência seria a formação de ferrita + cementita (fases de equilíbrio). Entretanto, o processo de saída do carbono de dentro da célula CFC (Figura 1) requer tempo (exige difusão), o qual não é propiciado por um resfriamento rápido. Então, ocorre a transformação para CCC e o carbono fica retido dentro da célula, muito embora não haja espaço para acomodá-lo. Assim, ocorre uma distorção da célula CCC, formando uma célula tetragonal de corpo centrado. A distorção causa tensões internas, que são percebidas através da alta resistência mecânica e dureza da martensita, muito embora tenha grande fragilidade.

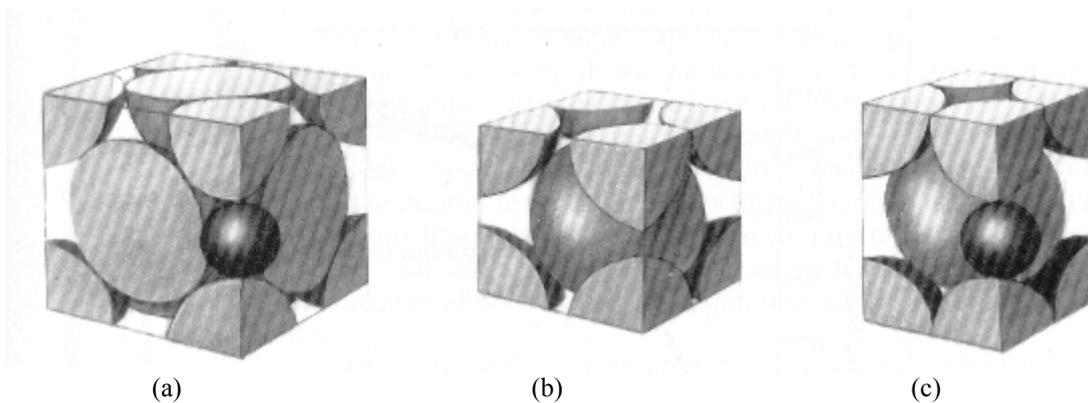


Figura 1 - (a) Austenita ($Fe\gamma$ - CFC), (b) Ferrita ($Fe\alpha$ - CCC), (c) Célula tetragonal de corpo centrado (martensita) (Callister, 2002).

No item (a) da Figura 1, observa-se a representação atômica da austenita com um átomo de carbono no interstício. No item (b), onde se tem a representação da ferrita, não há espaço intersticial para acomodar o átomo de carbono. Já para o item (c) a célula tetragonal de corpo centrado corresponde a martensita, resultante da distorção de uma célula CCC, causada pelo átomo de carbono no interstício.

Durante o corte, podem ocorrer diversas transformações da microestrutura influenciadas principalmente pelas solicitações térmicas e mecânicas. Os efeitos térmicos tendem a ocasionar uma tensão residual de tração, enquanto os efeitos mecânicos tendem a resultar em uma tensão residual de compressão (Axinte e Dewes, 2002). Se atingirmos a temperatura de austenitização, o calor da usinagem pode provocar tempera localizada, e conseqüentemente, tensões residuais compressivas (Weingaertner, 2007). A Figura 2 ilustra a camada modificada na superfície durante o processo de usinagem.

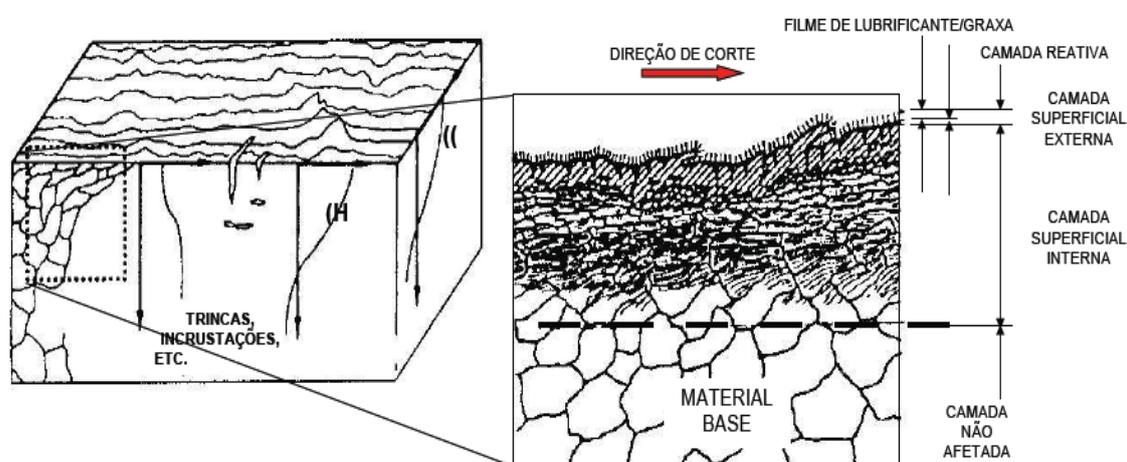


Figura 2 - Camada modificada durante o processo de usinagem (Bethke, 2006).

Quando se deseja conferir propriedades específicas para um determinado uso, deve-se buscar uma microestrutura apropriada. Esta adequação de propriedades tem, portanto, ligação direta com a composição química e com o processo de produção do aço. Os ensaios de temperabilidade são de grande valia na orientação de resistência e dureza na construção mecânica. Temperabilidade é definida como a propriedade que determina a capacidade de endurecimento do aço verificada através da profundidade e distribuição da dureza, obtida por tratamento térmico de têmpera (Chiaverini, 2005; Martins, 2002).

2.1.3 Tratamento térmico

O tratamento térmico é o conjunto de operações de aquecimento e resfriamento a que são submetidos os aços, sob condições controladas de temperatura, tempo, atmosfera e

velocidade de aquecimento e resfriamento, com o objetivo de alterar as suas propriedades ou conferir-lhes características determinadas. Eles podem tomar várias formas e denominações, mas a diferença entre si estará ligada sempre ao nível de temperatura em que se dá o aquecimento, ao tempo que permanece a peça àquela temperatura, e a forma através da qual se dá o resfriamento (Chiaverini, 2005; Rauter, 1974).

Entretanto, a má qualidade de um tratamento térmico pode ser prejudicial para a peça ou produto. Frequentemente ocorrem trincas e variações dimensionais em produtos onde não houve um processo controlado sobre o tratamento térmico no aço.

Os tratamentos térmicos mais comuns aos aços para beneficiamento são a normalização, e a têmpera seguida de revenimento. A normalização consiste em um aquecimento até a completa austenitização, seguida de um resfriamento ao ar livre até a temperatura ambiente, sem restringi-lo ou acelerá-lo. Com esse processo, visa-se normalizar a estrutura, dando-lhe uniformidade e homogeneidade, e diminuindo as tensões internas. É ainda um importante processo para provocar a diminuição do tamanho de grão, em aços que se tornam de granulação grosseira por qualquer prática de aquecimento muito elevado, formando geralmente perlita fina (Rauter, 1974).

A têmpera é um tratamento térmico caracterizado pelo aquecimento acima da temperatura de austenitização e resfriamento em velocidade superior à velocidade crítica de têmpera, a partir de uma temperatura acima da zona crítica (austenitização) para os aços hipoeutetóides e geralmente dentro da zona crítica, para os aços hipereutetóides, resultando em transformação da austenita em martensita. O revenimento é um tratamento térmico aplicado em peças temperadas ou normalizadas, com a finalidade de provocar um melhor balanço entre a dureza, e reduzir as tensões produzidas durante a têmpera. É caracterizado por um reaquecimento abaixo da zona crítica e resfriamento adequado, visando a ajustar as propriedades mecânicas (Brasimet, 2005).

2.2 Torneamento

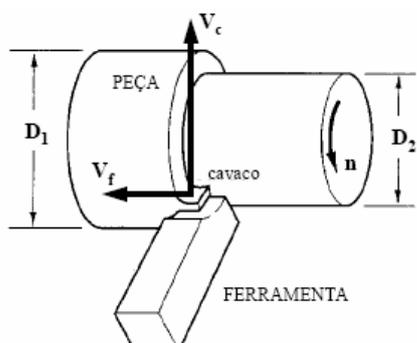
Entende-se por usinagem a operação que confere a uma determinada peça forma, dimensões ou acabamento, ou ainda uma combinação qualquer desses três itens por retirada de cavaco (König & Klocke, 2002).

No processo de usinagem, uma quantidade de material é removida com o auxílio de uma ferramenta de corte, obtendo-se uma peça com formas e dimensões desejadas. Na usinagem verifica-se que os materiais se comportam de um modo distinto, sendo que alguns podem ser trabalhados com grande facilidade, enquanto que outros oferecem uma série de dificuldades ao operador. Em processos onde o espaço para alojar o cavaco durante a sua formação é reduzido, e em máquinas automatizadas, a forma e o tamanho do cavaco apresentam grande importância. As principais influências sobre a formação do cavaco são as condições de corte, a geometria da ferramenta e o estado metalúrgico do material da peça (Cimm, 2006; Stemmer, 2005; Hioki, 1998; König & Klocke, 2002).

Torneamento é um processo mecânico de usinagem, que combina dois movimentos: avanço da ferramenta e rotação da peça, como ilustrado na Figura 3. Pode ser classificado como torneamento de desbaste e torneamento de acabamento.

O torneamento de desbaste é uma operação de usinagem anterior a de acabamento, visando obter na peça a forma e dimensões próximas das finais. A condição de desbaste deve ser tão severa quanto à espessura do cavaco, a vida da ferramenta, a potência do motor e a própria peça permitirem, e é limitada pela potência instalada na máquina ferramenta, pela rigidez, e pelo sobrematerial da peça e ainda pela característica da ferramenta de corte. Já o torneamento de acabamento é uma operação de usinagem destinada a melhorar a precisão de forma, dimensão, posição e qualidade de superfície usinada. As condições de acabamento são leves, caracterizados ainda pela utilização de velocidades de corte maiores que a do desbaste, com profundidades de usinagem bastante reduzidas e avanços tão pequenos quanto os

necessários para a obtenção da especificação da peça-obra (Ferraz, 2002, Hioki, 1998 e Weingaertner, 2007).



- V_c – velocidade de corte (m/min)
- V_f – velocidade de avanço (mm/min)
- (f – avanço (mm/volta))
- D_1 – diâmetro inicial da peça
- D_2 – diâmetro final da peça
- $D_1 - D_2 = a_p$
- a_p – profundidade de usinagem (mm)
- n – rotação da peça (rpm)

Figura 3 - Representação de torneamento (Ferraz, 2002).

No torneamento, a qualidade e a integridade da superfície usinada são preocupações freqüentes devido ao seu impacto na apresentação do produto, em termos de comportamento funcional e estabilidade dimensional (Poulachon, 2005). A Figura 4 ilustra as alterações possíveis devido ao processo de usinagem por torneamento.

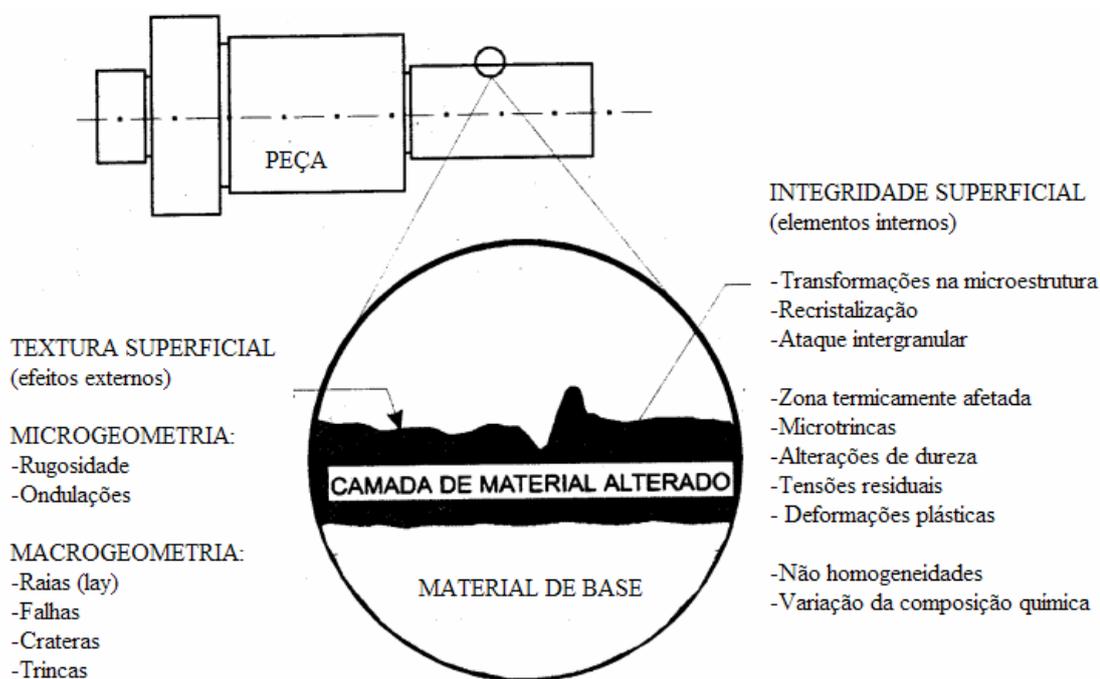


Figura 4 - Secção simulada da superfície de uma peça com suas camadas inferiores (SME, 1987).

Para se obter faixas de tolerâncias dimensionais estreitas e bons acabamentos de superfície usinada, é necessário realizar um ou mais passos na condição de desbaste, seguidos

por um ou mais passos na condição de acabamento. Em alguns casos, uma ferramenta especial é usada, mas geralmente a mesma ferramenta é usada para ambas as condições (Degarmo, 1997; Meireles, 2000 e Ferraz 2002).

2.2.1 Mecânica do corte

Os movimentos no processo de usinagem são movimentos relativos entre a peça e o gume. Referem-se a peça e podem ser divididos em dois grupos: os que causam diretamente a saída do cavaco (corte, avanço e efetivo) e os que não causam (aproximação, ajuste, correção e recuo).

Com relação a máquina ferramenta, Li (2001) afirma que o sistema máquina-ferramenta é composto basicamente por *servo drive* (equipamentos de acionamento e controle), estrutura da máquina ferramenta, peça obra e processo de corte. As principais fontes de erros de peças, quanto a qualidade de superfície usinada e dimensional derivam dos seguintes componentes (Chen, 1998):

- estrutura da máquina-ferramenta: erros térmicos, geométricos, e provocados por forças de vibração.
- *servo drive*: dinâmica dos acionadores, e erros de programas.
- processo de corte: flexão da máquina, ferramenta de corte e peça-obra, desgaste e quebra de ferramentas de corte.

Essas fontes de erro vêm sendo minimizadas, chegando-se ao extremo no processo de torneamento de ultraprecisão, onde superfícies com rugosidade de alguns nanômetros são produzidas (Ferraz, 2002).

Os parâmetros velocidade de corte (v_c), avanço (f) e profundidade de corte (a_p) afetam a taxa de material removido e a vida da ferramenta no torneamento. Qualquer aumento nesses parâmetros aumenta a taxa de remoção de material, mas diminui a vida da ferramenta. Uma

mudança em qualquer um desses parâmetros tem um efeito igual na taxa de remoção, entretanto, cada um deles tem um efeito diferente sobre a vida da ferramenta.

A vida da ferramenta é menos afetada por variações na profundidade de corte do que em qualquer um dos outros parâmetros. A profundidade de corte é limitada pela quantidade de material a ser removida, potência disponível na máquina, rigidez do sistema, capacidade da ferramenta, qualidade superficial e precisão requerida. Variações de avanço têm grande efeito sobre a vida da ferramenta, maior do que variações de profundidade de corte, mas menor que variações nas velocidades de corte. Um aumento no raio de quina ou uma redução no avanço melhoram a qualidade da superfície. A velocidade de corte usada em torneamento tem um efeito sobre a vida da ferramenta maior do que o avanço e a profundidade de corte, por isso sua seleção é mais crítica.

Materiais de corte como metais-duros revestidos, cerâmicas, diamante policristalino e nitreto cúbico de boro (CBN), podem gerar benefícios devido às suas propriedades a altas velocidades de corte. Altas velocidades também podem criar problemas relacionados à vibração, vida dos componentes da máquina, assim como à produção e segurança. Devem sempre ser feitas considerações criteriosas a respeito de aumentos na produção e custos por peça usinada. (König & Klocke, 2002 e Ferraresi, 2003).

2.2.2 Calor gerado na usinagem

Segundo König (2002), o trabalho mecânico efetivo empregado para a usinagem é transformado, em sua maior parte, em energia térmica. Existem fontes de calor na região de cisalhamento e nas regiões de atrito da ferramenta. O calor gerado é absorvido pela peça, pelo cavaco e pela ferramenta. Para uma ferramenta de metal duro na velocidade de corte de 60 metros por minuto, o cavaco absorve aproximadamente 75% do calor gerado, a ferramenta 18% e 7% vai para o material (peça). A Figura 5 ilustra a geração de calor, e a distribuição das temperaturas durante o processo de usinagem.

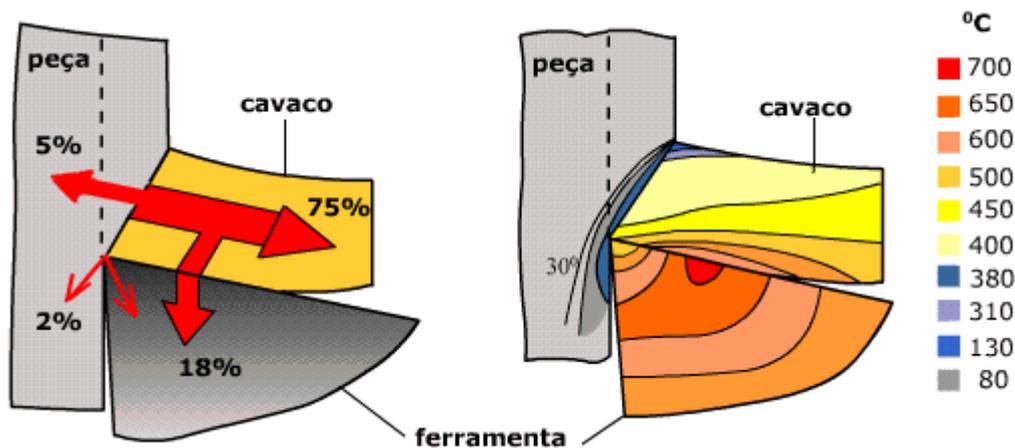


Figura 5 - Geração de calor e distribuição de temperaturas na usinagem (König & Klocke, 2002).

