

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

Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas Para  
Produção de Moldes e Matrizes

Juliano Marcon Oliveira

Orientador:

Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann

Caxias do Sul, 2006  
Juliano Marcon Oliveira



Juliano Marcon Oliveira

Caracterização da Integridade de Superfícies Usinadas para Produção de Moldes e Matrizes . “Dissertação apresentada ao Programa de Mestrado em Materiais da Universidade de Caxias do Sul, visando a obtenção do grau de Mestre em Materiais”, com a orientação do Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann.

Caxias do Sul, 2006

## Folha de Aprovação

Dedico esta dissertação aos meus pais, Tânia e Gelson, aos meus irmãos Rodrigo e Natália e a minha noiva Miriam.

## **Agradecimentos**

Aos meus pais, Gelson Oliveira e Tânia Marcon de Oliveira e irmãos Rodrigo Marcon de Oliveira e Natália Marcon de Oliveira pelo incentivo, apóio e amor dedicado em todos os anos de minha vida.

A minha noiva Miriam Borges pela compreensão nos momentos ausentes, pelo incentivo, amor, carinho e apoio demonstrados.

Ao Prof. Dr. Rodrigo Panosso Zeilmann pela amizade, apoio e orientação deste trabalho. Aos Professores Dr. Alexandre Viecelli, Dr. Carlos E. F. Kwietniewski e em especial ao Prof. Dr. Frank P. Missell pelos auxílios prestados no andamento do trabalho.

A TaeguTec e ao Sr. Daniel Yuhara pelo fornecimento das ferramentas utilizadas nos ensaios de usinagem.

A JR Oliveira pela usinagem dos corpos-de-prova.

Ao Professor Ms.C. Eng. Gilmar Tonietto pelo auxílio no tratamento térmico dos corpos-de-prova.

Ao Dr. Eduardo Blando pelo auxílio nas medidas de nano-dureza realizadas nos corpos-de-prova.

A USP pelas medidas de ruído magnético de Barkhausen.

A AST pelas medidas de difração de raio X.

Aos colegas Técnico Marcelo Tedesco, Eng. Gerson Nicola e Eng. Deives Baretta pela amizade e colaborações que ajudaram no trabalho e ao bolsista de iniciação científica Diego Calza pela amizade e auxílio na preparação dos corpos-de-prova.

Aos bolsistas e membros do Grupo de Usinagem da Universidade de Caxias do Sul pela colaboração e apoio durante o trabalho.

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

## Sumário

<b>AGRADECIMENTOS.....</b>	<b>VI</b>
<b>SUMÁRIO.....</b>	<b>VII</b>
<b>LISTA DE TABELAS.....</b>	<b>IX</b>
<b>LISTA DE FIGURAS.....</b>	<b>X</b>
<b>LISTA DE SIGLAS.....</b>	<b>XIV</b>
<b>LISTA DE SÍMBOLOS.....</b>	<b>XV</b>
<b>RESUMO.....</b>	<b>XVI</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>XVII</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>6</b>
2.1 GERAÇÃO DE SUPERFÍCIES USINADAS.....	6
2.1.1 Geração de Cavidades por Fresamento.....	8
2.1.2 Geração de Cavidades por Eletroerosão.....	11
2.1.3 Os Processos de Usinagem sem Geometria Definida Aplicado a Cavidades.....	13
2.2 TEXTURA SUPERFICIAL.....	16
2.3 INTEGRIDADE SUPERFICIAL.....	18
2.3.1 Fatores Influentes Sobre a Tecnologia de Superfície.....	20
2.3.2 Parâmetros de Caracterização da Integridade Superficial e Sub-superficial.....	25
2.4 MÉTODOS ANALÍTICOS DE CARACTERIZAÇÃO.....	31
2.4.1 Rugosidade.....	31
2.4.2 – Metalografia.....	35
2.4.3 – Medidas de Dureza (RMB).....	36
2.4.4 – Ruído Magnético de Barkhausen.....	37
2.4.5 – Difração de Raio X.....	40
2.5 AÇOS PARA MOLDES.....	41
<b>3. MÉTODOS E MATERIAIS .....</b>	<b>44</b>
3.1 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	45
3.1.1 Condições de Usinagem Etapa 1.....	47
3.1.2 Condições de Usinagem Etapa 2.....	48
3.1.3 Condições de Usinagem Etapa 3.....	49
3.1.4 Condições de Usinagem Etapa 4.....	49
3.1.5 Condições de Usinagem Etapa 5.....	50
3.2 MATERIAL.....	51

3.3 MÁQUINAS E EQUIPAMENTOS.....	52
3.4 FERRAMENTAS.....	53
3.5 ANÁLISE DOS PARÂMETROS DE CARACTERIZAÇÃO.....	54
3.5.1 Rugosidade.....	55
3.5.2 Metalografia e microscopia ótica .....	55
3.5.3 Medidas de dureza.....	57
3.5.4 Medição de Ruído Magnético de Barkhausen.....	58
3.5.5 Difração de raio X para medida de tensões residuais.....	59
3.5.6 Monitoramento da temperatura.....	59
<b>4. RESULTADOS DAS ANÁLISES.....</b>	<b>60</b>
4.1 RUGOSIDADE.....	60
4.1.1 Rugosidade Etapa 1.....	60
4.1.2 Rugosidade corpos etapa 2.....	63
4.1.3 Rugosidade Etapa 3.....	64
4.1.4 Rugosidade etapa 4.....	66
4.2 ANÁLISE METALGRÁFICA.....	68
4.2.1 Metalografia etapa 1.....	69
4.2.2 Metalografia etapa 2.....	71
4.2.3 Metalografia Etapa 3.....	73
4.2.4 Metalografia etapa 4.....	74
4.3 DUREZA.....	75
4.3.1 Dureza etapa 1.....	76
4.3.2 Dureza Etapa 2.....	77
4.3.3 Dureza Etapa 3.....	77
4.3.4 Dureza Etapa 4.....	78
4.4 ANÁLISES DE TENSÃO RESIDUAL.....	79
4.4.1 Ruído de Barkhausen etapa 5.....	79
4.4.2 Difração de Raio X para medida de tensões residuais .....	83
4.5 MEDIDAS DE TEMPERATURA .....	84
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>86</b>
<b>6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>88</b>

## Lista de Tabelas

<b>TABELA 1.1 - ETAPAS EMPREGADAS NA ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO.....</b>	<b>5</b>
<b>TABELA 2.1 – DESVIO DE FORMA DAS SUPERFÍCIES TÉCNICAS (MESQUITA, 1992) .....</b>	<b>17</b>
<b>TABELA 2.2 - VALORES TÍPICOS DE RUGOSIDADE MÉDIA PARA SUPERFÍCIES DE ENGENHARIA FABRICADAS POR DIFERENTES PROCESSOS (HUTCHINGS, 1992).....</b>	<b>34</b>
<b>TABELA 2.3 – HABILIDADE DOS ELEMENTOS DE LIGA EM CONFERIR CERTOS CARACTERÍSTICOS AOS AÇOS PARA FERRAMENTAS E MATRIZES (CHIAVERINI, 2002)..</b>	<b>42</b>
<b>TABELA. 2.4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DO AISI H13 (THYSSENKRUPP, 2005).....</b>	<b>43</b>
<b>TABELA- 3.1 - DADOS DE CORTE DOS ENSAIOS DE USINAGEM SUGERIDOS POR TAEGUTEC, 2005.....</b>	<b>46</b>
<b>TABELA 3.2 – SEQÜÊNCIA DE GRANULOMETRIA DAS LIXAS .....</b>	<b>48</b>
<b>TABELA 3.3 – PARÂMETROS DE CORTE , CORPO-DE-PROVA ETAPA 5.....</b>	<b>51</b>

<b>TABELA 3.4 – SEQÜÊNCIA DE LIXAS EMPREGADAS NO LIXAMENTO CORPO-DE-PROVA DA ETAPA 5.....</b>	<b>51</b>
<b>TABELA 3.5 - CARACTERÍSTICAS DAS FERRAMENTAS EMPREGADAS NOS ENSAIOS DE USINAGEM.....</b>	<b>54</b>
<b>TABELA 4.1 – RUGOSIDADE ETAPA1 - LONGITUDINAL.....</b>	<b>60</b>
<b>TABELA 4.2 – RUGOSIDADE ETAPA1 - TRANSVERSAL.....</b>	<b>61</b>
<b>TABELA 4.3 – RUGOSIDADES CORPOS-DE-PROVA FRESADOS E POLIDOS.....</b>	<b>63</b>
<b>TABELA 4.4 - CORPO-DE-PROVA USINADO MAIS ELETROEROSÃO.....</b>	<b>64</b>
<b>TABELA 4.5– RUGOSIDADE CORPOS-DE-PROVA FRESADOS MAIS ELETROEROSÃO MAIS LIXAMENTO.....</b>	<b>66</b>
<b>TABELA 4.6 – MEDIDAS DE TENSÃO RESIDUAL.....</b>	<b>83</b>

## Lista de Figuras

<b>FIGURA 2.1 -SECCÃO SIMULADA DA SUPERFÍCIE DE UMA PEÇA COM SUAS CAMADAS INFERIORES (SME, 1987).....</b>	<b>7</b>
<b>FIGURA 2.2 – PROCESSO DE FRESAMENTO COM FERRAMENTAS DE TOPO ESFÉRICO (ADAPTAÇÃO SILVA, 2000; BETHKE, 1995).....</b>	<b>9</b>
<b>FIGURA 2.3 –MICROGRAFIA DA SUB-SUPERFÍCIE DE UMA PEÇA DE AISI 1045 USINADA PELO PROCESSO DE FRESAMENTO (ZEILMANN ET AL, 2005).....</b>	<b>11</b>
<b>FIGURA 2.4 – SEÇÃO TRANSVERSAL DE UMA AMOSTRA ELETROERODIDA (YOSHIDA, 2002).....</b>	<b>13</b>
<b>FIGURA 2.5 - REPRESENTAÇÃO DA FORMAÇÃO DO CAVACO DURANTE O PROCESSO DE POLIMENTO, ONDE VC É A VELOCIDADE DE CORTE (KLOCKE ET AL, 2005).....</b>	<b>16</b>
<b>FIGURA 2.6 – ESTRUTURA REFUNDIDA COM TIPOS DE ALTERAÇÕES E SUAS EXPLICAÇÕES (CALIL, 2001).....</b>	<b>19</b>

<b>FIGURA 2.7 - DISTRIBUIÇÃO DO CALOR GERADO NO MOMENTO DA USINAGEM (KÖNIG E KLOCKE, 1997).....</b>	<b>21</b>
<b>FIGURA 2.8 – COMPONENTES DE UMA FERRAMENTA DE CORTE (SILVA, 2000).....</b>	<b>24</b>
<b>FIGURA 2.9 – (A) AUSTENITA (<math>Fe\gamma</math> - CFC), (B) FERRITA (<math>Fe\alpha</math> – CCC), (C) CÉLULA TETRAGONAL DE CORPO CENTRADO (MARTENSITA (CALLISTER, 2002) .....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURA 2.10 – MICROESTRUTURA MARTENSÍTICA (1000X) (SHACKELFORD, 2000).....</b>	<b>27</b>
<b>FIGURA 2.11 – DESENHO DE REPRESENTAÇÃO DE RUGOSIDADE.....</b>	<b>32</b>
<b>FIGURA 2.12– RUGOSIDADE <math>R_q</math> DEFINIDA PELA RUGOSIDADE PARCIAL (NESTE CASO <math>Z_3</math>).....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 2.13 – RUGOSIDADE PARCIAL <math>Z_i</math>, PARA DEFINIR RUGOSIDADE <math>R_z</math>.....</b>	<b>33</b>
<b>FIGURA 2.14 – RUGOSIDADE <math>R_y</math>. DISTÂNCIA ENTRE O PICO MAIS ALTO E VALE MAIS FUNDO.....</b>	<b>34</b>
<b>FIGURA 2.15 – CURVA DE RESPOSTA DE ENSAIO DE DUREZA NANO-INDENTADO .....</b>	<b>37</b>
<b>FIGURA 2.16 - REPRESENTAÇÃO DO LAÇO DE HISTERESE PARA UM MATERIAL FERROMAGNÉTICO (MARTINS ET AL 2004). .....</b>	<b>39</b>
<b>FIGURA 2.17 – PLANOS DE INCIDÊNCIA DO RAIOS X, EM ENSAIO DE DIFRAÇÃO.....</b>	<b>40</b>
<b>FIGURA 3.1- FIGURA REPRESENTATIVA DO FLUXO DOS ENSAIOS.....</b>	<b>45</b>
<b>FIGURA 3.2– REPRESENTAÇÃO DA FIXAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA NOS ENSAIOS DE USINAGEM.....</b>	<b>46</b>
<b>FIGURA 3.3 – REPRESENTAÇÃO DA USINAGEM POR FRESAMENTO DOS CORPOS-DE-PROVA.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 3.4 – USINAGEM DOS CORPOS-DE-PROVA NA ETAPA 1.....</b>	<b>47</b>
<b>FIGURA 3.5 - ESQUEMA DA FIXAÇÃO DO CORPO-DE-PROVA ETAPA 5, COM DETALHE DO POSICIONAMENTO DAS PISTAS USINADAS PELA FERRAMENTA DE CORTE.....</b>	<b>50</b>
<b>FIGURA 3.6 - CORPO-DE-PROVA PADRÃO.....</b>	<b>52</b>
<b>FIGURA 3.7 – MÁQUINA BMEI, DA EMPRESA JR OLIVEIRA, ONDE FORAM REALIZADOS OS ENSAIOS DE FRESAMENTO.....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 3.8 – MÁQUINA ELETROEROSÃO ENGEMAQ, DA EMPRESA JR OLIVEIRA, ONDE FORAM REALIZADOS OS ENSAIOS DE USINAGEM POR EROSÃO .....</b>	<b>53</b>
<b>FIGURA 3.9 – VISTAS AMPLIADAS DO GUME FERRAMENTA DE TOPO ESFÉRICO UTILIZADA NOS ENSAIOS DE FRESAMENTO.....</b>	<b>54</b>
<b>FIGURA 3.10 - RUGOSIMETRO SJ – 301 MITUTOYO.....</b>	<b>55</b>
<b>FIGURA 3.11 – INDICAÇÃO DAS SECÇÕES FEITAS NOS CORPOS-DE-PROVA PARA ENSAIO METALOGRAFICO.....</b>	<b>56</b>

<b>FIGURA 3.12 – IMPRESSÕES DE MICRO-DUREZA EM UM CORPO-DE-PROVA.....</b>	<b>57</b>
<b>FIGURA 3.13 – CORPO-DE-PROVA, COM FURAÇÕES PARA FIXAÇÃO DE TERMOPARES ...</b>	<b>59</b>
<b>FIGURA 4.1 – PERFIL LONGITUDINAL DA RUGOSIDADE .....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 4.2 – PERFIL TRANSVERSAL DA RUGOSIDADE.....</b>	<b>62</b>
<b>FIGURA 4.3 – GRÁFICOS COMPARATIVOS DE RUGOSIDADE DOS CORPOS-DE-PROVA FRESADOS.....</b>	<b>63</b>
<b>FIGURA 4.4 – GRÁFICO DA RUGOSIDADE CORPOS-DE-PROVA USINADOS E POLIDOS.....</b>	<b>64</b>
<b>FIGURA 4.5 – PERFIL TRANSVERSAL (A) E PERFIL LONGITUDINAL (B) DE RUGOSIDADE DE CORPO-DE-PROVA USINADO POR ELETROEROSÃO.....</b>	<b>65</b>
<b>FIGURA 4.6 – RUGOSIDADE CORPO-DE-PROVA USINADO MAIS ELETROEROSÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>FIGURA 4.7 – RUGOSIDADES ENCONTRADAS NO PROCESSO DE FRESAMENTO MAIS ELETROEROSÃO MAIS LIXAMENTO. ....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 4.8 – FOTO DO TOPO DA SUPERFÍCIE POLIDA.....</b>	<b>67</b>
<b>FIGURA 4.9 – ESTRUTURA BASE DOS CORPOS-DE-PROVA ANTES DO TRATAMENTO TÉRMICO.....</b>	<b>68</b>
<b>FIGURA 4.10 – MICROGRAFIAS CORTE LONGITUDINAL USINADO A SECO (A), E USINADO COM FLUÍDO (B).....</b>	<b>69</b>
<b>FIGURA 4.11 – MICROGRAFIAS CORTE TRANSVERSAL, USINADO A SECO ITEM A E ITEM B COM FLUIDO.....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 4.12 – MICROGRAFIAS CORTE TRANSVERSAL COM DETALHES INDICADOS, USINADO A SECO ITEM A E ITEM B COM FLUIDO.....</b>	<b>70</b>
<b>FIGURA 4.13 – CORPO-DE-PROVA FRESADO E LOGO DEPOIS “POLIDO”, CORTE LONGITUDINAL AO FRESAMENTO.....</b>	<b>72</b>
<b>FIGURA 4.14 - CORPO-DE-PROVA FRESADO E LOGO APÓS POLIDO, CORTE TRANSVERSAL AO FRESAMENTO.....</b>	<b>73</b>
<b>FIGURA 4.15 – CORPO-DE-PROVA FRESADO E LOGO APÓS USINADOS POR ELETROEROSÃO, CORTE LONGITUDINAL A E TRANSVERSAL B.....</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 4.16 – CORPO-DE-PROVA FRESADO E LOGO APÓS USINADOS POR ELETROEROSÃO E POLIDO, CORTE LONGITUDINAL AO FRESAMENTO.....</b>	<b>74</b>
<b>FIGURA 4.17 – MÉDIA DE DUREZA DOS CORPOS-DE-PROVA ANTES DOS PROCESSOS DE USINAGEM.....</b>	<b>75</b>
<b>FIGURA 4.19 – PERFIL DE DUREZA FRESADO E LIXADO .....</b>	<b>77</b>
<b>FIGURA 4.20 – PERFIL DE DUREZA FRESADOS E ERODIDOS.....</b>	<b>78</b>
<b>FIGURA 4.21 – PERFIL DE DUREZA FRESAMENTO MAIS ELETROEROSÃO MAIS LIXAMENTO.....</b>	<b>79</b>

<b>FIGURA 4.22 – SINAIS RMB DA AMOSTRA USINADA EM DIFERENTES CONDIÇÕES.....</b>	<b>80</b>
<b>FIGURA 4.23 – VALORES RMS E VALORES DE PICO ENCONTRADOS NA AMOSTRA.....</b>	<b>81</b>
<b>FIGURA 4.24 – GRÁFICO DE TENSÃO RESIDUAL X PROFUNDIDADE EM UM MATERIAL TRATADO TERMICAMENTE COM 59 HRC (CULLITY, 1979).....</b>	<b>82</b>
<b>FIGURA 4.25- VISTAS DE TOPO DAS SUPERFÍCIES DAS PISTAS CORPO-DE-PROVA ETAPA 5.....</b>	<b>82</b>
<b>FIGURA 4.26 – GRÁFICO DO MONITORAMENTO DA TEMPERATURA AO LONGO DA USINAGEM.....</b>	<b>84</b>
<b>FIGURA 4.27 – GRÁFICO DA TEMPERATURA MEDIDA NO CORPO-DE-PROVA EM FUNÇÃO DE SUA PROFUNDIDADE.....</b>	<b>85</b>

## Lista de Siglas

$a_e$ [mm]	Passe lateral
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i> (Instituto Americano do Ferro e do Aço)
$a_p$ [mm]	Incremento de usinagem
EDM	<i>Electrical Discharge Machining</i> (Usinagem por Descargas Elétricas)
Gap	Folga
H13	Classificação dos aços série H segundo norma AISI
HSM	<i>High Speed Machining</i> (Usinagem com Altas Velocidades)
P20	Classificação dos aços Segundo norma AISI
$R_a$ [ $\mu\text{m}$ ]	Rugosidade média
RMB	Ruído Magnético de Barkhausen
$R_q$ [ $\mu\text{m}$ ]	Corresponde a distancia vertical mais alta entre o pico mais alto e o vale mais profundo
$R_y$ [ $\mu\text{m}$ ]	Maior valor de rugosidade apresentado dentro da faixa de leitura
$R_z$ [ $\mu\text{m}$ ]	Média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial
SME	<i>Society of Manufacturing Engineers</i> (Sociedade dos Engenheiros de Manufatura)
$v_c$ [m/min]	Velocidade de corte

## Lista de Símbolos

HRC	Indicação de escala de dureza Rockwell
Hv	Indicação de escala de dureza Vickers
mm	Milímetros
°C	Graus celsius
µm	Micrometros

## Resumo

Este trabalho abrange o estudo do processo convencional de fabricação de moldes e matrizes, ou seja, passando por processos de fresamento, eletroerosão e lixamento. Estes três processos foram aplicados ao material AISI H13, usualmente empregado na fabricação de moldes e matrizes. Além disso, foram variadas condições de usinagem, como o uso de fluido de corte.

No material, a integridade da superfície foi avaliada através: da rugosidade; da dureza; da existência de deformações plásticas, trincas, tensões residuais; entre outros. No processo de fresamento foram encontradas deformações plásticas que variam de 5  $\mu\text{m}$  a 8  $\mu\text{m}$ . Já para o processo de EDM, foi encontrada uma camada branca de aproximadamente 20  $\mu\text{m}$ . Para o lixamento constataram-se marcas de riscos e micro-rupturas. O perfil de dureza encontrado para as condições empregadas mostram um valor médio menor próximo a borda do que para a base do material.

Os resultados de ruído magnético de Barkhausen mostraram que os processos de usinagem empregados modificaram a estrutura da sub-superfície dos corpos-de-prova usinados, o que pode ser percebido também para os valores medidos de tensão residual pela técnica de difração de raio X.

**Palavras chaves:** integridade superficial, fresamento, EDM, lixamento, usinagem de moldes e matrizes.

## Abstract

This work includes the conventional way of die and mold production. Process such as milling, EDM and sanding are discussed. These three processes of die and mold making were applied to the AISI H13 material, that is wide used by die and mold makers to produce the mold's parts. Besides that, some conditions were modified such as the cutting fluids applications.

The surface integrity was observed in the machined material by the follow itens: the roughness, the hardness, the plastic deformations existence, chippings, residual tensile, among others features were observed. In the milling process the plastic deformations varied from 5  $\mu\text{m}$  to 8  $\mu\text{m}$  and a white layer with about 20  $\mu\text{m}$  were found to the EDM process. In the sanding process were found risks mark's and micro-breaches. The average value measured for the hardness profile shows that in the boundary there is a low value than in the material base. The Barkhausen noise results show that the machining process employed had changed the sub-surface of the blank material. This changed can be seen analyzing the stress results measured by X ray diffraction.

**Key-words:** superficial integrity, milling, EDM, sanding, machining of moulds and dies



## 1. Introdução

Na indústria de moldes, o principal processo de fabricação é a usinagem. Caracterizando-se pela remoção de material, este processo é responsável por aproximadamente 65% do custo de um molde. Já a matéria prima envolvida, no caso o aço, corresponde a aproximadamente 20%. O restante do custo se divide entre a montagem e o tratamento térmico (Sandvik, 2002). Material e usinagem estão diretamente relacionados, pois as características de um implicam nos parâmetros do outro. Além disto, estes parâmetros, em parte, determinam as características do produto final, ou seja, o molde.

Os moldes para injeção de plásticos são confeccionados em vários tipos de aços, cada um com suas propriedades, buscando qualidade que atenda ao mercado consumidor, cada dia mais exigente, como na linha de eletrodomésticos, montadoras de carros com seus painéis, pára-choques, faróis, espelhos laterais, e um sem fim de outras peças. Os aços para moldes e matrizes exigem certas propriedades mecânicas fundamentais para este tipo de aplicação. As principais propriedades são: dureza à temperatura ambiente, resistência ao desgaste, temperabilidade, tenacidade, resistência mecânica, dureza a quente, tamanho de grão adequado e boa usinabilidade. Evidentemente, não se pode associar estas propriedades, sobretudo altas dureza e resistência ao desgaste a uma usinabilidade satisfatória (Chiaverini, 2002). A baixa usinabilidade é minimizada ajustando-se convenientemente os parâmetros de usinagem que têm sido objeto de muitos estudos. Há uma grande preocupação nas indústrias de manufatura relacionadas a usinagem, onde uma economia nestes processos é a chave neste mercado tão competitivo (Reddy et al, 2005; Stilwell, 1998).

Como os moldes são constantemente solicitados a esforços, tanto através de pressões de injeção, quanto às forças de fechamento do molde. Estes elementos também

estão sujeitos à fadiga dos ciclos de injeção, sendo importante que as características da integridade superficial sejam compatíveis a tais solicitações. Em certos casos o polímero injetado possui propriedades abrasivas ou corrosivas. Desta forma, é muito importante saber como se comporta a superfície e sub-superfície de um metal usinado para que este possa suportar as adversidades a que estará sujeito.

O alto grau de complexibilidade das geometrias superficiais usinadas obriga o uso de ferramentas esféricas com hastes longas, e com grande balanço, o que torna o sistema instável e passível de vibrações, acarretando prejuízos para o acabamento, que é uma forma de avaliar a qualidade de uma superfície usinada. Caso os parâmetros de corte não estejam ajustados adequadamente, ocorrem problemas de ordem dimensionais e de elevadas rugosidades, indesejáveis para nosso sistema (Reddy et al, 2005).

O acabamento pode influenciar no desempenho de um componente, como por exemplo, alterar a resistência à fadiga. A rugosidade, mudanças micro estruturais e por conseqüência, a existência de tensões residuais vão se relacionar à fadiga (Machado et al, 2003). As falhas por fadiga quase sempre originam-se na, ou perto, da superfície de um componente; igualmente a corrosão por tensão é também um fenômeno superficial. Conseqüentemente, a natureza da superfície desde um ponto de vista tanto topográfico como metalúrgico é vital no desenho e na fabricação de componentes críticos (Barbacki et al, 2003). Além disso, a rugosidade influencia no desgaste, corrosão, lubrificação e na condutividade elétrica (Reddy et al, 2005).

As alterações físicas abaixo da superfície têm uma forte influência sobre o desempenho em serviço de componentes mecânicos, quando estes são submetidos à esforços muito elevados ou à ambientes agressivos. Tais alterações geram diferentes propriedades tecnológicas que exercem grande influência no desempenho de uma peça

técnica, principalmente no que diz respeito a sua vida útil (Barbacki et al, 2003; SME, 1987)

A sub-superfície não é muito bem compreendida, e tem atraído o interesse de cientistas e engenheiros, e é motivo de controvérsias a respeito de sua microestrutura. Por outro lado, ela influencia os componentes produzidos. Por exemplo, Griffiths (2001) que analisou com detalhes a camada branca, concluiu que ela é dura e resistente a ataques químicos. Entre resultados mais positivos de investigações três diferentes afirmações podem ser distinguidas:

- a) No caso de aços de médio e alto carbono endurecidos, a camada branca consiste basicamente de martensita não revenida. Esta martensita origina-se da austenita formada na sub-superfície durante a usinagem.
- b) No caso de aços eutetoides e hiper-eutetoides endurecidos, a camada branca consiste basicamente de austenita.
- c) A camada branca produzida pelo torneamento em aços de alto carbono, consiste basicamente em grãos ferríticos extremamente pequenos, na ordem de alguns nanômetros (Barbacki et al, 2003).

Segundo Barbacki et al (2003), para o torneamento em condições severas, com ou sem uso de refrigerante, ocorrem alterações micro estruturais na sub-superfície. Essas alterações aumentam à medida que o material tem uma menor usinabilidade, ou seja, quando a dureza aumenta e também quando a temperatura do revenimento é relativamente baixa e o calor gerado durante a usinagem, causa um novo revenimento da microestrutura. Como ocorrem alterações micro estruturais na operação de torneamento, o mesmo é esperado para a operação de fresamento. No entanto as variáveis são diferentes para ambos os processos.

