

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

**O USO DA DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL A LASER  
NO DESENVOLVIMENTO E CARACTERIZAÇÃO DE TEXTURAS  
APLICADAS AO DESIGN DE PRODUTOS**

Fábio Pinto da Silva

Dissertação para obtenção do título de Mestre em Engenharia

Porto Alegre

2006

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL  
Escola de Engenharia

Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais-PPGEM

O USO DA DIGITALIZAÇÃO TRIDIMENSIONAL A LASER NO DESENVOLVIMENTO  
E CARACTERIZAÇÃO DE TEXTURAS APLICADAS AO DESIGN DE PRODUTOS

Fábio Pinto da Silva  
Engenheiro Mecânico

Trabalho realizado no Departamento de Materiais da Escola de Engenharia da UFRGS, dentro do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Minas, Metalúrgica e de Materiais - PPGEM, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia.

Área de Concentração: Ciência e Tecnologia dos Materiais

Porto Alegre

2006

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Engenharia, área de concentração Ciência e Tecnologia dos Materiais e aprovada em sua forma final, pelo Orientador e pela Banca Examinadora do Curso de Pós-Graduação.

Orientador: Prof. Dr. Wilson Kindlein Júnior

Banca Examinadora:

Prof. Dra. Regina de Oliveira Heidrich

ICET / FEEVALE

Prof. Dr. Joyson Luiz Pacheco

FENG / PUC-RS e PROMEC / UFRGS

Profa. Dra. Liane Roldo

DEMAT / UFRGS

Prof. Dr. Antônio Cezar Faria Vilela

Coordenador do PPGEM

## AGRADECIMENTOS

A todos que colaboraram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho, bem como àqueles que simplesmente acreditaram em mim.

Ao meu orientador desde 2000, quando entrei como IC no Laboratório de Design e Seleção de Materiais - LdSM (na época Núcleo de Design e Seleção de Materiais - NdSM), professor Wilson Kindlein Júnior.

A toda a equipe do LdSM, onde encontra-se grande astral para trabalhar, em especial aos bolsistas Felipe Ferreira Luz pela ajuda nas digitalizações e Samuel Henrique Freese pela ajuda na programação PHP.

Aos órgãos de fomento CAPES, FINEP e CNPq pelo apoio financeiro aos projetos de pesquisa que permitiram a realização deste trabalho.

À empresa Tecnodrill pelo uso do software Geomagic Studio e ao professor Joyson Pacheco pelos padrões de rugosidade.

A meus pais, por tudo.

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS .....	VII
LISTA DE TABELAS .....	X
RESUMO .....	XI
ABSTRACT .....	XIII
INTRODUÇÃO.....	15
1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	22
1.1. As texturas e a subjetividade .....	22
1.2. Texturas, Rugosidade e suas aplicações.....	25
1.2.1. Aspectos econômicos .....	26
1.2.2. Tolerâncias .....	27
1.2.3. Tribologia - Atrito, desgaste e lubrificação.....	28
1.2.4. Fadiga e Corrosão.....	35
1.2.5. Escoamento de Fluidos.....	38
1.2.6. Transferência de Calor.....	42
1.2.7. Propriedades Óticas .....	47
1.3. Normas Técnicas para Rugosidade.....	49
1.4. Parâmetros de Rugosidade .....	52
1.4.1. Parâmetro Ra - Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade .....	61
1.4.2. Parâmetro Rq - Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade.....	62
1.4.3. Parâmetro Rz - Altura máxima do perfil de rugosidade.....	63
1.4.4. Parâmetro Rt - Altura total do perfil de rugosidade .....	65
1.5. Medição de Rugosidade.....	66
1.6. Digitalização Tridimensional a Laser.....	70
1.7. Texturas x Materiais x Processos de Fabricação.....	80
1.7.1. Moldagem por injeção .....	87
1.7.2. Moldagem por sopro.....	91
1.7.3. Termoformagem .....	93
1.7.4. Extrusão .....	95
1.7.5. Laminação .....	95
1.7.6. Usinagem.....	96
2. MATERIAIS E MÉTODOS.....	98
2.1. Digitalização Tridimensional a Laser.....	98
2.2. Padrões de Rugosidade.....	103
2.3. Seleção das variáveis de processo para a digitalização .....	104
2.4. Digitalização dos Padrões de Rugosidade .....	107
2.5. Superfícies Tridimensionais .....	116
2.6. Desenvolvimento de texturas .....	116
2.6.1. Digitalização .....	117
2.6.2. Processamento .....	119
2.6.3. Parametrização .....	121
2.6.4. Geração de arquivos .....	125
3. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	126
3.1. Digitalização dos Padrões de Rugosidade.....	126
3.1.1. Resultados do parâmetro Ra.....	129
3.1.2. Resultados do parâmetro Rz.....	136
3.2. Superfícies tridimensionais.....	142
3.3. Banco de Texturas .....	145

3.4. Estudos de caso.....	148
3.4.1. Textura couro de cobra.....	148
3.4.2. Textura couro de arraia.....	152
3.4.3. Textura palha de milho.....	154
4. CONCLUSÕES.....	158
4.1. Sugestões para trabalhos futuros.....	160
REFERÊNCIAS.....	161
APÊNDICE A.....	167