2.2.3 Erros e tolerâncias na fabricação

Dependendo do processo de fabricação podem ocorrer erros diferentes, relacionados as propriedades dos materiais e aos erros geométricos. Erros que se referem às propriedades do material da peça são, por exemplo, erros produzidos por tratamento térmico das peças, que tem conseqüências sobre a estrutura, dureza e resistência da mesma (König & Klocke, 2002).

Os erros de forma são definidos como sendo o desvio da geometria em relação à forma básica reta, plana, circular ou cilíndrica. No torneamento, o motivo para o surgimento de um desvio de forma cônico decorre do fato de que a fixação da peça não está paralela ao sentido de trabalho, e o erro de circularidade pode ocorrer devido a uma fixação não correta da peça.

Erros de dimensão são entendidos como o desvio de uma medida padrão de um componente, definida pela utilização posterior do produto, e indicada no desenho da peça. Esse erro dimensional não significa obrigatoriamente a inutilização da peça acabada, podendo ser corrigido através de um retrabalho posterior. No torneamento longitudinal de peças cilíndricas é possível surgir erros de dimensão quando para o mesmo posicionamento na máquina a peça bruta apresentar variações de diâmetro. Em decorrência disso, tem-se uma variação da seção de usinagem e também uma variação da força de usinagem, que por sua vez

leva a diversas deformações da máquina-ferramenta, ferramenta e peça (König & Klocke, 2002).

De acordo com Nakayama (1988), as forças passivas também provocam erros dimensionais, devido a deformações elásticas do sistema máquina-peça-ferramenta (podendo essa ser minimizada pelo aumento da rigidez do sistema e redução das forças passivas) e pela deformação elástica local, na região próxima ao ponto de corte.

Dhar (2002) realizou um estudo sobre o desgaste de ferramenta, rugosidade da superfície usinada e desvio dimensional na usinagem do aço AISI 4140 com lubri-refrigeração por jatos de nitrogênio líquido. Essa aplicação de lubri-refrigeração diminuiu substancialmente a temperatura na região do corte, comparando com o ensaio sem lubri-refrigeração. Como conclusão, apresenta que o desvio dimensional foi menor nesta aplicação, como ilustrado na Figura 6. As letras (a) e (b) na figura revelam que foram utilizados insertos diferentes nos dois ensaios, porém em ambas as situações, o desvio dimensional foi maior na condição a seco.

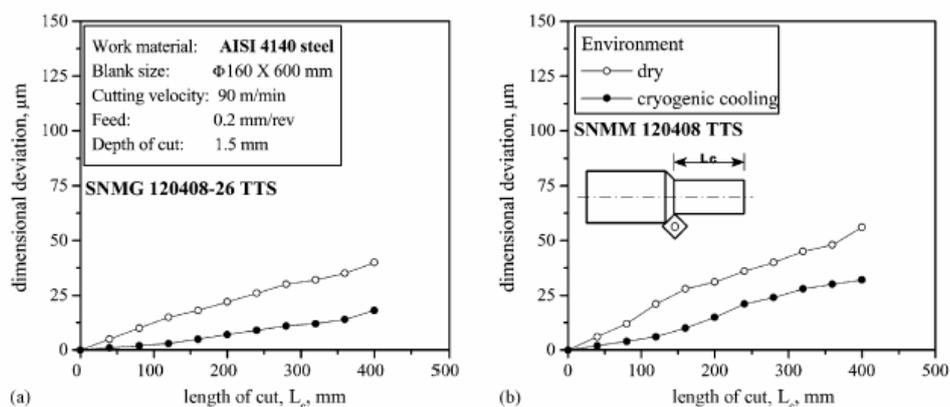


Figura 6 - Variação dimensional pelo comprimento de corte, em condições de usinagem a seco (círculo branco) e com jatos de nitrogênio líquido (círculo preto) (Dhar, 2002).

Em alguns casos, como no torneamento de aço endurecido, onde este geralmente é realizado a seco, as dilatações térmicas da peça tem que ser controladas. Portanto, valores

pequenos de profundidade de usinagem são usados para diminuir a temperatura da peça e melhorar as tolerâncias dimensionais, tolerâncias de forma e rugosidade da peça (Diniz, 2005)

2.2.4 Influência de aplicações de fluídos lubri-refrigerantes

O uso de fluido de corte na usinagem baseou-se originalmente no aumento da vida das ferramentas de corte, como consequência da lubri-refrigeração na interface ferramenta peça cavaco e um auxílio no transporte de cavacos.

Inicialmente, W. H. Northcott (1868) e F. W. Taylor (1894) utilizaram a água para refrigerar o processo e concluíram que isto aumentava a vida da ferramenta. Desde então, o uso de fluido de corte passou a ter fundamental importância nos processos de usinagem e entrou em constante desenvolvimento (König & Klocke, 2002).

Depois de Taylor, diversas pesquisas desenvolveram novos fluídos além da água. Porém, nos últimos anos, intensificaram-se ao limite as pesquisas com o objetivo de restringir ao máximo o uso dos fluídos lubri-refrigerantes na produção metal-mecânica. Os fatores importantes que justificam tal procedimento incluem os custos operacionais de produção, as questões ecológicas, as exigências legais quanto à preservação do meio ambiente e a preservação da saúde do ser humano (Diniz, 2001).

Aplicações de fluídos de corte convencionais e refrigerantes são essenciais para os processos de usinagem, mas podem frequentemente não controlar as altas temperaturas de corte em usinagem de alta precisão. A utilização de métodos tais como mínima quantidade de lubrificação (MQF, onde uma pequena quantidade de fluido é pulverizada com um jato de ar) e usinagem a seco (usinagem ecológica) representam alternativas para o uso convencional de fluido refrigerante, mas só foi possível atingir uma substituição completa das tarefas e funções (refrigerar, lubrificar, limpar e conservar) em casos isolados. Para um trabalho eficiente com

os fluídos refrigerantes, o usuário é obrigado a considerar aspectos legais, sanitários, técnicos, ambientais, econômicos e de organização (Dhar, 2002; Sales, 2001 e Walter, 2005).

O fluído apresenta vantagens em operações nas quais o acabamento da superfície usinada e/ou as tolerâncias dimensionais são críticos. São casos em que os fluídos de corte tem função de lubri-refrigerante, garantindo bom acabamento da superfície usinada e tolerâncias dimensionais estreitas. Ao se abrir mão destes fluídos, a sua influência positiva na usinagem também perde o efeito. A sua redução drástica no processo ou sua completa eliminação, certamente poderão ocasionar aumento de temperatura nos processos queda de rendimento da ferramenta de corte, perda de precisão dimensional e geometria das peças (Ramos, 2003 e Martinez, 2002).

Oliveira (2006) analisou a rugosidade longitudinal e transversal obtida na operação de fresamento com ferramenta de topo esférica. Nos perfis de rugosidade nota-se que, na usinagem a seco, a rugosidade medida no sentido longitudinal foi maior que na usinagem com fluído. No entanto, a rugosidade no sentido transversal, para condição a seco foi menor que a rugosidade para a condição com fluído.

Silva et al (2006) atribuem essas diferenças nos perfis de rugosidade (com relação a aplicação ou não da lubri-refrigeração) com as altas temperaturas envolvidas no momento de corte do material. Quando o fluído de corte é aplicado, ocorre um aumento na força de corte, pois a alta temperatura facilita o corte do material bem como seu escoamento e com isso a amplitude de vibração da ferramenta aumenta gerando um pior acabamento na peça fresada.

Scandiffio (2000) analisou o valor da rugosidade média da peça contra o comprimento de corte, e notou que a rugosidade não acompanha o desgaste de flanco nas condições de lubri-refrigeração. A rugosidade apresentou um comportamento aleatório, não dependendo assim da condição de lubri-refrigeração, mas sim de outro tipo de desgaste que cause a variação da ponta da ferramenta.

Micarone et al (2002) realizaram vários experimentos de torneamento de aço com pastilhas de metal duro recobertas, com e sem a utilização de fluido de corte. Eles concluíram que, retirando-se o fluido de corte do processo, diminuiu-se bastante o consumo de potência (e, conseqüentemente, o gasto com energia elétrica) e a rugosidade da peça. Se a retirada do fluido for realizada sem mudança das condições de corte, os benefícios citados virão acompanhados de um maior consumo de ferramenta, pois sua vida deverá diminuir. Pode-se, porém, modificar o avanço e a velocidade de corte de tal maneira a se manter ou até aumentar a vida da ferramenta, mesmo sem a utilização do fluido.

2.3 Critérios de usinabilidade

O termo usinabilidade compreende todas as propriedades de um material que tem influência sobre o processo de usinagem, descrevendo as dificuldades que um material apresenta na sua usinagem.

A usinabilidade depende do estado metalúrgico da peça, das propriedades mecânicas do material, de sua composição química, das operações anteriores efetuadas sobre o material (sejam a quente ou a frio) e do eventual encruamento. Mas ela depende também das condições de usinagem, das características da ferramenta, das condições de refrigeração, da rigidez do sistema máquina–ferramenta-dispositivo de fixação e dos tipos de trabalhos executados pela ferramenta. Além de ser uma grandeza tecnológica, implica também em condições econômicas, principalmente no custo de fabricação por peça.

Para avaliar a usinabilidade geralmente são usados quatro critérios: vida da ferramenta, força de usinagem, qualidade da superfície usinada da peça e forma dos cavacos (Ferraresi, 2003; Diniz, 2001 e König & Klocke, 2002).

2.3.1 Vida da ferramenta

A vida da ferramenta é um dos critérios de maior importância, pois é o tempo durante o qual uma ferramenta resiste ao corte até atingir um certo critério de fim de vida nas condições de usinagem avaliadas.

Para a determinação da vida de uma ferramenta, na prática, são empregados testes de longa duração, com as velocidades de corte usuais na fabricação, exigindo um elevado tempo de ensaio e grande quantidade de material (Weingaertner, 2007).

Testes rápidos são empregados para obter uma informação rápida com o mínimo gasto de material possível, permitindo uma comparação qualitativa de usinabilidade de diversos materiais. São empregados no controle de qualidade de entrada do material da peça e da ferramenta, bem como para a supervisão da usinabilidade (König & Klocke, 2002).

2.3.2 Força de usinagem

A força de usinagem é de grande importância para projetos de máquinas, de ferramentas, e dispositivos; avaliação da precisão de uma máquina, sob determinadas condições e determinação de fenômenos que ocorrem na região de formação de cavaco, bem como para estabelecer as condições de usinagem a serem utilizadas. Os fatores que apresentam grande influência sobre a força de usinagem são: a condição de corte, a geometria da ferramenta, e o material da peça e da ferramenta (Hioki, 1998).

2.3.3 Qualidade da superfície usinada

A qualidade da superfície usinada, obtida por usinagem com remoção de cavaco, pode ser critério para determinar os parâmetros de entrada. Essa qualidade é função da precisão dimensional e da rugosidade da peça (König & Klocke, 2002 e Vlack, 1998).

Com relação a velocidade de corte, o valor máximo da rugosidade para velocidades de corte pequenas está relacionado com a formação do gume postivo e às partículas do gume

postição que migram para a região entre a ferramenta e a superfície da peça. A medida em que se aumenta a velocidade de corte, ocorre uma redução considerável nos valores de rugosidade, que pode ser explicada pela redução da intensidade da formação do gume postição, na faixa em que se forma o cavaco contínuo. A profundidade de corte não tem influência sobre a qualidade superficial.

O desgaste da ferramenta tem influência sobre a qualidade da superfície usinada. São importantes para a caracterização da superfície no torneamento o desgaste do flanco secundário e o raio de quina. O desgaste do gume principal, em virtude das condições geométricas no torneamento, não tem influência sobre a qualidade da superfície usinada (König & Klocke, 2002 e Diniz, 2005).

Entretanto, em decorrência da crescente exigência sobre as propriedades mecânicas da peça, o enfoque dado a topografia da superfície da peça deve ser estendido às transformações que ocorrem nas camadas abaixo da superfície (Boehs, 1992).

2.3.4 Formação de cavaco

Em processos onde o espaço para alojar o cavaco durante a sua formação é reduzido e em máquinas automatizadas, a forma e o tamanho dos mesmos apresentam grande importância. As principais influências sobre a formação do cavaco são as condições de corte, a geometria da ferramenta e o estado metalúrgico do material da peça (König & Klocke, 2002).

2.4 Fatores influentes na usinabilidade do aço

A usinabilidade do aço deve ser analisada através da influência das variáveis de componentes que estão intimamente relacionados, que são o material da peça, o processo mecânico e as condições de usinagem, e o critério empregado na avaliação.

Com relação aos processos mecânicos e as condições de usinagem, os fatores que mais influenciam na usinabilidade são o material da ferramenta, as condições de usinagem (velocidade, avanço, profundidade, geometria da ferramenta), os fluídos de corte, a rigidez da máquina, da ferramenta e do sistema de fixação, e o tipo de trabalho executado pela ferramenta (tal como operação empregada, corte contínuo ou intermitente, e as condições de entrada e saída da ferramenta) (Ferraresi, 2003).

Aços com teores de carbono entre 0,4% e 0,8% (caso do AISI 4140) são considerados de boa usinabilidade somente com relação aos critérios de formação de cavaco e qualidade da superficial (König & Klocke, 2002).

2.4.1 Propriedades do material

É comum se pensar, no meio produtivo, que a usinabilidade é uma propriedade intrinsecamente ligada à dureza do material da peça e a sua resistência mecânica. Seguindo esse raciocínio, diríamos que um material mole é de boa usinabilidade, e um material duro de baixa usinabilidade, porém, esse raciocínio é falso. Embora a dureza e a resistência mecânica sejam fatores importantes de influência na usinabilidade do material, outros fatores também são importantes, como a quantidade de inclusões, de aditivos, de partículas duras, a microestrutura, a tendência ao empastamento do cavaco do material na superfície de saída da ferramenta, etc.

Propriedades como dureza e resistência mecânica, ductilidade, condutividade térmica e taxa de encruamento também podem afetar na usinabilidade dos materiais. Valores de dureza e resistência mecânica baixos normalmente favorecem a usinabilidade, porém, quando temos materiais muito dúcteis (que se deformam muito plasticamente antes de se romperem) a baixa dureza pode causar problemas, pois facilita a formação da aresta postiça de corte.

Com relação à ductilidade, baixos valores são benéficos. A formação de cavacos curtos é facilitada, e se tem menor perda de energia com o atrito cavaco – superfície de saída da

ferramenta. Em geral, consegue-se uma baixa ductilidade com alta dureza e vice-versa. Uma ótima usinabilidade se obtém com uma boa relação entre dureza e ductilidade.

Uma alta condutividade térmica do material da peça significa que o calor gerado pelo processo é rapidamente retirado da região de corte e, assim, a ferramenta não é excessivamente aquecida, não se desgastando tão rapidamente e, conseqüentemente, favorecendo a usinabilidade do material. Deve-se considerar também que, quando o material tem alta condutividade térmica, retém boa parte do calor gerado, sendo necessária uma refrigeração eficiente, com a finalidade de evitar uma excessiva dilatação térmica da peça, e com isso, obtendo-se tolerâncias apertadas sem danificar a estrutura superficial.

Outra propriedade que deve ser citada é o encruamento, que ocorre quando os metais são deformados plasticamente, aumentando sua resistência. Uma alta taxa de encruamento significa que a resistência do material é bastante aumentada, ou seja, se o material possui alta taxa de encruamento, ele requer muita energia para a formação do cavaco, e com isso, acarretará um substancial aumento de dureza numa fina camada da superfície usinada (Diniz, 2001).

2.4.2 Efeito dos elementos de liga

Os elementos de liga podem influenciar a usinabilidade de aços através da modificação da estrutura ou através da formação de inclusões lubrificantes ou abrasivas (König & Klocke, 2002). Elementos como manganês, cromo, molibdênio e tungstênio melhoram a temperabilidade e aumentam a resistência dos aços, o níquel eleva a tenacidade, o silício aumenta a resistência da ferrita nos aços, o titânio e o vanádio em pequenas quantidades, podem proporcionar um aumento considerável na resistência devido á pequena granulometria dos carbonetos e carbonitretos, e o enxofre possui uma pequena solubilidade no ferro, porém, dependendo dos elementos de liga do aço, forma diferentes sulfetos estáveis, alguns com efeitos desejáveis e outros com efeitos indesejáveis.

2.4.3 Tratamento térmico

Através de tratamentos térmicos específicos, a estrutura de um material pode ser alterada, em relação à quantidade, forma e distribuição das segregações, com isso a resistência e a usinabilidade podem ser influenciadas positivamente.

Os tratamentos térmicos podem influenciar, dependendo da composição química do aço, a usinabilidade e principalmente a formação de cavaco e o desgaste da ferramenta (König & Klocke, 2002).

2.4.4 Integridade da superfície usinada

A integridade superficial é descrita como uma medida da qualidade da superfície usinada, vinculada às alterações sub-superficiais e ao acabamento da peça, que é dimensionada pela rugosidade, tolerância dimensional, entre outros (Chevrier, 2003, e Nouilati, 2004).

As superfícies dos componentes mecânicos devem ser adequadas ao tipo de função que exercem, por isso, a importância desse estudo aumenta à medida que crescem as exigências do projeto. As superfícies dos componentes deslizantes devem ser lisas para que o atrito seja o menor possível.

As superfícies, independentemente do processo de fabricação, apresentam irregularidades. E essas irregularidades compreendem dois grupos de erros: erros macrogeométricos e erros microgeométricos.

Erros macrogeométricos são os erros de forma, verificáveis por meio de instrumentos convencionais de medição, como micrômetros, relógios comparadores, projetores de perfil, etc. Entre esses erros, incluem-se divergências de ondulações, ovalização, reticidade, planicidade, circularidade etc.

Erros microgeométricos são os erros conhecidos como rugosidade (Bibvirt, 2006).

A importância da qualidade da superfície usinada justifica-se, entre outros com fatores como precisão e tolerância (que também são analisados neste trabalho). Em aplicações de peças com acoplamentos onde o furo e o eixo estejam em movimento relativo. As superfícies mais irregulares (com maiores valores de rugosidade) estarão expostas a desgastes mais intensos do que os que sofreriam caso tivessem um melhor acabamento (Amorim, 2002).