No processo de corte dos metais (usinagem) ocorre uma série de deformações plásticas não homogêneas que originam tensões residuais. Além disso, transformações de fase relacionadas às mudanças no volume também geram tais tensões. As deformações plásticas são causadas pelos efeitos térmicos e pelos esforços mecânicos da ferramenta de corte agindo sobre o material. Uma deformação plástica adicional ocorre em consequência do aquecimento local da superfície usinada quando o limite de escoamento do material é excedido. Desta forma a deformação plástica se deve a dois fatores: um mecânico, que gera tensões residuais de compressão e um térmico que gera tensão residual de tração (Arunachalam et al, 2004).

Para situar a importância do estudo da integridade superficial, pode-se citar o estudo sobre a integridade superficial na fabricação de matrizes para forjamento (Pasini e Zeilmann, 2004). Neste caso, verificaram-se as diferenças de processos para fabricação das cavidades, estando em questão a usinagem com elevadas velocidades de corte (HSM) e o processo convencional de fresamento associado a eletroerosão (EDM). Olhando pelo aspecto da integridade superficial, chegou-se a conclusão de que a zona termicamente afetada pelo processo EDM, apresentou uma camada branca, com espessura aproximada de 15  $\mu\text{m}$ . Nessa camada encontrou-se uma dureza menor que na base do material, de 53 HRC ela caiu para 50 HRC. Desta forma, a matriz produzida por EDM foi mais suscetível a desgaste, como foi comprovado neste estudo, onde a produção de peças, com cavidades fabricadas por HSM, foi bem superior .

Para os moldes de injeção de plástico é importante avaliar que a integridade superficial atua junto à resistência mecânica, resistência à corrosão e resistência ao desgaste. Como por exemplo, as tensões residuais vão influenciar na superfície usinada que necessita de uma boa resistência mecânica, suficiente para que não ocorra “amassamento” durante a injeção, e, ao mesmo tempo não apresente colapso em trabalho, ou seja, não

propicie a formação de trincas. A diferença de propriedades entre a superfície e núcleo deve ser a menor possível (Yoshida, 2004; Provenza, 1993).

Considerando-se a evidencia de tais transformações na superfície e sub-superfície da peça e quão importante é seu estado, o presente trabalho estudou algumas condições de usinagem presentes na indústria. Adotou-se a forma convencional de fabricação de moldes, empregando-se os processos de fresamento, eletroerosão e lixamento, não necessariamente nesta ordem, ou que tenha que existir essa seqüência. Isto depende muito da função que a superfície do molde vai exercer em trabalho.

Em virtude disto, o trabalho foi dividido em cinco etapas que separam os processos que serão aplicados aos corpos-de-prova. Na etapa 1 foi empregado apenas a usinagem de fresamento, já nas etapas seguintes se tem o fresamento combinado com outros processos de usinagem, tais como EDM e lixamento como pode ser observado na tabela 1.1.

Tabela 1.1 - Etapas empregadas na organização do trabalho

<b>Etapas</b>	<b>Processos Aplicados ou Condições</b>
1	Fresamento a seco e fresamento com fluido
2	Fresamento a seco com posterior lixamento
3	Fresamento a seco mais EDM
4	Fresamento a seco mais EDM com posterior lixamento
5	Fresamento a seco em diferentes condições de acabamento com posterior lixamento

O principal objetivo do trabalho é caracterizar a integridade superficial do aço H13 para os processos de fresamento, eletroerosão e lixamento e desta forma, gerar informações tecnológicas que permitam interpretar as alterações metalúrgicas ocorridas em processos de usinagem.

Assim para caracterizar a integridade superficial foram empregadas as técnicas de medida de rugosidade, micrografias, medidas de dureza, medida de ruído magnético de Barkhausen e difração de raios-X para medir tensões residuais.

## 2. Revisão bibliográfica

### 2.1 Geração de Superfícies Usinadas

Na confecção de moldes e matrizes os processos de usinagem por fresamento e usinagem por descargas elétricas ou EDM (*Electrical Discharge Machining*) são os mais utilizados. Outro processo possível é a usinagem eletroquímica, porém é pouco viável, pois é de difícil controle e geram grandes problemas ambientais causados pelo eletrólito. Ferramentas para conformação de chapas metálicas planas sofrem usinagem de acabamento executada principalmente por retificação ou a combinação de fresamento e retificação. Já as matrizes para forjamento são usinadas, no acabamento, por fresamento ou combinação de fresamento e EDM, sendo que este último processo é usado quase que somente no lixamento. Matrizes de fundição são também usinadas, no acabamento, por fresamento e fresamento mais EDM. O acabamento superficial é bastante rigoroso em moldes e matrizes ( $R_a$  normalmente menor que  $0,1 \mu\text{m}$ ) e bastante crítico principalmente no molde para injeção. A qualidade do acabamento requerida nas superfícies de moldes para injeção é maior que aquelas requeridas nas matrizes de forjamento e estampagem, além disso, sua geometria complexa impede a aplicação do lixamento automático. Somente a geração de superfícies convexas e ligeiramente curvas, além de furos na matriz, permite o uso de equipamento automático de lixamento (Ramos e Machado, 2002; Alan et al, 1993; Milan, 1999).

A tecnologia da superfície descreve, detalha e avalia as condições das camadas inferiores, além de ser uma poderosa ferramenta para compreensão das alterações das características que ocorreram durante e depois do processo de fabricação e como estas características afetam o desempenho da superfície manufaturada (Hioki et al, 2004).

Desta forma, experimentos têm mostrado que a textura é apenas uma parte do todo a ser considerada. Alterações físicas abaixo da superfície têm uma forte influência sobre o desempenho em serviço de componentes mecânicos, quando estes são submetidos à esforços ou à ambientes agressivos. Tais alterações geram diferentes propriedades tecnológicas que exercem grande influência no desempenho de uma peça técnica, principalmente no que diz respeito a sua vida útil (SME, 1987). A figura 2.1 mostra a secção simulada da superfície de uma peça com suas camadas inferiores.

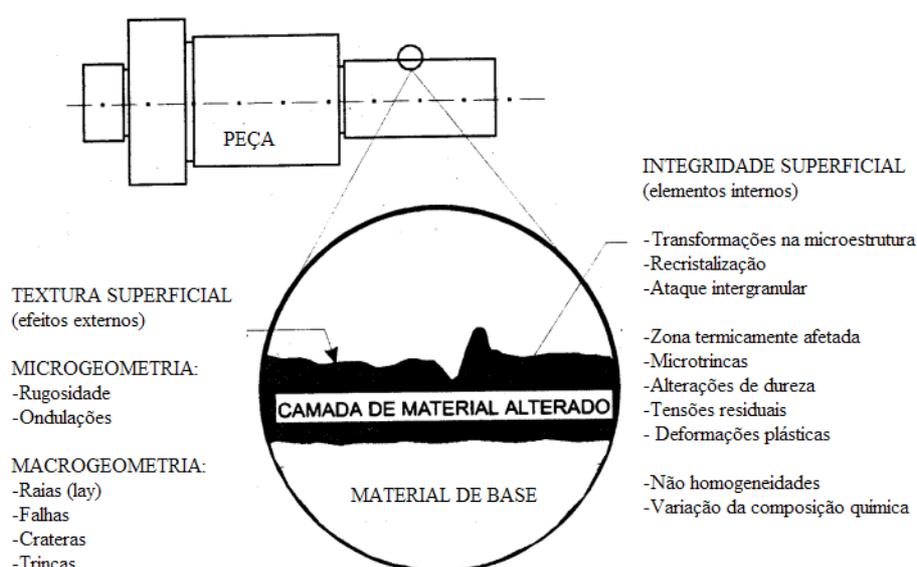


Figura 2.1 -Secção simulada da superfície de uma peça com suas camadas inferiores (SME, 1987).

Na figura 2.1 é possível observar a representação da camada que é afetada pela usinagem do material. A região da textura superficial compreende uma região macrogeométrica que compreende raias, falhas, crateras e trincas e uma região microgeométrica onde se tem a rugosidade e as ondulações.

Já a integridade superficial vai além do que pode ser observado na superfície do material, compreendendo transformações na microestrutura, recristalizações, ataques intergranulares, zona termicamente afetada, micro trincas, alterações de dureza, tensões residuais, deformações plásticas, não homogeneidades, variações da composição química.

Para entender as características que devem ser preservadas na sub-superfície do material é necessário entender a que tipo de solicitações e esforços o aço escolhido vai estar sujeito no momento em que estiver em trabalho, sobre solicitação de cargas. Desta forma é preciso ser feita uma revisão a respeito do material, do processo de usinagem bem como de suas influências sobre a integridade superficial.

### **2.1.1 Geração de Cavidades por Fresamento**

O fresamento se caracteriza por ser uma operação, onde a ferramenta cortante é denominada de fresa e é provida de gumes cortantes dispostos simetricamente em torno de um eixo, onde um movimento de corte é proporcionado pela rotação em torno deste eixo. Já o movimento de avanço geralmente é feito pela peça em usinagem, que está fixada na mesa da máquina e obriga a peça a passar sobre a ferramenta em rotação, que lhe confere as formas e dimensões desejadas (Diniz et al, 1999; Metals Handbook, 1989).

Além disso, pode se caracterizar por ser um processo de usinagem no qual a remoção de material da peça se realiza de forma intermitente, pelo movimento rotativo da ferramenta geralmente multicortante (isto é, com múltiplos gumes de corte), gerando superfícies das mais variadas formas (Stemmer, 2005). Este tipo de usinagem é predominante na maioria dos moldes em função de sua abrangência e características de forma dos produtos a ser injetados.

Na figura 2.2, observa-se como ocorre o processo de fresamento de acabamento com ferramentas de topo esférico. Na figura estão expressadas a rotação ( $n$ ), o sistema de coordenadas  $x,y,z$ , a velocidade de corte ( $v_c$ ) o passo lateral ( $a_e$ ) e a profundidade de corte ( $a_p$ ). Além disso, pode-se observar uma representação do que ocorre no material devido a ação da ferramenta.

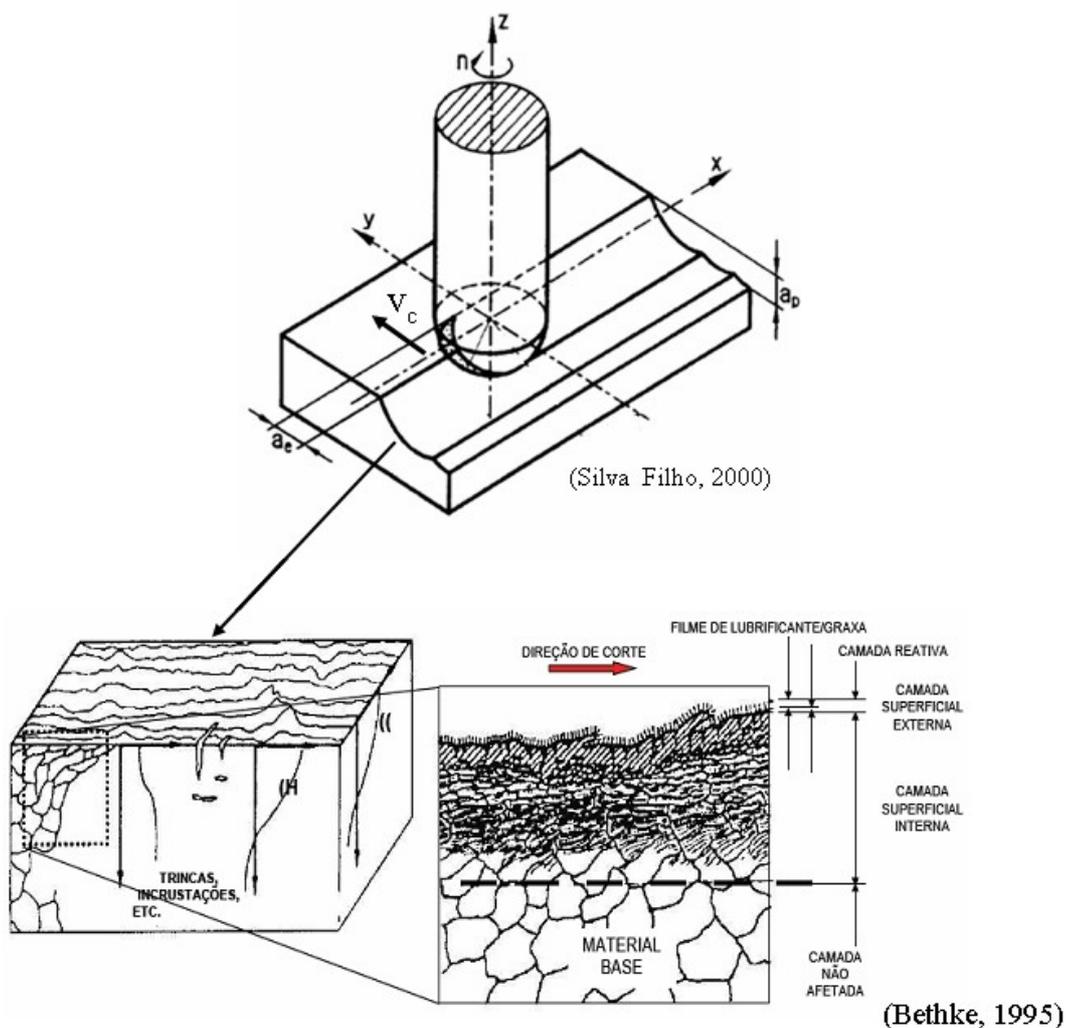


Figura 2.2 – Processo de fresamento com ferramentas de topo esférico (adaptação Silva, 2000; Bethke, 1995).

Como moldes exigem materiais com boas propriedades mecânicas nas cavidades e posições são empregados materiais de baixa usinabilidade, que depende de fatores metalúrgicos e das condições de usinagem como ferramenta e velocidade de corte, sendo um resultado de interação do metal com a operação de usinagem. O termo usinabilidade é utilizado geralmente para expressar o estado da superfície usinada, a taxa de remoção de material, a facilidade de saída do cavaco ou a vida da ferramenta.

Desta forma, a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão (Diniz et al, 1999). Em outras palavras, usinabilidade é o grau de dificuldade de usinar determinado material. Trent

(1989) sugere que usinabilidade não é apenas uma propriedade, mas uma forma do material se comportar durante a usinagem.

Segundo Baptista (2002), durante a deformação, o material da apara é encruado, aumentando a sua resistência. A ruptura passa a se dar abaixo da superfície de corte, no metal mais mole, produzindo arrancamentos que prejudicam o acabamento da peça usinada. Quando a diferença de resistência do material da apara e do metal de base torna-se menos significativa, diminui-se a tendência de ocorrer ruptura abaixo da superfície da peça; a deformação necessária para se atingir à tensão de ruptura do cavaco é menor, formando uma apara menos espessa, reduzindo também o atrito e o arrasto sobre a ferramenta.

Desta forma, a usinabilidade pode ser definida como uma grandeza tecnológica que expressa, por meio de um valor numérico comparativo, um conjunto de propriedades de usinagem de um material em relação a outro tomado como padrão (Diniz et al, 1999). Em outras palavras, usinabilidade é o grau de dificuldade de usinar determinado material. Trent (1989), sugere que usinabilidade não é apenas uma propriedade, mas uma forma do material se comportar durante a usinagem.

No processo de corte, devido às exigências mecânicas, como uma solicitação a tração, simultânea a aplicação de uma pressão vertical sobre a ferramenta e em combinação com as elevadas temperaturas, levam a deformações na camada superficial do material. Além disso, em função do deslizamento do cavaco sobre a superfície da ferramenta, se formam superfícies limites que também sofrem deformações plásticas complementares. Em metalografias é possível se notar regiões de escoamento (figura 2.3), que tem uma textura de deformação paralela a face da ferramenta, dando a impressão de escoamento viscoso com elevado grau de deformação (König e Klocke, 1997).

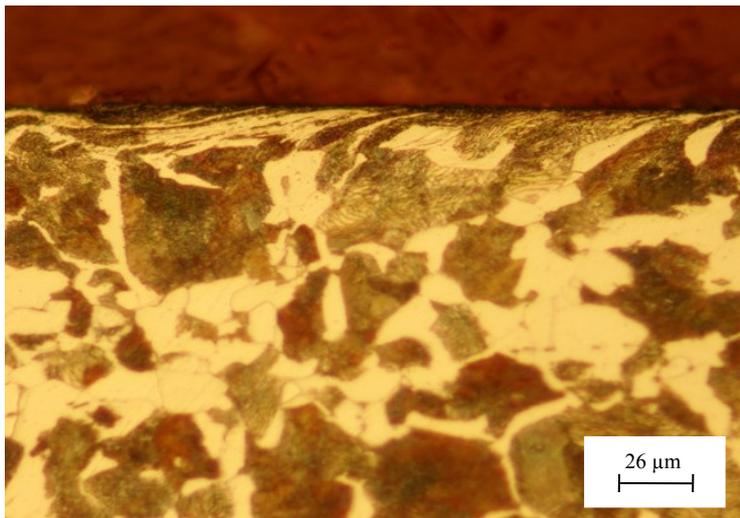


Figura 2.3 –Micrografia da sub-superfície de uma peça de AISI 1045 usinada pelo processo de fresamento (Zeilmann et al, 2005).

### 2.1.2 Geração de Cavidades por Eletroerosão

A usinagem por eletroerosão, *Electro Discharge Machining* (EDM), se caracteriza por ser um processo não convencional de usinagem, onde milhares de descargas elétricas são produzidas em uma fração de segundos para erudir certo volume de metal. Estas descargas elétricas geram uma elevada temperatura durante o processo. Este processo é utilizado em situações onde geometrias complexas têm que ser usinadas em materiais de elevada dureza. No entanto, ele gera uma superfície pobre em propriedades mecânicas com altas tensões residuais, alta rugosidade, presença de micro-trincas e trincas. Estas propriedades podem variar de acordo com os parâmetros de processo.

Mesmo sendo um processo não convencional de usinagem, a eletroerosão tem sido amplamente usada por indústrias de moldes e matrizes. Desde que o material da peça conduza eletricidade ele pode ser usinado através do processo de EDM, não importando a sua dureza. EDM é um processo onde o metal é removido pela ação de descargas elétricas entre o eletrodo (cátodo) e a peça (anodo). Cada descarga elétrica produz uma pequena cratera pela fusão e vaporização do material, reproduzindo desta forma, a geometria do eletrodo na peça. Um fluido dielétrico retira o cavaco e limita a descarga elétrica. Quando

o espaço entre a peça e a ferramenta é diminuído até uma distância determinada, o dielétrico passa a atuar como condutor, formando uma “ponte” de íons entre o eletrodo e a peça. Produz-se, então, uma centelha que superaquece a superfície do material dentro do campo de descarga, fundindo-a. Estima-se que, dependendo da intensidade da corrente aplicada, a temperatura na região da centelha possa variar entre 2.500°C e 50.000°C. Uma pequena quantidade de material, mais de 15% é expelida violentamente da superfície fundida e o restante líquida resolidifica. A estrutura refundida é tipicamente de grãos muito finos e duros e podem estar ligadas com carbono (Ramasawmy e Blunt, 2004).

O processo de erosão ocorre simultaneamente na peça e no eletrodo. Com ajustes convenientes da máquina, é possível controlar a erosão, de modo que se obtenha até 99,5% de erosão na peça e 0,5% no eletrodo. A distância mínima entre a peça e a ferramenta, na qual é produzida a centelha, é chamada GAP (*gap* = folga) e depende da intensidade da corrente aplicada. O GAP é o comprimento da centelha. O tamanho do GAP pode determinar a rugosidade da superfície da peça. Com um GAP alto, o tempo de usinagem é menor, mas a rugosidade é maior. Já um GAP mais baixo implica maior tempo de usinagem e menor rugosidade de superfície.

As partículas fundidas, desintegradas na forma de minúsculas esferas, são removidas da região por um sistema de limpeza e, no seu lugar, fica uma pequena cratera. O dielétrico, além de atuar como isolante, participa desta limpeza e ainda refrigera a superfície usinada.

A duração da descarga elétrica e o intervalo entre uma descarga e outra são medidos em microssegundos e controlados por comandos eletrônicos. Descargas sucessivas, ao longo de toda a superfície do eletrodo, fazem a usinagem da peça. A frequência das descargas pode alcançar até 200 mil ciclos por segundo. Na peça fica reproduzida uma matriz, que é uma cópia fiel do eletrodo, porém invertida.

O principal problema da tecnologia empregada no processo de EDM é a formação de uma camada refundida branca, que é muito dura e contém muitas imperfeições como trincas, micro trincas e alta tensão residual. Estas características são indesejáveis na maioria dos casos, podendo resultar em uma falha prematura do componente. Na figura 2.4 pode-se observar uma peça usinada pelo processo de EDM. Na figura está representada uma secção em corte de uma superfície.

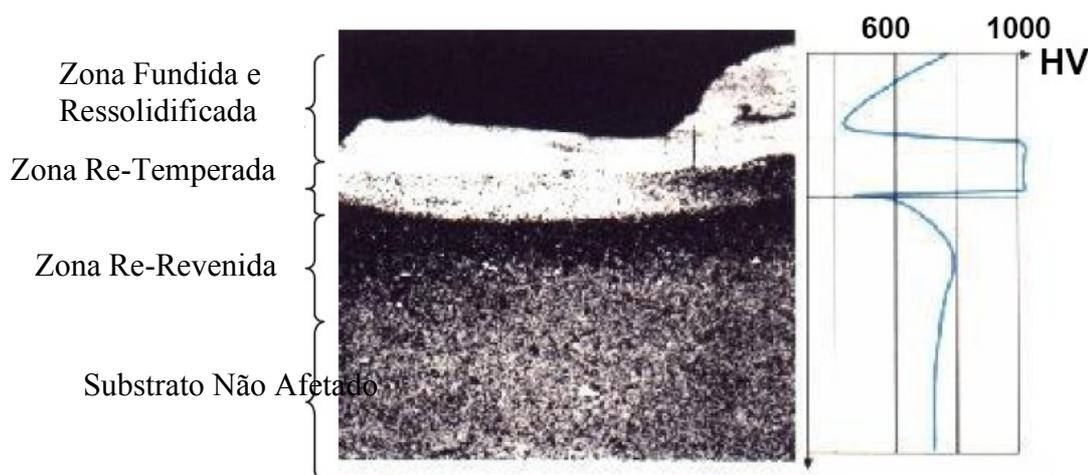


Figura 2.4 – Seção transversal de uma amostra eletroerodida (Yoshida, 2002).

O perfil de durezas ao lado da figura evidencia claramente a natureza destas sub-camadas. Evidentemente, esta camada é extremamente pobre em propriedades mecânicas, em relação ao material base, temperado e revenido de forma correta. A existência desta camada, por si só, já seria suficiente para explicar muitos dos problemas que ocorrem no uso de ferramentas que passaram por eletroerosão, mas além de possuir propriedades mecânicas inferiores às do substrato, ela também apresenta-se com trincas e porosidades, que contribui para tornar ainda mais frágil a superfície da ferramenta (Yoshida, 2002).

### 2.1.3 Os Processos de Usinagem sem Geometria Definida Aplicado a Cavidades

Na indústria de moldes e matrizes o processo de lixamento e polimento são tratados da mesma forma sendo chamado apenas de polimento. No entanto, o processo de

lixamento trata de uma usinagem com grãos abrasivos sem geometria definida, porém fixos com algum adesivo a um substrato. Já o polimento se caracteriza por uma usinagem onde os grãos abrasivos estão envoltos a uma pasta. Porém em ambos os casos o processo de corte ocorre da mesma forma.

Em linhas gerais pode-se definir o lixamento como baixar a rugosidade das superfícies, no caso de moldes, através de desbastes em etapas definidas, com a utilização de abrasivos e acessórios de movimentação de diferentes durezas aplicadas em condições controladas de pressão e tempo. A diferença entre uma superfície de baixa rugosidade espelhada e uma opaca, é o arredondamento dos picos que refletem a luz em linhas paralelas na espelhada, enquanto que na opaca as linhas são dispersas devido aos picos serem pontiagudos (Steiner et al, 2005).

São diversos os fatores metalúrgicos que influenciam na polibilidade, que mede a facilidade de realização de polimento - lixamento em um aço. Inclusões não metálicas, como óxidos e sulfetos, podem diminuir a polibilidade, dependendo do tamanho e de como estão distribuídas. Além disso a dureza deve ser uniforme e a presença de carbonetação é indesejável (Mesquita e Barbosa, 2004).

Segundo Mesquita e Barbosa (2004), a relação entre a usinabilidade e polibilidade, de um aço para molde, está focada principalmente no teor de enxofre. Formando inclusões com o Manganês, tipo MnS, que possuem baixo ponto de fusão e alta deformabilidade, melhorando a usinabilidade. Estas causam um efeito lubrificante no gume de corte e facilitam a quebra do cavaco na zona de cisalhamento, no entanto, diminuem a polibilidade.

A operação de lixamento é executada por profissionais treinados, que possuem habilidades e técnicas tradicionais. O alto nível de habilidade e destreza necessários para executar essa operação, torna esse procedimento difícil de ser automatizado. Além disso, a

falta de dados sobre os parâmetros do lixamento, bem como das características da superfície polida, dificultam ainda mais sua automatização, mesmo que recentemente tenham sido publicados alguns trabalhos experimentais nesta área (Huissoon et al, 2002; Steiner et al, 2005).

Partindo-se de que o mecanismo de lixamento, em materiais metálicos, ocorre a remoção de material por meio de abrasão, pode-se dividi-lo em três etapas:

a) o grão abrasivo entra em contato com a superfície do material, o qual sofrerá deformação elástica. Devido ao movimento relativo de fricção entre o abrasivo e a peça surge, por um lado, o estresse de cisalhamento na superfície da peça, por outro lado, é gerado um estresse de compressão devido a pressão aplicada pela abrasivo sobre a superfície.

b) tão logo quando o limite de escoamento plástico é excedido, este é plasticamente deformado. Isto induz o material a acumular-se nas laterais dos riscos da superfície

c) durante a mais uma penetração da pedra na superfície, a força elástica é excedida, no local, formando o cavaco. Após isto, uma sub-superfície deformada plasticamente continua existindo, logo abaixo da linha da superfície (Klocke et al, 2005).

As três etapas citadas podem ser observadas na figura 2.5, onde está representada a superfície externa (1), sub-superfície deformada (2) e o material base (3). Ainda pode-se observar a ferramenta que provoca tal situação indicada na figura que seria a representação de um grão abrasivo da pedra ou lixa de lixamento. No processo de lixamento também ocorrem deformações na sub-superfície, como se pode observar. Estas deformações são causadoras de modificações na integridade superficial, com geração de tensões residuais, deformação dos grãos entre outros fatores.

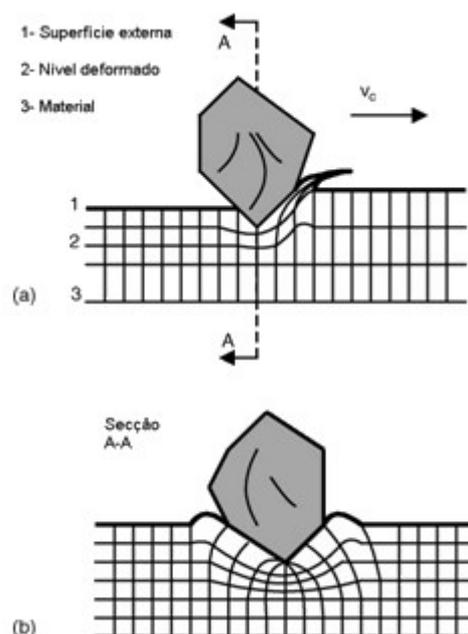


Figura 2.5 - Representação da formação do cavaco durante o processo de polimento, onde  $v_c$  é a velocidade de corte (Klocke et al, 2005).