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Propriedades sensoriais (subjetivas) e propriedades técnicas (objetivas).....	25
Figura 2 - Processos de acabamento superficial em relação a seu tempo de obtenção .....	26
Figura 3 - Tolerâncias e Rugosidade Superficial. Fonte: Ferrante (1996). .....	27
Figura 4 - Mapa de seleção de processos de fabricação: tolerância x rugosidade superficial..	28
Figura 5 - Atrito e Rugosidade para ligas de cobre. Fonte: Rabinowicz (1965). .....	30
Figura 6 - Atrito e Rugosidade para várias superfícies. Fonte: Sviridenok (1996). .....	30
Figura 7 - Sistema Tribológico. Fonte: Balzers (2005). .....	31
Figura 8 - Desgaste adesivo. Fonte: Mendes (2006). .....	32
Figura 9 - Lubrificação (a) Película Fina, (b) Mista, (c) Limite. Fonte: Mendes (2006). .....	33
Figura 10 - Atrito em função da velocidade. Fonte: Rabinowicz (1965). .....	34
Figura 11 - Rugosidade e lubrificação. Fonte: González (1998). .....	34
Figura 12 - Nucleação de fadiga, intrusões e extrusões na superfície. ....	35
Figura 13 - Utilização de raios ao invés de entalhes para minimizar a fadiga. ....	36
Figura 14 - Fator de redução do limite de fadiga devido a vários tratamentos superficiais. ....	37
Figura 15 - Escoamento laminar e turbulento sobre uma placa plana. ....	38
Figura 16 - Separação da camada limite em uma esfera; (a) laminar e (b) turbulenta. ....	40
Figura 17 - Bolas texturizadas; (a) golfe e (b) futebol. Fonte: Rubini & Aguiar (2004). ....	40
Figura 18 - Ventilador com hélice texturizada. Fonte: Sharkoon (2005). .....	41
Figura 19 - Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação. ....	42
Figura 20 - Resistência térmica de contato. Fonte: Incropera & DeWitt (1998). .....	44
Figura 21 - Rugosidade superficial e transmissão de calor. Fonte: González (1998). ....	44
Figura 22 - Perfis de velocidade para escoamento laminar e turbulento. ....	45
Figura 23 - Formação de sítios de nucleação. Fonte: Incropera & DeWitt (1998). ....	46
Figura 24 - Radiação térmica; (a) absorção em uma cavidade com temperatura uniforme; ...	47
Figura 25 - Superfícies texturizadas com aplicações óticas, .....	48
Figura 26 - Perfil de superfície. Fonte: NBR ISO 4287 (2002). ....	53
Figura 27 - Perfil geométrico, real e efetivo. Fonte: Silva (2002). ....	54
Figura 28 - Desvios de superfície; (a), (b), (c) e (d) 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup> e 4 <sup>a</sup> ordens respectivamente; ...	55
Figura 29 - Filtros para os perfis de rugosidade e ondulação. Fonte: NBR ISO 4287 (2002). ...	56
Figura 30 - Algoritmo para o procedimento de filtragem .....	56
Figura 31 - Perfis de rugosidade e ondulação de acordo com o filtro $\lambda_c$ utilizado. ....	57
Figura 32 - Perfil medido e perfil nivelado. Fonte: Mummery (1992). .....	58
Figura 33 - Comprimentos de amostragem; (a) perfil primário, (b) perfil de rugosidade. ....	59
Figura 34 - Elemento do perfil. ....	59
Figura 35 - Representação gráfica do perfil indicando o parâmetro $R_z$ . .....	64
Figura 36 - Representação gráfica do perfil indicando o parâmetro $R_t$ . .....	65
Figura 37 - Escalas de rugosidade e sua influência na fricção. Fonte: Myshkin (1998). ....	66
Figura 38 - Principais métodos de medição de rugosidade e suas faixas de operação. ....	67
Figura 39 - Comparação entre o perfil real e o perfil medido com um apalpador. ....	68
Figura 40 - Efeito de uma ponta danificada sobre um perfil. ....	69
Figura 41 - Comparação entre perfil medido (a) com apalpador e (b) através de laser. ....	70
Figura 42 - Princípio de operação do sensor conoscópico a Laser. Fonte: Optimet (2005). ....	71
Figura 43 - Aplicação da digitalização Tridimensional na Engenharia Reversa. ....	73
Figura 44 - Aplicação de filtro para redução de ruído na superfície. Fonte: Freitas (2006). ...	73
Figura 45 - Registro de nuvens de pontos por sobreposição de pontos. ....	76
Figura 46 - Registro de nuvens de pontos através de esferas de referência. ....	76
Figura 47 - Pingente com a imagem de Nossa Senhora do rosário. ....	77
Figura 48 - Salto de sapato feminino, (a) modelo físico em latão e (b) modelo virtual. ....	78