2.4.4.1 Textura

Todas as peças usinadas apresentam irregularidades na superfície usinada com origem durante o processo de fabricação. Estas irregularidades estão relacionadas ao processo de formação do cavaco e das deformações ocorridas devido à ação do gume da ferramenta, como as marcas de avanço. De acordo com o espaçamento das irregularidades, a textura superficial da superfície usinada pode ser dividida em três classes:

a) Irregularidades de forma, que apresentam maior espaço entre si e são perceptíveis ao longo da superfície da peça.

b) Ondulações, que apresentam espaçamento menor e surgem na superfície da peça devido a vibrações, a flexão da peça ou a outros fatores externos.

c) Rugosidade, que apresentam pequenos espaços entre as irregularidades. A rugosidade é inerente ao processo de produção, deixado pelo atual agente de usinagem (marcas de avanço).

O acabamento tende a ser uma condição estável, devendo permanecer constante em todas as peças se não houver mudanças nas condições de processo. Os engenheiros de fabricação podem estimar aproximadamente o acabamento que o processo irá fornecer, conhecendo o material, a máquina-ferramenta, a ferramenta, o fluido e os parâmetros de corte. Por esse motivo, a medição do acabamento superficial tem sido usada, fundamentalmente, para monitorar a estabilidade do processo (Oliveira, 2006).

Na Tabela 2, estão apresentados os desvios de forma apresentados pelas superfícies técnicas, bem como exemplos de onde estas são encontradas. Em todos os casos, são resultantes de seu processo de fabricação.

Tabela 2 – Desvio de forma das superfícies técnicas (König & Klocke, 2002).

Desvios de forma (representado numa seção do perfil)	Exemplos para tipos de desvios	Exemplos para origem de desvios
1ª ordem: Desvio de forma 	Não plano Ovalado	Defeitos nas guias das máquinas ferramentas; deformação por flexão da máquina ou da peça; fixação errada da peça; deformações devido a temperatura, desgaste
2ª ordem: Ondulação 	Ondas	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa; vibrações da máquina ferramenta, da ferramenta ou da peça.
3ª ordem: Rugosidade 	Ranhuras	Forma do gume da ferramenta; avanço ou profundidade de corte.
4ª ordem: Rugosidade 	Estrias Escamas Ressaltos	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço); jateamento de areia; tratamento galvânico.
5ª ordem: Rugosidade Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura	Processo de cristalização, modificação da superfície por ação química (ex. decapagem), processos de corrosão.
6ª ordem: Não mais representável graficamente em forma simples	Estrutura reticulada do material	Processos físicos e químicos da estrutura do material; tensões e deslizamentos da rede cristalina.

No monitoramento do processo, a rugosidade média R_a representa, de forma efetiva, a estabilidade. Assim, compreende-se porque este parâmetro é largamente usado nas indústrias. Entretanto, medindo-se somente o R_a , não são detectadas ocasionais elevações ou reentrâncias, importantes em uma superfície moldante (Mesquita, 1992; Tabenkin, 1999 e Oliveira, 2006).

No entanto, a rugosidade não pode ser o único critério para se avaliar a qualidade da superfície usinada, tampouco o ser o único critério para a seleção dos parâmetros de corte. É

necessário levar em consideração os efeitos provocados pela usinagem na integridade da superfície manufaturada (Hioki, 2004; Mesquita, 1992 e Oliveira, 2006).

2.4.4.2 Rugosidade

É o conjunto de irregularidades, isto é, pequenas saliências e reentrâncias que caracterizam uma superfície. Desempenha um papel importante no comportamento dos componentes mecânicos, influenciando sobre:

- precisão e tolerância;
- qualidade de deslizamento;
- resistência ao desgaste;
- possibilidade de ajuste do acoplamento forçado;
- resistência oferecida pela superfície ao escoamento de fluidos e lubrificantes;
- qualidade de aderência que a estrutura oferece às camadas protetoras;
- resistência à corrosão e à fadiga;
- vedação, e
- aparência (Amorim, 2002).

A rugosidade de uma peça manufaturada é afetada pelo processo de fabricação, pela geometria da ferramenta e pelos parâmetros de corte. Dentre as variáveis que influenciam os parâmetros da rugosidade, as mais importantes são:

- processo de fabricação: Ferraresi (2003) cita a variação da rugosidade em função dos processos de fabricação. No torneamento, os valores médios para esta aplicação giram entre $0,8\mu\text{m}$ e $6,3\mu\text{m}$. Porém, em condições especiais, esses valores podem ser aumentados ou diminuídos.

- parâmetros de corte: Diniz et al. (2000) citam o mais importante como sendo o avanço, juntamente com o raio da ponta da ferramenta. Em relação a profundidade de corte, esta não apresenta grande influência na rugosidade.

A grandeza, a orientação e o grau de irregularidade da rugosidade podem indicar suas causas que, entre outras, são:

- imperfeições nos mecanismos das máquinas-ferramenta;
- vibrações no sistema peça-ferramenta;
- desgaste das ferramentas;
- o próprio método de conformação da peça.

Essas irregularidades podem ser avaliadas com aparelhos eletrônicos, a exemplo do rugosímetro.

Parâmetros de rugosidade

Parâmetros de rugosidade são procedimentos usados para avaliar o acabamento superficial de um componente. A superfície de peças apresenta perfis bastante diferentes entre si. As saliências e reentrâncias (rugosidade) são irregulares. Para dar acabamento adequado às superfícies é necessário, portanto, determinar o nível em que elas devem ser usinadas, ou seja, deve-se adotar um parâmetro que possibilite avaliar a rugosidade (Amorim, 2002).

Rugosidade média (R_a)

O parâmetro R_a (roughness average) significa rugosidade média, sendo o parâmetro mais empregado na indústria. É a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento (y_i), dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro do percurso de medição (l_m). A Figura 7 ilustra o processo de medição do parâmetro R_a .

O valor de R_a é geralmente expresso em μm no sistema métrico.

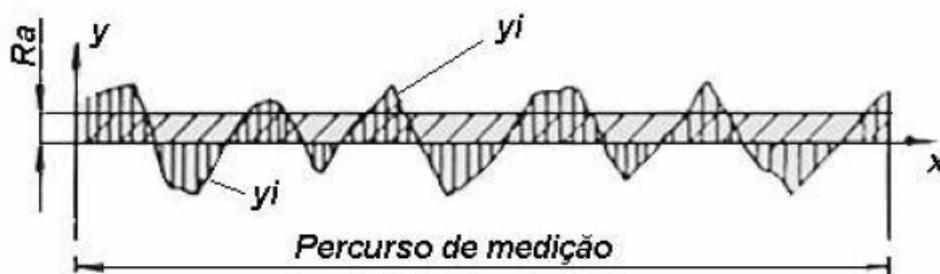


Figura 7 - Rugosidade média R_a (Mitutoyo)

Devido à facilidade de sua obtenção a partir do registro de rugosidade, a rugosidade média é bastante empregada em controles nas linhas de produção, como por exemplo, em linhas de peças torneadas (Weingaertner, 2007).

Rugosidade máxima ($R_{máx}$)

Está definido como o maior valor das rugosidades parciais (Z_i) que se apresenta no percurso de medição (l_m). Por exemplo: na Figura 8, o maior valor parcial é o Z_3 , que está localizado no 3º cut off, e que corresponde à rugosidade R_y . A Figura 8 ilustra o processo de medição do parâmetro R_a .

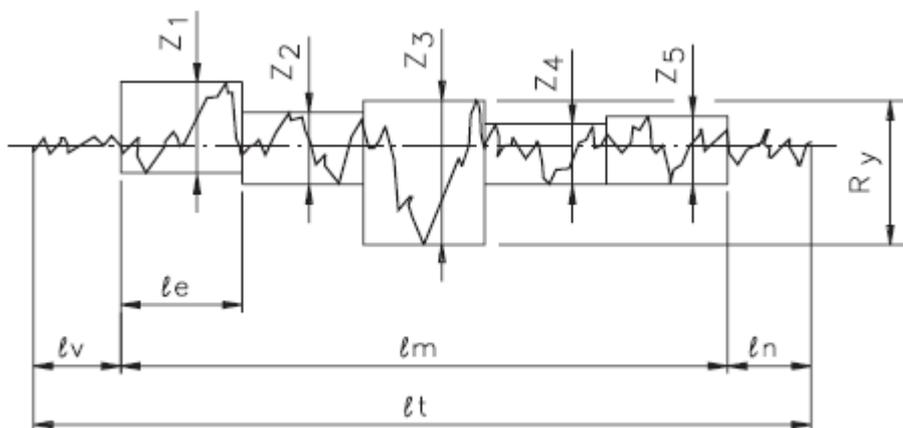


Figura 8 - Rugosidade máxima $R_{máx}$ (Mitutoyo, 2006).

2.5 Técnicas de caracterização

De acordo com o Conselho Nacional de Pesquisa, a caracterização é a descrição da composição e estrutura – inclusive defeitos – de um material que são significantes para uma preparação particular, estudo das propriedades e possível reprodução deste material. Sendo assim, a caracterização tem fundamental importância na análise de um material (Wachtman, 1993; Tentardini, 2000).

Muitas podem ser as técnicas utilizadas para a caracterização completa de um material. As técnicas de caracterização empregadas neste trabalho foram escolhidas de acordo com a natureza das amostras, e das informações que se deseja obter.

2.5.1 Medição tridimensional

O controle de qualidade dimensional é tão antigo quanto à própria indústria, mas somente nas últimas décadas vem ocupando a importante posição que lhe cabe. Esses sistemas evoluíram e fizeram uso da integração mecânica, óptica, eletrônica, física, computação, informática, técnicas de projeto e ajuste, entre outros, permitindo atingir uma maior exatidão e uma menor incerteza de medição em relação aos sistemas de medição anteriormente disponíveis. Os sistemas de medição tridimensional, além de todas as vantagens citadas anteriormente, possibilitam uma diminuição do tempo de medição, quando comparado com sistemas de medição convencionais.

A definição dimensional de uma peça é feita geometricamente no espaço tridimensional. Este espaço pode ser caracterizado por um sistema de três eixos perpendiculares entre si. No sistema cartesiano, os eixos foram convencionados com as letras X, Y e Z, sendo o ponto representado por suas coordenadas (x, y e z), conforme ilustrado na Figura 9 (Weingaertner, 2007).

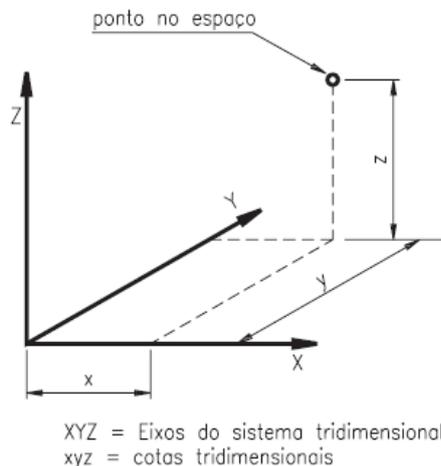


Figura 9 - Sistema de coordenadas tridimensional (Bibvirt, 2006).

A máquina de medição tridimensional consiste de uma base de referência rigorosamente plana, sobre a qual deslizam horizontalmente dois corpos, perpendiculares entre si (X e Y), e

um terceiro corpo, que se movimenta verticalmente no sentido de Z. No lado externo inferior do eixo vertical Z é acoplado um sensor especial, que pode ser mecânico, eletrônico ou óptico que entrará em contato com a peça que será medida, movimentando-se de acordo com a capacidade da máquina. O movimento de cada eixo é registrado por um sistema de leitura eletrônico mostrado digitalmente.

Na utilização da máquina tridimensional acoplada ao sistema de processamento de dados, as operações de nivelamento e alinhamento tornam-se simples e rápidas, pois o computador e seu programa compensam a posição. Por exemplo, para ajustar um plano a posição correta, é suficiente acionar um comando no computador e fazer o sensor dar três toques na peça. Quando utilizado um sensor de ponta esférica, é necessário introduzir a medida desse diâmetro na memória do computador, para que o programa leve em conta e faça uma compensação automática do diâmetro do sensor (Bibvirt, 2006; Augusto, 2006).

2.5.2 Caracterização da rugosidade

O rugosímetro é um aparelho eletrônico amplamente empregado na indústria para a verificação de superfície de peças e ferramentas. Assegura um alto padrão de qualidade nas medições, destinando-se a problemas relacionados à rugosidade das superfícies (Bibvirt, 2006). Inicialmente, o rugosímetro destinava-se somente a avaliação da rugosidade ou textura primária. Com o tempo, apareceram os critérios para avaliação da textura secundária, ou seja, a ondulação, e muitos aparelhos evoluíram para essa nova tecnologia.

A Figura 10 ilustra o esquema de funcionamento de um rugosímetro.

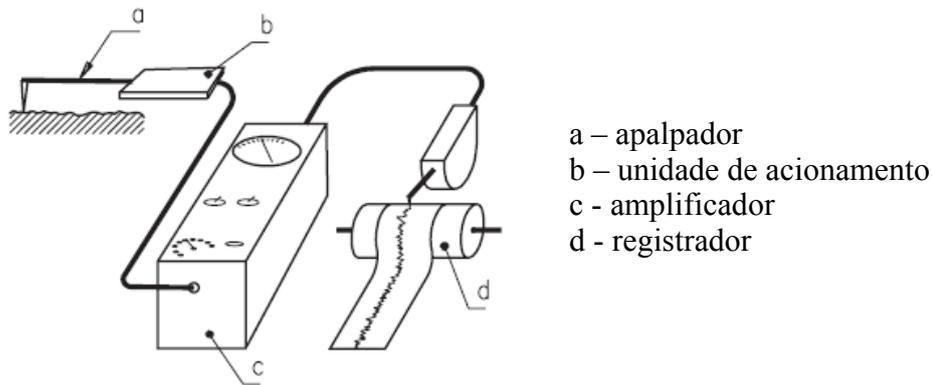


Figura 10 - Esquema de funcionamento de um rugosímetro

O processo de determinação da rugosidade consiste, basicamente, em percorrer a rugosidade com um apalpador de formato normalizado, acompanhado de uma guia (patim) em relação ao qual ele se move verticalmente.

Enquanto o apalpador acompanha a rugosidade, a guia (patim) acompanha as ondulações da superfície. O movimento da agulha é transformado em impulsos elétricos e registrado no mostrador e no gráfico (Bibvirt, 2006).

2.5.3 Análise metalográfica e microscopia Ótica

Em linhas gerais a técnica de análise metalográfica é utilizada para se fazer imagens das características microestruturais sobre uma superfície polida e atacada quimicamente com aumentos de 1 a 2000 vezes. É possível se analisar o grão, as fases estruturais e dimensões da amostra. Alguns exemplos de aplicações podem ser a determinação de como foi a fabricação e a história do tratamento térmico, determinação das características da integridade superficial, análises de falhas e caracterização dos efeitos de processamento sobre as propriedades da microestrutura.

As amostras podem ser de materiais metálicos, cerâmicas compósitos ou materiais geológicos. Já a preparação das amostras é feita em espécimes seccionados e montados,

lixados e polidos a fim de se conseguir uma superfície plana e livre de riscos, e depois atacada quimicamente para revelar as características da microestrutura de interesse (ASM, 1992).

A preparação metalográfica segue um processo que pode ser melhor explicado através da Figura 11. Inicialmente, o corpo-de-prova é cortado nos planos de interesse para a análise. A etapa seguinte é o embutimento a quente em baquelite, de forma que a superfície a ser analisada fique exposta no topo do cilindro de baquelite (Weingaertner, 2007).

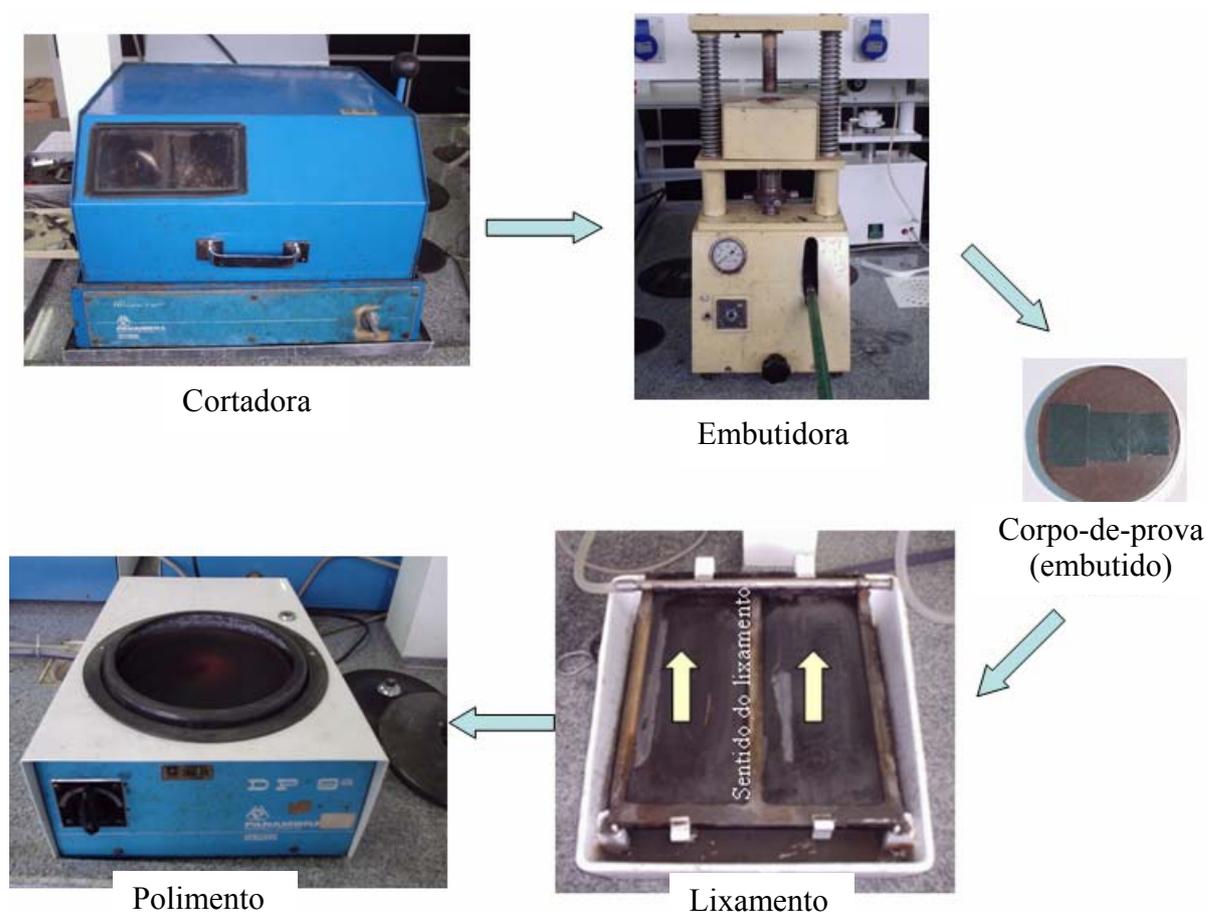


Figura 11 - Preparação para análise metalográfica.