## 2.2 Textura Superficial

Todas as peças usinadas apresentam irregularidades superficiais que têm 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 de peça para peça 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 de corte, 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.

Na tabela 2.1, estão apresentados os desvios de forma apresentados pelas superfícies técnicas, bem como exemplos de onde são encontradas tais superfícies. Em todos os casos as superfícies resultantes são provenientes de seu processo de fabricação.

Tabela 2.1 – Desvio de forma das superfícies técnicas (Mesquita, 1992)

<b>Desvios de forma (representado numa seção do perfil)</b>	<b>Exemplos para tipos de desvios</b>	<b>Exemplos para origem de desvios</b>
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 e Tabenkin, 1999).

No entanto, a rugosidade não pode ser o único critério para se avaliar a qualidade superficial, tampouco 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). Existe uma série de desvios que não se encontram na textura superficial sendo que esta compreende somente os desvios de 2ª a 5ª ordem (Calil, 2005).

### ***2.3 Integridade Superficial***

A tecnologia da integridade superficial descreve e controla todas as possíveis alterações produzidas numa camada superficial durante a fabricação, incluindo os seus efeitos sobre as propriedades do material e o comportamento da superfície em serviço. A integridade superficial desejada consegue-se através da seleção e o controle dos processos de fabricação, estimando os seus efeitos sobre as propriedades dos materiais utilizados (Sánchez, 2004; Calil 2001). 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 et al, 2003).

O processo de fabricação em especial o de usinagem, é determinante na integridade superficial que se deseja alcançar. Alguns problemas que têm sido identificados em função ao processo são: superaquecimento, queima, micro trincas, irregularidades superficiais, alterações metalúrgicas incluindo distorções microestruturais, tensões residuais e redução

da vida em fadiga. Tais alterações ocorrem devido ao ciclo térmico mecânico. Já transformações da microestrutura e deformações mecânicas ocorrem durante o corte. Os efeitos térmicos tendem por uma tensão residual de tração, enquanto os efeitos mecânicos tendem a resultar em uma tensão residual de compressão (Axinte e Dewes, 2002).

Na figura 2.6 pode-se observar, defeitos típicos de processos elétricos ou térmicos de remoção de material, no caso, uma liga *Hastelloy* (Calil, 2001).

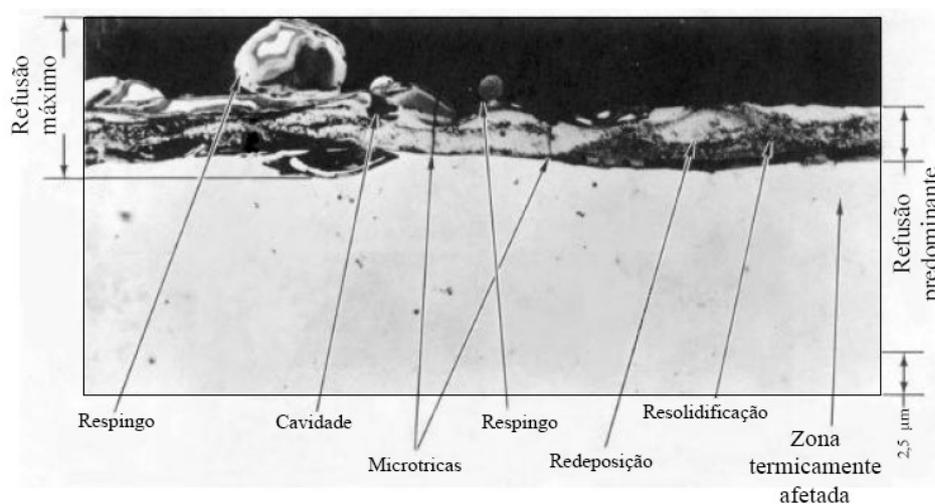


Figura 2.6 – Estrutura refundida com tipos de alterações e suas explicações (Calil, 2001)

Em condições críticas de corte são geradas camadas superficiais alteradas mais espessas, enquanto condições mais suaves geram uma pequena camada alterada. Também se percebe que cada parâmetro de corte influencia na integridade superficial de uma maneira diferente (Silva et al, 2006).

Praticamente todos os processos de fabricação por arranque de material são responsáveis pelo surgimento de danos na integridade superficial das peças. Provavelmente, os danos mais conhecidos são os produzidos por uma retificação muito severa, que conduz uma queima na superfície da peça. Entretanto, também outros processos de arranque como o fresamento são responsáveis pelos danos nas peças usinadas (Sánchez, 2004).

As condições de formação do cavaco têm grande influência no grau de deformação e endurecimento da superfície usinada. Verifica-se que na superfície da peça ocorre um aumento de dureza. Alguns pesquisadores demonstraram também que a camada superficial das peças usinadas apresenta tensões residuais, provavelmente devido ao efeito combinado do calor com a da deformação plástica do material sob a ação da ferramenta de corte. Estas tensões residuais, que em casos extremos podem ir até a tensão de ruptura do material, afetam a resistência a fadiga das peças usinadas (Stemmer, 2005).

As camadas logo abaixo da superfície são as que se relacionam com a integridade superficial. As alterações físicas geram diferentes propriedades tecnológicas que, naturalmente exercem grande influência no desempenho funcional de uma peça técnica, principalmente relacionada à vida de um componente (SME, 1983).

As alterações da integridade superficial mais comuns podem ser classificadas em três grandes grupos:

a) alterações Mecânicas, entre as quais as variações de dureza, o aparecimento de fissuras e a criação de tensões residuais;

b) alterações Químicas, que incluem efeitos de corrosão ou de contaminação do material da peça;

c) alterações Metalúrgicas, entre as que se encontram o aparecimento de camada branca, de inclusões no material e as trocas de fase.

### **2.3.1 Fatores Influentes Sobre a Tecnologia de Superfície**

Diversos fatores influenciam a integridade superficial de um aço, sobretudo a temperatura e os esforços mecânicos gerados na região do corte do material. Na seqüência seguem alguns dos principais fatores de influência sobre a integridade do material usinado por fresamento.

### 2.3.1.1 Grandezas Térmicas

A temperatura no momento da usinagem afeta a peça ocasionando deformações. Além disso, a temperatura influencia também no desgaste de ferramenta. Determinar tecnicamente com precisão as temperaturas na região de corte é muito difícil (figura 2.7) (Brandão, 2005).

A temperatura pode provocar alterações microestruturais, pela introdução de uma zona termicamente afetada pelo calor, levando ao surgimento de tensões residuais de tração. Além disso, a qualidade superficial do componente pode ser afetada pelo surgimento de trincas e a ocorrência de queima superficial, decorrentes das elevadas temperaturas na região de corte (Bianchi et al, 2000).

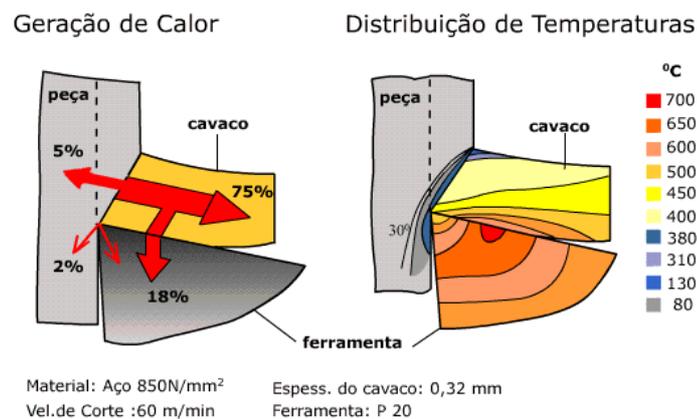


Figura 2.7 - Distribuição do calor gerado no momento da usinagem (König e Klocke, 1997).

Para minimizar os efeitos da temperatura sobre o material e sobre a ferramenta são usados fluidos de corte que tem como objetivos:

- lubrificar a baixas velocidades de corte, redução da geração de calor;
- refrigerar a altas velocidades de corte, remoção do calor gerado;
- ajudar a retirada do cavaco da zona de corte;
- proteger a máquina-ferramenta e a peça de corrosão atmosférica.

Como lubrificante, o fluido de corte age para reduzir a área de contato cavaco-ferramenta. A sua eficiência vai depender da sua habilidade de penetrar na interface cavaco ferramenta, no pequeno espaço de tempo disponível, e de formar um filme, seja por ataque químico ou por adsorção física, com resistência ao cisalhamento menor do que a resistência do material da interface.

Segundo Diniz e Machado (2000), quando se usa fluidos de corte à base de água, a dissipação do calor (refrigeração) é mais importante do que a redução da geração do calor (lubrificação). Desta forma, quando o fluido é usado como refrigerante ajuda a prolongar a vida útil das ferramentas e a garantir a precisão dimensional das peças pela redução dos gradientes térmicos na peça (König e Klocke, 1997). Foi demonstrado experimentalmente que a eficiência do fluido de corte em reduzir a temperatura diminui com o aumento da velocidade de corte e da profundidade de corte. O uso de fluido refrigerante não vai garantir que a temperatura não influa na integridade superficial. Existe uma zona termicamente afetada onde as tensões, trincas e outros problemas continuarão a existir, pela dificuldade de se introduzir o fluido refrigerante na região do corte no momento em que a ferramenta vai estar exercendo as forças de corte sobre a peça.

#### 2.3.1.2 – Grandezas mecânicas

Entre a peça e a ferramenta atuam várias forças, responsáveis pela deformação local de material e conseqüente formação de cavaco. Para simplificar o estudo dessa força, considera-se que ela atua em um único ponto localizado no gume cortante. De maneira geral, a direção e o sentido da força  $F$  são difíceis de se determinar. Por isso ela é decomposta em componentes.

As componentes de  $F$  são identificadas por índices:

a)  $c$  : Para a direção principal de corte.

b)  $f$  : Para a direção de avanço.

c)  $p$  : Para a direção passiva (perpendicular ao plano de trabalho  $P_f$ ).

Estas forças mecânicas vão atuar na deformação da sub-superfície do material, ocasionando as deformações plásticas. No processo de corte dos metais ocorrem uma série de deformações plásticas não homogêneas que originam tensões residuais. Além disso, transformações de fase conectadas a mudanças no volume também geram tais tensões. As deformações plásticas são causadas pela força mecânica da ferramenta de corte agindo sobre o material (Arunachalam et al, 2004).

### 2.3.1.3– Geometria da ferramenta

As geometrias possíveis para o gume de uma ferramenta estão especificadas na norma NBR 6163. As ferramentas geralmente apresentam as seguintes partes construtivas:

a) parte de corte: parte ativa da ferramenta constituída pelas suas cunhas de corte. A parte ativa da ferramenta é construída ou fixada sobre um suporte ou cabo da ferramenta através do qual é possível fixar a ferramenta;

b) gume: é a cunha da ferramenta, formada pela intersecção das superfícies de saída e de folga;

c) superfície de saída: é a superfície da cunha de corte sobre a qual o cavaco é formado e sobre a qual o cavaco escoava durante a sua saída da região do trabalho de usinagem.

A figura 2.8 pode-se observar os gumes e as superfícies da parte de corte de uma ferramenta de topo esférico. Nela estão representados os principais componentes de uma ferramenta de corte.

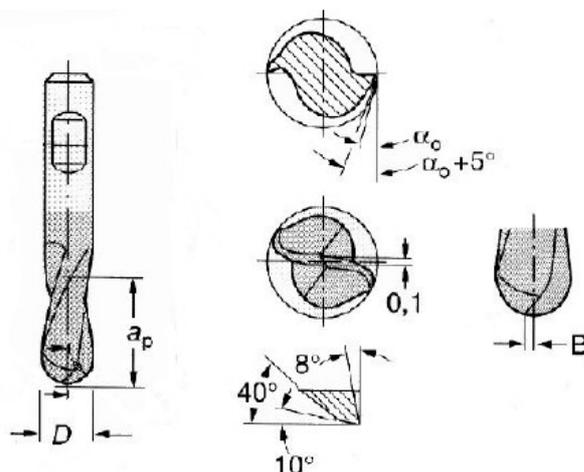


Figura 2.8 – Componentes de uma ferramenta de corte (Silva, 2000).

Além desta constituição básica diversos fatores referentes a geometria são influentes no acabamento, bem como na integridade superficial. Dependendo de sua geometria, maiores serão os esforços mecânicos atuantes sobre a região de corte da ferramenta. Por exemplo, o aumento do raio na ponta da ferramenta a torna mais resistente, mas também aumenta a vibração da ferramenta devido ao aumento do atrito causado pela maior área de contato entre a ferramenta e a peça (Diniz et al, 1999). O atrito sendo maior, vai gerar maiores temperaturas, conseqüentemente, maiores prejuízos para a sub-superfície.

Os gumes sofrem desgastes ao longo do processo de usinagem. Existem diversos tipos de desgaste de ferramenta, no entanto, não é objetivo do trabalho estudar estes desgastes. De uma forma geral pode-se citar os principais deles: desgaste de flanco, desgaste de cratera, deformação plástica no gume, lascamentos, trincas e a possível quebra (Diniz et al, 1999). De todos os tipos de desgaste citados o importante é a sua influencia para a integridade superficial do material usinado, ou seja, com a temperatura no momento do corte é ocasionado um aumento no desgaste da ferramenta. Esse desgaste, por sua vez, aumenta a temperatura de corte, que acaba aumentando a sua influencia na região da sub-superfície.

Basicamente, o principal prejuízo para a integridade superficial será o relativo aumento da temperatura na usinagem. Além disso, a rugosidade superficial tende a aumentar, uma vez que a geometria do gume está descaracterizada.

#### 2.3.1.4 – Parâmetros de usinagem

No fresamento, assim como nos demais processos de usinagem, existe uma série de importantes parâmetros de corte a considerar. Eles descrevem quantitativamente os movimentos, as dimensões e outras características da operação de corte. Os parâmetros que descrevem o movimento da ferramenta e/ou peça são: frequência de rotação, velocidade de corte e velocidade de avanço. As dimensões do corte são: profundidade de corte e penetração de trabalho. Outros parâmetros são: diâmetro da ferramenta e seu número de dentes (gumes principais), taxa de remoção de material e o tempo de corte. Para definição e medição dos ângulos da ferramenta e outros parâmetros utiliza-se um ponto selecionado sobre o gume como referência. A variação de todos estes parâmetros traz influências sobre o acabamento superficial e sobre a integridade da superfície.

### **2.3.2 Parâmetros de Caracterização da Integridade Superficial e Sub-superficial**

São vários os parâmetros utilizados para caracterizar a integridade superficial e sub-superficial de peças fabricadas por meio de usinagem. No geral pode-se dizer que são observados critérios como a rugosidade, a dureza, a microestrutura, a existência de micro-trincas e trincas, e a existência de tensões residuais.

#### 2.3.2.1 Microestrutura

Os processos de usinagem que foram empregados neste trabalho podem trazer modificações na microestrutura do material usinado. Conforme procederem estas alterações, o material perde propriedades mecânicas, o que na maioria dos casos não é desejável que ocorra.

A microestrutura esta relacionada com as propriedades mecânicas, físicas e químicas da peça. Segundo Ferraresi (1970), 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, abrasividade, força e temperatura de corte. A presença de fases acirculares tipo bainita e martensita, em função do efeito extremamente abrasivo, também é indesejável na usinagem (Baptista, 2005).

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).

O aço AISI H13 estudado neste trabalho caracteriza-se por ter fases metaestáveis. Muitos dos materiais de uso comum contêm fases que são metaestáveis, ou seja, fases que não se transformam na fase de equilíbrio, embora tenham mais energia que esta.

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 FCC (figura 2.9.a) 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.

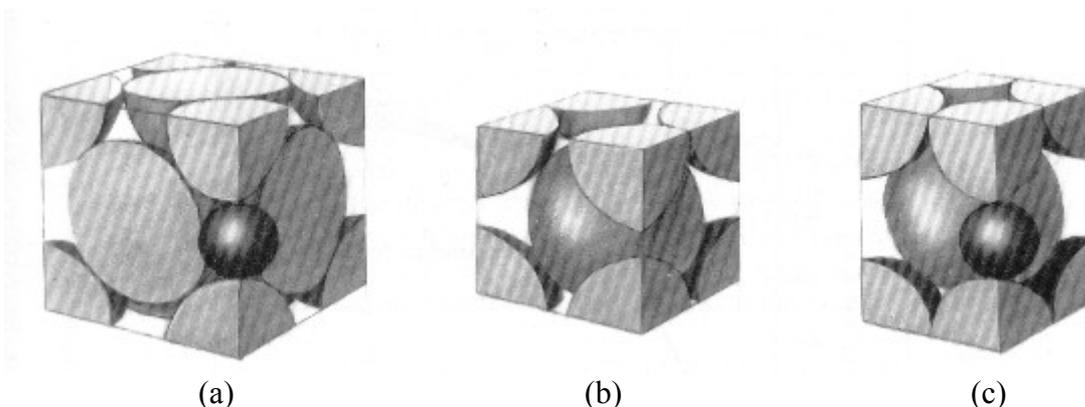


Figura 2.9 – (a) Austenita ( $\text{Fe}_\gamma$  - CFC), (b) Ferrita ( $\text{Fe}_\alpha$  - CCC), (c) Célula tetragonal de corpo centrado (martensita (Callister, 2002)

No item a da figura 2.9 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.

A martensita, que pode ser observada na figura 2.10, é obtida através de um processo industrial chamado *têmpera* (*quenching*), que consta em aquecer o material acima da temperatura de austenitização e resfriá-lo bruscamente em um fluido (água, óleo, etc).

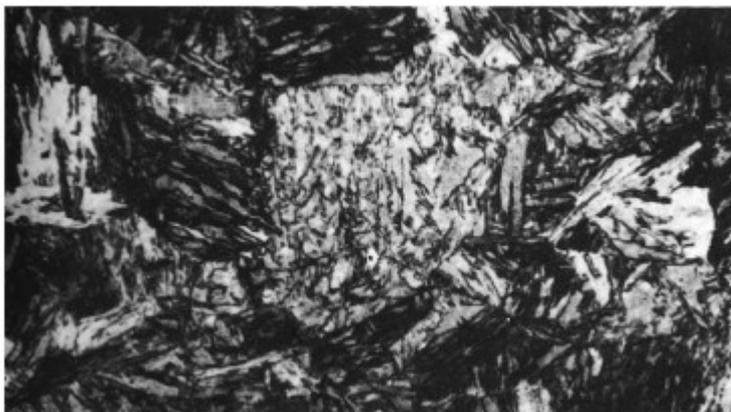


Figura 2.10 – Microestrutura martensítica (1000x) (Shackelford, 2000).

Os processos de usinagem, como fresamento e torneamento podem produzir deformações plásticas na sub-superfície do material. Já os processos de retífica e EDM, produzem a chamada camada branca da sub-superfície, em função da temperatura envolvida nestes processos.

#### 2.3.2.2 Dureza

A dureza é uma propriedade mecânica relacionada à resistência que um material, quando pressionado por outro material ou por marcadores padronizados, apresenta ao risco ou à formação de uma marca permanente. A dureza depende diretamente das forças de ligação entre os átomos, íons ou moléculas e do estado do material (processo de fabricação, tratamento térmico, entre outros) (ASM, 2000).

Alterações nos materiais são comprovadas com modificações na dureza ao longo de uma superfície. Por exemplo, para estudos de análise de tensão residual, o ensaio de dureza é muito empregado. As tensões residuais presentes em uma peça podem alterar os resultados de dureza.

Além disso, uma série de outros processos de fabricação podem alterar os valores de dureza de uma superfície. No caso do fresamento pode ocorrer um encruamento na região do corte entre a superfície usinada e a ferramenta. Deformações plásticas ocorrem na sub-superfície, geralmente elevando os valores de dureza para aquela região.

#### 2.3.2.3 Tensão Residual

Tensões residuais são aquelas que permanecem na peça quando todas as solicitações externas são removidas. Estas tensões aparecem frequentemente em peças submetidas a diferentes processos térmicos ou mecânicos (fundição, soldagem, laminação, usinagem, têmpera, etc.). Uma das principais causas de seu aparecimento é a ocorrência, ao

longo de uma seção da peça, de deformações plásticas não uniformes, o que pode ser causada por efeitos mecânicos ou térmicos.

Geralmente, três tipos de tensão residual podem ser caracterizados num sólido de acordo com sua extensão, primeiro, denominado macroscópico, que se estende por vários grãos do material. Um segundo, denominado micro-tensão estrutural, que cobre a distância de um grão ou parte de sua extensão, podendo ocorrer, por exemplo, entre duas fases do material que contêm diferentes características físicas ou até mesmo em áreas que contêm partículas, como inclusões. E um terceiro, que cobre várias distâncias atômicas dentro dos limites do grão numa pequena fração do material (Lu e Rehr, 1998).

Os ensaios não destrutivos baseiam-se na relação entre parâmetros físicos medidos pela difração de Raios-X ou Ultra-som. O princípio da determinação do estado de tensão passa pela análise do feixe monocromático de Raios-X que interage com um material cristalino, fazendo com que fótons incidentes difratem numa direção previamente conhecida, determinada pela equação de *Bragg ou lei de Bragg* (Lukin e Glenn, 2004).

Quando uma peça de material policristalino é deformada elasticamente, há uma deformação uniforme a distâncias relativamente longas entre os espaçamentos dos planos da rede cristalina onde estão contidos os cristalitos (grãos) que mudam seu estado livre para algum novo valor correspondente a intensidade da tensão aplicada. Este novo espaçamento caracterizado pelo distanciamento entre grãos, para qualquer conjunto de planos igualmente orientados em relação à tensão aplicada, é medido pela difração de raios-X (Martins et al, 2004).

Geralmente uma superfície usinada tem uma tensão residual de tração, o que diminui a resistência à fadiga, gerando pontos de tensão de corrosão. Segundo Segawa et al 2004, em alguns casos como na indústria aeronáutica é utilizado o processo de *shot peening* para induzir uma tensão de compressão a superfície usinada. Entretanto este

processo deve ser limitado, uma vez que a sua repetibilidade depende de uma preparação e conseqüentemente consome tempo, é difícil manter sua precisão para superfícies complexas e se trata de uma operação adicional ao de usinagem.

Por outro lado, muitos estudos concluem que operações como o polimento gera tensões residuais compressivas. No entanto, estas operações de polimento, só podem ser aplicadas após o processo de usinagem. Este procedimento para formas irregulares é aplicado manualmente tornando-se mais uma etapa no processo de fabricação induzindo a custos elevados (Segawa et al, 2004).

Para aços recozidos durante o faceamento (típica operação de fresamento), ocorrem deformações plásticas consideráveis, levando à tensões residuais compressivas. Com o aumento da velocidade de corte e do avanço e também dos desgastes da ferramenta aumenta a magnitude e profundidade de penetração desta tensão (König e Wand, 1987). Já no caso de Matsumoto et al, citado por Abrão e Aspinwall, reportou que a força a fadiga de um aço endurecido AISI 4340 com uma dureza de 54 HRC após uma usinagem fina (pouca espessura removida), foi de 2 a 5% a maior do que o aço retificado em função da ferramenta exercer uma força sobre um único ponto, produzindo uma tensão residual de compressão que se propaga em uma maior profundidade pela peça.

Trabalhando com o aço AISI H13, recozido, Pina et al. citado por Abrão e Aspinwall, na operação de fresamento obteve tensões residuais próximas de zero na superfície, caindo nitidamente para uma figura de mínima compressão aproximadamente de 100  $\mu\text{m}$  abaixo da superfície, então subindo novamente para uma tensão trativa. O trabalho a frio produz uma camada de espessura de aproximadamente 400  $\mu\text{m}$  de espessura (Abrão e Aspinwall, 1996).

## **2.4 Métodos analíticos de caracterização**

A caracterização de superfícies usinadas podem ser realizadas por técnicas de análise destrutivas e não destrutivas. Medidas de rugosidade, análises metalográficas, medidas de dureza, medidas de ruído magnético de Barkhausen e medidas de difração de raio X são frequentemente empregadas.

### **2.4.1 Rugosidade**

A rugosidade sobrepõe a ondulação, que por sua vez sobrepõe as imperfeições de forma, formando o perfil de textura superficial. A distinção entre a classificação de um perfil de textura é subjetiva e feita qualitativamente. A medida da rugosidade é realizada através de dois sistemas básicos: o sistema da linha média M ou sistema da envolvente. A ABNT utiliza o sistema da linha média, que é também o mais utilizado. Neste sistema da linha média M todos os parâmetros de rugosidade são definidos em relação a uma linha imaginária no comprimento de amostragem paralela à direção do perfil e denominada linha média. Esta linha é posicionada de tal maneira que a soma das áreas do perfil acima e abaixo dela seja a mesma. Os sistemas de medição de rugosidade, baseados no critério da linha média podem ser agrupados em três classes:

- baseados na medida da profundidade da rugosidade.
- baseados em medidas horizontais.
- baseados em medidas proporcionais.

O acabamento obtido no processo de fresamento depende de vários fatores (Metals Handbook, 1989) como a composição e condição do metal, velocidade, avanço, material e geometria da ferramenta e fluido de corte. Pode chegar a 0,25  $\mu\text{m}$  quando utilizando ferramenta especial com condições de corte muito bem controladas (Metals Handbook, 1989; Tabenkin, 2005). Porém sem um controle rigoroso das variáveis de processo pode-se obter usualmente valores como 3,20  $\mu\text{m}$  com ferramentas de metal duro ou aço-rápido

(Metals Handbook, 1989; Özel et al, 2004). Novas tecnologias como as ferramentas com arestas alisadoras podem produzir acabamentos ainda melhores.

São vários os fatores que influenciam o acabamento, e para se obter superfícies com rugosidade menor é necessário que se evite vibrações, o que pode ser feito com máquinas rígidas e sem folgas nas guias. A geometria da ferramenta deve ser cuidadosamente escolhida, assim como as condições de corte. Deve-se trabalhar fora da faixa de gume postiço e utilizar ferramentas em que a ponta não seja aguda e com gume sem quebras. O material da peça deve ser livre de defeitos (trincas, bolhas e inclusões) (Boehs et al, 1999).

Dentre os parâmetros da rugosidade, destacam-se:

- $R_a$ , rugosidade média. 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 ( $l_m$ ). Essa grandeza pode corresponder à altura de um retângulo, cuja área é igual à soma absoluta das áreas delimitadas pelo perfil de rugosidade e pela linha média, tendo por comprimento o percurso de medição ( $l_m$ ). Na figura 2.11 observa-se um desenho esquemático de um perfil de rugosidade. Nele estão indicados os itens utilizados para se calcular o  $R_a$ .

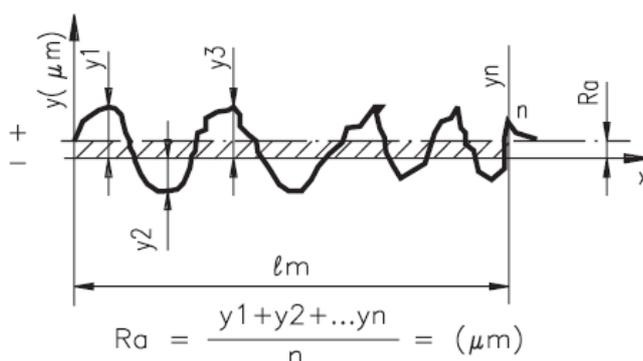


Figura 2.11 – Desenho de representação de rugosidade.

A rugosidade média pode ser aplicada em superfícies em que o acabamento apresenta sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresagem etc.);

- $R_q$ , Está definido como o maior valor das rugosidades parciais ( $Z_i$ ) que se apresenta no percurso de medição ( $l_m$ ). Por exemplo: na figura 2.12, o maior valor parcial é o  $Z_3$ , que está localizado no 3º cut off, e que corresponde à rugosidade  $R_y$ .