Após embutido o corpo-de-prova, é lixado uniformemente passando por lixas com granulação de 150, 300, 400 até 1200, dependendo da aplicação. Seguido a isso, o corpo de prova embutido deve ser polido com pasta de diamante, até que não se apresentem mais riscos na superfície da amostra. É muito importante no lixamento não exceder a pressão de

lixamento para que as bordas do material a ser analisado não fiquem arredondadas, principalmente no caso do objeto de estudo em questão ser a borda da amostra.

Para visualização da microestrutura do corpo de prova de aço AISI 4140, o corpo-de-prova deve ser atacado com Nital 2% (ácido nítrico + álcool), e para visualização do contorno de grão, o ataque deve ser feito com reagente Teepol.

O exame metalográfico procura relacionar a estrutura do material às propriedades físicas, ao processo de fabricação e ao tratamento térmico. Pode ser macrográfico (exame do aspecto da superfície plana) ou micrográfico (permite observar a granulação do material, a natureza, forma, quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões) (Oliveira, 2006).

Na microscopia ótica, o contraste da imagem é resultado da diferença de reflectividade da luz nas diversas regiões da microestrutura, uma vez que o sistema é constituído basicamente pela fonte de iluminação e do sistema de lentes. Para materiais que são opacos a luz visível, como é o caso dos metais, da maioria dos cerâmicos e polímeros, somente a superfície pode ser observada e a mesma precisa ser cuidadosamente preparada de maneira a revelar os detalhes da microestrutura.

Com as imagens obtidas pela microscopia ótica é possível a determinação qualitativa do tamanho de grão, formato do grão, área de fronteira do grão por unidade de área, espaços e muitas outras em fases múltiplas de metais e cerâmicas. Ainda é possível obter-se informações quantitativas como determinação de frações do volume de segunda fase, tamanho e áreas de interferência por unidade de volume, espaços entre outros em múltiplas fases de metais e cerâmicas (ASM, 1992, Oliveira, 2006).

Uma das limitações da microscopia ótica é o aumento máximo possível, limitado em 2000 vezes. Como consequência, pequenos detalhes estruturais não são possíveis de serem detectados através desta técnica (Maliska, 2004).

2.5.4 Microscopia eletrônica de varredura

Durante a fase de produção ou análise de materiais, torna-se necessário analisar a sua microestrutura. Esta análise microestrutural é muito importante, pois permite entender as correlações microestrutura – defeitos – propriedades, e prever as propriedades do material quando estas correlações são estabelecidas. As principais diferenças entre o microscópio óptico e o microscópio eletrônico de varredura é que, no primeiro, a amostra é iluminada por um feixe de luz visível, e no segundo, por um feixe de elétrons, além do que, no microscópio eletrônico de varredura, o olho humano é substituído por um detetor de elétrons (Maliska, 2004; Tentardini, 2000).

O microscópio eletrônico de varredura (MEV) é um equipamento capaz de produzir imagens de alta ampliação (até 300000 x) e elevada resolução. As imagens fornecidas pelo MEV possuem um caráter virtual, pois o que é visualizado no monitor do aparelho é a transcodificação da energia emitida pelos elétrons, ao contrário da radiação de luz a qual estamos habitualmente acostumados.

O princípio de funcionamento do MEV consiste na emissão de feixes de elétrons por um filamento capilar de tungstênio (eletrodo negativo), mediante a aplicação de uma diferença de potencial que pode variar de 0,5 a 30 KV. Essa variação de tensão permite a variação da aceleração dos elétrons, e também provoca o aquecimento do filamento. A parte positiva em relação ao filamento do microscópio (eletrodo positivo) atrai fortemente os elétrons gerados, resultando numa aceleração em direção ao eletrodo positivo. A correção do percurso dos feixes é realizada pelas lentes condensadoras que alinham os feixes em direção à abertura da objetiva. A objetiva ajusta o foco dos feixes de elétrons antes dos elétrons atingirem a amostra analisada. Um esquema de funcionamento de um microscópio eletrônico de varredura é mostrado na Figura 12 (Finkler, 2005).

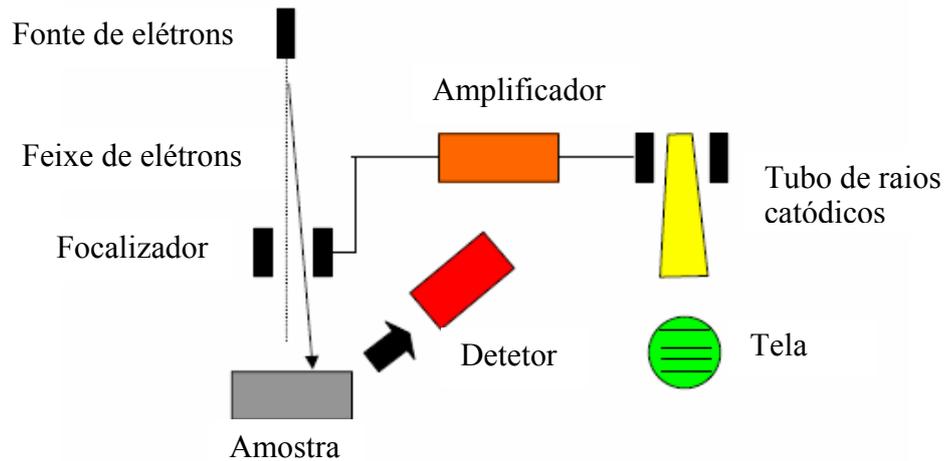


Figura12 - Esquema de um Microscópio eletrônico de varredura (Tentardini, 2000).

O principal uso do microscópio eletrônico de varredura é para obter imagens topográficas da superfície da amostra com maior magnificação e fornecer uma análise elementar do material que a constitui, desde que acoplado a um detector de estado sólido. É uma técnica não destrutiva e os cuidados com a amostra são mínimos, porém estas devem ser compatíveis com vácuo e amostras isolantes devem ser revestidas com um filme metálico (Tentardini, 2000).

2.5.5 Micro e nanodureza

Dureza é a propriedade mecânica de um material e sua medida indica a resistência do material à deformação plástica localizada através de uma pequena penetração ou um arranhão.

Uma técnica quantitativa de dureza foi desenvolvida ao longo dos anos, consiste em forçar um pequeno indentador, normalmente uma ponta de diamante ou aço que realiza a penetração deixando uma marca, ou indentação, na superfície de uma amostra a ser analisado, empregando condições controladas de carga e taxa de aplicação. A profundidade e/ou tamanho da indentação resultante é medida e relacionada a um número de dureza. Quanto menos duro o material, maior e mais profunda será a indentação e, conseqüentemente, menor será a medida de dureza.

Os três padrões mais usados em medidas de dureza são: Rockwell, Knoop e Vickers. A diferença entre eles é que o indentador Rockwell é um cone de diamante, o indentador Vickers é uma pirâmide e o indentador Knoop é uma pirâmide cuja base é um losango. Um corte transversal e uma vista superior destes indentadores é mostrado na Figura 13.

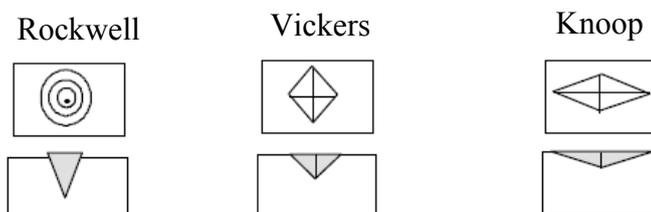


Figura 13 - Vista superior e corte transversal de perfurações feitas por indentadores Rockwell, Vickers e Knoop (Hubler, 1994).

Testes de dureza são realizados mais frequentemente que outros testes mecânicos por duas razões: são simples e baratos, pois geralmente a amostra não necessita de nenhuma preparação especial, e o equipamento utilizado não é caro. O teste não é destrutivo, pois a amostra não é fraturada ou excessivamente deformada, sendo que uma pequena indentação é a única deformação (Tentardini, 2000).

Quando as alterações superficiais e sub-superficiais são em menor escala, a técnica da nanodureza pode ser aplicada para determinar as propriedades mecânicas superficiais e sub-superficiais. Entretanto, estes testes podem ser significativamente influenciados por fatores como tensão residual da usinagem e microestrutura, sendo que a relação entre estes fatores e o comportamento mecânico na sub-superfície ainda está sendo estudado. Quanto menor a carga aplicada, maior a incerteza na medição (Warren, 2004).

Devido aos fatores de ambiente, a baixa escala do teste de nanodureza é difícil e consome muito tempo. O principal motivo é a necessidade de esperar após a montagem das amostras a estabilização térmica da máquina com o ambiente. A complacência da máquina também é um obstáculo para rápida medida de dureza e módulo de elasticidade,

especialmente quando as propriedades mecânicas do material varia com a penetração da indentação (Woirgard, 1998, Junqueira, 2004).

O mecanismo de medidas é composto por um indentador de geometria conhecida montado em uma coluna rígida pela qual é transmitida a força, sistema de aplicação de força, e um sensor para medir os deslocamentos do penetrador.

No ensaio de penetração, a medida que o penetrador é pressionado contra a superfície do material, ocorrem processos de deformações plásticas e elásticas, produzindo uma impressão de dureza com a forma do penetrador até uma profundidade limite, característica do material da amostra. São registrados o deslocamento do penetrador como função de carga e da descarga. Quando o penetrador é retirado, somente a porção elástica do deslocamento é recuperada, o que permite separar efetivamente as propriedades plásticas do material das elásticas. Uma curva genérica carga versus deslocamento para um ciclo completo de carga descarga esta ilustrada na Figura 14.

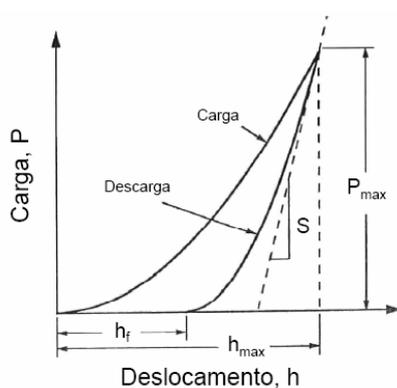


Figura 14 – Curva de resposta de ensaio de dureza nanoindentado (Oliveira, 2006).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Na abordagem deste capítulo, estão detalhados os procedimentos executados nos ensaios experimentais de torneamento longitudinal de aço AISI 4140 tratado termicamente, na usinagem com e sem fluido. Para os diversos parâmetros de usinagem e tratamentos térmicos, foi feita uma caracterização da integridade da superfície usinada. Foram avaliados a superfície e a camada limite dos corpos-de-prova, caracterizados pela medição dimensional (determinação da dimensão, circularidade e cilindridade), medição da rugosidade no sentido de avanço pela avaliação metalúrgica da camada afetada (corte transversal da amostra), efetuando-se uma análise metalográfica óptica e microscopia eletrônica de varredura bem como ensaios de micro e nanodureza.

3.1 Material ensaiado

Os corpos-de-prova são cilíndricos, feitos do aço AISI 4140, com diâmetro bruto de 38,10 mm. A composição química do material é apresentada na Tabela 3, de acordo com o certificado do material emitido na compra do mesmo.

Tabela 3 - Composição química do aço utilizado na confecção dos corpos-de-prova (Metalbrás, 2006).

C (%)	Si (%)	Mn (%)	P (%)	S (%)	Cr (%)	Ni (%)	Mo (%)	Cu (%)
0,4	0,25	0,81	0,018	0,029	0,94	0,13	0,18	0,19

3.2 Preparação dos corpos-de-prova

Os corpos-de-prova foram preparados em um torno convencional até a medida de diâmetro (\varnothing) de 30 mm x 60 mm de comprimento com tolerância de $\pm 0,1$ mm, sendo que todas as amostras foram termicamente normalizadas e com rugosidade média (R_a) de 1,5 μ m. Os parâmetros especificados foram certificados com o uso de instrumentos de medição apropriados para tal faixa de tolerância. Partindo de um corpo-de-prova em que foi retirado um sobrematerial de no mínimo três mm no raio, eliminando-se as superfícies defeituosas

provenientes do processo de laminação, por este motivo a matéria-prima base tem o diâmetro de 38,1 mm.

3.2.1 Tratamento térmico aplicado

Após os corpos-de-prova serem preparados, foi realizado o tratamento térmico destes, seguindo dados existentes na literatura. De acordo com Chandler (1995) e Cimm (2005), para a condição de normalização, o corpo-de-prova deve ser aquecido até a temperatura de austenitização (860 °C), permanecer nessa temperatura por uma hora e trinta minutos e resfriado ao ar. No tratamento térmico de têmpera, a temperatura e o tempo de permanência foram as mesmas da condição normalizada, porém o resfriamento foi realizado em martêmpera a 180°C. O revenimento foi feito em temperaturas entre 200 e 700°C, em função da dureza desejada, de acordo com a Figura 15.

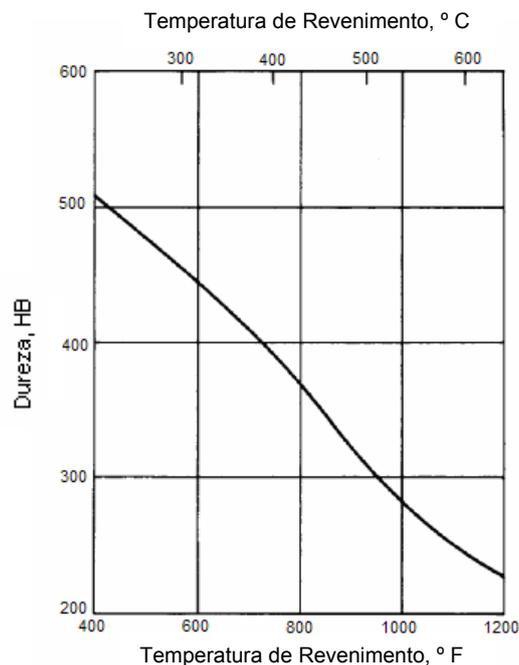


Figura 15 - Curva de revenimento do aço AISI 4140 (Chandler, 1995).

Foram realizados tratamentos térmicos para quatro condições de dureza do material, que estão descritos na Tabela 4 (Kraft, 2006):

Tabela 4 - Tratamento térmico aplicado.

Nº Amostra	Tratamento térmico	Temp. (°C)	Tempo (min)	Dureza média (HRc)	Dureza média (Vickers)
Amostra 1	normalizado	860	90	21 – 23	243 – 254
Amostra 2	tempera e revenimento	690	90	21 – 24	243 – 260
Amostra 3	tempera e revenimento	490	90	43 – 44	423 – 434
Amostra 4	tempera e revenimento	250	90	53 – 54	560 – 577

As estruturas obtidas após o tratamento térmico estão ilustradas na Figura 16. O tempo de tratamento térmico foi determinado de acordo com o volume da peça. Na estrutura normalizada, tem-se a presença de ferrita e perlita, e a estrutura resultante do processo de têmpera seguida de revenimento é a martensita revenida.

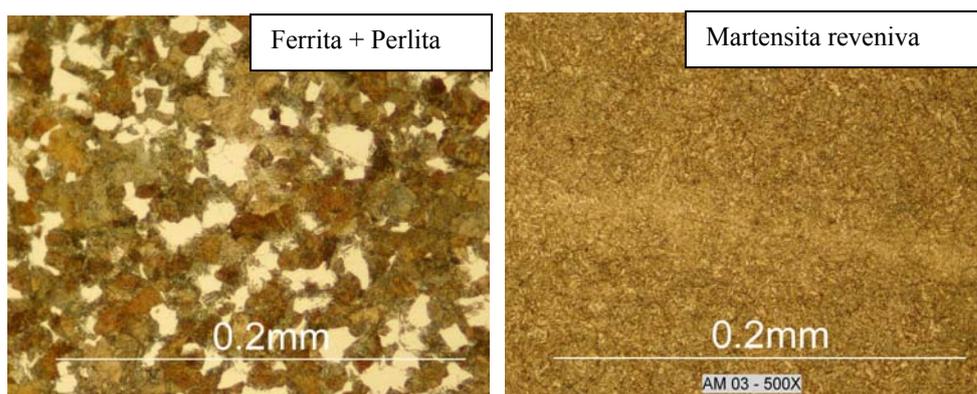


Figura 16 – Micrografias do AISI 4140.

As durezas foram asseguradas com a verificação em todos os corpos-de-prova utilizados, com durômetros devidamente calibrados para tais faixas de medição.

3.3 Máquinas e equipamentos

3.3.1 Ferramenta

No torneamento das amostras foi empregado um suporte MTJNL 2525 M16 M1, com inserto TNMG 160408 PF 4015 de metal duro e cobertura de nitreto de titânio, da marca Sandvik Coromant. Para cada uma das condições de usinagem proposta, foi utilizado um

gume novo, analisado previamente em um microscópio, seguindo a norma ISO 3685 (ISO, 1993). Dados como avanço de corte e outros parâmetros necessários para a usinagem do material foram determinados de acordo com a recomendação do fabricante dos insertos.

3.3.2 Máquina-ferramenta

A máquina ferramenta utilizada para a usinagem dos corpos-de-prova foi um Centro de Torneamento Integrex 200Y, ano 2001, marca Mazak, com rotação máxima de 5000 rpm na placa, onde o *presset* (zeramento da ferramenta) é feito automaticamente com auxílio de sensores.

3.4 Condições de usinagem dos corpos-de-prova

São quatro as condições de trabalho, cada uma delas ensaiada com e sem a presença da lubri-refrigeração. Os ensaios para cada condição são repetidos três vezes cada, totalizando 24 ensaios. As condições para os ensaios estão descritas na Tabela 4.

Nos ensaios com lubri-refrigeração em emulsão, foi utilizado o fluido comercial Sidersol 501[®], com concentração entre 4,5% a 6,0% (pH 9,00).

Dos 60 mm de comprimento, foram usados 25 mm para fixação nas castanhas do torno, e usinados 30 mm, conforme a Figura 17. O diâmetro nominal final da peça foi de 28 mm, e sobre esta medida final desejada serão feitas às análises dimensionais, testes de rugosidade e os posteriores ensaios metalográficos, a fim de se analisar as dimensões e a microestrutura resultante.

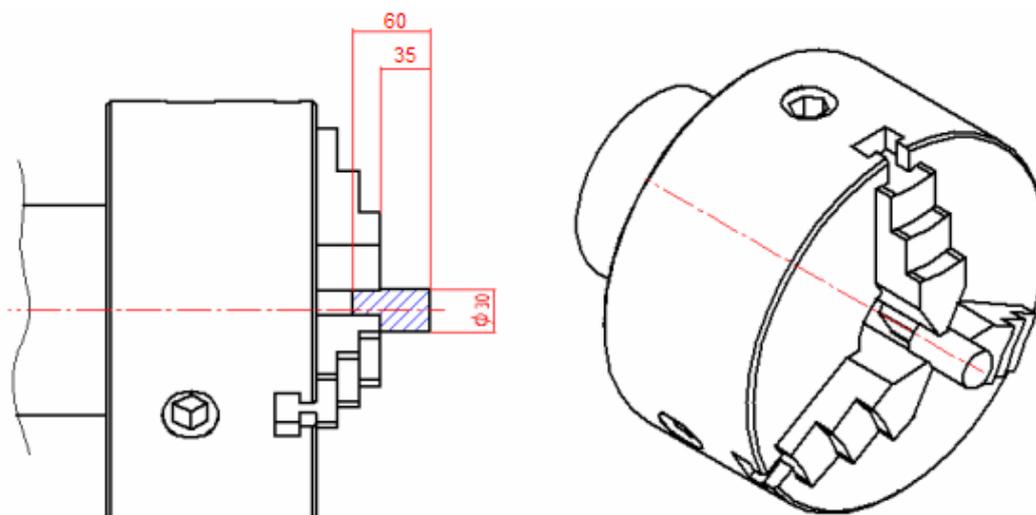


Figura 17 - Sistema de fixação do corpo-de-prova

O processo de torneamento foi realizado através de uma etapa de desbaste, deixando 0,2 mm de sobremetal para retirar na operação de acabamento. Os parâmetros de usinagem utilizados estão descritos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros de usinagem.

Nº Amostra	Condições do material	Etapa	v_c (m/min)	a_p (mm)	f (mm)
Amostra 1	250 HV (norm.)	acabamento	360	0,2	0,10
Amostra 2	250 HV	acabamento	360	0,2	0,10
Amostra 3	430 HV	acabamento	210	0,2	0,10
Amostra 4	570 HV	acabamento	210	0,2	0,10

3.5 Análises experimentais

3.5.1 Desvio dimensional, circularidade e cilindricidade

As análises dimensionais, circularidade e cilindricidade foram realizadas no laboratório metrológico do CETEMP – RS, que segue a norma NBR 6165, eliminando assim os problemas relatados por König (2002), que cita possíveis desvios provocados pelo princípio de medição, e também a influência da variação da temperatura ambiente, iluminação, e uma instalação não adequada do sistema de medição.

Foi utilizada uma máquina de medição tridimensional Zeiss modelo UMC 850, com apalpador esférico de 5 mm de diâmetro, força de medição 0,2 N e incerteza de medição de \pm

0,2 μm . Considerando uma área usinada de 30 mm de altura, o escaneamento dos pontos foi realizado em 3 diferentes pontos do corpo-de-prova: a 5, 15 e 25 mm, conforme ilustra a Figura 18.

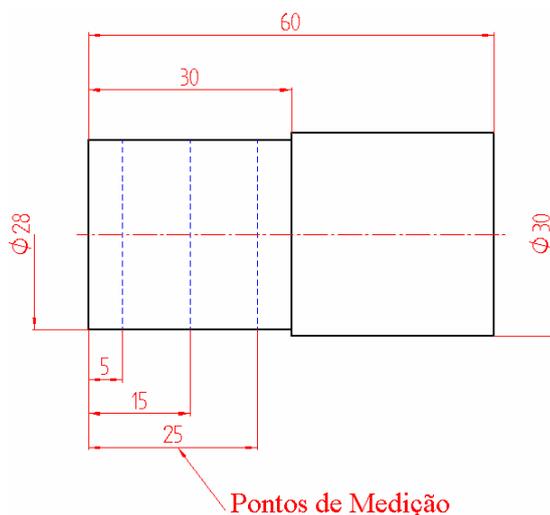


Figura 18 - Pontos de medição do diâmetro nominal, circularidade e cilindricidade da superfície usinada.

3.5.2 Qualidade da superfície usinada

Os ensaios de rugosidade foram feitos na ETFar – Escola Técnica da Universidade de Caxias do Sul, localizada na cidade de Farroupilha. O equipamento utilizado é um rugosímetro marca Mitutoyo SJ-301, com ponta de diamante de raio de 5 μm e capacidade da unidade de leitura entre 0,01 μm e 100 μm , com impressora integrada.

3.5.3 Análises metalográficas e microscopia ótica

Para realização do ensaio metalográfico foram observadas as normas ABNT 11568 e ABNT 8653. A preparação e o embutimento dos corpos-de-prova foram realizados no laboratório de metalografia da UCS, em Caxias do Sul. Após o embutimento, a amostra foi lixada com lixa de granulometria de 150, 300, 400 e 600, respectivamente, e polida com pasta de diamante 3 μm . Durante o ensaio metalográfico foram testados vários ataques com reagentes químicos, tais como nital 2%, nital 5% e teepol. Esses ataques foram testados com a

finalidade de obter-se uma melhor imagem, que revelasse uma possível deformação plástica decorrente da usinagem.

Desta forma, os ácidos que apresentaram melhores imagens foram o nital 2% e o teepol, o primeiro para visualização da microestrutura, e o segundo para verificar o contorno de grão e as deformações plásticas na borda do material. As metalografias foram analisadas no microscópio metalográfico Nikon Epiphot 200, com câmera CCD e magnificação de 50 a 1000X, no laboratório de microscopia, também localizado na UCS.

Nas micrografias de cortes transversais obtida com ampliação definida, foi medida a espessura da região deformada plasticamente pela operação de torneamento. Em decorrência das irregularidades na espessura desta camada foram traçados o perfil da deformação total, em seu ponto mais afastado da borda, e a deformação média, que foi medida baseando-se no ponto médio da deformação visualizada.

3.5.4 Microscopia eletrônica de varredura

As análises com o microscópio eletrônico de varredura foram feitas na empresa Fras-le SA, no equipamento Jeol modelo JSM-5800. Para que fosse possível realizar as medidas, os corpos-de-prova foram cortados e embutidos a quente com baquelite e polidos como para uma análise metalográfica. As amostras foram previamente atacadas com Nital 2% por um tempo de 15 segundos.

3.5.5 Micro e nanodureza

A fim de avaliar se houve um aumento da dureza na borda em relação ao núcleo da amostra, foi utilizada a técnica da micro dureza. No entanto, não foi possível encontrar variações nas medidas realizadas. Isso se deve ao fato de que com esta técnica não é possível de se fazer medidas tão próximas quanto às desejadas da borda do material. Desta forma, a primeira impressão só poderia ser feita a partir de aproximadamente 40 μm de distância da

borda ficando fora da região deformada plasticamente e fora da região em que se teve mudanças de dureza para os processos empregados neste trabalho. Na Figura 19 é possível observar uma imagem das impressões de micro-dureza realizadas nas amostras. Como os valores de micro-dureza não apresentaram variações, partiu-se para a técnica de nanodureza.

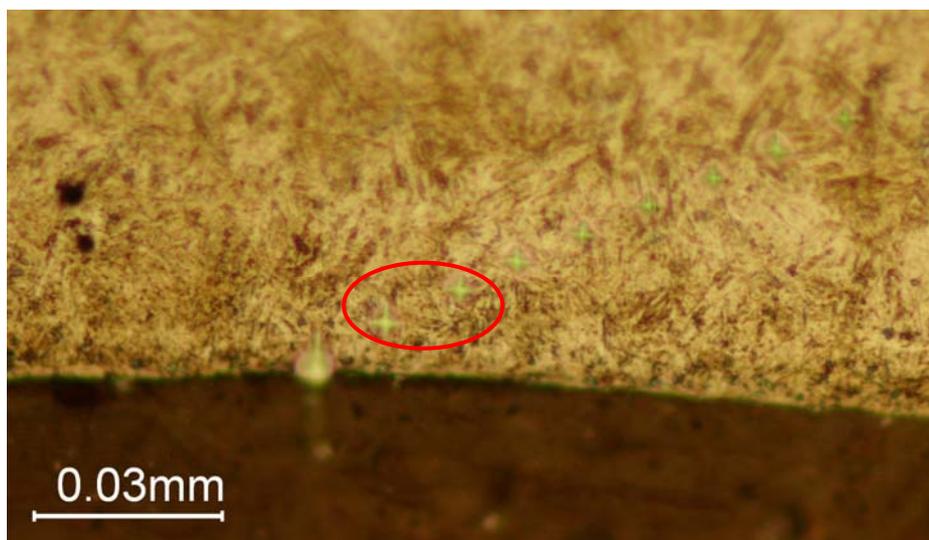


Figura 19 – Impressões de micro-dureza em um corpo-de-prova, durante a fase de pré-testes.

As medidas de nano dureza permitiram verificar a existência ou não de um gradiente de dureza. Estas medidas foram realizadas no GEPSI da PUC – RS com o nano-durômetro marca Helmuth – Fischer, com capacidade de medidas nas faixas de nano e microdureza controlado por computador. Foram realizadas medidas da camada sub-superficial, fazendo um levantamento do seu perfil. As medições foram feitas a uma distância de 5, 15 e 50 μm da borda.

Para que fosse possível realizar as medidas, os corpos-de-prova foram cortados e embutidos (semelhante à análise do MEV e polidos como para uma análise metalográfica). Desta forma, foi possível garantir que não ocorressem os arredondamentos de borda, fato que ocorre no processo de polimento das amostras.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios experimentais. As análises dimensionais, circularidade, cilindridade e rugosidade, feitas na superfície do corpo-de-prova usinado a fim de caracterizar a qualidade da superfície usinada e o desvio dimensional, são apresentadas em forma de Tabelas e gráficos. As análises metalográficas, a microscopia ótica e a microscopia eletrônica de varredura, feitas para a análise da microestrutura abaixo da borda do corpo-de-prova, são apresentadas em forma de fotos e micrografias. O perfil de nanodureza, feito para quantificação da mudança de propriedades do material, é apresentado em forma de gráfico.

4.1 Desvio dimensional, circularidade e cilindridade

Na análise dimensional, para a avaliação do diâmetro nominal, foi adotado um critério de verificação quantitativo da qualidade da usinagem, baseado na tolerância classe k7: a haste diâmetro de 28 mm é considerada como boa, quando se encontra dentro de uma tolerância D k7 (para o diâmetro D entre 18 e 30 mm, tem-se uma tolerância entre + 2 μm e + 23 μm) (Tabellenbuch Metall, 2005).

Analisando todos os diâmetros nominais, verificou-se que aproximadamente 60% dos resultados totais ficaram enquadrados na tolerância k7. Foram atingidos valores de diâmetro dentro da faixa de 27,996 até 28,038. Isto significa que, os eixos apresentaram valores até 38 μm acima do diâmetro teórico nominal (superior a uma tolerância classe k8). Os resultados estão ilustrados na Figura 20.

Se considerarmos isoladamente, na condição a seco obteve-se aproximadamente 90% de resultados enquadrados na faixa de tolerância, enquanto na condição com lubri-refrigeração a eficiência foi de aproximadamente 40%.

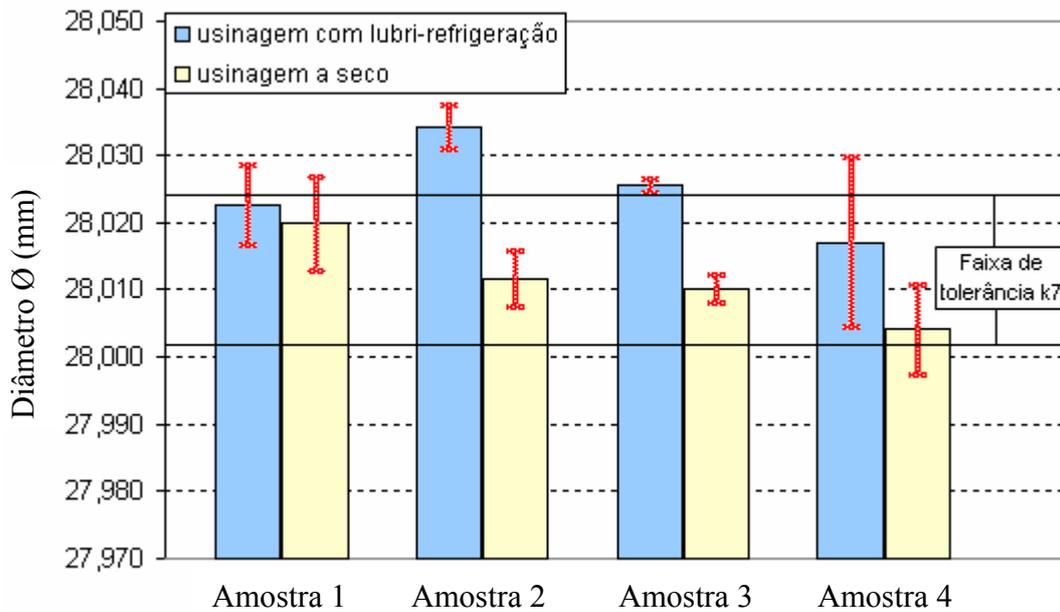


Figura 20 - Resultados da análise dimensional

Com relação à lubri-refrigeração e seus efeitos no processo, apenas na condição em que os corpos-de-prova foram normalizados (amostra 1) não foi possível identificar a influência da lubri-refrigeração, pois os resultados ficaram na mesma faixa. Nas outras condições, é possível verificar a diferença dimensional devido à presença da lubri-refrigeração. Percebe-se que nas amostras 2, 3 e 4 os resultados ficaram em faixas diferentes.

Os maiores diâmetros foram obtidos na usinagem com lubri-refrigeração, na condição com dureza média de 250 HV temperado e revenido (amostra 2). Para a amostra 3, na condição com lubri-refrigeração, os resultados obtidos também ficaram fora da faixa de tolerância estabelecida para os ensaios. Para os ensaios realizados, não foi analisada a vida útil da ferramenta. As variáveis de maior impacto analisadas foram a qualidade superficial e o desvio dimensional, por isso partiu-se de um gume novo para cada condição de trabalho.

Em todos os grupos de amostras, os diâmetros encontrados na condição a seco foi menor do que o diâmetro encontrado na condição de usinagem com lubri-refrigeração, e acorda com Caldeira (2005), que cita que durante a usinagem, o calor gerado no processo de deformação do cavaco provoca o seu amolecimento, o que facilita o corte. Em superfícies endurecidas, a

deformação plástica é menor, e o calor gerado é maior. Isto significa que, devido ao alto aquecimento durante o processo de corte sem ação de um fluido refrigerante, o corpo-de-prova dilatou, e quando a peça voltou a temperatura ambiente, houve a contração do material. O tempo de usinagem envolvido no processo foi de cerca de 30 segundos, sendo aproximadamente 13 segundos para desbaste e 17 segundos para acabamento, tempo esse suficiente para estabilizar a temperatura de corte (Konig, 2002).

Segundo Ahmed (2006), as altas temperaturas causam diferenças dimensionais e falhas prematuras na ferramenta de corte. A usinagem a seco é uma aplicação interessante, e encontra sucesso no campo da manufatura ecologicamente correta, porém, na verdade, ela é menos efetiva quando é requerida maior eficiência de usinagem, um melhor acabamento superficial e condições severas de corte.

König (2002) também cita que no torneamento longitudinal de peças cilíndricas é possível surgir erros dimensionais quando para um mesmo posicionamento na máquina, a peça bruta apresente variações de diâmetro, tendo-se assim uma variação na secção da usinagem e também uma variação da força da usinagem, que por sua vez leva a diversas deformações da máquina-ferramenta, ferramenta e peça. No processo, a secção da usinagem foi controlada através das medições dimensionais, e não obteve-se variações significativa.

Para a análise da circularidade foram avaliados os registros dos erros de forma no eixo. Em todos os ensaios, a circularidade foi medida em três alturas pontos, da mesma maneira que o diâmetro nominal: 5, 15 e 25 mm, conforme ilustrado na Figura 21. Com isso, pode-se verificar a circularidade e também a tendência do erro de cilíndricidade. A adoção deste procedimento permite averiguar de uma forma confiável a tendência apresentada pelo eixo. Os resultados estão ilustrados na Figura 22.

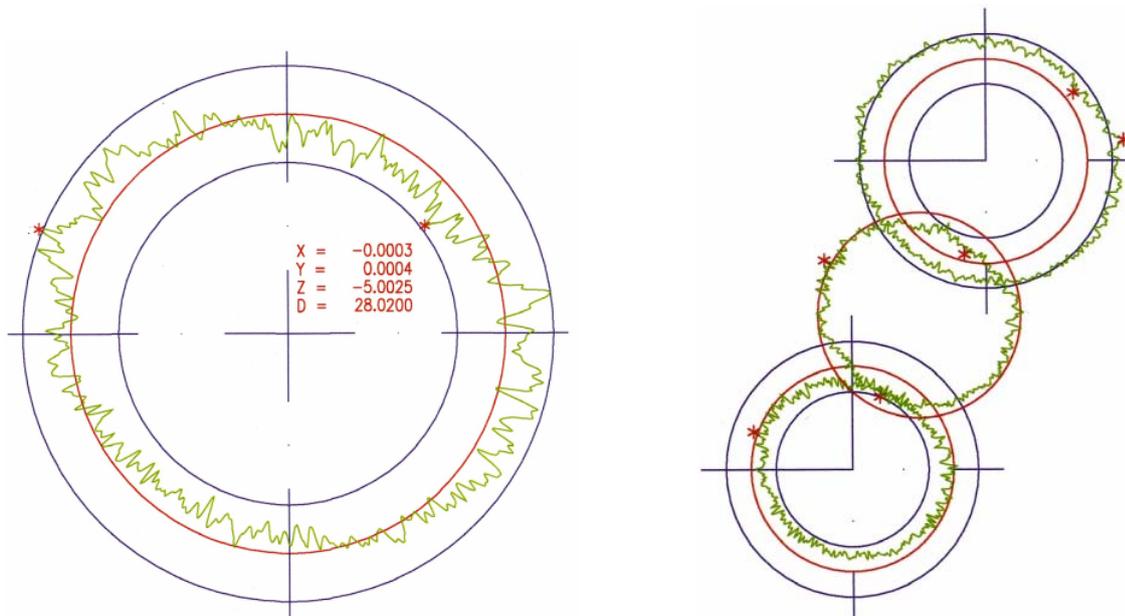


Figura 21 - Resultados típicos da circularidade e cilindricidade encontrados.