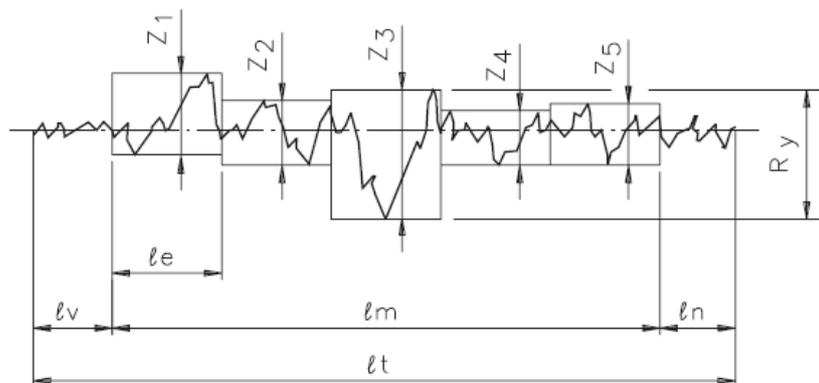


Figura 2.12– Rugosidade  $R_q$  definida pela rugosidade parcial (neste caso  $Z_3$ ).

- $R_z$ , corresponde à média aritmética dos cinco valores de rugosidade parcial. Rugosidade parcial ( $Z_i$ ) é a soma dos valores absolutos das ordenadas dos pontos de maior afastamento, acima e abaixo da linha média, existentes no comprimento de amostragem (cut off). Na representação gráfica do perfil, esse valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, no comprimento de amostragem ( $l_e$ ). Ver figura 2.13.

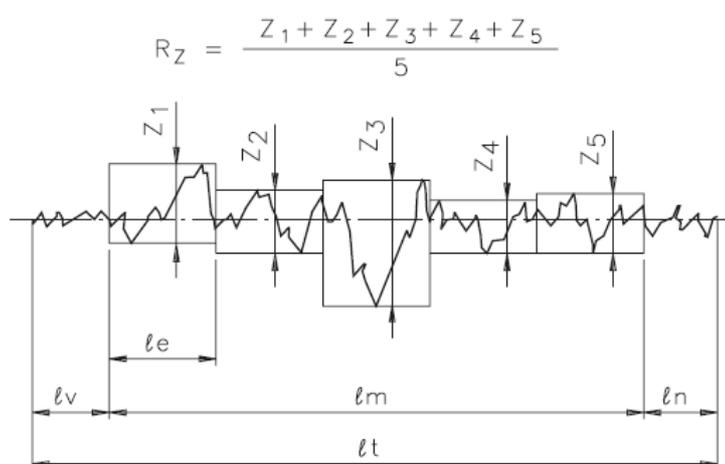


Figura 2.13 – Rugosidade parcial  $Z_i$ , para definir rugosidade  $R_z$ .

- $R_y$ , Corresponde à distância vertical entre o pico mais alto e o vale mais profundo no comprimento de avaliação ( $l_m$ ), independentemente dos valores de rugosidade parcial

(Zi). Na figura 2.14, pode-se observar que o pico mais alto está no retângulo Z1, e que o vale mais fundo encontra-se no retângulo Z3. Ambos configuram a profundidade total da rugosidade  $R_q$  (Tabenkin, 2005).

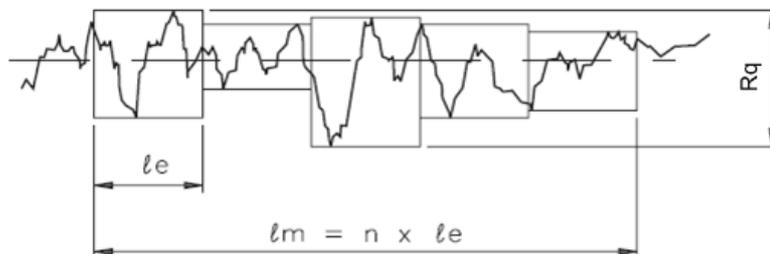


Figura 2.14 – Rugosidade  $R_y$ . Distância entre o pico mais alto e vale mais fundo

Mesmo que consigamos muitas informações utilizando-se de todos os parâmetros de rugosidade, as superfícies de engenharia na grande maioria dos casos é especificada apenas pela rugosidade média ( $R_a$ ). A tabela 2.2 lista os valores típicos de rugosidade para superfícies de engenharia acabadas por vários processos (Hutchings, 1992).

Tabela 2.2 - Valores típicos de rugosidade média para superfícies de engenharia fabricadas por diferentes processos (Hutchings, 1992).

Processo	$R_a$ ( $\mu\text{m}$ )
aplainamento, perfilamento	1 – 25
fresamento	1 – 6
trefilação, extrusão	1 – 3
torneamento, furação	0,4 – 6
retífica	0,1 – 2
brunimento	0,1 – 1
polimento	0,1 – 0,4
polimento com disco	0,05 – 0,04

Antes de medir a rugosidade é necessário se ter certeza de como é formada a superfície da peça que esta sendo medida. No caso de fresamento pode-se ter raias e sulcos a rugosidade no sentido horizontal vai ser diferente do sentido vertical (Mesquita, 1992; Chansel, 2000).

### 2.4.2 – Metalografia

Em linhas gerais a técnica análise metalográfica é utilizada para se fazer imagens da topografia ou das características microestruturais sobre uma superfície polida e atacada quimicamente com aumentos de 1 a 1500 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 metais, cerâmicas compósitos ou materiais geológicos, de dimensões indo de  $10^{-5}$  a  $10^{-1}$  m. Já a preparação das amostras é feita em espécimes seccionados e montadas, lixadas e polidas 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).

O exame metalográfico procura relacionar a estrutura íntima do material às propriedades físicas, ao processo de fabricação, entre outras. Pode ser:

- Macrográfico: Consiste no exame do aspecto de uma superfície plana seccionada de uma peça ou amostra metálica, devidamente polida e atacada por um reagente adequado. Por seu intermédio tem-se uma idéia de conjunto, referente à homogeneidade do material, à distribuição e natureza de falhas, impurezas; ao processo de fabricação. Para a macrografia o aço é o material de maior interesse.
- Micrográfico: Consiste no estudo dos produtos metalúrgicos, com o auxílio do microscópio, permitindo observar a granulação do material, a natureza, forma, quantidade e distribuição dos diversos constituintes ou de certas inclusões, etc. Estas observações são de grande utilidade prática.

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 volume, espaços e muitas outras em fases múltiplas de metais e cerâmicas. Ainda é possível através das imagens se obterem 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).

#### **2.4.3 – Medidas de Dureza (RMB)**

As medidas de dureza estudadas nesse trabalho foram feitas utilizando-se da técnica de nanoindentação. As propriedades mecânicas de camadas finas próximas as superfícies e superfícies sólidas frequentemente diferem das que estão no meio do material. O teste de nanoindentação é um dos poucos métodos pelo qual, estas propriedades podem ser estudadas na escala nanométrica de profundidade.

Até agora o teste de nanoindentação não tem sido tão rápido e conveniente quanto os testes de micro-dureza. Por esta razão que novas e versáteis dispositivos tem sido construídos para permitir medidas mais precisas e rápidas sem requerer de uma precaução mais apurada (Woïrgard, 1998; Junqueira, 2004).

Devido aos fatores de ambiente, a baixa escala do teste de nano-dureza 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 (Woïrgard, 1998).

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 deformação plástica e elástica, produzindo uma impressão de dureza com a forma do penetrador até uma profundidade de contato, característica do material. 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 2.15.

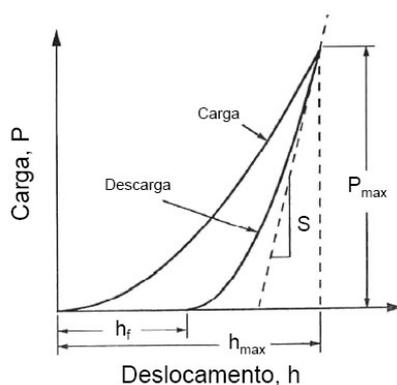


Figura 2.15 – Curva de resposta de ensaio de dureza nano-indentado

#### 2.4.4 – Ruído Magnético de Barkhausen

O ruído magnético de Barkhausen é uma técnica não destrutiva, utilizada para avaliação da microestrutura e estresse residual em aços ferromagnéticos. Existem algumas vantagens deste método sobre a difração de raio X na medição de tensões residuais, uma vez que se consegue uma profundidade maior de medida, se tem uma rápida leitura, o equipamento é portátil, e se consegue medir componentes de geometrias complexas como engrenagens.

Na literatura são encontrados diversos trabalhos que indicam a sensibilidade do RMB ao estado microestrutural e mecânico do material. Assim, são diversas as possibilidades de desenvolvimento de métodos de ensaio magnético não destrutivo para monitoramento de processos de fabricação bem como de desempenho de componentes e equipamentos industriais. Como exemplos, têm-se a aplicação para inspeção da qualidade de superfícies obtidas por processos de usinagem e superfícies tratadas, inspeção de anisotropia em chapas obtidas pela conformação mecânica, integridade de estruturas soldadas, degradação causada por processos de fadiga e fluência em tubulações de caldeiras, entre outras (Marau e Padovese, 2006).

De acordo com vários estudos realizados, pode-se classificar o ruído de Barkhausen em duas categorias: alta frequência e baixa frequência. As mediadas com alta frequência envolvem o uso de frequências maiores que 10 MHz necessitando de uma excitação externa e a frequência de análise fica entre 2 – 1000 kHz. As medidas com baixa frequência é executada com uma mais baixa excitação da frequência magnética, menor que 1 Hz e o sinal de frequência analisado é de 0,1 à 100 kHz.

O efeito Barkhausen explica a elevação abrupta da curva de magnetização até a saturação. O efeito de orientação da força magnetizante imposta por uma corrente elétrica, sobre os elementos cristalinos num corpo ferro-magnético é originado pela repentina reordenação dos mesmos domínios magnéticos, que são facilmente girados.

A densidade de fluxo magnético num material ferromagnético, sujeito a um campo magnético oscilante, varia de forma descontínua, em pequenos incrementos chamados saltos Barkhausen. A figura 2.16 mostra o laço de histerese para um material ferromagnético onde B é a densidade de fluxo magnético e H é a intensidade do campo magnético oscilante aplicado (Karpuschewski e Oberbeck, 1997).

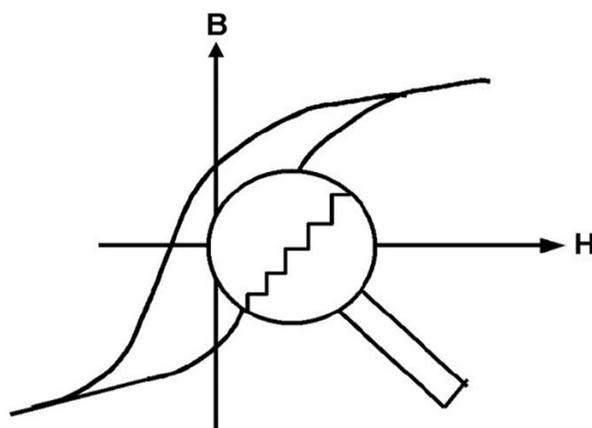


Figura 2.16 - Representação do laço de Histerese para um material ferromagnético (Martins et al 2004).

Estes saltos estão diretamente relacionados aos movimentos das paredes dos domínios magnéticos e ao processo de rotação que ocorrem no interior do domínio durante a magnetização de alta intensidade (Karpuschewski e Oberbeck, 1997). Se for colocada uma bobina indutora na superfície da amostra, durante o movimento dos domínios magnéticos, esta captará um pulso elétrico decorrente da mudança da orientação dos domínios chamado de ruído Barkhausen. Este ruído é fortemente influenciado pelo estado de tensões residuais e pela microestrutura do material (Hauk 1997, Withers e Bhadeshia 2001, Stefanita et al 2000).

Para um material ferromagnético, magnetostrictivamente positivo, a presença de tensões residuais compressivas reduz a taxa de alinhamento dos domínios magnéticos na direção do campo magnético externo e a intensidade do ruído Barkhausen produzido, para tensões trativas o efeito é o oposto (Hauk, 1997).

Como este é um método indireto, uma etapa posterior de calibração deve ser efetuada a fim de se ter a relação entre os sinais medidos e a magnitude das tensões presentes no componente. Esta calibração pode ser efetuada através de ensaios mecânicos ou através de outros métodos de determinação das tensões residuais tais como difração de raios-X ou pelo método do furo (Hauk, 1997).

### 2.4.5 – Difração de Raio X

Na análise das tensões residuais por difração de raios-X a variação no retículo cristalino, induzida pela presença de tensões, é medida com base na lei de Bragg e as tensões residuais são calculadas assumindo-se que a distorção no ocorre no regime linear elástico (Withers e Bhadeshia 2001; Prev y, 1986; Hauk 1997) . Esta   uma técnica não-destrutiva que, devido   forte absor o dos raios-X pela matéria,   limitada às camadas superficiais onde estes percorrem distâncias da ordem de 10  $\mu\text{m}$ . O volume analisado depende do grau de penetra o e da área do feixe incidente na amostra (Prev y, 1986).

Quando uma peça de material policristalino   deformada elasticamente, há uma deform o uniforme a distâncias relativamente longas entre os espaçamentos dos planos da rede cristalina onde estão contidos os cristalites (grãos) que mudam seu estado livre para algum novo valor correspondente a intensidade da tensão aplicada. Este novo espaçamento caracterizado pelo distanciamento entre grãos, para qualquer conjunto de planos igualmente orientados em rela o   tensão aplicada,   medido pela difra o de raios-X (Cullyti, 1978).

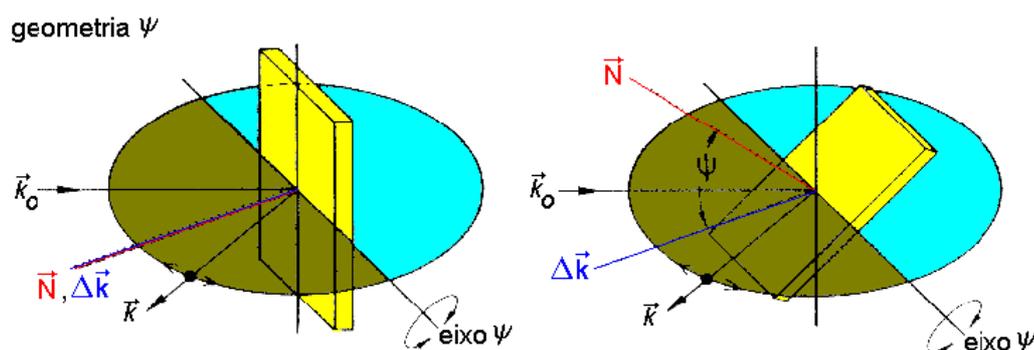


Figura 2.17 – Planos de incidência do raio X, em ensaio de difra o.

A determina o da tensão residual passa pela medida da deform o presente na f milia de planos hkl em algumas dire es ( $\psi$ ) (Figura 2.17) e da obten o do seu tensor de tensão pelo equacionamento através da Mecânica dos meios contínuos (Genzel et al, 1996; Lu e Reirant, 1998). Esse equacionamento (2.2 e 2.3) assume uma deform o dentro do limite

elástico e um comportamento isotrópico do material, (Scarminio, 1989; Cullyti 1978; Lu e Retraint, 1998). A determinação da deformação de um plano considerado pela difração de raios-X para um estado de tração uniaxial vem da definição da variação do seno do ângulo difratado  $\theta$ .

Em 1989, Scarminio estudou a determinação dos níveis de tensões mecânicas em filmes de Pb/Pd apresentando um método simples para a medição da deformação de planos por difração de raios-X, aliada a cálculos analíticos e sem a utilização do método de *psi* quadrado. Segundo o mesmo autor, a lei de *Hooke* para materiais de comportamento linear e isotrópico, e para uma tensão planar e homogênea onde tem-se,  $\sigma_x = \sigma_y = \sigma_z$  e  $\sigma_{xy} = \sigma_{yx} = \sigma_z = 0$ .

## **2.5 Aços para moldes**

Os aços utilizados em moldes de plásticos correspondem principalmente, aos aços da série AISI P. Apesar de muitas vezes pouco ligados, possuem propriedades de limpeza microestrutural e de processamento que os diferenciam dos outros aços convencionais e do carbono. As propriedades destes materiais relacionam-se às características de processamento, como poliabilidade, usinabilidade e resposta ao tratamento térmico (Mesquita e Barbosa, 2004). No entanto moldes em que a tiragem das peças são na ordem de 1.000.000 de unidades, são escolhidos materiais com propriedades mecânicas mais condizentes como é o caso do aço AISI H13.

O aço é a matéria prima base para a agregação de valores quando se fala em moldes. O processo que mais vai agregar valor ao aço será o de usinagem. Desta forma o aço é a base para todos os processos subseqüentes, portanto a utilização de aços de elevada qualidade e desempenho se tornam fatores fundamentais para o bom desempenho do mole.

São várias as propriedades que um aço destinado a confecção de matrizes e moldes deve possuir a fim de desempenhar satisfatoriamente o serviço ao qual será destinado.

Pode-se observar na tabela 2.3 as propriedades versus os elementos que conferem tal característica aos aços.

Tabela 2.3 – Habilidade dos elementos de liga em conferir certos característicos aos aços para ferramentas e matrizes (Chiaverini, 2002).

<b>Característicos</b>	<b>Elementos de liga</b>
Dureza a quente	W, Mo, Co (com W ou Mo), V, Cr, Mn
Resistência ao desgaste	V, W, Mo, Cr, Mn
Profundidade de endurecimento	Mn, Mo, Cr, Si, Ni V(a)
Empenamento mínimo	Mo (com Cr), Cr, Mn
Tenacidade pelo refino de grão	V, W, Mo, Mn, Cr
(a) O vanádio fornece elevada profundidade de endurecimento se austenitizado a temperatura suficientemente elevada para dissolver o carboneto de vanádio	

No caso dos aços para moldes, os elementos de liga produzem um menor empenamento durante a têmpera, porque aumentam a endurecibilidade dos aços e permitem o emprego de resfriamentos menos drásticos, o que se traduz em menores tensões de natureza térmica. A resistência a abrasão é aumentada mesmo a mesma dureza, devido a formação de carbonetos duros e resistentes ao desgaste, aos quais são em maior quantidade, à medida que aumentam os teores de carbono e elementos de liga.

A série P é bastante utilizada por já vir beneficiada da usina com uma dureza de 28 HRc – 32 HRc, no entanto quando a produção (do molde) for mais elevada, é necessária a utilização de materiais com melhores propriedades mecânicas, tais como os da série H.

Classificado pela sua endurecibilidade, segundo a norma da AISI (*American Iron and steel Institut*), onde emprega-se o sufixo “H” (*Hardenability*) para distingui-los dos tipos correspondentes que não apresentam exigências de endurecibilidade (Chiaverini, 2002). Encontra-se no grupo de aços para trabalho a quente, ou seja, foi desenvolvido para utilização em operações de punçonnemento, cisalhamento, e forjamento de metais em altas temperaturas sob condições de calor, pressão e abrasão. São identificados como aço “H”, no sistema de classificação. São divididos em três sub-grupos: ao cromo (que vai do H10 ao H19), ao tungstênio (H21 ao H26) e ao molibidênio (42 e H43) (Infomet, 2005).

O H13 pode ser considerado de uso universal. Tem boa tenacidade, boa resistência mecânica a quente, boa resistência à fadiga térmica e ao desgaste a quente. Usado em moldes para fundição sob pressão de ligas de Al, matrizes para extrusão a quente de ligas Al, insertos para matrizes de ligas não ferrosas, moldes para injeção de plásticos, ferramentais para processamento de materiais plásticos e pinos ejetores. Sua composição química pode ser observada na tabela 2.4. Com tratamento térmico, o H13 chega a uma dureza aproximada de 56 HRc (Thyssenkrupp, 2005).

Tabela. 2.4 - Composição química do AISI H13 (Thyssenkrupp, 2005).

C%	Si%	Cr%	Mo%	V%
0,40	1,00	5,30	1,40	1,00

O aço AISI H13 é utilizado em moldes de injeção, quando as produções chegam na casa de 1.000.000 de unidades (Sandvik, 2002). O seu processamento tem sido muito estudado em função de sua versatilidade, sendo empregado em diversas funções.

O aço vai passar por um processo de usinagem que vai lhe conferir a forma, e características funcionais. Assim, o processo de usinagem deve ser compreendido, pois ele é o responsável pelas modificações na sub-superfície do material.

### 3. Métodos e Materiais

Na abordagem deste trabalho, estão inclusos os principais processos de usinagem para se produzir um molde, ou seja, fresamento, eletroerosão e lixamento. Com base nos parâmetros aplicados a estes processos, deseja-se obter uma caracterização da integridade superficial para as cavidades geradas.

Este trabalho foi dividido em etapas, como citado na introdução, para facilitar a compreensão das atividades executadas. Em todas elas foram realizados ensaios de fresamento e alguma outra operação posterior, exceto na etapa 1, onde somente o processo de fresamento foi aplicado aos corpos-de-prova.

A figura 3.1 trata de uma representação dos processos que foram utilizados na geração das superfícies que passaram pela caracterização proposta. Além disso, vale ressaltar que todos os parâmetros de empregados na confecção dos corpos-de-prova foram os mesmos empregados na indústria e fornecidos pelo fabricante das ferramentas. Já para a usinagem por eletroerosão, os parâmetros utilizados foram os aplicados usualmente na indústria de moldes.

A divisão em etapas foi feita com base nas principais superfícies fabricadas que exercem diversos papéis em um molde de injeção. Por exemplo, a superfície que constitui a linha de fechamento do molde não precisa ser polida, no entanto, dependendo de sua forma geométrica ela poderá passar pelo processo de EDM.

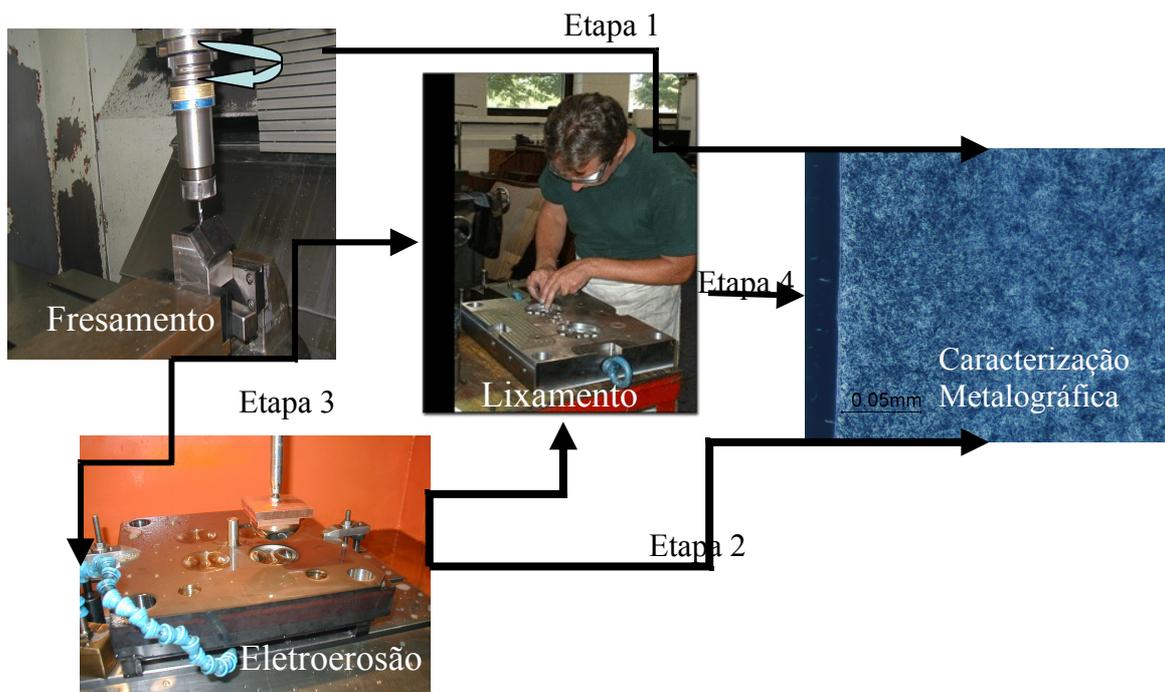


Figura 3.1- Figura representativa do fluxo dos ensaios

Já as superfícies que compreendem a cavidade do molde terão seu acabamento direcionado pela função que o produto final (injetado) vai exercer. No caso de uma sinaleira de automóvel fabricada pelo processo convencional de usinagem, se aplicam nas cavidades os processos de fresamento, EDM e um processo de lixamento que daria um aspecto de espelho ao aço. Desta forma, foram avaliadas todas as condições divididas nas etapas acima descritas.

### 3.1 Procedimento Experimental

Com base nas superfícies geradas pelos processos de fresamento, eletroerosão e lixamento, foram caracterizados a superfície e sub-superfície dos corpos-de-prova através dos processos de medida de rugosidade para avaliar a textura superficial, análise da metalografia para avaliar a existência de deformações plásticas e mudanças de microestrutura, de dureza para se avaliar a existência de um gradiente de dureza, medidas de ruído de Barkhausen, e difração de raio X para avaliar a existência de tensões residuais. Desta forma, foram avaliadas a textura superficial, a existência de trincas e deformações plásticas. Foi feito um levantamento do perfil de dureza e a existência de tensões residuais.

Para o processo de fresamento envolvendo as etapas 1, 2, 3 e 4 os corpos-de-prova foram fixados com um gabarito com inclinação de 45°, em uma morsa. Na figura 3.2, observa-se uma representação da fixação utilizada nos ensaios de fresamento. Com a utilização de um gabarito, é possível garantir a inclinação desejada e uma maior rigidez ao sistema. Além disso, pode-se manter sempre o mesmo ponto zero durante a usinagem, facilitando o procedimento de preparação da máquina.

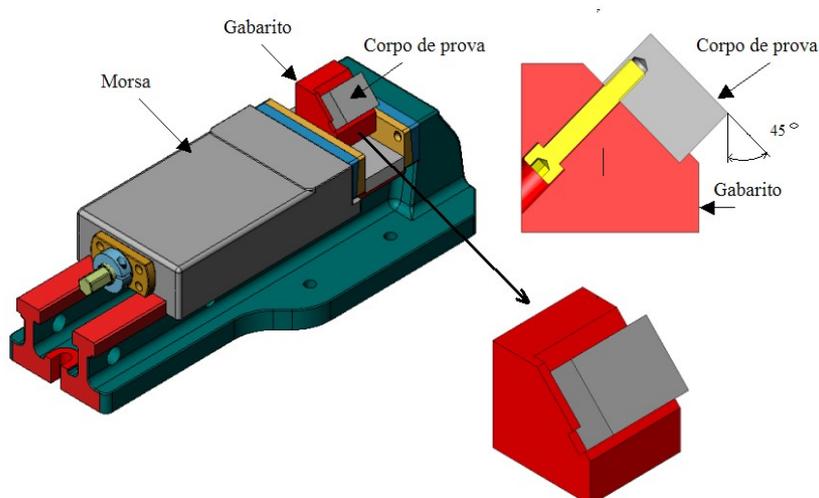


Figura 3.2– Representação da fixação do corpo-de-prova nos ensaios de usinagem.

Na tabela 3.1 pode-se observar os parâmetros de corte utilizados para o processo de fresamento nas etapas 1, 2, 3 e 4. Uma operação de acabamento foi utilizada e uma estratégia de corte concordante e discordante. A ferramenta executa o movimento de descida pelo corpo-de-prova, incrementa o passe lateral e sobe pelo corpo-de-prova (figura 3.3) e assim repete-se o ciclo até completar a usinagem.