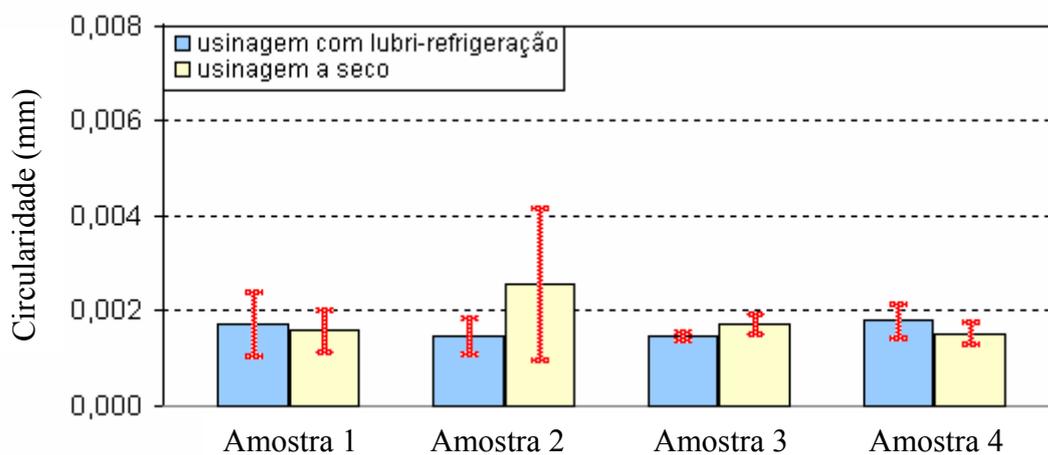


Figura 22 - Resultados da circularidade.

Quanto aos resultados da medição da circularidade, observou-se que não houve uma diferença significativa entre os resultados na usinagem a seco e na usinagem com lubri-refrigeração. Todas as análises tiveram um mesmo comportamento, não havendo grande diferença entre os valores. O erro máximo de circularidade encontrado foi de 4,4 μm , mas o valor médio ficou em 1,7 μm . Essa diferença de circularidade pode ocorrer, como cita König (2002), devido a erros de fixação da peça. No momento da usinagem, o zeramento das peças foi feito com base em relógios apalpadores e relógios comparadores, porém, como a diferença

não chega a ser centesimal, os erros encontrados podem ser atribuídos então a problemas de fixação. No gráfico, percebe-se que na amostra 2, na usinagem a seco, o valor do desvio está desproporcional com os demais resultados, porém, quantitativamente, essa diferença não é significativa, a ponto de representar uma mudança de interpretação nas análises.

Com relação à cilindridade, considerando os fatores avaliados que podem afetar a mesma, foi possível perceber que, em 100% dos casos, o eixo apresentou uma leve conicidade negativa, ou seja, o diâmetro encontrado na medição da altura de 5 mm sempre foi maior do que o encontrado na altura de 15 mm, e o diâmetro na altura de 15 mm foi maior do que o encontrado na altura de 25 mm, porém a diminuição do diâmetro foi inferior a 0,5 μm , e pode ser verificada na Figura 23. Porém, não ficou evidenciada nenhuma mudança significativa para os valores. O desvio mínimo encontrado foi de 2,4 μm , e o máximo, 7,6 μm .

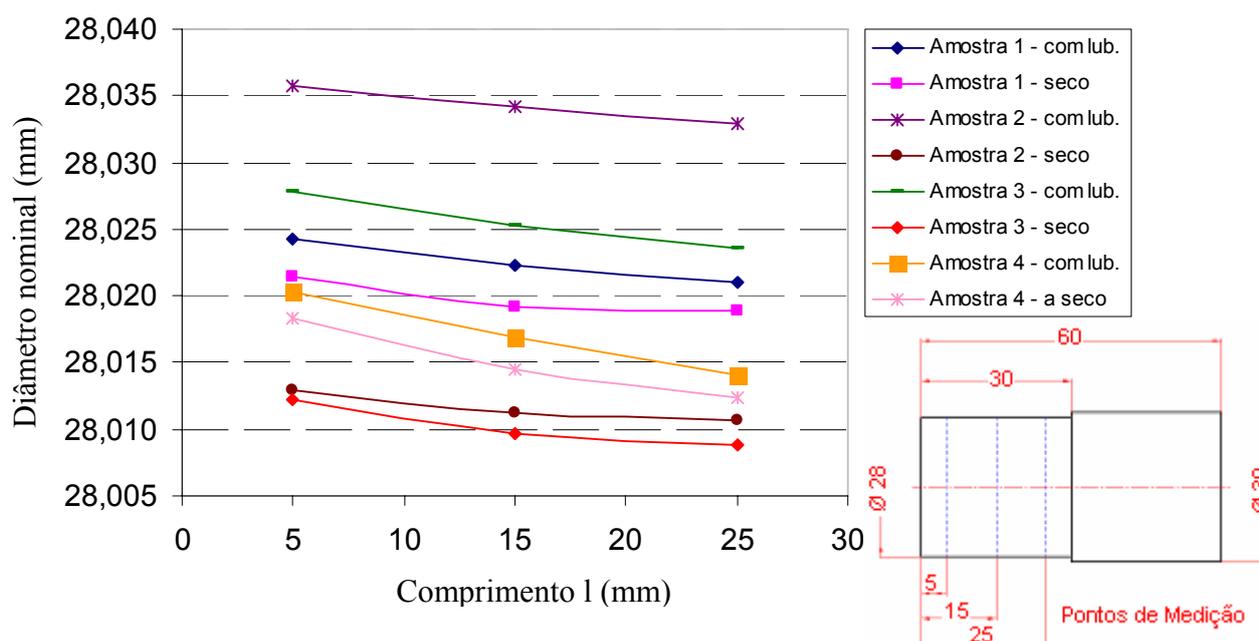


Figura 23 - Resultados relativos à cilindridade.

Dentre as possíveis causas para a conicidade encontrada, Carrino (2002) cita como possível fonte de desvios uma deflexão no cone de fixação da ferramenta. König (2002) diz que um desvio de forma cônico no torneamento longitudinal muitas vezes decorre do fato de que a fixação da peça não está paralela ao sentido de trabalho. König (2002) também cita que

usinagem de materiais endurecidos, a força passiva é alta, ao contrario dos materiais moles, frequentemente maiores que as forças de corte, o que também pode ter contribuído para a conicidade. Weinert (1999) também apresenta resultados que mostram que a força passiva pode resultar em diferentes geometrias. Porto (2004) diz que as forças de corte podem causar problemas de dilatação térmica na peça usinada, influenciando sobre a qualidade final da forma, e também destaca que em alguns casos a força passiva pode alcançar valores superiores ao valor da força de corte.

Também podem ser levadas em conta as considerações de Lima (2001) e Matsumoto (1998), que citam que, na usinagem de materiais duros, a grande força passiva pode causar erros dimensionais devido à deformação elástica no conjunto peça, ferramenta de corte e máquina ferramenta, e as deformações elásticas próximas à região de corte. Lima ainda cita que materiais duros são caracterizados pela elevada dureza e baixo módulo de elasticidade, e as tensões geradas na região de contato ferramenta-peça causam apreciável quantidade de deformação elástica na ordem de 1 – 10 μm .

4.2 Qualidade da superfície usinada

Os efeitos da usinagem sobre a qualidade de superfície usinada foram avaliados através da caracterização da rugosidade. A Figura 24 mostra o comportamento da rugosidade média (R_a) para todos os ensaios, com e sem a presença da lubri-refrigeração. Na Figura 25, tem-se os resultados da rugosidade máxima ($R_{m\acute{a}x}$). As barras indicam o desvio padrão, que foi calculado a partir da média dos diâmetros.

Nas medições da rugosidade, concluiu-se que a presença da lubri-refrigeração não tem influência significativa na rugosidade, ou seja, não apresenta algum tipo de alteração ou melhora. Isso está de acordo com Ferraresi (2003) que relata que, com relação ao acabamento, os fluídos de corte não podem fazer nada para corrigir os efeitos das demais condições de corte, e com Scandiffio (2000), Hioki (1998) e König (2002), que relatam que a

rugosidade tem um comportamento aleatório, provavelmente acompanhando as variações da geometria da ponta da ferramenta ao longo do processo, variações essas que exercem uma influência considerável sobre a rugosidade.

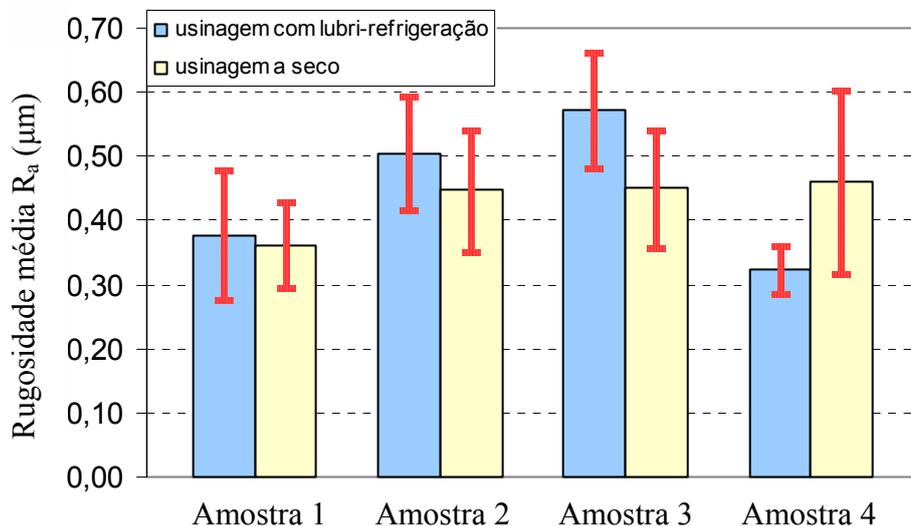


Figura 24 - Comportamento da rugosidade média (R_a).

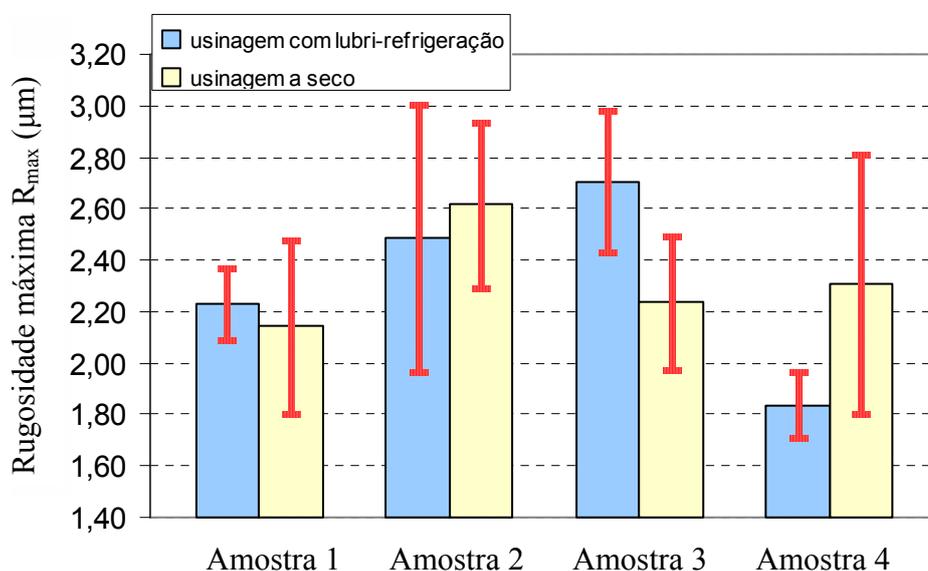


Figura 25 - Comportamento da rugosidade máxima ($R_{\text{máx}}$)

De acordo com Caldeira (2005), a tecnologia de alisamento wiper para insertos consegue valores de rugosidade mais baixos do que os obtidos no processo com insertos convencionais. Nos ensaios realizados, foram utilizados apenas insertos convencionais, o que

pode ter contribuído para o aumento da rugosidade das amostras 3 e 4. Os valores de rugosidade também podem ser afetados pela rigidez do conjunto máquina/ferramenta/fixação, como citado por Bonifácio (1993) e Nascimento (2006). As Figuras 26 e 27 ilustram os perfis de rugosidade característicos encontrados.

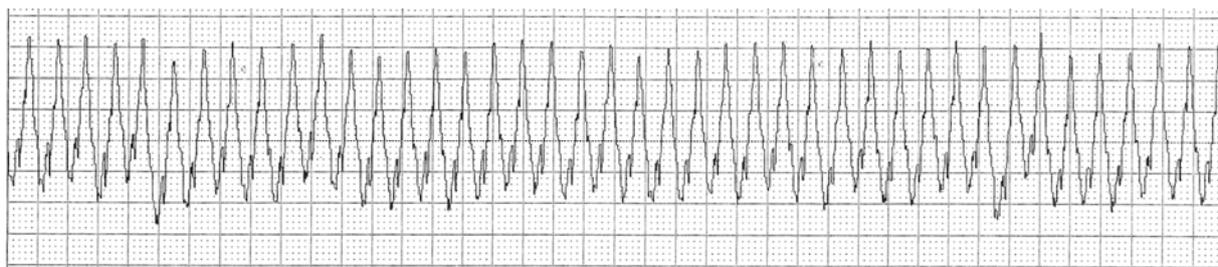


Figura 26: Perfil de rugosidade típico encontrado na usinagem com lubri-refrigeração (Escala: vertical 1 μm / cm, horizontal 200 μm / cm).

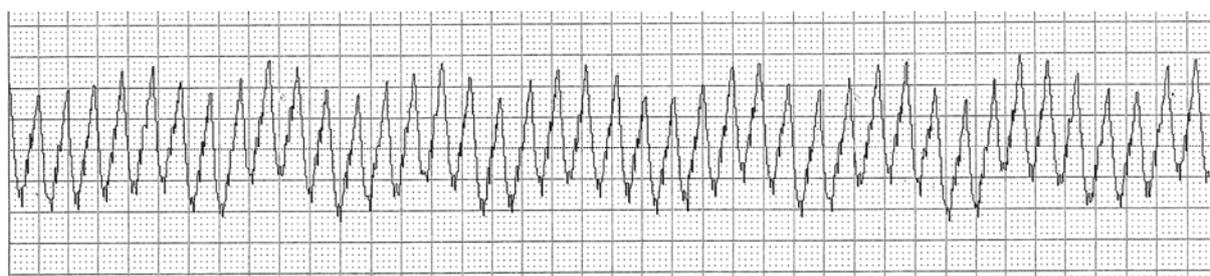


Figura 27: Perfil de rugosidade típico encontrado na usinagem sem lubri-refrigeração (Escala: vertical 1 μm / cm, horizontal 200 μm / cm).

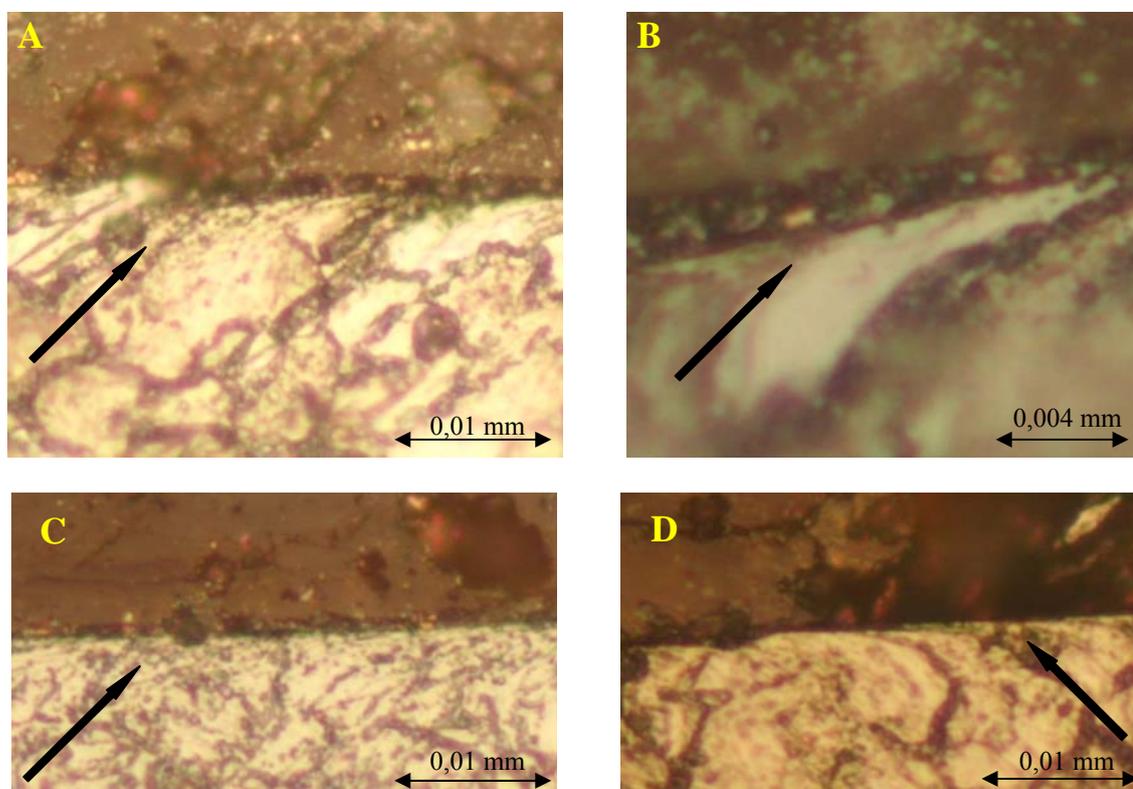
Portanto, notifica-se que geralmente a rugosidade não depende diretamente da condição de lubri-refrigeração, mas sim de fatores que desgastam a ponta da ferramenta, causando uma variação na mesma, piorando consideravelmente a qualidade da superfície usinada. Em alguns casos, o aumento da rugosidade pode ser atribuído ao emaranhamento do cavaco na operação de acabamento, que permanece em contato, riscando a peça e assim prejudicando o acabamento.