Tabela- 3.1 - Dados de corte dos ensaios de usinagem sugeridos por Taegutec, 2005.

Condição	Ø Efetivo (mm)	$z_n$ (un)	$v_f$ (mm/min)	$n$ (rpm)	$f_z$ (mm/rpm)	$v_c$ (m/min)	$a_e$ (mm)	$a_p$ (mm)
Descendo	4,24	2	1000	6000	0,083	79,92	0,2	0,3
Subindo	5,67	2	1000	6000	0,083	106,87	0,2	0,3

Na figura 3.3 pode-se observar uma representação esquemática do caminho da ferramenta sobre o corpo-de-prova. As setas sobre o caminho da ferramenta indicam o sentido da usinagem. Quando a ferramenta executa o movimento de descida, ela tem uma

posição de contato com a peça diferente de quando executa o movimento de subida. Desta forma se tem dois diâmetros efetivos de corte um na descida e um na subida da ferramenta pelo corpo-de-prova. Para executar todo o trajeto a ferramenta levou o tempo de aproximadamente 13 minutos.

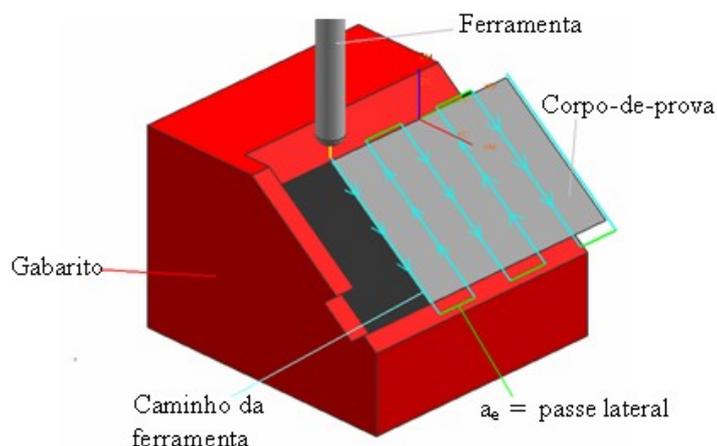


Figura 3.3 – Representação da usinagem por fresamento dos corpos-de-prova.

### 3.1.1 Condições de Usinagem Etapa 1

Na etapa 1 foram usinados 6 corpos-de-prova, 3 à seco e 3 com fluido. Na figura 3.4 estão representadas os corpos-de-prova no momento da usinagem, tanto para condição a seco item A, como para a condição com fluido item B.



Figura 3.4 – Usinagem dos corpos-de-prova na etapa 1.

Os parâmetros utilizados formam os indicados no capítulo 3.1, tabela 3.2 tanto para usinagem a seco como para a usinagem com fluido. O fluido utilizado no fresamento foi um óleo solúvel semi-sintético de alta diluição, da marca Ultra, código *ultra cut 370*.

### 3.1.2 Condições de Usinagem Etapa 2

Esta etapa compreende a usinagem por fresamento com posterior lixamento da região fresada. O objetivo deste ensaio é a verificação da eficácia do lixamento em remover a região afetada pela usinagem de fresamento e verificar quais são as características da nova superfície formada por este processo.

O processo de fresamento segue os parâmetros descritos no item 3.1. Já para o lixamento o critério estabelecido foi visual, ou seja, depois de estabelecidas às seqüências das lixas, o lixamento realizado sobre a superfície usinada teve como critério de fim de processo a qualidade visual. Este é o procedimento adotado na indústria. Na tabela 3.2 estão destacadas as granulometrias das lixas empregadas no processo de lixamento.

Tabela 3.2 – Seqüência de Granulometria das lixas

Seqüência	Granulometria da lixa
<b>1</b>	<b>230</b>
<b>2</b>	<b>320</b>
<b>3</b>	<b>400</b>
<b>4</b>	<b>600</b>
<b>5</b>	<b>1200</b>

Além disso, destaca-se que o lixamento empregado nos corpos-de-prova, foi o chamado de “polimento” funcional, ou seja, aquele que permite ao polímero se desprender da cavidade de um molde. Para esta situação não é necessário chegar ao brilho. No caso da indústria de moldes e matrizes, a partir deste critério visual de rugosidade é que realmente o processo de polimento é feito. Até então, se tem o processo de lixamento que já produz a superfície com a rugosidade desejada.

### **3.1.3 Condições de Usinagem Etapa 3**

Para esta etapa a usinagem seguiu a seguinte seqüência: fresamento a seco, com posterior usinagem por EDM. Esta seqüência empregada é normalmente a mesma utilizada na indústria de moldes e matrizes. Para o processo de fresamento as condições de usinagem são as mesmas adotadas na etapa 1 para o fresamento a seco. Já para a usinagem por eletroerosão adotou-se o seguinte critério: usinar 0,1 mm no regime de desbaste; usinar 0,1 mm no regime de acabamento num total de 0,2 mm.

No regime de desbaste foi utilizada uma descarga elétrica de 3 Ts, com 150 de regime de trabalho. Já para a condição de desbaste utilizou-se 1,5 Ts com 150 de regime de trabalho.

### **3.1.4 Condições de Usinagem Etapa 4**

Na etapa 4 da usinagem definiu-se a seguinte seqüência: fresamento, usinagem por eletroerosão e lixamento. Em todos os casos de usinagem os parâmetros empregados foram os mesmos dos itens anteriores. Desta forma criou-se um padrão para se usinar os corpos-de-prova.

O objeto desta etapa é verificar se os processos anteriores têm influência para a formação final da sub-superfície de um molde. Desta maneira, os critérios de usinagem têm que ser os mesmos aplicados nas etapas anteriores.

Para o processo de fresamento adotou-se a mesma condição da etapa 1 para o fresamento a seco, ou seja, usinagem com ferramenta de topo esférico com 0,2 de passe lateral e 0,3 de profundidade de corte. No processo de eletroerosão, da mesma forma, aplicou-se os parâmetros utilizados na etapa 3, ou seja, removeu-se 0,1 mm no regime de desbaste e 0,1 mm no regime de acabamento. Por fim a etapa de lixamento seguiu as condições definidas na etapa 2, onde se teve a mesma operação. Com a superfície gerada,

foi possível avaliar a influência de todos os processos empregados na fabricação de uma cavidade pelo método convencional.

### 3.1.5 Condições de Usinagem Etapa 5

Na etapa 5 foi fabricado um corpo-de-prova, onde foram aplicados os processos de fresamento e lixamento. No entanto, o corpo-de-prova foi dividido em pistas, e nelas foram aplicados o processo de fresamento com diferentes incrementos laterais ( $a_e$ ) como pode ser observado na figura 3.5.

O objetivo desta etapa foi observar as técnicas de ruído magnético de Barkhausen e difração de raio X para análise de tensão residual para as condições de fresamento e fresamento mais lixamento. Em ambos os casos, as medidas não foram realizadas na Universidade de Caxias do Sul. A primeira foi avaliada na Universidade de São Paulo (USP) e a segunda na AST (*American Stress Technologies, Inc*). Desta maneira, foi criada a etapa 5 do trabalho.

A figura 3.5 traz uma representação do corpo-de-prova e do sentido de sua usinagem para a etapa 5. Foram criadas pistas com diferentes parâmetros de corte para o processo de fresamento. Nesta etapa, o grau de inclinação do corpo-de-prova foi mantido o mesmo das demais etapas, ou seja,  $45^\circ$ .

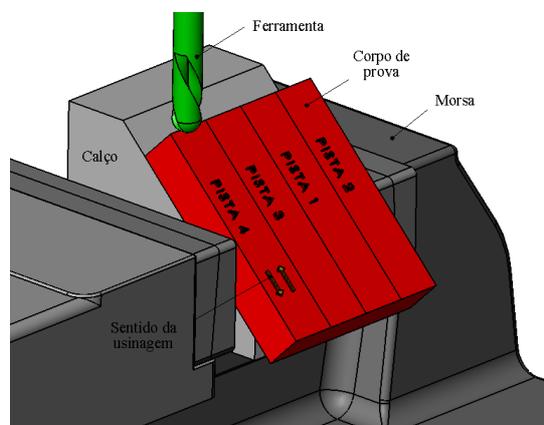


Figura 3.5 - Esquema da fixação do corpo-de-prova etapa 5, com detalhe do posicionamento das pistas usinadas pela ferramenta de corte.

Os parâmetros de corte empregados neste corpo-de-prova estão descritos na tabela 3.3. Observa-se que a pista 1 tem as mesmas condições de  $a_e$  e  $a_p$  do que a usinagem de fresamento para os demais corpos-de-prova fabricados nas outras etapas. A pista 4 também teve estes parâmetros de usinagem para o fresamento e apresentou um posterior processo de lixamento. A seqüência de lixas empregadas no lixamento da pista 4 pode ser observada na tabela 3.4.

Tabela 3.3 – Parâmetros de corte , corpo-de-prova etapa 5.

Parâmetros de corte	Pista (1)	Pista (2)	Pista 3	Pista 4
Incremento lateral $a_e$ (mm)	0,2	0,5	0,08	0,2
Profundidade de corte $a_p$ (mm)	0,3	0,3	0,3	0,3
Rotação (rpm)	8000	8000	8000	8000
Avanço (mm/min)	1200	800	600	1200
Velocidade de corte $v_c$ (m/min)	106,56	106,56	106,56	106,56
Avanço por dente $f_z$ (mm)	0,075	0,05	0,037	0,075

Tabela 3.4 – Seqüência de lixas empregadas no lixamento corpo-de-prova da etapa 5.

Seqüência	Granulometria
1 <sup>a</sup>	230
2 <sup>a</sup>	320
3 <sup>a</sup>	400
4 <sup>a</sup>	600
5 <sup>a</sup>	1200

Na pista 2 foram empregados parâmetros de fresamento considerados de desbaste com um  $a_e$  de 0,5 mm. Já na a pista 3, foi empregado um acabamento mais fino do que o estudado nas outras etapas e nas outras pistas, tendo um  $a_e$  de apenas 0,08 mm.

### 3.2 Material

A matéria prima utilizada nos corpos-de-prova é o aço AISI H13, tratado termicamente, com uma dureza entre 50 a 54 HRc. Cortado em forma de blocos nas dimensões indicadas na figura 3.6, eles passam por um processo de fresamento frontal para que seja conferido o paralelismo e planicidade entre suas faces.

Para fixar o corpo-de-prova durante o ensaio de usinagem, foram feitos dois furos rosca M8 com uma profundidade de 15 mm. Um gabarito com inclinação de 45° serviu de apoio para o corpo-de-prova. Este foi fixado na mesa da máquina através de uma morsa, que é amplamente utilizada para fixação de peças durante o processo de usinagem.

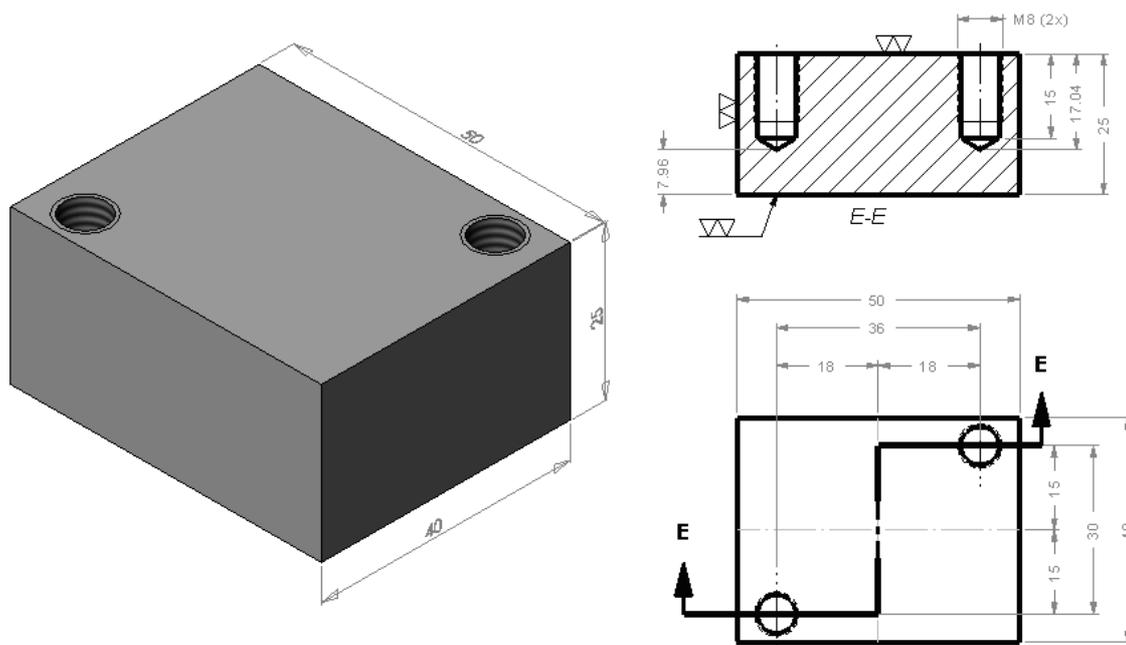


Figura 3.6 - Corpo-de-prova padrão

O tratamento térmico aplicado ao material teve as seguintes etapas: tempera a uma temperatura de 950° e três etapas de revenimento até atingir a dureza de 550 Hv.

### 3.3 Máquinas e Equipamentos

Nos ensaios de fresamento foi utilizado um centro de usinagem CNC ano 2004, marca BEMI (figura 3.7) que pode chegar até 9.000 rpm. A máquina é equipada com guias de rolamentos lineares, que permite uma maior precisão. Além disso, a máquina possui um sistema de réguas digitais que além do encoder, garantem o sistema de coordenadas da máquina durante o seu deslocamento.



Figura 3.7 – Máquina BMEI, da empresa JR Oliveira, onde foram realizados os ensaios de fresamento

A máquina eletroerosão utilizada nos ensaios de usinagem por EDM está representada na figura 3.8. Trata-se de uma máquina ano 2004, marca Engemaq. A máquina possui sistema de guias lineares e sistema de coordenadas com réguas digitais.



Figura 3.8 – Máquina Eletroerosão Engemaq, da empresa JR Oliveira, onde foram realizados os ensaios de usinagem por erosão

Para o processo de lixamento foram utilizadas lixas e pedras de polir com a granulometria indicada nas etapas 2 e 5.

### ***3.4 Ferramentas***

As ferramentas empregadas nos ensaios de fresamento são inteiriças de topo esférico diâmetro de 6 mm, de metal-duro, com dois gumes. Sua fixação foi feita por meio de pinça mecânica. A tabela 3.5 traz as características das ferramentas empregadas.

Tabela 3.5 - Características das ferramentas empregadas nos ensaios de usinagem

Tipo	Diâmetro [mm]	Gumes	Material	Classe	Código	Revestimento	Ângulo de Hélice [mm]
Topo esférico	6	2	Micro grão	P 15 / 20	SBE 2060T	TiAlN	30°

Para garantir que a usinagem dos corpos-de-prova não sofre influência da ferramenta e seguindo a norma ISO 3685, as ferramentas foram todas analisadas. Na figura 3.9, se têm os gumes da ferramenta.

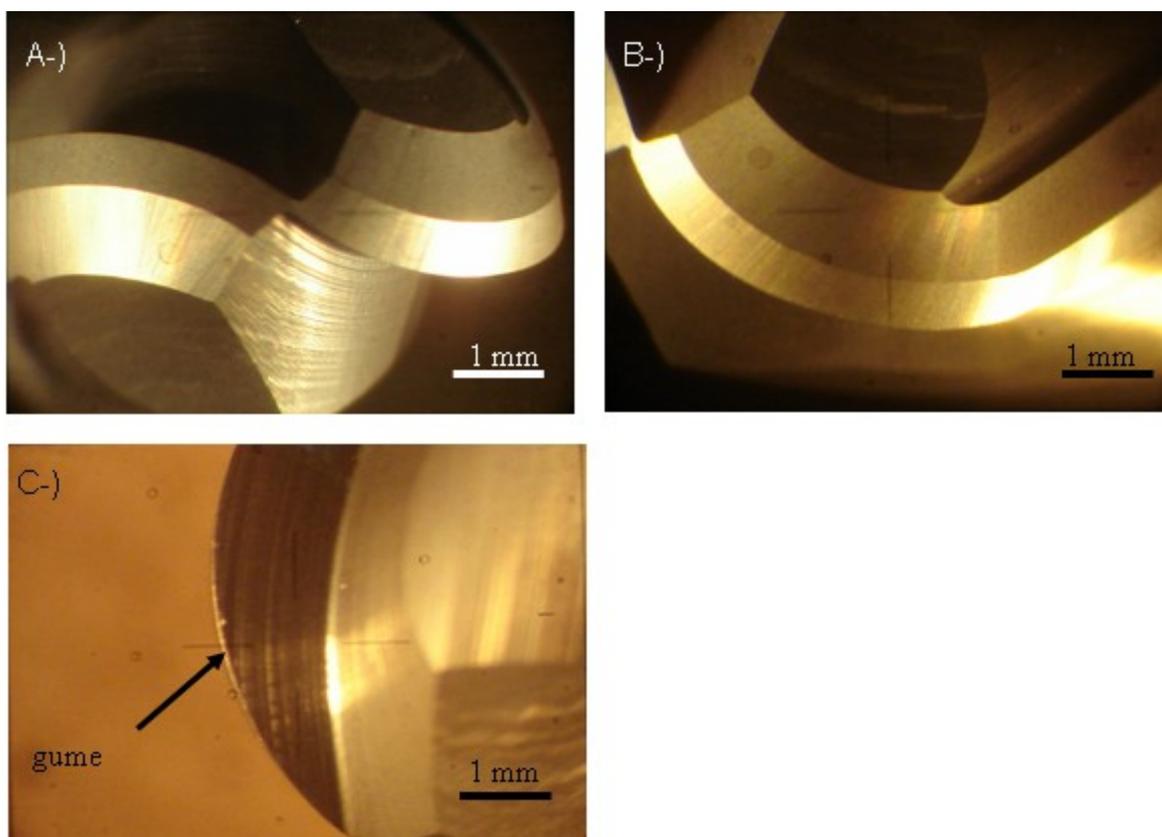


Figura 3.9 – Vistas ampliadas do gume ferramenta de topo esférico utilizada nos ensaios de fresamento.

### 3.5 Análise dos parâmetros de caracterização

De posse das amostras usinadas foram caracterizadas as sub-superfícies e superfícies para os seguintes critérios:

- a) Medidas de rugosidade.
- b) Análise metalográfica.

- c) Medidas de Dureza.
- d) Ruído de Magnético de Barkhausen.
- e) Difração de raio X.
- f) Monitoramento da temperatura.

### 3.5.1 Rugosidade

A rugosidade foi medida utilizando-se o rugosímetro Mitutoyo SJ – 301, figura 3.10.



Figura 3.10 - Rugosímetro Sj – 301 Mitutoyo

As medidas de rugosidade foram feitas no sentido longitudinal da usinagem e no sentido transversal a usinagem. Neste procedimento foram consideradas as medidas de rugosidade  $R_a$ ,  $R_y$ ,  $R_q$  e  $R_z$ .

### 3.5.2 Metalografia e microscopia ótica

Para realização do ensaio metalográfico foram observadas as normas ABNT 11568 e ABNT 8653. Na microscopia ótica foi utilizado o microscópio ótico de bancada Neophot II, com câmara LCCD do laboratório da Universidade de Caxias do Sul.

O corpo-de-prova foi cortado em duas posições: uma no sentido longitudinal e outra no sentido transversal ao avanço da ferramenta. Desta forma, foi possível se observar as deformações decorrentes do avanço e as ocasionadas pelo movimento de rotação da mesma.

A figura 3.11 mostra um desenho de como foram cortados os corpos-de-prova das etapas 1 a 4, para o embutimento. O referencial para os cortes é o sentido de usinagem. Nos corpos-de-prova polidos e ou, com usinagem de eletroerosão seguiu-se o mesmo critério, pois ambos também passaram pelo processo de fresamento.

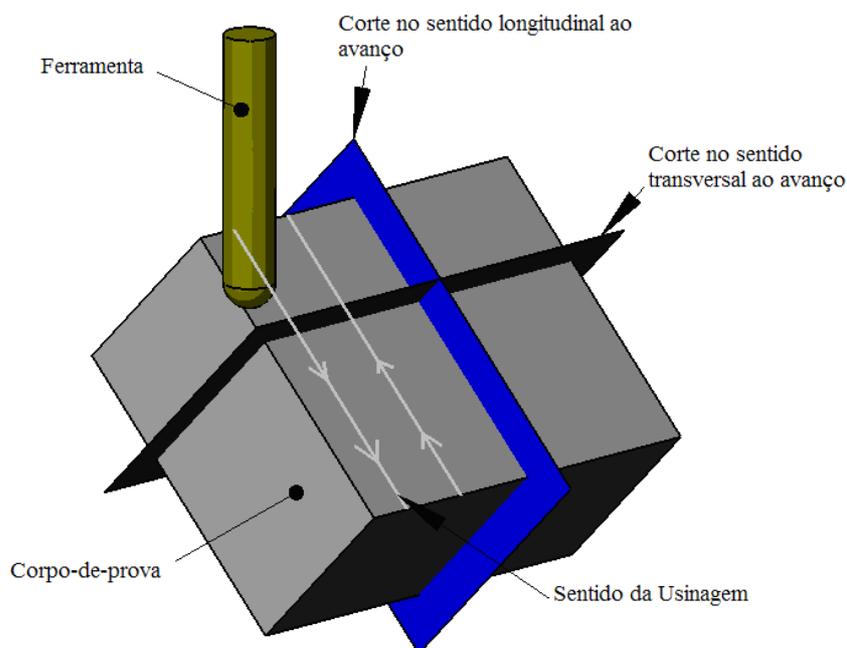


Figura 3.11 – Indicação das secções feitas nos corpos-de-prova para ensaio metalográfico.

Durante o ensaio metalográfico foram testados vários ataques com reagentes químicos, tais como o nital 2% , nital 5%, picral, ataque eletrolítico, e ainda uma ataque a quente com ácido pícrico. Estes ataques foram testados com a finalidade de se obter a melhor imagem, que revelasse uma possível deformação plástica decorrente da usinagem.

Desta forma, se escolheu os ataques à quente com ácido pícrico, bem como o ataque com o reagente picral. Com um dos ataques foi possível observar as influências da usinagem sobre a sub-superfície e com o outro ataque foi possível observar a microestrutura do material do corpo-de-prova.

### 3.5.3 Medidas de dureza

Na tentativa de caracterizar o perfil de dureza da borda em relação ao centro do material, foi utilizada a técnica de 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.

As normas indicam que a medida mais próxima da borda deve ter a distância de duas vezes e meia do valor da média encontrada da diagonal da impressão, que deve ser feita no centro do material antes de iniciar as medidas de micro-dureza.

Desta forma, a primeira impressão só poderia ser feita a partir de aproximadamente 40  $\mu\text{m}$  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 3.12 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 nano-dureza.

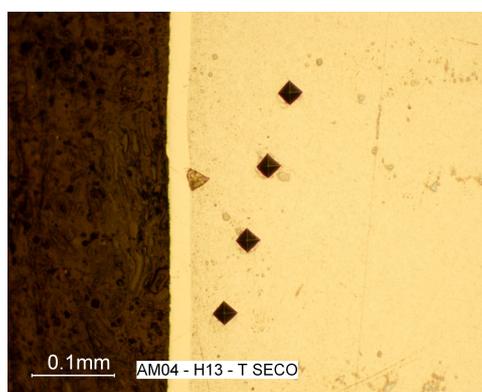


Figura 3.12 – Impressões de micro-dureza em um corpo-de-prova.

As medidas de nano-dureza permitiram verificar a existência de um gradiente de dureza. Estas medidas foram realizadas na Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, com o nano-durômetro. Foram realizadas medidas da camada sub-superficial, fazendo um levantamento do seu perfil.

Para que fosse possível realizar as medidas, os corpos-de-prova foram cortados e embutidos à quente com uma resina fenólica 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 lixamento das amostras. Além disso, destaca-se que as medidas foram realizadas em uma secção transversal ao corte da ferramenta.

#### **3.5.4 Medição de Ruído Magnético de Barkhausen**

O equipamento de RMB se compõe de uma unidade que contém um gerador de corrente de excitação, um condicionador de sinais e um programa de aquisição, controle e pré-análise de sinais instalado num computador. O sistema permite controlar tanto a intensidade quanto a frequência do campo magnético de excitação, bem como a amplificação do sinal lido.

A sonda de inspeção contém uma bobina excitadora e uma leitora. A bobina excitadora aplica o campo magnético alternado na peça a ser inspecionada. Os pulsos magnéticos de alta frequência que são emitidos do material são captados pela bobina de leitura, na forma de pulsos de tensão elétrica induzida, correspondentes aos pulsos magnéticos que compõem o RMB.

Foram realizadas medidas de RMB utilizando-se uma excitação magnética senoidal a uma frequência de 10 Hz, induzida na amostra através de um núcleo de Fe-Ni em forma de “U” com enrolamento de cobre.

Foi utilizada uma taxa de amostragem de 200 kHz do sinal de RMB, coletando-se cinco amostras consecutivas em medição. Cada sinal, composto de 60.000 pontos, foi analisado em termos do valor de rms (*root mean square*) e do valor médio de pico. Cada medição foi repetida 3 vezes em cada condição de usinagem.

### 3.5.5 Difração de raio X para medida de tensões residuais

As medidas de difração de raio X foram feitas na AST, nos EUA. Foram utilizados os seguintes parâmetros para a análise de raio X: radiação  $CrK\alpha$ , tempo de exposição 6 s.

Foram feitas medidas a  $0^\circ$ ,  $45^\circ$  e  $90^\circ$ .

### 3.5.6 Monitoramento da temperatura

A temperatura durante a usinagem foi monitorada para o processo de fresamento a fim de se verificar a variação da temperatura em regiões próximas a borda, e se estas temperaturas poderiam ser significativas. Para isso, foram feitos furos de diâmetro de 2 mm para alojamento dos termopares. A disposição destes furos foi feita observando-se o sentido da usinagem. A figura 3.13, apresenta o sistema de furação do corpo-de-prova.

Na seta horizontal, pode-se observar que os termopares foram fixados ao longo da usinagem, que denominamos de sentido longitudinal, ou seja, no mesmo sentido da usinagem. Já para a seta vertical, pode-se observar que os termopares foram fixados na medida de espessura do corpo-de-prova, ou seja, no mesmo sentido do eixo da ferramenta, que se denomina de colinear a ferramenta.

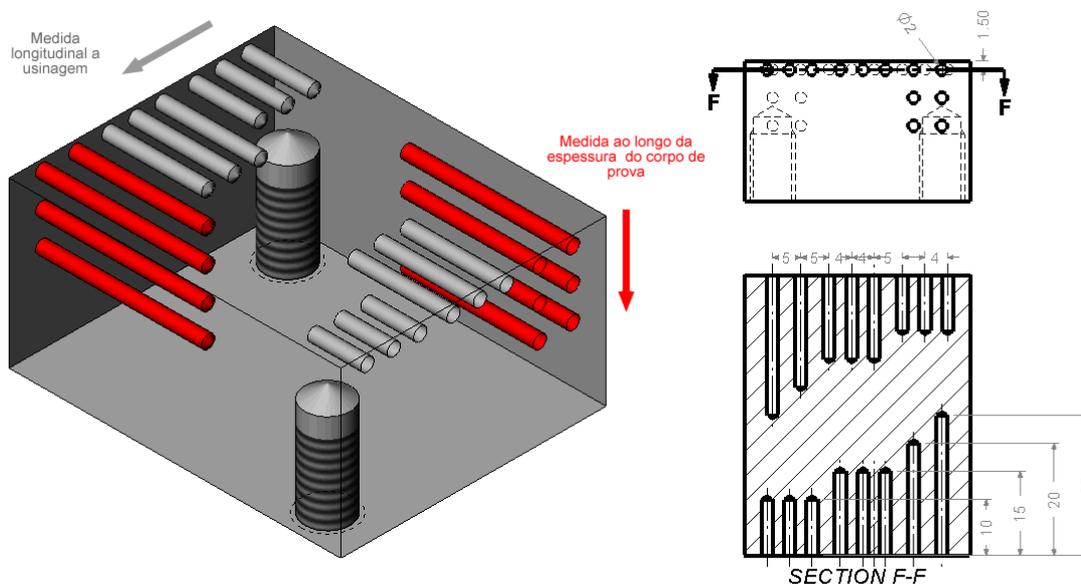


Figura 3.13 – Corpo-de-prova, com furações para fixação de termopares

No sentido longitudinal é possível se medir a temperatura de usinagem durante o seu trajeto e seu comportamento quando a usinagem está próxima ao sensor. Já no sentido colinear a ferramenta, é possível medir a propagação do calor gerado na usinagem pelo corpo-de-prova ao longo de sua espessura.

## 4. Resultados das Análises

Neste capítulo são apresentados os resultados das análises feitas sobre os corpos-de-prova. As rugosidades foram apresentadas em forma de tabela e gráficos, as análises metalográficas trazem fotos das micrografias. Os perfis de dureza são apresentados em forma de gráfico e os valores de ruído de Barkhausen em forma de média. As tensões residuais em forma de tabela para ilustração dos valores.

### 4.1 Rugosidade

De acordo com as superfícies geradas e com as etapas pré-definidas no capítulo 3 estão dispostas as análises de rugosidade. Estas foram medidas em dois sentidos: um transversal e outro no sentido ao avanço da ferramenta.

#### 4.1.1 Rugosidade Etapa 1

Abaixo estão listadas as médias das rugosidades encontradas nos corpos fresados com e sem fluido. Na tabela 4.1 pode-se observar as médias e os desvios padrões das rugosidades encontradas nos corpos-de-prova, no sentido longitudinal ao avanço da ferramenta.

Tabela 4.1 – Rugosidade etapa1 - longitudinal

	<b>Seco</b> $\bar{X}_s$	<b><math>\sigma_s</math></b>	<b>Fluído</b> $\bar{X}_s$	<b><math>\sigma_s</math></b>
<b>R<sub>a</sub></b>	0,38	0,041	0,30	0,012
<b>R<sub>v</sub></b>	2,36	0,189	1,58	0,121
<b>R<sub>z</sub></b>	1,65	0,131	1,11	0,111
<b>R<sub>q</sub></b>	0,46	0,043	0,36	0,015

Considerando-se as medidas no sentido longitudinal, pode-se observar que os valores de  $R_a$  enquadram-se em valores esperados para uma usinagem de acabamento (Hutchings, 1992; Withouse, 1994). No entanto, vale ressaltar que existem vales e ou picos bem maiores neste sentido, que podem ser vistos quando avalia-se os valores de  $R_y$  onde chega-se a valores de 2,36  $\mu\text{m}$  para usinagem a seco e 1,58  $\mu\text{m}$  para a usinagem com fluido. Já na tabela 4.2, os resultados das rugosidades são para as medidas feitas no sentido transversal. Para estas condições os valores de  $R_a$  também enquadram-se nos esperados para uma usinagem de acabamento.

Tabela 4.2 – Rugosidade Etapa1 - transversal

	<b>Seco</b> $\bar{X}_s$	$\sigma_s$	<b>Fluido</b> $\bar{X}_s$	$\sigma_s$
<b><math>R_a</math></b>	1,46	0,051	1,84	0,025
<b><math>R_y</math></b>	6,48	0,222	7,58	0,177
<b><math>R_z</math></b>	5,69	0,062	6,97	0,188
<b><math>R_q</math></b>	1,72	0,041	2,17	0,085

Os valores de  $R_y$  ficam muito acima da média ( $R_a$ ) encontrados. Isto demonstra que a superfície possui vales e ou picos que podem ser prejudiciais quando esta superfície estiver sobre solicitações de cargas . Além dos resultados, pode-se observar nas figuras 4.1 A-) e 4.2 os perfis de rugosidade da condição de usinagem a seco, A, e os perfis de rugosidade com fluido na B.

B-)



Figura 4.1 – Perfil longitudinal da rugosidade

Nos perfis de rugosidade nota-se que, na usinagem a seco, a rugosidade medida no sentido longitudinal foi maior que na usinagem com fluido. No entanto, a rugosidade no sentido transversal, para condição a seco foi menor que a rugosidade para a condição com fluido.

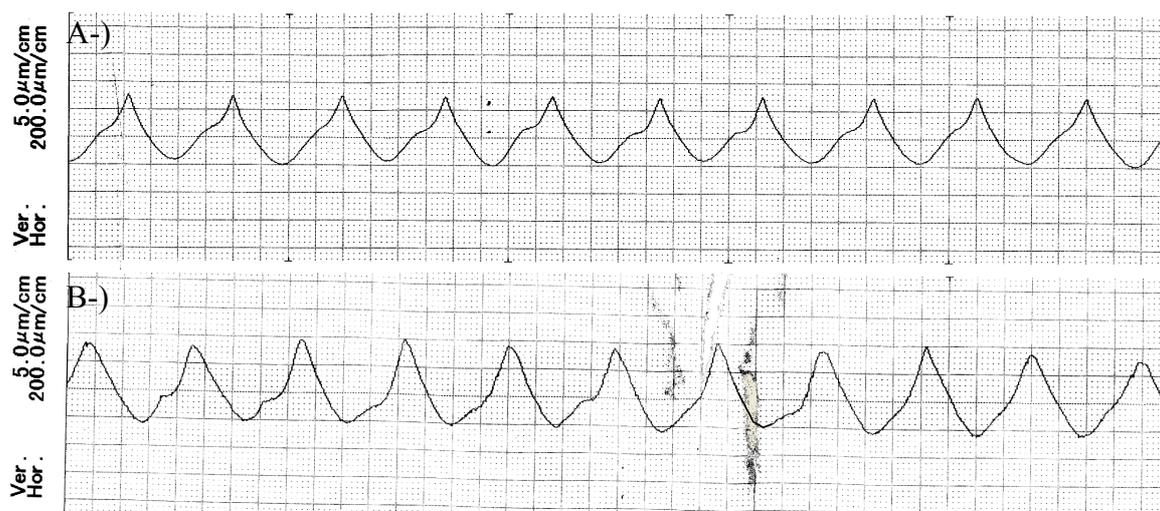


Figura 4.2 – Perfil transversal da rugosidade.

Isto se deve em função das altas temperaturas envolvidas no momento do corte do material. Quando o fluido 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 (Silva et al, 2006).

Além destes fatores, ainda é possível avaliar a rugosidade através dos gráficos apresentados na figura 4.3. As colunas azuis demonstram as rugosidades medidas no sentido longitudinal. Já as colunas em grená demonstram as rugosidades medidas no sentido transversal.

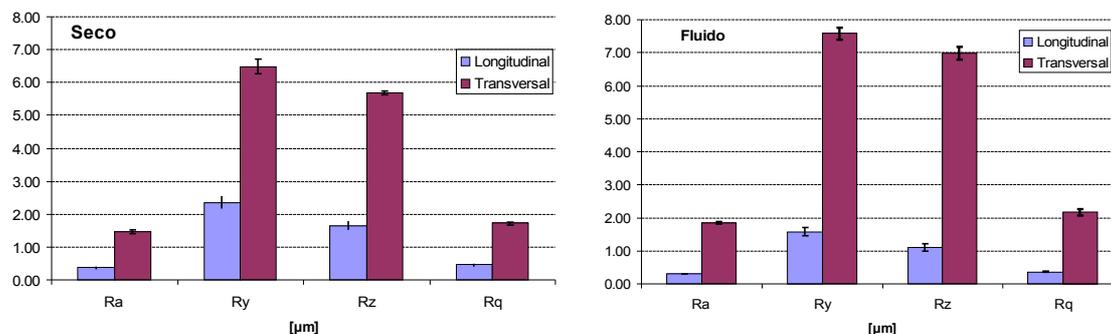


Figura 4.3 – Gráficos comparativos de rugosidade dos corpos-de-prova fresados.

#### 4.1.2 Rugosidade corpos etapa 2

Na tabela 4.3 observa-se os valores das rugosidades encontradas nos corpos-de-prova. Tanto no sentido longitudinal, quanto no transversal, os valores não apresentaram diferenças significativas, uma vez que no lixamento são removidos os sulcos deixados pela usinagem de fresamento.

Tabela 4.3 – Rugosidades corpos-de-prova fresados e polidos

	Longitudinal		Transversal	
	$\bar{X}_s$	$\sigma_s$	$\bar{X}_s$	$\sigma_s$
<b>R<sub>a</sub></b>	0,10	0,030	0,11	0,058
<b>R<sub>v</sub></b>	1,30	0,689	0,93	0,476
<b>R<sub>z</sub></b>	0,62	0,179	0,52	0,227
<b>R<sub>q</sub></b>	0,16	0,043	0,18	0,093

Os valores de rugosidade encontrados são os esperados, e encontram-se dentro de uma faixa de valores encontrados na literatura para esta operação de acabamento. No gráfico apresentado na figura 4.4, observa-se que para a superfície o sentido de avanço da usinagem não tem influência na rugosidade após o lixamento, uma vez que o lixamento apresenta várias direções. Pelas barras de desvio nota-se que, tanto para um sentido quanto para o outro, os valores são semelhantes e não apresentam diferenças significativas.

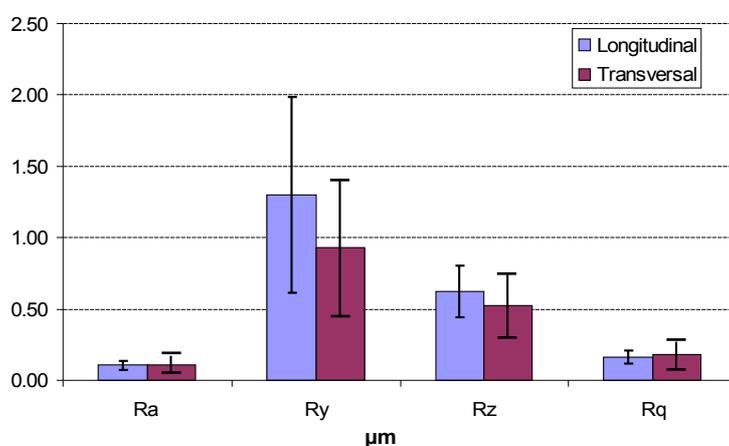


Figura 4.4 – Gráfico da rugosidade corpos-de-prova usinados e polidos

Apesar de apresentar valores baixos de rugosidade média ( $R_a$ ) pode-se observar que pelos valores de  $R_y$ , que existem picos e vales com valores superiores na faixa de 1,3  $\mu\text{m}$ .

### 4.1.3 Rugosidade Etapa 3

As rugosidades medidas para os corpos-de-prova fresados e que logo após passaram por um processo de eletroerosão estão apresentadas na tabela 4.4.

Tabela 4.4 - Corpo-de-prova usinado mais eletroerosão

	Longitudinal		Transversal	
	$\bar{X}_s$	$\sigma_s$	$\bar{X}_s$	$\sigma_s$
<b>R<sub>a</sub></b>	3,32	0,535	3,93	0,450
<b>R<sub>y</sub></b>	20,14	1,797	19,53	2,018
<b>R<sub>z</sub></b>	13,19	1,381	13,72	1,236
<b>R<sub>q</sub></b>	4,15	0,632	4,76	0,489

A faixa de valores encontrados para média de rugosidade ( $R_a$ ), encontra-se dentro dos padrões para este processo, como visto na literatura (Hutchings, 1992; Withouse, 1994). Assim como no processo anterior, pode-se observar que os valores de  $R_y$  são elevados se comparados aos valores de  $R_a$ .

Neste processo foram removidos 0,2 mm e desta maneira, a rugosidade do processo anterior (fresamento) foi removido totalmente e não influenciou na rugosidade deixada pelo processo de eletroerosão. Na figura 4.5 estão representados os perfis da rugosidade do processo final neste corpo-de-prova, no caso o processo de eletroerosão.

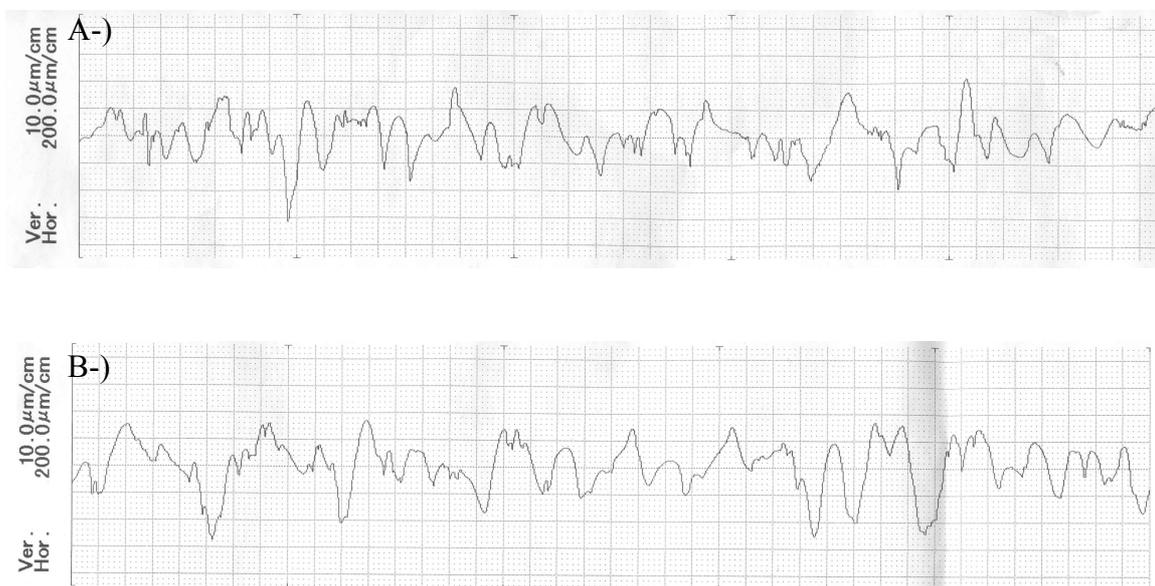


Figura 4.5 – Perfil transversal (A) e perfil longitudinal (B) de rugosidade de corpo-de-prova usinado por eletroerosão.

Além do perfil, pode-se analisar através do gráfico, figura 4.6, que as rugosidades medidas em ambas as direções tiveram um comportamento semelhante. Isto se deve ao processo de eletroerosão aplicado sobre a peça. Nota-se que as duas medidas encontram-se dentro da margem do desvio padrão uma da outra.

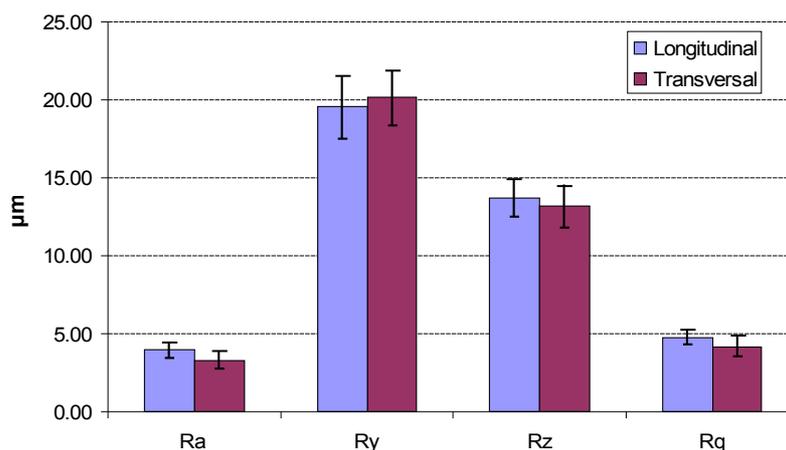


Figura 4.6 – Rugosidade corpo-de-prova usinado mais eletroerosão

#### 4.1.4 Rugosidade etapa 4

Neste caso, os corpos-de-prova passaram por três processos de usinagem. No entanto, o processo que vai definir a rugosidade final do corpo-de-prova é o lixamento. Este último teve como critério de avaliação seu aspecto visual, uma vez que é desta maneira que é procedido dentro da indústria.

Na tabela 4.5 encontram-se as rugosidades para este processo. Os valores de rugosidade são semelhantes aos valores encontrados para a etapa 2. No entanto, a sub-superfície apresentou diferenças, a ser mostradas posteriormente, em função dos processos de fabricação aplicados nos corpos-de-prova.

Tabela 4.5– Rugosidade corpos-de-prova fresados mais eletroerosão mais lixamento

	Longitudinal		Transversal	
	$\bar{X}_s$	$\sigma_s$	$\bar{X}_s$	$\sigma_s$
<b>R<sub>a</sub></b>	0,05	0,018	0,10	0,026
<b>R<sub>y</sub></b>	0,44	0,080	0,74	0,207
<b>R<sub>z</sub></b>	0,24	0,089	0,44	0,089
<b>R<sub>q</sub></b>	0,09	0,02	0,15	0,033

Os valores encontrados para as rugosidades longitudinal e transversal para o lixamento apresentam diferença. Isto se deve ao fato do lixamento ser um processo de acabamento manual onde são removidas camadas muito pequenas de material de forma aleatória.

Os valores apresentados também enquadram-se dentro dos padrões esperados para o processo (Hutchings, 1992; Withouse, 1994). Na figura 4.7 pode-se observar melhor este comportamento apresentado pela rugosidade para esta condição do corpo-de-prova.

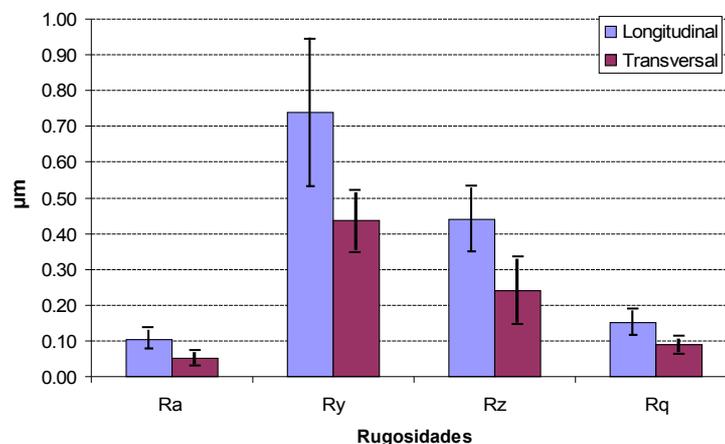


Figura 4.7 – Rugosidades encontradas no processo de fresamento mais eletroerosão mais lixamento.

Apesar de o lixamento proporcionar menores rugosidades, através da figura 4.7 é possível observar que existem muitos “riscos” na superfície (indicados pelas setas). Estes riscos podem ser agentes causadores de micro-trincas, quando a superfície estiver em solitação mecânica e térmica.

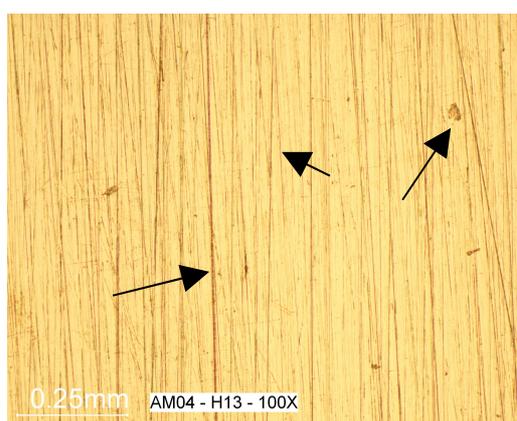


Figura 4.8 – Foto do topo da superfície polida.

Na figura 4.8 se tem a uma foto de uma superfície que passou pelos processos de fresamento, eletroerosão e logo após o lixamento. Além disso, vale ressaltar que o “lixamento” aplicado a este corpo-de-prova é funcional, que tem como critério o aspecto visual. Observando estes riscos, pode-se compreender porque existem valores de  $R_y$  que

são muito maiores que os valores apresentados por  $R_a$ . Nota-se ainda, que a rugosidade do processo de eletroerosão foi removida pelo processo de lixamento.

#### 4.2 Análise Metalográfica

Os corpos-de-prova passaram por uma análise metalográfica, onde pode-se averiguar as possíveis alterações ocorridas em sua estrutura, bem como a identificação de eventuais falhas e micro-trincas.

A figura 4.9 corresponde à uma fotografia da estrutura de base do material. No item A se tem a estrutura antes do primeiro tratamento térmico. Pode-se observar que, o aço corresponde ao AISI H13 esferoidizado. O material é recebido da usina desta forma.

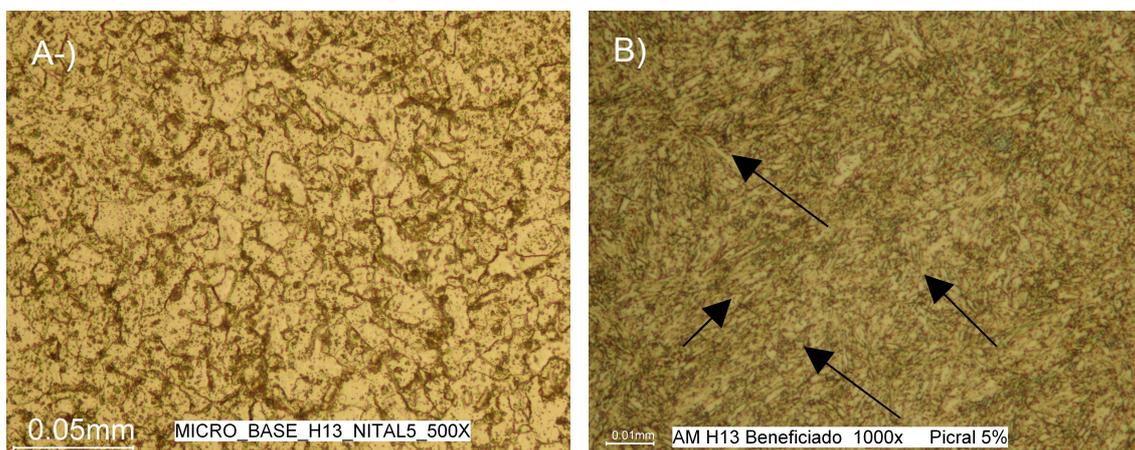


Figura 4.9 – Estrutura base dos corpos-de-prova antes do tratamento térmico.

Já no item B da figura 4.9, observa-se a estrutura do aço depois do tratamento térmico, ou seja, depois da tempera e revenimento. A estrutura obtida neste processo foi a de martensita revenida. É possível observar também alguns carbonetos dissolvidos nesta martensita, que é muito fina.

### 4.2.1 Metalografia etapa 1

As micrografias dos corpos-de-prova fresados estão apresentadas nas figuras 4.10 e 4.11. Nelas estão dispostos um item “A” e um item “B” que, respectivamente são fresados a seco e fresados com fluido.

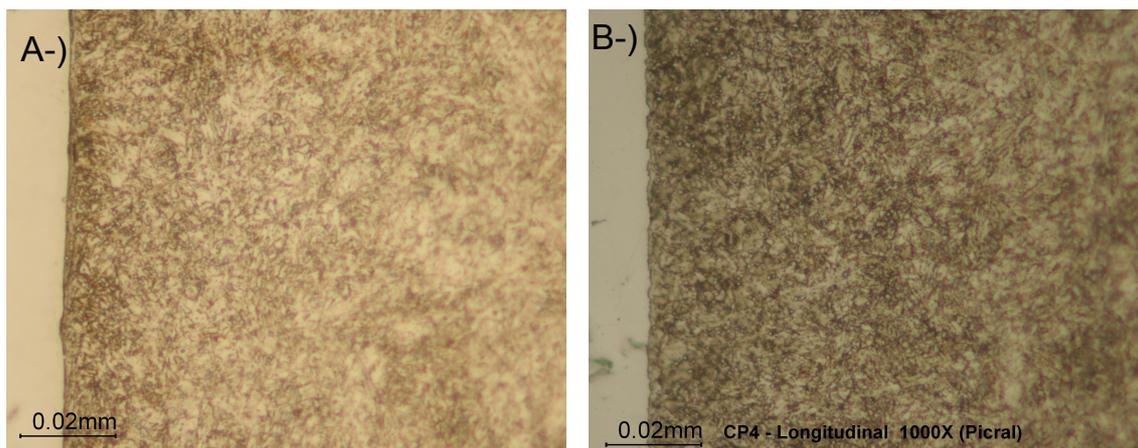


Figura 4.10 – Micrografias corte longitudinal usinado a seco (A), e usinado com fluido (B).

Através de medidas realizadas foi possível constatar que existem pequenas deformações plásticas no item A, ou seja, na usinagem com fresamento a seco. Existem variações desta deformação, sendo que a máxima encontrada nesta condição, para o corte longitudinal foi de 7  $\mu\text{m}$ . Já no item B, para o corte longitudinal, não foi detectada deformações. No entanto, analisando o corte transversal para o mesmo caso, que esta apresentado na figura 4.11, item B, pode-se observar que existe uma pequena deformação localizada pontualmente, variando de 3  $\mu\text{m}$  a 5  $\mu\text{m}$ .

Já para o item A da figura 4.11 foi possível identificar deformações que ocorrem próximas à borda. As medidas obtidas variam dentro da faixa de 5  $\mu\text{m}$  a 10  $\mu\text{m}$ . Desta forma pode-se concluir que o fluido atuou para que houvesse uma diminuição na faixa de deformação da sub-superfície uma vez que os valores apresentados foram menores.

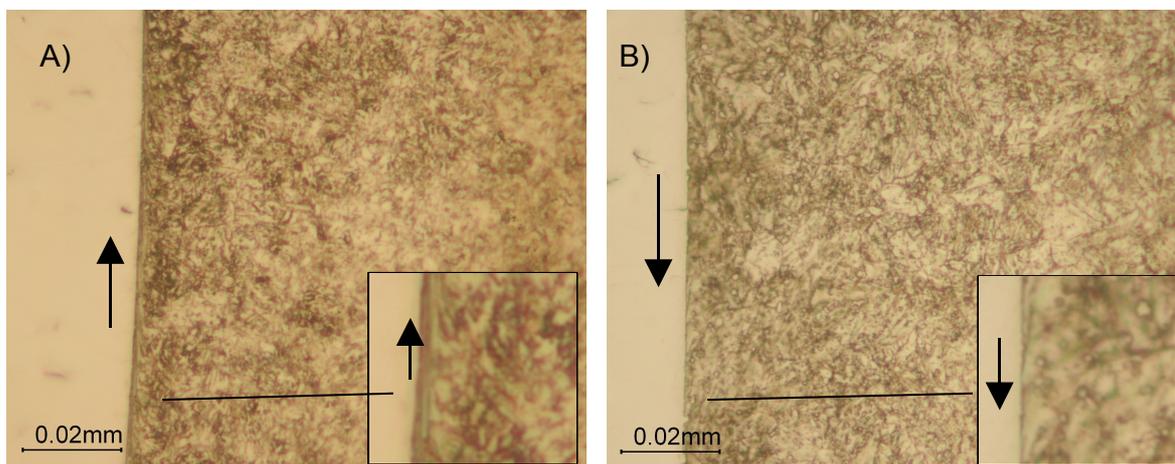


Figura 4.11 – Micrografias corte transversal, usinado a seco item A e item B com fluido.

Além disso, existem outros fatores a serem observados, como pequenos vales que poderão ser origens de futuras trincas. Tanto na condição a seco como na condição com fluido existem pequenos “vales” que podem ser observados nos detalhes da figura 4.12.