4.3 Metalografias e microscopia ótica

Para a caracterização da superfície e sub-superfície foram feitas análises metalográficas, microscopias óticas, microscopias eletrônicas de varredura e medições de nanodureza.

Para a análise metalográfica, onde pode-se averiguar as possíveis alterações ocorridas e sua estrutura, bem como a identificação de eventuais falhas e micro-trincas, os corpos-de-prova foram cuidadosamente cortados em seções transversais, e embutidos em epóxi.

Após o processo de lixamento e polimento, foi feito o ataque químico com solução de teepol, a fim de visualizar o contorno de grão. A Figura 28 identifica os resultados típicos encontrados nas microscopias óticas, de acordo com a condição de dureza do material. As setas indicam o sentido da deformação plástica encontrada. Cabe aqui ressaltar que as deformações encontradas foram sempre no sentido do avanço da usinagem, independente da posição das setas, pois as imagens ficaram de acordo com o embutimento realizado.



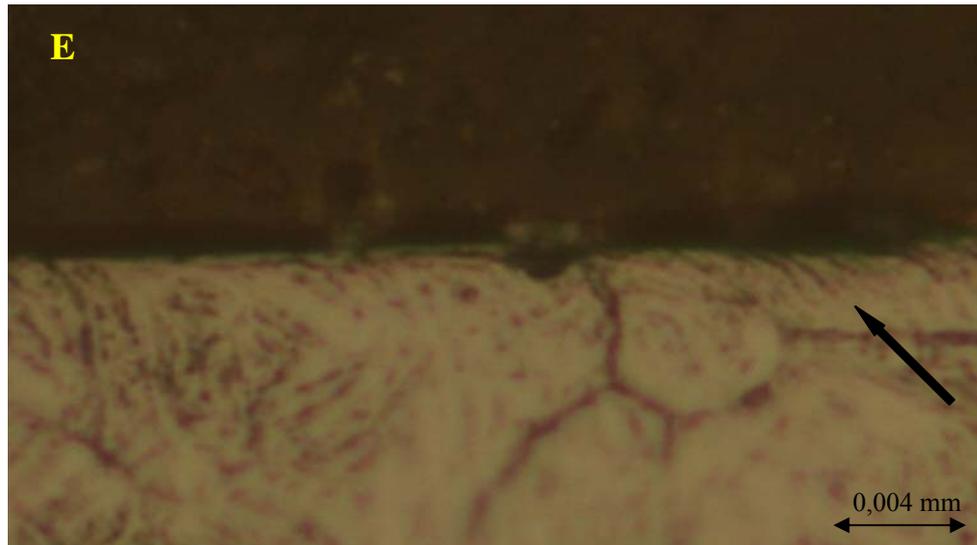


Figura 28 - Micrografia A) normalizado e usinado com lubri-refrigeração; B) normalizado e usinado a seco; C) 21-24 HRc, usinado a seco; D) 43-44 HRc, usinado com lubri-refrigeração; e E) 53-54 HRc, usinado com lubri-refrigeração. As micrografias A, C e D estão ampliadas em 500X, enquanto que B e E estão ampliadas em 1000X.

Os resultados obtidos para a máxima profundidade das deformações plásticas abaixo da borda usinada, com base nas micrografias, estão ilustrados na Figura 29.

Através de medidas realizadas, foi possível constatar que existem pequenas deformações plásticas em todas as amostras, ou seja, tanto no torneamento a seco quanto no torneamento com lubri-refrigeração. Existem variações destas deformações, porém, as deformações máximas chegaram na casa de 16 μm , enquanto que a deformação média encontrada não passou de 10 μm .

Deformações plásticas também foram encontradas no torneamento em ensaios realizados por Weinert (1999) e König (2002), especialmente após a ferramenta já apresentar um certo desgaste, principalmente na usinagem de materiais endurecidos, aqui representadas pelas amostras 3 e 4.

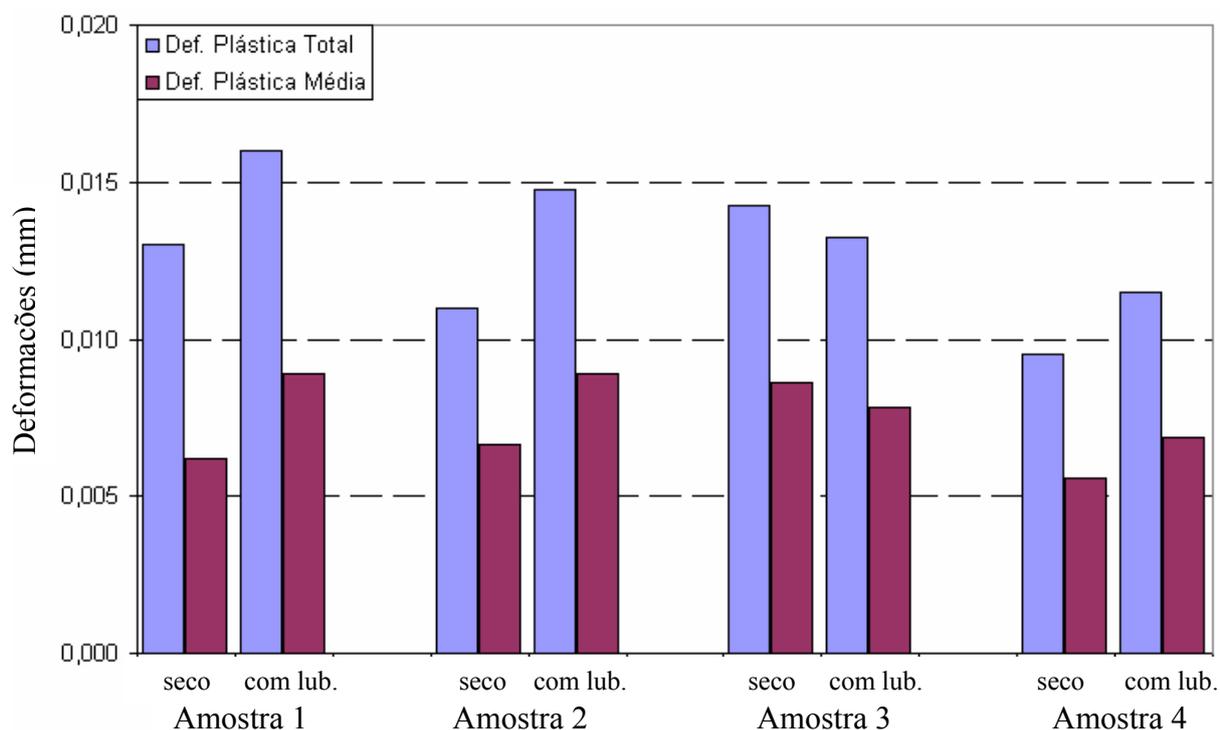


Figura 29 - Deformações plásticas encontradas.

Os resultados apresentaram-se bastante aleatórios quanto à influência do fluido lubri-refrigerante. Não se pode concluir se realmente o fluido atuou para que houvesse uma diminuição na faixa de deformação da sub-superfície.

Além disso, existem outros fatores a serem observados, como pequenos vales que podem ser origens de futuras trincas. Não visíveis sem a utilização de um microscópio, estes vales podem ser pontos concentradores de tensões. Para os corpos-de-prova com dureza acima de 40 HRC é possível que regiões de deformações menores tenham sido geradas por este processo como cita Klocke et al (2005), que não podem ser observados pela técnica aplicada.

4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Para obter-se uma melhor visão microestrutura do material, foram feitas análises e fotos no microscópio eletrônico de varredura, que permite aumentos superiores ao microscópio óptico. Através destas micrografias, foi possível confirmar as deformações visualizadas na microscopia óptica.

Nas amostras 1 e 2, (estrutura normalizada, e temperado e revenido com dureza média de 250 HV), foi possível visualizar as deformações plásticas com maior nitidez. Na Figura 30 são apresentados resultados das microscopias realizadas na amostra 1, usinada com lubri-refrigeração. Já na Figura 31, tem-se os resultados obtidos na amostra 2. As setas indicam o sentido da deformação.

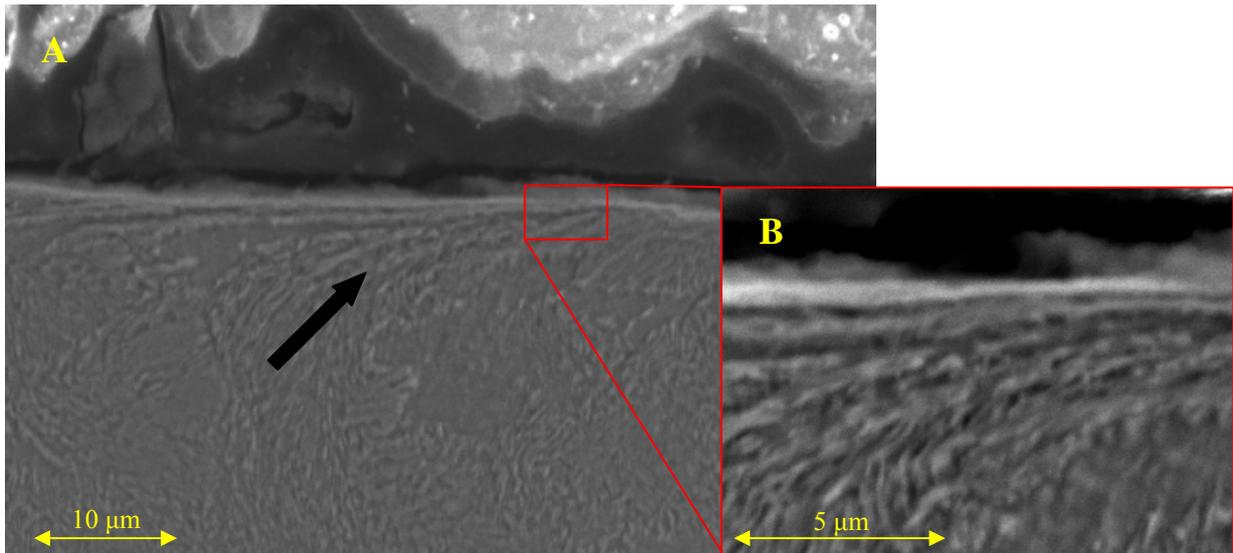


Figura 30 - Fotos tiradas da amostra 1, usinada com lubri-refrigeração. Na Figura A, a foto está com aumento de 800 X, e no detalhe B, a ampliação com aumento de 2300X.

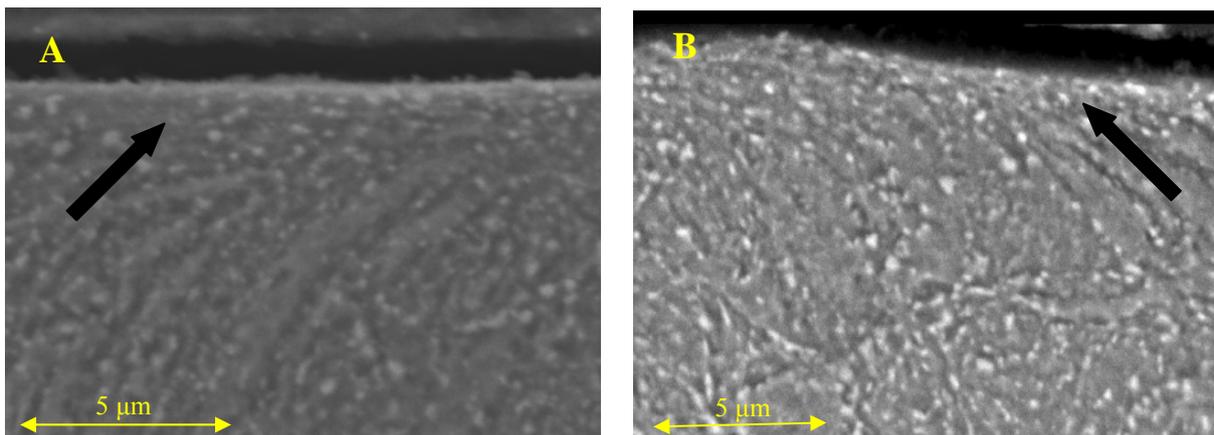


Figura 31 - Fotos tiradas da amostra 2. A Figura A foi usinada a seco, e a B usinada com lubri-refrigeração. Aumento de 2300X.

Já para as amostras 3 e 4, com durezas mais elevadas, a deformação encontrada foi visualmente menor do que nas amostras 1 e 2. Isso pode ser atribuído à maior facilidade para usinar as amostras 1 e 2, devido a sua baixa dureza. Por consequência, mesmo com um maior esforço para a usinagem das amostras 3 e 4, as deformações plásticas encontradas foram menores. As deformações das amostras 3 e 4 estão ilustradas nas Figuras 32 e 33, respectivamente.

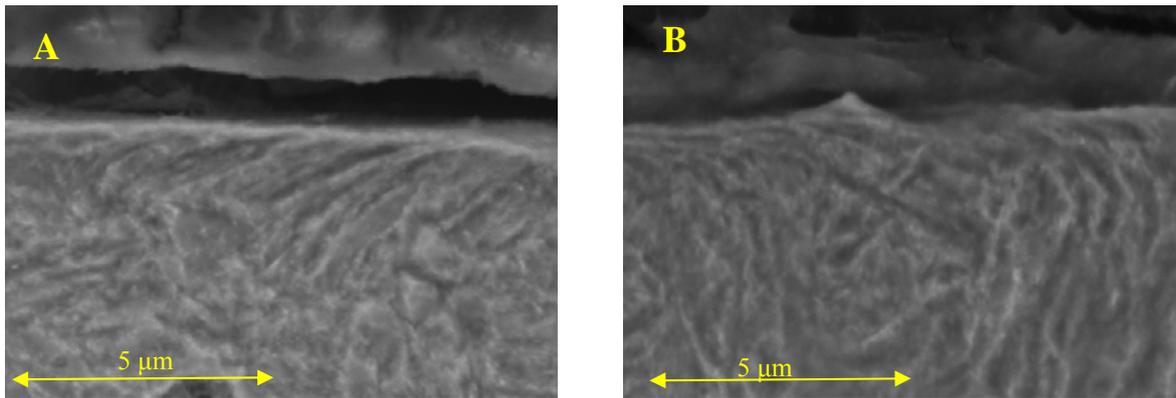


Figura 32 - Fotos tiradas da amostra 3. A Figura A foi usinada a seco (aumento de 3700 X), e a B usinada com lubri-refrigeração (aumento 3000 X).

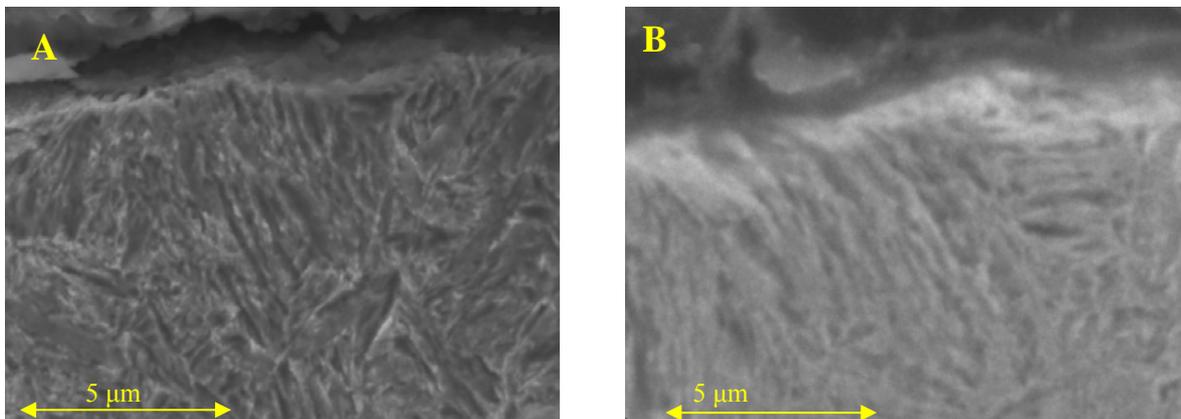


Figura 33 - Fotos tiradas da amostra 4. A Figura A foi usinada a seco, e a B usinada com lubri-refrigeração. Aumento de 2300X.

Através das micrografias obtidas, é possível confirmar as informações obtidas nas micrografias tiradas pelo microscópio óptico, com aumentos de 1000 vezes. Observou-se que a deformação encontrada está localizada em uma área próxima da borda (até 20 μm), sendo

possível identificá-la pelas micrografias. Também é possível verificar que não há uma variação dos resultados devido a presença ou não da lubri-refrigeração.

4.5 Micro e nanodureza

Para análise quantitativa da variação microestrutural do material, e para validação dos resultados obtidos através das análises metalográficas, foram realizados testes de micro e nanodureza, a fim de se estabelecer um perfil da borda em direção ao centro do material.

Conforme descrito na metodologia, a técnica utilizada para a análise da variação microestrutural foi a nanodureza, com uma carga de 25 mN.

No gráfico apresentado, estão relatadas as medidas feitas a partir de 5 μm de distância da borda em direção ao centro do material. Os corpo-de-prova torneados a seco e com fluido foram embutidos, passaram pelo processo de lixamento e polimento. O gráfico da Figura 34 ilustra o perfil de dureza medido.

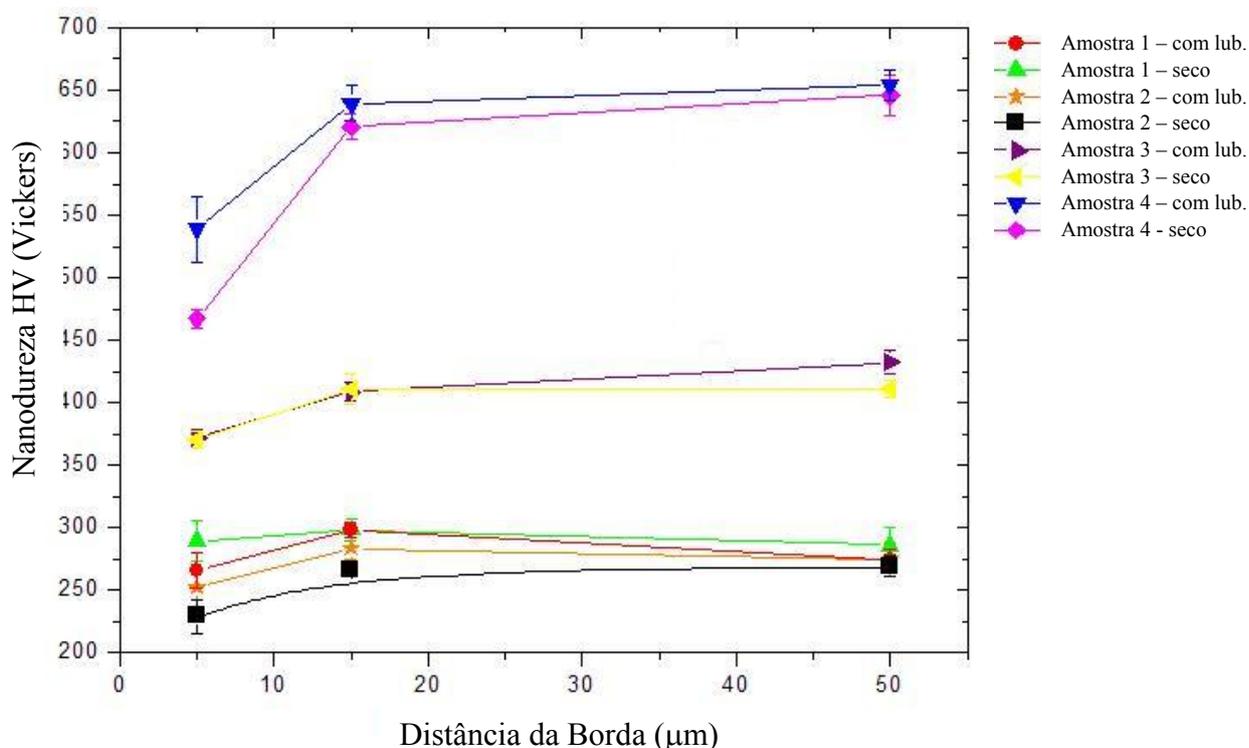


Figura 34 - Resultados da nanodureza.

Através dos resultados, pode-se perceber que houve uma queda de dureza na borda do material, numa área concentrada entre a distância 0 e 15 μm da borda. Em nenhuma das condições analisadas, a dureza no ponto mais próximo da borda do material (5 μm) foi maior do que os outros valores, medidos a partir de 15 μm afastado da borda.

Nota-se que a partir da segunda medida, a 15 μm da borda, começa a ocorrer uma estabilização da dureza, para todas as condições analisadas. Também não ocorreram mudanças significativas nos resultados para as condições de usinagem com e sem lubri-refrigeração.

Nos corpos-de-prova das amostras 1 e 2 (tanto na estrutura normalizada, quanto na estrutura temperada e revenida), não ocorreram grandes mudanças, sendo a queda da dureza próxima da borda desprezível.

Na amostra 3, as curvas tiveram um comportamento semelhante nas duas condições. Já na condição de dureza mais severa (amostra 4) foi registrada a queda mais significativa próxima a borda do material.

Com base nos estudos de Eriksson (2003), a tensão elástica não influencia a dureza. Rodrigues (2003) chama atenção que, na nanodureza, a dureza é fortemente dependente da profundidade da indentação, tornando difícil a interpretação dos dados. Uma explicação para a queda de dureza na borda do material com relação à base, é que devido ao aquecimento instantâneo que o material sofre no momento da usinagem, tem-se uma temperatura pontual de corte, sendo esta temperatura bastante elevada, fazendo com que ocorra uma espécie de revenimento na superfície, diminuindo a dureza superficial do mesmo (Oliveira, 2006). Após a distância de mais ou menos 20 μm da borda, ocorre a estabilização da dureza, indicando que não houveram maiores modificações na direção do centro do material.

5. CONCLUSÕES

Com base nas análises realizadas, concluí-se que:

Os diâmetros nominais obtidos no torneamento com e sem lubri-refrigeração apresentaram, em 60% das condições testadas resultados satisfatórios, dentro da classe de tolerância pré-estabelecida, na faixa k7. A variação pode ser atribuída ao processo, o qual causa variações na mecânica do corte, de acordo com as condições momentâneas de usinagem. Levando em consideração que os ensaios foram de curta duração, o gume da ferramenta não apresentou desgaste significativo que pudesse afetar o resultado obtido. Para os valores que ficaram acima dessa tolerância, é possível aproximá-los a mesma adicionando-se mais um passe de acabamento no processo de torneamento. A circularidade e a cilindricidade, de uma maneira geral, se apresentaram satisfatórias, dentro da tolerância exigida nos ensaios.

Quanto a qualidade da superfície usinada, não houve influência da lubri-refrigeração nas condições analisadas. Isto pode ser explicado pelo fato de que geralmente a rugosidade não depende da condição de lubri-refrigeração, mas sim de outros fatores, tais como desgaste, que causem variação da ponta da ferramenta. Mesmo assim, os valores de R_a e $R_{máx}$ foram considerados dentro dos padrões para os processos de fabricação esperados.

As análises metalográficas revelaram-se muito importantes para este trabalho, pois através das mesmas foi possível observar deformações plásticas do processo. Posteriormente, através das análises no Microscópio Eletrônico de Varredura, pode-se confirmar, com uma melhor resolução, as deformações plásticas ocorridas no processo. No entanto, confrontando-se com as medidas de nanodureza, observa-se que os valores encontrados próximos a borda (5 μm) tenderam a ficar abaixo dos valores de base do material.

Para as medidas de nanodureza observou-se que a primeira medida (na faixa de 5 μm) mostra que na usinagem de materiais endurecidos, ao invés de se ter um aumento de dureza nessa faixa, se tem uma redução da dureza em relação ao material de base, para este tipo de usinagem e condições. Isto provavelmente se deve a um possível revenimento na borda do material, ocasionando essa queda de dureza.

Sem levar em consideração a vida útil da ferramenta, pode-se dizer que, para as condições analisadas, a usinagem com e sem lubri-refrigeração apresentaram-se como alternativas viáveis para o processo. Cabe ressaltar que as medidas mais próximas do diâmetro nominal pré-estabelecido foram alcançadas sem a presença do fluido, o que pode representar ganhos de valor e ambientais neste processo, e reforça a idéia de que é possível alcançar a tolerância dimensional necessária mesmo na condição a seco.

Sumarizando, os ensaios rápidos realizados nestas condições propostas mostram que a presença da lubri-refrigeração não teve influência significativa. Assim, é possível a usinagem nas condições propostas sem lubri-refrigeração, o que significa redução nos custos de produção.

6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Investigar melhor a aplicação da nanodureza para investigação da variação microestrutural nos processos de usinagem;

Repetir os ensaios realizados em condições mais severas de usinagem, onde o corpo-de-prova fique exposto a variações de temperatura por um maior período de tempo;

Analisar a vida da ferramenta para os processos utilizados;

Aplicar uma técnica estatística para análise dos dados.

- CALDEIRA, M. M. C. **Usinagem de Materiais Endurecidos**. Revista Máquinas e Metais, pg 148 - 153, agosto/2005.
- CALLISTER, W.D. **Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução**. 5ª edição, Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CARRINO, L.; GIORLEO, G.; POLINI, W. E PRISCO, U. **Dimensional errors in longitudinal turning based on the unified generalized mechanics of cutting approach. Part I: Three-dimensional theory**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, pgs 1509–1515, 2002.
- CARRINO, L.; GIORLEO, G.; POLINI, W. E PRISCO, U. **Dimensional errors in longitudinal turning based on the unified generalized mechanics of cutting approach. Part II: Machining process analysis and dimensional error estimate**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 42, pgs 1517–1525, 2002.
- CHANDLER, Harry. **Heat Treater's Guide – Practices and Procedure for Irons and Steels**. ASM International. United States, 1995.
- CHEN, S.; ULISOY, A. G. e KOREN, Y. **Error source diagnostic using a turning process simulator**. Transactions ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering 120, pg 409-16, 1998.
- CHEVRIER P., TIDU A., BOLLE B., CEZARD P., TINNES J. P., **Investigation of Surface Integrity in high speed end milling of low alloyed steel**. Internation Journal of Machine Tool and Manufacture, abril de 2003.
- CHIAVERINI, Vicente. **Aços e Ferros Fundidos**. 7ª edição. São Paulo: Publicação ABM (Associação Brasileira de Metais), 2005.
- CIMM. **Centro de Informação Metal Mecânica**. Disponível em <http://www.construtor.cimm.com.br>. Acesso em outubro de 2005.
- DEGARMO, E. P.; BLACK, J. T. e KOHSER, R. A. **Materials and processes in Manufacturing**. Prentice-Hall, USA, 1997.
- DHAR, N.R.; PAUL, S. e CHATTOPADHYAY, A.B. **Machining of AISI 4140 steel under cryogenic cooling – tool wear, surface roughness and dimensional deviation**. Journal of Materials Processing Technology 123, pg 483 – 489, 2002.
- DINIZ, A. E.; MARCONDES, F. C. e COPPINI, N. L. **Tecnologia da usinagem dos metais**. 3ª ed. São Paulo: Artliber Editora, 2001.
- DINIZ, A. E. e OLIVEIRA, A.J. **Torneamento de Aço Endurecido com Superfícies Interrompidas usando Ferramentas de CBN**. Revista O Mundo da Usinagem n 2, pgs 24 – 28, 2005.

- ERIKSSON, C. L.; LARSSON, P. L. e ROWCLIFFE, D. J. **Strain Hardening and Residual stress effects in plastic zones around indentations.** Journal of Materials Science and Engineering 340, pgs 193-203, 2003
- FAVORIT. Aços Especiais. **Características e Aplicações dos Aços para Construção Mecânica.** Catálogo Técnico. 2005.
- FERRAZ Jr., Fábio. **Desenvolvimento de um sistema de monitoramento e supervisão para o processo de torneamento.** Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2002.
- FERRARESI, D. **Tecnologia da usinagem dos metais.** 9a ed. São Paulo: Editora Edgard Blucher LTDA. 2003.
- FINKLER, Maira. **Desenvolvimento de Compósitos Utilizando Matriz de Polietileno e Fibras do Resíduo de Malharia.** Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2005.
- HIOKI, Daniel. **Usinagem dura do aço 100Cr6 com PCBN.** Dissertação de mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 1998.
- HUBLER, R. **Revestimentos Protetores com Filmes Finos de TiN e Multicamadas de Ti / TiN.** Tese de Doutorado. Instituto de Física, UFRGS, 1994.
- INFOMET. **Aços Liga.** HandBook Metais & Ligas, Desenvolvido por iMetais.com. Disponível em http://www.infomet.com.br/metais_ligas.php. Acesso em setembro de 2005.
- ISO. International Organization for Standardization. **ISO 3685: Tool-life testing with single-point turning tools.** 2.ed. Genève, 48p, 1993.
- JUNQUEIRA R. M. R., **Caracterização de Filmes Finos de Coloração Por Interferência em Aços Inoxidáveis.** Tese (doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.
- KLOCKE, E; DAMBOM, O.; e CAPUDI FILHO G.G. **Influence of the polishing process on the near-surface zone of hardened an unhardened steel.** Science Direct, 2005.
- KÖNIG, W.; KLOCKE, F. - **Fertigungsverfahren - Drehen, Fräsen, Bohren.** Springer-Verlag. 7ª Edição. Berlin, 2002.
- KRAFT. Aço Kraft. **Tabela de conversão de durezas.** Disponível em <http://www.acokraft.com.br/produtos/tabequiv/hrc.html> Acesso em novembro/2006.
- LI, X. **Real-time prediction of workpiece errors for a CNC turning centre, part 1: measurement and identification.** International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v.17, pg 649-653, 2001.

- LIMA, Francisco Elicivaldo. **Características do Processo de Torneamento de Materiais Endurecidos**. Tese de Doutorado. Universidade Estadual de Campinas, 2001.
- MALISKA, Ana Maria. **Microscopia Eletrônica de Varredura**. Laboratório de Caracterização Microestrutural e Análise de Imagens, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2004.
- MARTINEZ, F. G. e SARULS, R. **Usinagem Com e Sem Refrigeração – Verdades, Mitos e Tendências**. Revista O Mundo da Usinagem n 4, pgs 16 – 17, 2002.
- MARTINS, Marcelo. **Temperabilidade Jominy e influência do revenido sobre a dureza – um estudo em aços estruturais nacionais**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, 2002.
- MATSUMOTO, H. e DINIZ, A. E. **Torneamento de aço endurecido monitorado por emissão acústica e corrente do motor**. Revista Máquinas e Metais, pgs 72 – 79, dezembro de 1998.
- MEIRELES, G. S. C. **Desenvolvimento de sistema de aquisição de dados em operações de usinagem visando o monitoramento de linhas ou células de produção**. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 2000.
- MESQUITA, N. G. M. **Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função fabricação**. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 1992.
- MICARONI, Ricardo e DINIZ, Anselmo Eduardo. **Economizando Energia Elétrica e Fluido de Corte no Torneamento de Aço**. O Mundo da Usinagem, 1º ed. 2002.
- MITUTOYO. Portal para projetos colaborativos. Disponível em <http://www.mitutoyo.com.br>
Acesso em novembro/2006.
- NAKAYAMA, Kazuo; MINORU, Arai e KANDA, Torakito. **Machining Characteristics of Hard**. Anais do CIRP, vol. 37, nº 1, pag. 89 – 92, 1998.
- NASCIMENTO, F. F.; RAMOS Jr, M. J.; MELO, A. C. A. e MACHADO, A.R. **Influência da rugosidade superficial e do sinal de emissão acústica na superfície usinada**. Revista Máquinas e Metais, pgs 76 a 87, julho de 2004.
- NN: **Tabellenbuch Metall**. 39, Auflage, Verlag Europa-Lehrmitte, Haan-Gruiten, 1994.
- NOUILATI, Mohamad. **Performance Assessment of Coated Cemented Carbide Tools in Turning AISI 1018 Steel**. Masters Thesis. Louisiana State University. USA, 2004.
- OLIVEIRA, Juliano Marcon. **Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas**. Dissertação de Mestrado. Universidade de Caxias do Sul. Caxias do Sul, 2006.

- PANNONI, Fabio Domingos. **Aços Estruturais**. Artigo técnico, disponível em http://www.acominas.com.br/upload/produtos/perfis/caracteristicatecnicapf/artigostecnico/geral_1.pdf. Açominas, 2001.
- PORTO, A. J. V. **Usinagem de Ultraprecisão**. 1ª edição. Editora Rima – Fapesp. São Paulo, 2004.
- POULACHON, G.; ALBERT, A.; SCHLURAFF, M. e JAWAHIR, I.S. **An experimental investigation of work material microstructure effects on white layer formation in PCBN hard turning**. International Journal of Machine Tools & Manufacture 45, pg 211 – 218, 2005.
- RAMOS, C. A. D.; COSTA, E. S. e MACHADO, Á. R. **Fluídos de Corte – Tendências, utilização e Aspectos Ecológicos**. Revista Máquinas e Metais n 450, pgs 116 – 134, julho / 2003.
- RAUTER, Raul Oscar. **Aços Ferramentas – seleção, tratamentos térmicos, pesquisa de defeitos**. 1a ed., Rio de Janeiro: Livros técnicos e científicos, 1974.
- RISBOOD, K.A.; DIXIT, U.S. E SAHASRABUDHE, A.D. **Prediction of surface roughness and dimensional deviation by measuring cutting forces and vibrations in turning process**. Journal of Materials Processing Technology 132, pg 203 - 214, 2003.
- RODRIGUES, R. e GUTIERREZ, I. **Correlation between nanoindentation and tensile properties: Influence of the indentation size effect**. Journal of Materials Science and Engineering A361, pg 377 - 384, 2003.
- SALES, W.F.; DINIZ, A. E. e MACHADO, A.R. **Applicaion of cutting fluids in machining operations**. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences, vol 23, nº 2. Rio de Janeiro, 2001.
- SCANDIFFIO, Innocenzo. **Uma Contribuição ao Estudo do Corte a Seco e ao Corte com Mínima Quantidade de Lubrificante em Torneamento de Aço**. Dissertação de Mestrado. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, 2000.
- SHACKELFORD, J.F. **Introduction to Materials Science for Engineers**, 5º edition, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.
- SILVA M. M., ABRÃO A. M., COELHO R. T., CAMPOS W. R. C., **Integridade Superficial de peças Fresadas e Retificadas**, Máquinas e Metais fevereiro de 2006.
- SME Tool and Manufacturing Engineers Handbook** 4. ed. Dearborn/Michigan: SME v. IV Quality control and Assembly, cap 5. Surface Technology – Surface Texture, 1987.
- STEMMER C. E. **Ferramentas de Corte I**. 6ª edição. Editora da Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2005.

- TABENKIN, A. **Surface Finish: a machinist's toll. A design necessity.** Modern Shop. n 3, 1999. Disponível em <http://www.mmsonline.com>. Acesso em novembro/2006.
- TENTARDINI, Eduardo Kirinus. **Construção de um equipamento de deposição tipo magnetron sputtering e sua caracterização através da deposição de filmes finos e de metais e compósitos.** Dissertação de Mestrado. Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, 2000.
- USINAGEM BRASIL. Portal para projetos colaborativos. Disponível em http://www.usinagem-brasil.com.br/construtordepaginas/htm/1_1_2252.htm. Acesso em junho de 2005.
- VLACK, Van. **Princípios de Ciência e Engenharia dos Materiais.** 4ª edição. Editora Campus: Rio de Janeiro, 1998.
- WACHTMAN, J.B. **Characterization of Materials.** USA: Manning Publications Co., 1993.
- WALTER, André. **Refrigerantes usados com eficiência.** Revista Máquinas e Metais, pg 62 – 71, setembro/2005.
- WARREN, A.W.; GUO, Y.B. e WEAVER, M.L. **The influence of machining induced residual stress and phase transformation on the measurement of subsurface mechanical behavior using nanoindentation.** Surface & Coatings Technology 200, pg 3459 – 3467, 2004.
- WEINERT, K.; THANKE, D. **Kühlschmierkonzepte für die Bohrungsbearbeitung.** In: DI-Bericht 1240 Auf dem Weg zur Trockenbearbeitung. Düsseldorf, VDI-Verlag 1999, pg 111 – 124.
- WEINGAERTNER, Walter L. **Conversas com especialista em usinagem.** Professor da UFSC, Doutor em usinagem.
- WOIRGARD J., DARGENTON J.C., TROMAS C., AUDURIER V., **A New Technology for nanohardness measurements principle and applications.** Surface and Coatings Technology 100-101, 1998.
- ZIPPERIAN, Donald C. **Metallographic Specimen Preparation Basics.** Pace Technologies. Disponível em <http://www.metallographic.com/Basics.htm>. Acesso em Agosto/2006.