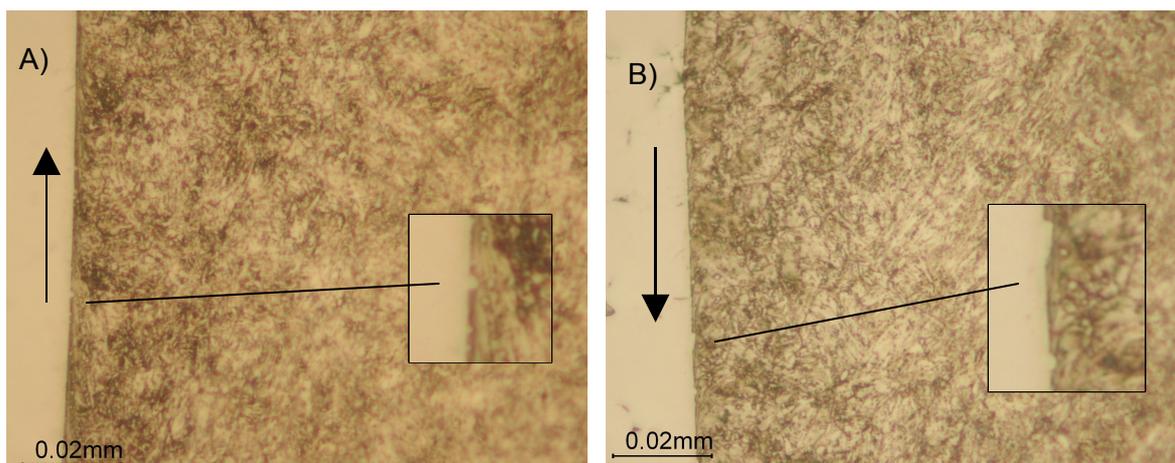


Figura 4.12 – Micrografias corte transversal com detalhes indicados, usinado a seco item A e item B com fluido.

As setas indicadas tanto na figura 4.11, quanto na figura 4.12 seguem o sentido da deformação plástica apresentada nos corpos-de-prova. A parte mais clara se trata de uma deposição de cromo com a finalidade de proteger a borda da amostra durante o processo de preparação metalográfica.

#### **4.2.2 Metalografia etapa 2**

As micrografias dos corpos-de-prova fresados e logo depois submetidos ao processo de lixamento estão dispostas nas figuras 4.13 e 4.14.

Através das imagens da figura 4.13 observa-se que as deformações plásticas que existiam do processo de fresamento foram removidas pelo processo de lixamento. Entretanto, outros fatores compõe a nova sub-superfície do corpo-de-prova, tais como uma possível região deformada muito pequena, vales decorrente de riscos que são formados na superfície, entre outros.

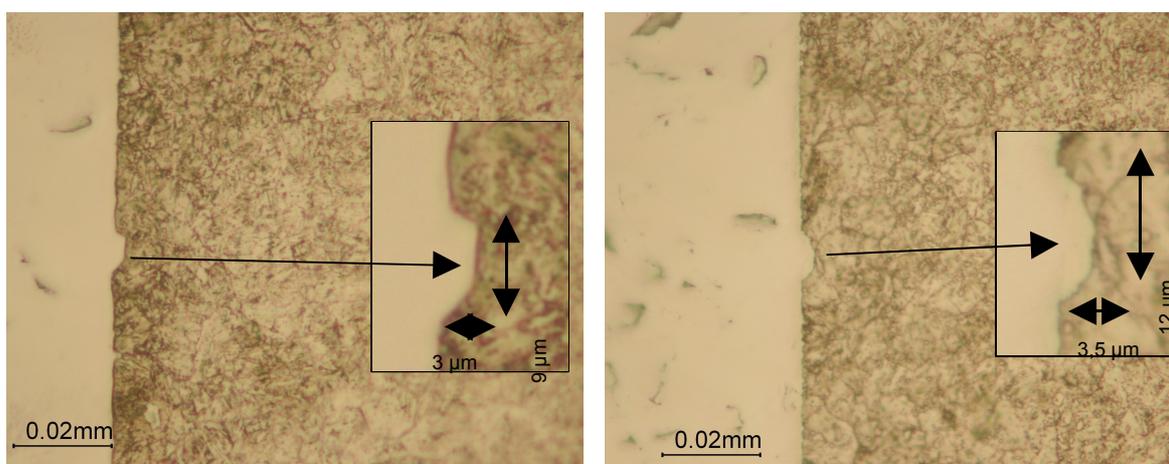


Figura 4.13 – Corpo-de-prova fresado e logo depois “polido”, corte longitudinal ao fresamento.

Não visíveis sem a utilização de um microscópio, estes vales podem ser pontos concentradores de tensões, de onde podem vir a se originar trincas. Além disso, existe uma série de micro trincas na sub-superfície que podem ser vistas na figura 4.13.

No corte transversal a usinagem de fresamento, na figura 4.14, não se tem nenhuma deformação aparente, nem a observação de vales ou regiões com defeitos. No entanto, mesmo sendo um processo manual, o lixamento imprime à sub-superfície tensões compressivas como pode-se observar na seção 4.5. O que acontece é que se pode ter uma região encruada na sub-superfície.

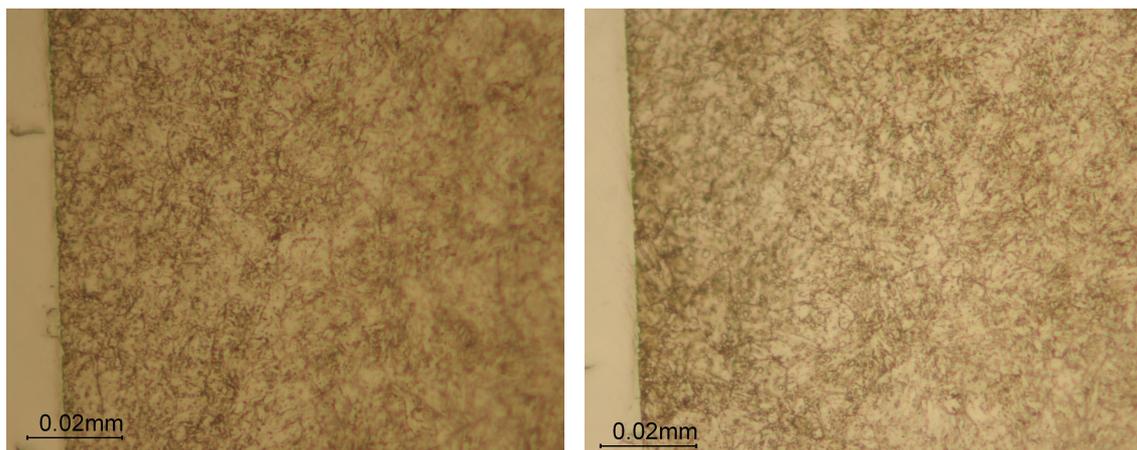


Figura 4.14 - Corpo-de-prova fresado e logo após polido, corte transversal ao fresamento.

Como este material apresenta uma dureza de 48 a 50 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.

### 4.2.3 Metalografia Etapa 3

As imagens geradas para este processo estão representadas na figuras 4.15. Pode-se dizer que a região formada por este processo não teve a influência do processo de fresamento, uma vez que tanto no sentido longitudinal como no transversal, a medida de espessura da camada branca gerada pelo processo de eletroerosão foi a mesma. Além disso, foi removida uma camada de 0,2 mm, e como visto nas seções acima, o fresamento gerou uma região com deformações de no máximo 10  $\mu\text{m}$ .

No item A da figura 4.15 está representado o corte longitudinal ao fresamento. A espessura medida de camada branca, ou seja, de camada termicamente afetada pelo processo de eletroerosão é de 18  $\mu\text{m}$ . No item B, onde está representado a seção transversal do corpo-de-prova também se tem uma camada branca de aproximadamente 18  $\mu\text{m}$ .

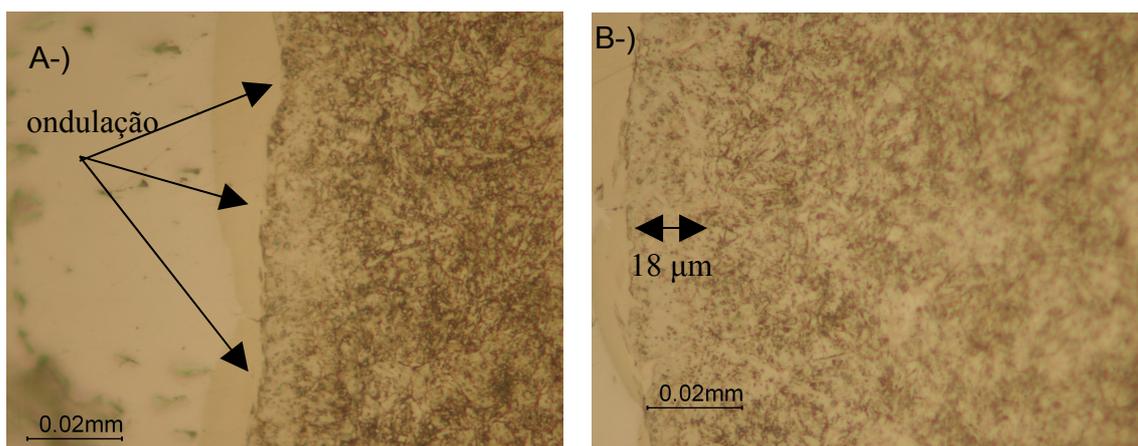


Figura 4.15 – Corpo-de-prova fresado e logo após usinados por eletroerosão, corte longitudinal A e transversal B.

Na composição da camada branca existe uma zona refundida bem na borda, uma zona re-revenida (devido a temperatura do processo de EDM) e logo após começa a estrutura base (martensita revenida). Além da camada branca pode-se avaliar que na superfície existe uma ondulação. Esta ondulação também é gerada no processo de eletroerosão.

#### 4.2.4 Metalografia etapa 4

Na figura 4.16 estão representada as imagens com a micrografia dos corpos-de-prova fresados, mais o processo de eletroerosão e lixamento .

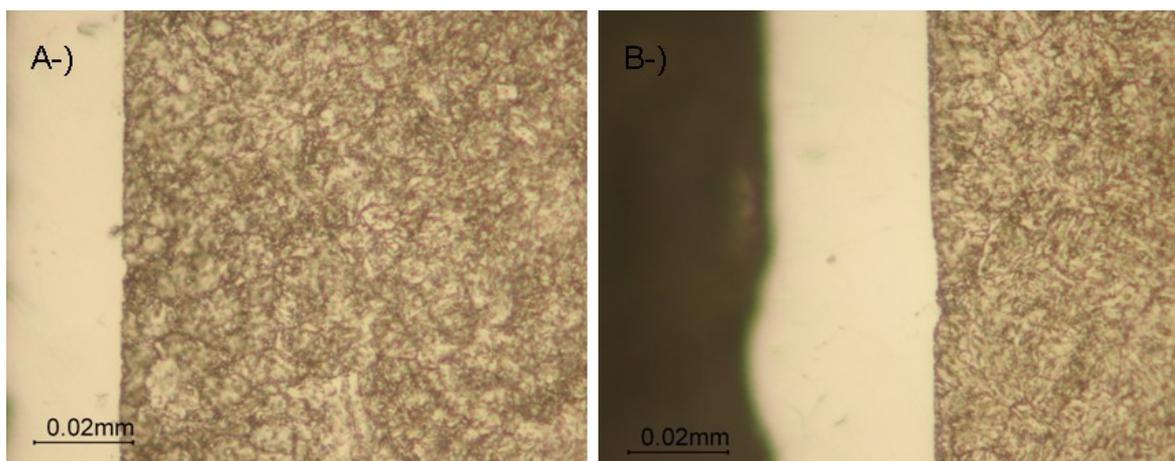


Figura 4.16 – Corpo-de-prova fresado e logo após usinados por eletroerosão e polido, corte longitudinal ao fresamento.

Assim como o caso na condição de fresamento mais lixamento existem alguns “vales” na sub-superfície. Estes vales são gerados no processo de lixamento. No entanto, o

que pode-se observar é que a camada branca gerada pelo processo de eletroerosão foi totalmente removida por esta etapa.

A camada branca é indesejável para muitos processos devido a suas características como ser frágil e apresentar micro-trincas que podem se propagar quando a superfície estiver sobre solicitação de carga. Para que seja possível observar se ela foi removida totalmente pelo processo de lixamento é necessário se avaliar as medidas de dureza no capítulo seguinte.

### 4.3 Dureza

Para correlacionar e validar os dados obtidos através das micrografias foram feitas medidas de dureza a fim de se estabelecer um perfil da borda em direção ao centro do material. As durezas medidas estão apresentadas na escala Vickers. Foi utilizada a técnica de nano-dureza com carga de 25 mN.

Para situar a dureza em que os corpos-de-prova se encontram foram feitas medidas aleatórias nos corpos-de-prova antes da usinagem onde os resultados obtidos estão expressos no gráfico da figura 4.17.

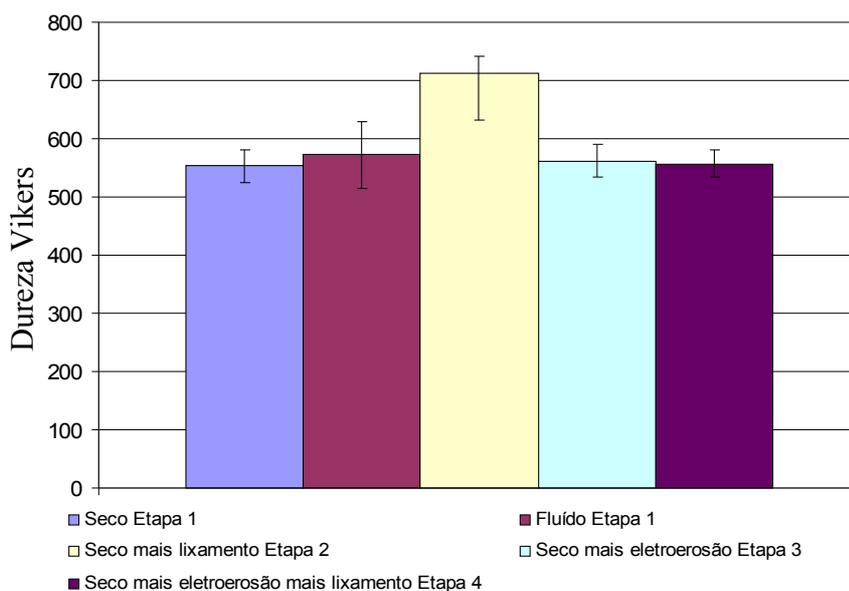


Figura 4.17 – Média de dureza dos corpos-de-prova antes dos processos de usinagem

Nos gráficos apresentados nos tópicos a seguir, estão relatadas as medidas feitas a partir de 5  $\mu\text{m}$  de distância da borda em direção ao centro do material.

### 4.3.1 Dureza etapa 1

Os corpos-de-prova fresados a seco e fresados com fluido tiveram um perfil de dureza medido que foi da borda em direção ao centro do material para, desta forma, relacionar os valores encontrados com as micrografias geradas na seção anterior. Na figura 4.18, o gráfico traz o perfil de dureza medido.

Os valores de dureza encontrados para o fresamento a seco mostram que houve uma variação de dureza, sendo que o primeiro valor (462,51 Hv) é menor que os três valores medidos na seqüência. Até uma profundidade de 30  $\mu\text{m}$  pode-se dizer que não houve uma estabilização para os valores de dureza.

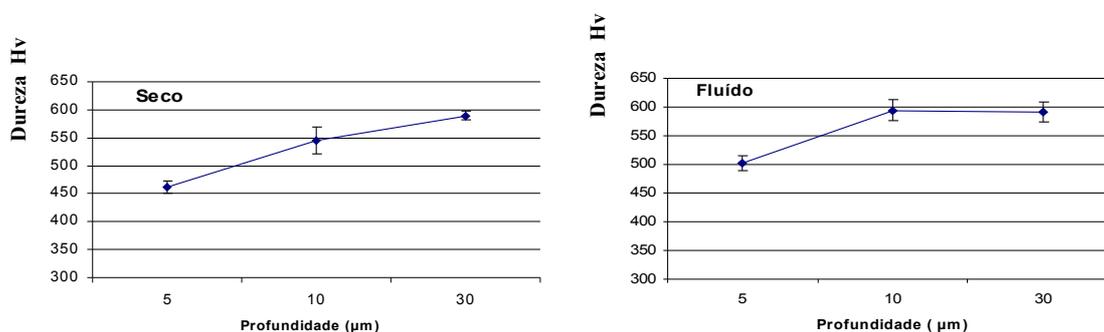


Figura 4.18 – Perfil de dureza no fresamento a seco e com fluido (etapa 1).

Já para usinagem com fluido onde o valor de dureza a 5  $\mu\text{m}$  é de 502,10 Hv pode-se observar que a dureza estabiliza a partir de 10  $\mu\text{m}$ .

Uma explicação para o fato de que as medidas mais próximas a borda estejam com uma dureza menor que a base do material, é que, como se tem uma temperatura pontual na região de corte, e esta é muito alta, o que pode ocorrer é que a camada logo abaixo da superfície esteja sofrendo ação desta temperatura, e esteja ocorrendo um revenimento nesta região reduzindo os valores de dureza.

### 4.3.2 Dureza Etapa 2

Para a condição fresada e lixada estão representados os valores de dureza no gráfico apresentado na figura 4.19. Foi encontrado um valor 662 Hv para 5  $\mu\text{m}$  de distância da borda e os outros pontos também foram mais altos ficando na faixa entre 700 Hv e 800 Hv. A operação de lixamento induz no material tensões residuais compressivas, o que poderia explicar o aumento de dureza mais próximo da borda do material.

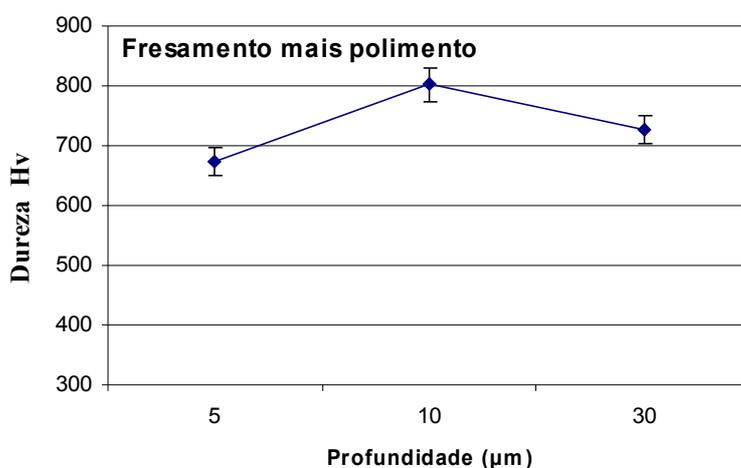


Figura 4.19 – Perfil de dureza fresado e lixado

O perfil apresentado pelo gráfico acima, mostra uma queda após o segundo ponto, indicando que a dureza cai até os 630 Hv, apresentado no material de base.

### 4.3.3 Dureza Etapa 3

O perfil de dureza do fresamento mais eletroerosão está representado na figura 4.20. Observa-se que na região da camada branca (18  $\mu\text{m}$ ), não se teve uma variação de dureza, que manteve-se semelhante ao longo da profundidade do corpo-de-prova.

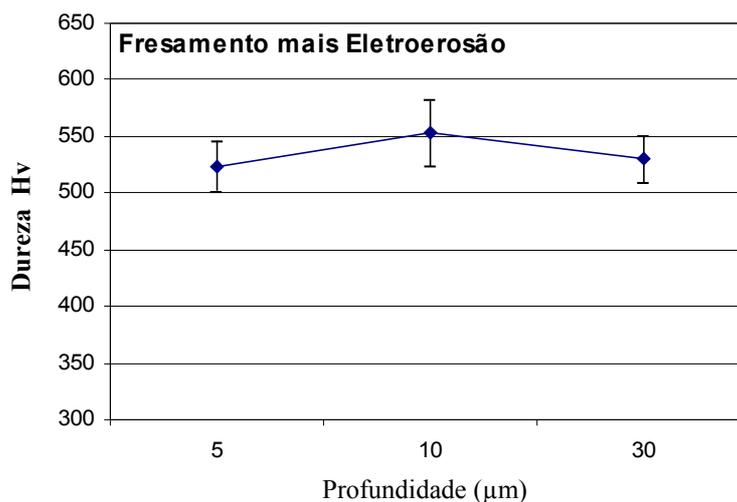


Figura 4.20 – Perfil de dureza fresados e erodidos

O processo de EDM aplicado aos corpos de prova não provocou uma mudança significativa de dureza ao longo da sub-superfície do material. As medidas apresentadas para o gráfico da figura 4.19 indicam que esta camada branca se caracteriza por apresentar propriedades mecânicas semelhantes ao restante da estrutura base. No entanto vale lembrar que esta camada é menos resistente a corrosão do que o material em sua estrutura base.

#### 4.3.4 Dureza Etapa 4

O perfil de dureza dos corpos-de-prova fresados, erudidos e posteriormente lixados estão representados na figura 4.21. É possível observar através destas medidas de dureza, que a camada branca gerada pelo processo de eletroerosão foi removida pelo processo de lixamento, uma vez que o primeiro ponto de dureza medido está abaixo do encontrado para a etapa 3, onde se tem uma seqüência semelhante, sem o processo de lixamento. Isso significa que a seqüência dos processos altera o comportamento estrutural do material em corte.

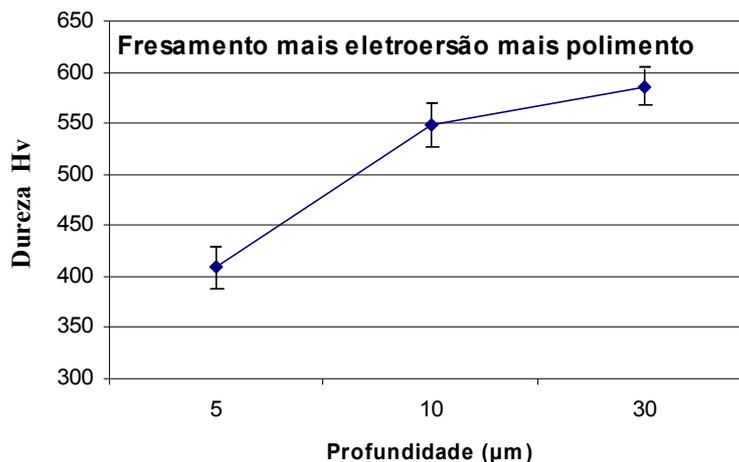


Figura 4.21 – Perfil de dureza fresamento mais eletroerosão mais lixamento.

Mesmo removendo-se a camada afetada pelo processo de eletroerosão e a camada afetada pelo processo de fresamento nota-se que o segundo ponto de dureza continua sendo mais elevado do que o primeiro, acompanhando a tendência observada para as condições de fresamento a seco e fresamento com fluido.

#### **4.4 Análises de Tensão Residual**

As análises de tensão residual foram feitas com base no corpo de prova diferenciado gerado na etapa 5 do trabalho. Todas as características do corpo-de-prova desta etapa podem ser analisados no capítulo 3.

##### **4.4.1 Ruído de Barkhausen etapa 5**

Os dados de ruído de Barkhausen foram medidos para a condição fresado a seco e para condição fresado mais lixamento. No entanto foram testadas outras condições de usinagem a fim de se verificar a eficácia do método para detecção de tensões residuais e mudanças estruturais com o ruído.

No gráfico da figura 4.22 estão representados os sinais de RMB encontrados nas pistas usinadas nos corpos-de-prova. Foram realizadas medidas de RMB utilizando-se uma excitação magnética senoidal a uma frequência de 10 Hz, induzida na amostra através de um núcleo de Fe-Ni em forma de “U” com enrolamento de cobre.

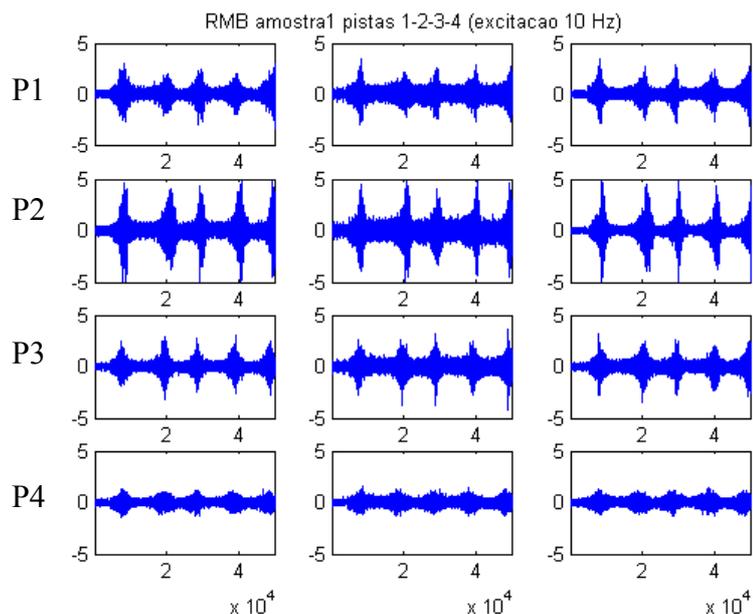


Figura 4.22 – Sinais RMB da amostra usinada em diferentes condições.

A pista P1 corresponde a condição fresado a seco e a pista P4 corresponde a condição fresado mais lixamento. Já as pistas P2 e P3 correspondem respectivamente a um fresamento com passe lateral mais apertado e a um fresamento com passe lateral maior que da condição de fresamento a seco.

O espectro da condição de fresamento é mais elevado do que da condição fresada mais polida. Isto se deve ao fato da operação de fresamento ter deixado uma camada deformada plasticamente, mesmo que pequena. Como visto no item 4.2, nas imagens metalográficas, a região deformada pelo fresamento é removida pelo processo de lixamento. Na figura 4.23 estão apresentados os valores de pico e rms para a amostra em todas as condições estabelecidas.

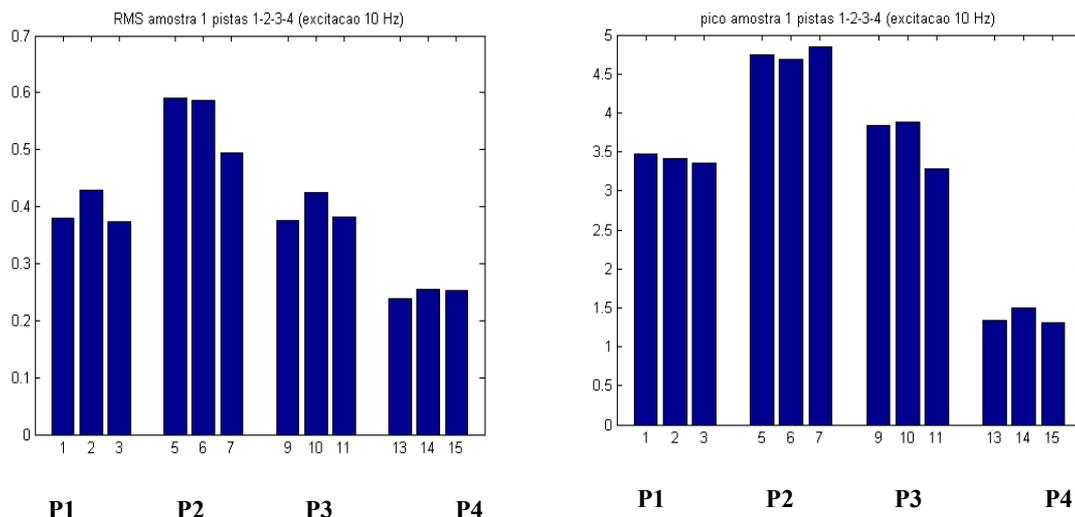


Figura 4.23 – Valores rms e valores de pico encontrados na amostra

O que se pode observar é que existe uma diferença entre as condições apresentadas. No entanto quando comparado com os valores de tensão residual encontrados descritos no próximo item, deve-se observar o fato de que as medidas de tensão residual por difração de raio X abrangem uma faixa de aproximadamente 5 a 6  $\mu\text{m}$  de superfície. Já as medidas para os valores de Barkhausen, abrangem uma faixa de aproximadamente 1 mm da borda do material.

Mesmo desta forma, os sinais de Barkhausen têm validade para o que o trabalho se propõe. Para uma região de tensões residuais compressivas na borda de um material, logo abaixo desta encontram-se regiões de tensão residuais trativas como pode-se observar na figura 4.24.

Para ilustrar as superfícies externas que foram medidas com RMB, a figura 4.25 traz vistas de suas texturas. Pelas imagens, pode-se observar que cada pista tem uma textura bem distinta. Esta textura pode influenciar na medida de RMB.

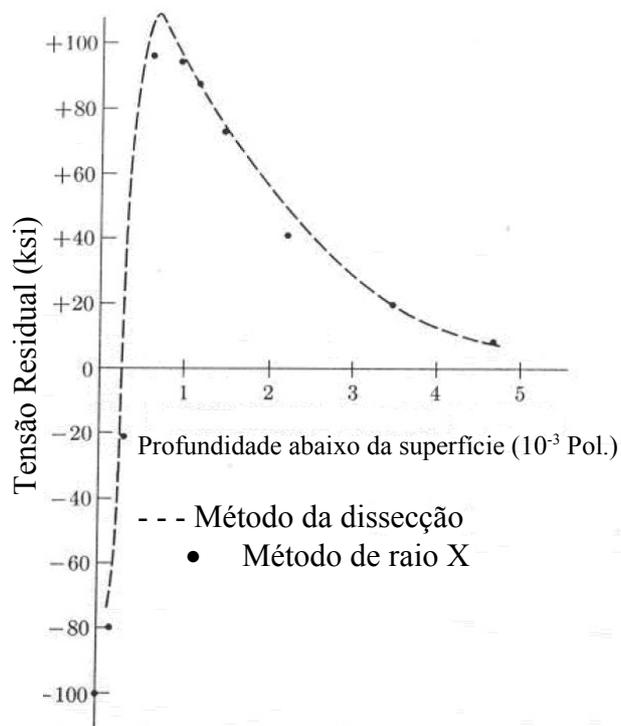


Figura 4.24 – Gráfico de tensão residual x profundidade em um material tratado termicamente com 59 HRc (Cullity, 1979).

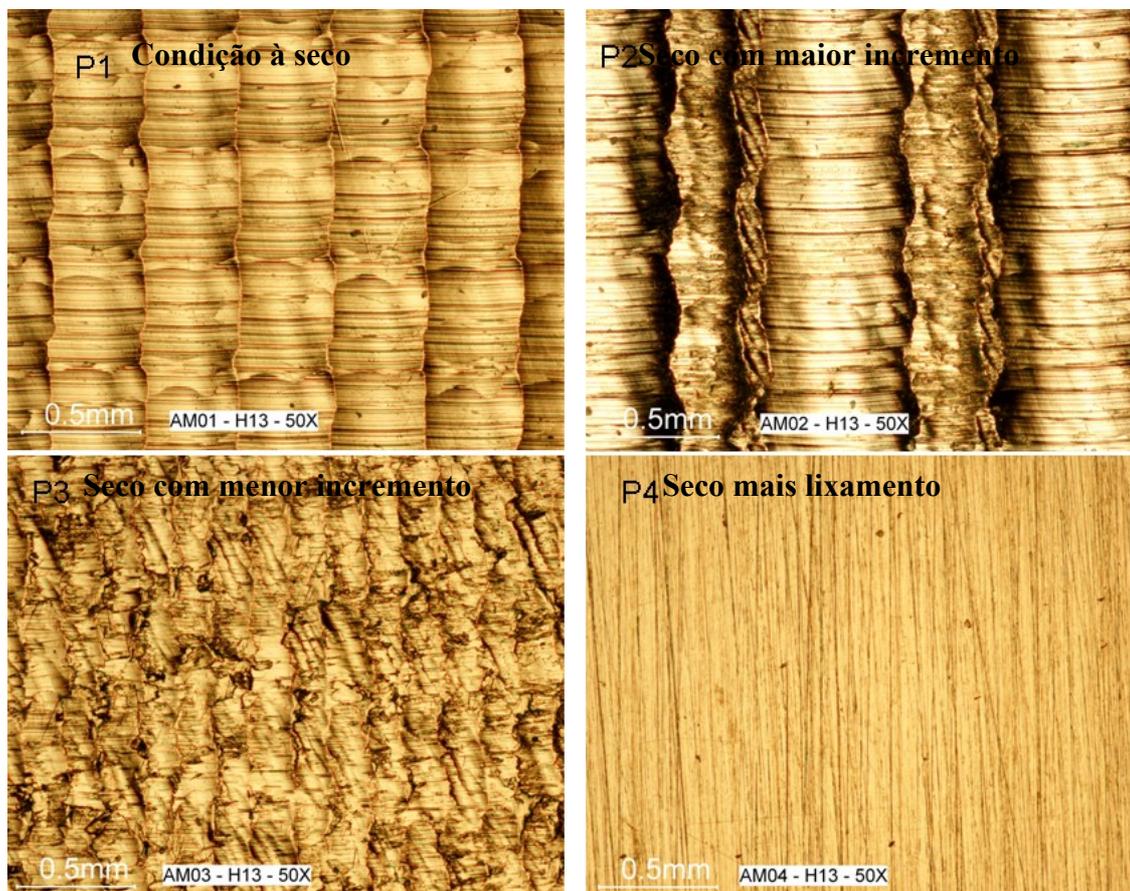


Figura 4.25- Vistas de topo das superfícies das pistas corpo-de-prova etapa 5.

No item P1 da figura pode-se perceber as marcas tanto do avanço lateral como do avanço por gume, promovido pelo processo de fresamento. Já no item P4 fica claro os “riscos” sobre a superfície. Estes riscos não foram eliminados pelo processo de lixamento, uma vez que se tratava o chamando polimento funcional, que serve para que a peça plástica depois de moldada não fique presa a cavidade ou macho.

#### 4.4.2 Difração de Raio X para medida de tensões residuais

A técnica foi aplicada na superfície das amostras do mesmo corpo-de-prova em que foram feitas as análises de RMB. Desta maneira se tem as condições de fresamento a seco com diferentes parâmetros e de fresamento mais lixamento.

Na tabela 4.6 estão dispostos os resultados encontrados para as medidas de tensão residual encontradas.

Tabela 4.6 – Medidas de tensão Residual

Pista			ângulo		
			0	45	90
1	XRD	Tensão	67.3	103.3	-17
		Erro Tensão	62.7	41.9	14.9
		FWHM	4.51	4.37	4.34
2	XRD	Tensão	18.9	31.1	-51.7
		Erro Tensão	38.8	40.2	30.9
		FWHM	4.31	4.35	4.18
3	XRD	Tensão	-239.5	-298.8	-355.1
		Erro Tensão	40.7	46.9	46.9
		FWHM	4.4	4.58	4.5
4	XRD	Tensão	-906.4	-805.2	-685.9
		Erro Tensão	17.7	11.9	31.1
		FWHM	3.52	3.54	3.55

Através da medida de FWHM é possível se ter uma idéia do encruamento da superfície. Por exemplo pode-se observar que a condição que trata do fresamento a seco se tem um valor maior para o encruamento do que a condição de fresamento mais lixamento. O que fica evidente é que o processo de lixamento gera tensões residuais compressivas. Já o processo de fresamento tende a gerar tensões trativas. No caso da pista

3 onde também se trata do fresamento, o que ocorre é que como seu passe lateral é muito pequeno, a ferramenta acaba por gerar mais tensões compressivas, por passar mais vezes sobre a superfície da peça do que nas outras condições. Além disso, com o passe lateral muito pequeno se remove uma quantidade menor de material.

O que pode influenciar nas medidas tanto para tensão residual quanto para as medidas de ruído de Barkhausen é que a usinagem de fresamento foi feita ora no sentido concordante ora no sentido discortante, o que alteram as forças de corte envolvidas no sistema e portanto a indução de tensões no material por conta da ação da ferramenta.

#### 4.5 Medidas de Temperatura

O monitoramento da temperatura foi realizado a uma distância de 200  $\mu\text{m}$  de distância da borda. Desta forma, a variação captada pelos sensores foi muito pequena. No gráfico da figura 4.26, é possível observar as temperaturas ao longo do processo de usinagem.

O monitoramento da temperatura para o gráfico da figura 4.25 se deu ao longo da peça, ou seja, o termopar 1 foi fixado a 5 mm do início da usinagem, já o termopar 2, a 10 mm e o termopar 3, a 15 mm, sendo que a largura usinada no corpo-de-prova foi de 20 mm.

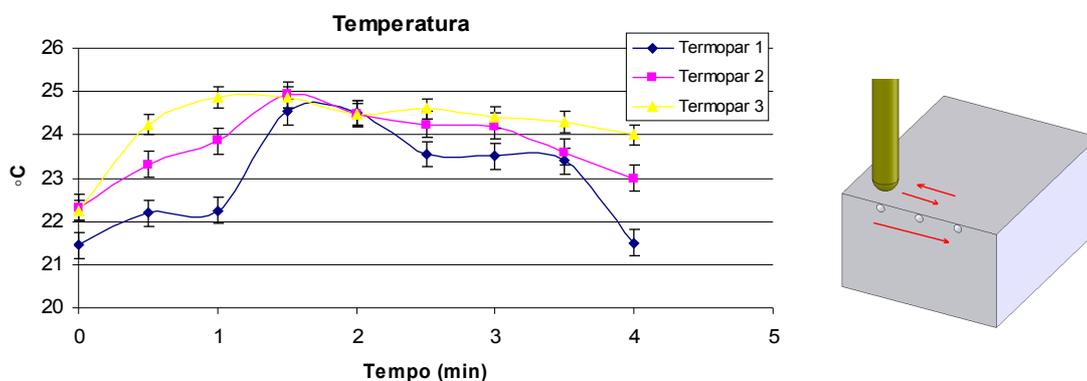


Figura 4.26 – Gráfico do monitoramento da temperatura ao longo da usinagem.

A temperatura máxima registrada na peça foi de 25°C, pelo termopar 2. Considerando que a peça estava à temperatura ambiente, em torno de 20°C, pode-se

considerar que a variação de temperatura na peça, em torno de  $5^{\circ}\text{C}$  foi muito pequena na região de captação do termopar. Através dos gráficos pode-se perceber que o calor gerado na usiagem de fresamento foi pontual e rapidamente propagou pela peça não apresentando gradiente significativo, na faixa medida pelos termopares, ou seja, a  $200\ \mu\text{m}$  de distância da borda da peça.

Já a propagação da temperatura pelo corpo-de-prova em sua profundidade, pode ser observada no gráfico da figura 4.27. O termopar 1 foi o que ficou mais próximo da superfície usinada da peça, ou seja a  $0,2\ \text{mm}$ , já o termopar 2 ficou a  $5\ \text{mm}$  e o termopar 3 ficou alojado a  $10\ \text{mm}$  da superfície usinada.

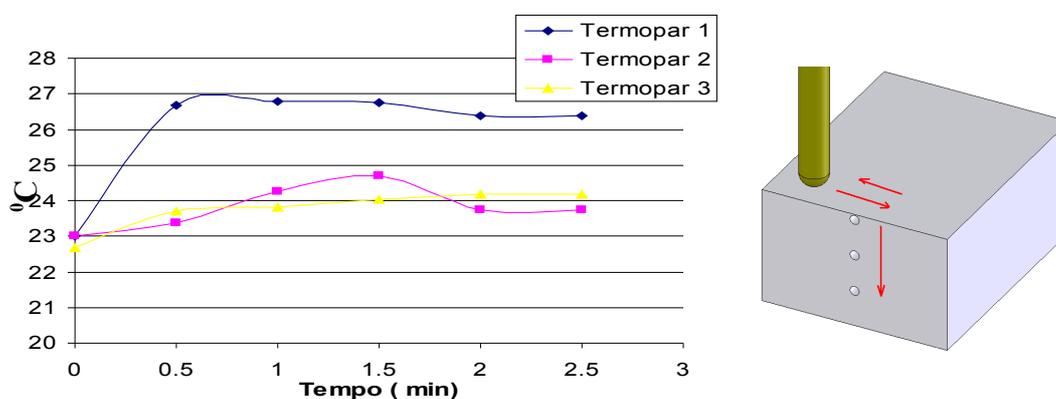


Figura 4.27 – Gráfico da temperatura medida no corpo-de-prova em função de sua profundidade.

Desta forma, foi possível constatar que o calor não se propagou de forma significativa pela peça. Parte desse calor deve ter fluído pelo cavaco, de forma que não apresentou maiores temperaturas no material.

Como foi observada pelas micrografias e pelas medidas de dureza, uma região bem menor do que a área de captação da temperatura pelos termopares, teve a influência da temperatura juntamente com a ação mecânica do corte. Dessa forma, fica evidenciada a pequena contribuição de solicitação térmica sobre a integridade de superfícies fresadas.

## 5. Conclusões

A caracterização da integridade superficial de peças usinadas é complexa e envolve diversas variáveis. Tendo como critério de usinagem as condições empregadas dentro da indústria de moldes e matrizes algumas conclusões foram possíveis.

Sendo a rugosidade média  $R_a$  considerada dentro dos padrões para o processo de fabricação esperado, esse não pode ser o único critério de avaliação da superfície. Os critérios de  $R_v$  e  $R_q$  também são valiosos na avaliação da topografia. Além disso, superfícies com rugosidade média maiores podem ter uma deformação plástica menor que outras com rugosidade média menores. Desta forma, pode-se estabelecer que não existiu uma relação entre a rugosidade e a deformação plástica para as condições estudadas.

As análises metalográficas revelaram-se muito importantes para este trabalho, pois através das mesmas foi possível observar deformações plásticas pontuais onde o processo de fresamento prevaleceu sendo o último empregado. No entanto, confrontando-se com as medidas de nano-dureza observa-se que os valores encontrados próximos a borda (5  $\mu\text{m}$ ) tendem a ficar abaixo dos valores de base do material, contrariando a idéia de que com um encruamento na sub-superfície se teria um aumento de dureza.

Considerando as etapas 3 e 4, observa-se que o processo de lixamento, nas condições empregadas, foi suficiente para remoção da camada branca deixada pelo processo de eletroerosão.

Para as medidas de nano-dureza observou-se que a primeira medida de dureza (na faixa de 5  $\mu\text{m}$ ), 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 as usinagens de fresamento (operações de acabamento), usinagem de eletroerosão e operações de lixamento.

Os valores encontrados para o ruído magnético de Barkhausen comprovam que houve uma mudança no material após a operação de fresamento. No entanto, mais estudos têm que ser feitos a fim de poder se quantificar os valores encontrados. Comparando os valores do sinal de Barkhausen com os valores encontrados para a difração de raio X, não foi encontrada uma equivalência direta para os valores. No entanto, isto pode ter sido gerado em função do fresamento ter se apresentando usinagem concordante e discordante para o mesmo corte, mudando os vetores das forças de usinagem e conseqüentemente as direções das deformações e domínios magéticos que influenciam nos sinais de ruído magnético de Barkhausen.

No caso das medidas de temperatura foi constado que o sistema empregado com a utilização de termopares não foi satisfatório, uma vez que a inércia do sistema é muito grande. A ferramenta produz um calor pontual que se propaga rapidamente para a peça, ferramenta e a maior parte para o cavaco. No entanto, como a remoção de material é muito pequena, essa parte do calor gerado que se propaga para a peça, não pode ser observada corretamente.

## 6. Referências Bibliográficas

- ABRÃO A. M., ASPINWALL D. K., The surface integrity of turned and ground hardened bearing steel. *Wear* 196, p 179-284, 1996 .
- ALTAN, T.; LILY, B. W.; KRUTH, P. J.; KÖNIG, W.; TÖNSHOFF. H. K.; VAN LUTTERVELT. C. A.; KHAIRY A. B. – Advanced techniques for die and mold manufacturing. *Annals of CIRP* vol. 42/4. p 707. 1993
- ARUNACHALAM R. M., MANNAN M. A., SPOWAGE A. C. Surface Integrity when machining age hardened inconel 718 with coated carbide cutting tools. *International Journal of Machine and Manufacture* 44, 2004 – p1481-1491
- ASM HANDBOOK, Mechanical Testing and Evaluation. ASM International volume 8, 2000.
- AXINTE D.A., DEWES R.C. Surface Integrity of hot work tool steel after high speed milling-experimental data and empirical models. *Materials Processing Technology* 127, 2002.
- BAPTISTA, A. L. B. Aspectos metalúrgicos na avaliação da usinabilidade de aços. *Rem: Rev. Esc. Minas*. [online]. abr. 2002, vol.55, no.2 [citado 27 Fevereiro 2005], p.103-109. Disponível na World Wide Web: [www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S0370-4672000200006&lng=pt&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0370-4672000200006&lng=pt&nrm=iso). ISSN 0370-4467.
- BARBACKI A., KAWALEC, HAMROL A., Turning and grinding as a source of microstructural changes in the surface layer hardened steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 133 2003 p 21- 25
- BETHKE J. *Surface Technology in Production Engineering, 1995*
- BIANCHI, E. C., MONICI R. D., SILVA E. J. *et al.* Análise do comportamento da microestrutura de materiais endurecidos retificados com rebolos de CBN. *Mat. Res.* [online]. Oct. 2000, vol.3, no.4 [cited 05 June 2005], p.147-154. Available from World Wide Web: <[http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1516-14392000000400009&lng=en&nrm=iso](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1516-14392000000400009&lng=en&nrm=iso)>. ISSN 1516-1439
- BOEHS L., MOSTIACK G. R., BET L. Comparação de valores de rugosidade em superfícies usinadas. *Máquinas e Metais*, junho de 1999.
- BRANDÃO L. C., COELHO R. T. Sistemas de Resfriamento Influenciam a produção de Moldes e Matrizes. *O Mundo da Usinagem*, janeiro de 2005.
- CALIL L. F. P., Estudo de Caso para Avaliação de Tratamento Dado à Tecnologia de Superfície no Meio Fabril Tese (doutorado) Universidade Federal de Santa Catarina, 2001.

- CALLISTER, W.D. Ciência e Engenharia de Materiais – Uma Introdução, quinta edição, Rio de Janeiro: LTC, 2002.
- CHANSEL P. Como Reduzir a Rugosidade da Superfícies de Peças Fresadas. Máquinas e Metais, dezembro de 2000.
- 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, V. Aços e Ferros Fundidos, São Paulo : Editora Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 7º edição. 2002
- CULLITY, B. D. – Elements of X-ray diffraction. Addison-Wesley Publishing Company. 1978, Massachussets – USA
- DINIZ, A. E., MARCONDES, F. C., COPPINI N. L., Tecnologia da usinagem dos materiais. MM editora, 1ª edição , 147p
- FERRARESI, D. Fundamentos da Usinagem de Metais, São Paulo: Editora Edgard Blucher. 1970
- GENZEL, C., et al. – Neutron and X-ray residual stress analysis of steel parts produced by cold forward extrusion and tube drawing. Material Science and Engineeering, A205, 79—90, 1996.
- GOU YB, LIU CR Mechanical properties of a hardened AISI 52100 steel in hard machining process. ASME J Manuf Sci Eng 124:1-9, 2002.
- GRIFFITS B., Manufacturing Surface Technology: Surface Integrity and Functional Performance. Kogan Page 2001
- HAUK, V. “Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods...” ELSEVIER, 1997.
- HIOKI D., SCHULTEK A. J., SINATORA A., Caracterização Tribológica de superfícies do aço ABNT 4140 usinadas por fresamento. 59º Congresso da Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais, 19/06/2004, São Paulo
- HUISSOON J. P., ISMAIL F., JAFARI A., BEDI S., Automated Polishing of Die Steel Surfaces. Springer-Verlag London Limited 2002
- HUTCHINGS I. M. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials – (Metallurgy & Materials Science Series) 1992.
- INFOMET. Portal para projetos colaborativos. Disponível em [www.infomet.com.br](http://www.infomet.com.br) Acesso em 15 de fevereiro de 2005.
- JUNQUEIRA R. M. R., Caracterização de Filmes Finos de Coloração Por Interferência em Aços Inoxidáveis Tese (doutorado), Universidade Federal de Minas Gerais, 2004.

- KARPUSCHEWSKI, B., OBERBECK–SPRINTIG, I., “Residual Stress Determination of Ferromagnetic Sheets“ ICRS5, Sweden, 1997, p.1145–1149.
- KLOCKE E, DAMBOM O., 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 Berlin Heidelberg, 1997. 5. Edição revisada. Band 1. 471 p.
- KÖNIG W., WAND T., Turning bearing steel with amborite and ceramic, Ind. Diamond Rev. 3, 1987, 117-120.
- LU, J., RETRAINT, D.,- A review of recent development and applications in the field of X-ray diffraction for residual stress studies., Journal of Strain Analysis, v.33, n.2, 127-136, 1998.
- LUKIN, K., GLENN, R.A., -Bragg’s law and diffraction: how waves reveal the atomic structure of crystals., [www.journey.sunsysb.edu/ProjectJava/Bragg/home.html](http://www.journey.sunsysb.edu/ProjectJava/Bragg/home.html), consultado em setembro de 2004.
- MACHADO I.F., MARCIACANO, L., DRIEMEIER E DIAS C. <sup>a</sup> N., XVII congresso de Engenharia mecânica , novembro de 2003.
- MARAU M. M., PADOVESE L. R., Inovação em Inspeção de Materiais via Medição do Ruído Magnético de Barkhausen Trabalho apresentado no CONAEND&IEV 2006, em São Paulo/SP.
- MARTINS J.A., CARDOSO L. P. FRAYMANN J. A. Análise de Tensões Residuais em Válvulas Estampadas por meio de Difração de Raio X e do Método de Elementos Finitos, CBECIMAT, Porto Alegre dezembro de 2004.
- MARTINS, C. O. D, STROHAECKER, T. R, ROCHA, A. S., HIRSCH, T. K. Comparação entre Técnicas de Análise de Tensões Residuais em Anéis de Rolamento do Aço ABNT 52100 Matéria, vol 9, N° 1 (2004) 23 - 31
- MESQUITA R.A., BARBOSA C. A., Moldes de Plástico: Otimização da Usinabilidade do Aço P20. O Mundo da Usinagem
- MESQUITA, N. G. M. Avaliação e escolha de uma superfície segundo sua função fabricação. Florianópolis, 1992. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Santa Catarina.
- METALS HANDBOOK, Vol 16 (1989), 9th Edition, - Machining - ASM International, , USA.
- MILAN, J. C. G. Usinabilidade de Aços para Moldes, Universidade Federal de Uberlândia, 1999.

- ÖZEL, T.; HSU, T.; ZERENT, E. – Effects of cutting edge geometry, workpiece hardness, feed rate and cutting speed on surface roughness and forces in finish turning of hardened AISI H13 steel. Springer-Verlag London Limited 2004.
- PREVÉY, P. S., “X-ray Diffraction Residual Stress techniques” **Metals Handbook**, ASM, 1986, p. 380–392.
- RAMASAWMY H., BLUNT L., Effect of EDM process parameters on 3D surface topography. *Journal of Materials Processing Technology*, n 148 pg 155-164 , 2004.
- RAMOS C. A. D., MIRANDA P. R. R., BARBOSA C. A., MACHADO A. R. Usinabilidade de um aço martensítico no fresamento de topo. *Máquinas e Metais*, maio de 2005 p174.
- RAMOS, C.A.D., MACHADO, A.R.,(2002) Usinagem de Moldes e Matrizes, Centro Federal de Educação Tecnológica Minas Gerais, 2002.
- REDDY N. S. K., RAO P. V., Selection of optimum tool geometry and cutting condition using a surface roughness prediction model for end milling. Springer Verlag, London 2005.
- SÁNCHEZ J. A. Integridade Superficial de Peças Cortadas por Fio, portal para projetos colaborativos [http://www.ona-electroerosion.com/por/news/baj\\_estudioportugues.pdf#search='integridade%20superficial'](http://www.ona-electroerosion.com/por/news/baj_estudioportugues.pdf#search='integridade%20superficial'), Acesso em 30 de maio de 2005.
- SANDVIK COROMANT 2002, Fabricação de Moldes e Matrizes, Ferramentas e Métodos, C H 02,2, 258p
- SCARMINIO, J., - Propriedades mecânicas em filmes de Nb/Pd, Tese (doutorado), 1989. Instituto de Física Gleib-Wataglin, Universidade Estadual de Campinas, UNICAMP.
- SEGAWA T., SASAHARA H., TSUTSUMI M., Development of a new tool to generate compressive stress withthin a machined surface. *Journal of Machine Tools e Manufacture* 44, 2004.
- SHACKELFORD, J.F. Introduction to Materials Science for Engineers, fifth edition, Upper Saddle River: Prentice Hall, 2000.
- SILVA FILHO M. S. Fresamento por Regiões com uma Alternativa na Usinagem de Cavidades para Moldes de Injeção Através de Sistema CAD/CAM, 2000 Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) Universidade Federal de Santa Catarina
- 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.
- SILVA, F. R., NOVASKI, O., A tecnologia do fresamento a altas velocidades, *Revista . Máquinas e Metais*, N° 423, pp 96-110, 2001.

- SME Tool and Manufacturing Engineers Handbook 4. ed. Dearborn/Michigan: SME v. IV Quality control and Assembly, cap 5. Surface Technology – Surface Texture, 1987.
- STEFANITA, C. G., ATHERTON, D. L., CLAPHAN, L. , “Plastic Versus Elastic Deformation Effects onMagnetic Barkhausen Noise in Steel”, Acta Materialia, Vol. 48, 2000, p. 3545–3551.
- STEINER C.,HINZE D.,PAVEZZI L. A., Técnica de Polimento na Construção de Moldes. III Encontro da Cadeia de Ferramentas, Moldes e Matrizes, São Paulo, SP, 10 a 12 de agosto de 2005.
- STEMMER C. E., Ferramentas de Corte II : Brocas, Alargadores, Ferramentas de Roscar, Fresas, Brochas, Rebolos e Abrasivos. Ed. Da UFSC, 1995.
- STEMMER C. E., Ferramentas de Corte I. 6ª edição Ed Da UFSC, 2005
- STILWELL, G. Taking The Mystery Out of Hard Die Milling. Manufacturing Engineering Dearborn: Apr 1998. Vol. 120 Iss.4 p 52-60
- TABENKIN, A. Surface Finish: a machinist’s toll. A desing necessity. Modern Shop. n 3, 1999. Disponível na internet <http://www.mmsonline.com> 5 março 2005.
- TAEGUTEC, Milling Apllications, 2003
- THYSSENKRUPP. Portal para projetos colaborativos. Disponível em [www.thyssen-tae.com.br](http://www.thyssen-tae.com.br) Acesso em 03 de março de 2005.
- WITHERS, P., BHADESHIA, K. “Residual Stress, Part 1...” Material Science And Technology, Vol. 17,2001, p 355–365 .
- WHITEOUSE, D. Surfaces and Their Measurement, 1994
- 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.
- ZEILMANN R. P., LUCIANO M. A., BORGES A. P. Avaliação dos parâmetros de corte no processo de fresamento de engrenagens. Máquina e Metais 2005.
- ZEILMANN R. P., PASINI G. Análise do Fresamento a Altas Velocidades de Corte na Produção de Matrizes para Forjamento. *Usinagem 2004 feira e congresso*, São Paulo 2004.