Figura 49 - Determinação do centro de massa de um <i>dinodontosaurus</i> .....	78
Figura 50 - Secções do modelo virtual de um <i>dinodontosaurus</i> .....	79
Figura 51 - Panorama evolutivo dos materiais. Fonte: Silva (2005).....	81
Figura 52 - Planta artificial, polímero texturizado imitando folha natural.....	83
Figura 53 - Dominó de Texturas. Fonte: Dischinger (2006). ....	85
Figura 54 - Relação entre custo relativo por unidade fabricada e produtividade.....	87
Figura 55 - Faixas de pressões para moldagem e contração da peça moldada.....	88
Figura 56 - Condições de processo e contração do material. Fonte: Morton-Jones (1989). ....	89
Figura 57 - Extração da peça (a) molde com uma gaveta e (b) molde com maior ângulo.....	90
Figura 58 - Produto texturizado obtido por injeção de ABS, componente da indústria.....	91
Figura 59 - Saídas de ar no molde de sopra. Fonte: Polisul (1995). ....	92
Figura 60 - Frasco texturizado, PET moldado por sopra. ....	93
Figura 61 - Chapas de 1 e 2mm de PS termoformadas. ....	94
Figura 62 - Protótipo usinado em PU. ....	96
Figura 63 - Usinagem de moldes para injeção. ....	97
Figura 64 - Scanner Tridimensional a Laser modelo Digimill 3D.....	99
Figura 65 - Funcionamento do eixo Z do equipamento CNC Digimill 3D.....	100
Figura 66 - Tela de configuração dos parâmetros do cabeçote Laser. ....	102
Figura 67 - Tela de configuração dos parâmetros do processo de digitalização. ....	103
Figura 68 - Padrões de rugosidade da fabricante Massi (Alemanha). ....	104
Figura 69 - Análise de tamanho de partícula para o revelador Metal-chek D-70. ....	106
Figura 70 - Procedimentos para a digitalização dos padrões de rugosidade. ....	108
Figura 71 - Tela inicial do programa desenvolvido.....	109
Figura 72 - Nuvem de pontos aberta em um processador de texto.....	110
Figura 73 - Ajuste dos pontos digitalizados à linha média calculada.....	111
Figura 74 - Processamento da nuvem de pontos para cálculo de parâmetros de rugosidade. ....	111
Figura 75 - Exibição de dados no programa desenvolvido. ....	112
Figura 76 - Digitalização do Padrão Rz 3,2 $\mu\text{m}$ . ....	113
Figura 77 - Digitalização do Padrão Rz 6,3 $\mu\text{m}$ . ....	113
Figura 78 - Digitalização do Padrão Rz 10 $\mu\text{m}$ . ....	114
Figura 79 - Digitalização do Padrão Rz 20 $\mu\text{m}$ . ....	114
Figura 80 - Digitalização do Padrão Rz 40 $\mu\text{m}$ . ....	115
Figura 81 - Digitalização do Padrão Rz 80 $\mu\text{m}$ . ....	115
Figura 82 - Textura do abacaxi; (a) fruta, (b) detalhe da textura e (c) parametrização.....	117
Figura 83 - Procedimentos para a digitalização tridimensional a Laser de uma superfície. ..	118
Figura 84 - Filtragem de uma nuvem de pontos.....	119
Figura 85 - Malha de triângulos obtidas a partir da nuvem de pontos. ....	120
Figura 86 - Processamento da nuvem de pontos obtida através da digitalização 3D a Laser.....	121
Figura 87 - Repetições do módulo da textura bolacha do mar ( <i>encope emarginata</i> ).....	122
Figura 88 - Representação de uma imagem monocromática através de mapa de bits. ....	123
Figura 89 - Relevo (a) em escala de cores e (b) em escala de cinzas.....	124
Figura 90 - Processamento com parametrização de uma nuvem de pontos digitalizada. ....	124
Figura 91 - Perfil obtido do padrão Rz 80 $\mu\text{m}$ , <i>cutoff</i> =2,5mm, escala x=200X y=1000X.....	126
Figura 92 - Perfil obtido do padrão Rz 40 $\mu\text{m}$ , <i>cutoff</i> =2,5mm, escala x=200X y=1000X.....	126
Figura 93 - Perfil obtido do padrão Rz 20 $\mu\text{m}$ , <i>cutoff</i> =0,8mm, escala x=600X y=1000X.....	127
Figura 94 - Perfil obtido do padrão Rz 10 $\mu\text{m}$ , <i>cutoff</i> =0,8mm, escala x=600X y=1000X.....	127
Figura 95 - Perfil obtido do padrão Rz 6,3 $\mu\text{m}$ , <i>cutoff</i> =0,8mm, escala x=600X y=1000X.....	127
Figura 96 - Perfil obtido do padrão Rz 3,2 $\mu\text{m}$ , <i>cutoff</i> =0,25mm, escala x=2000X y=1000X.....	128
Figura 97 - Qualidade mínima admissível x nº de pontos adquiridos. ....	128

Figura 98 - Resultados para o padrão Rz 80 (Ra = 20 $\mu\text{m}$ ).....	129
Figura 99 - Resultados para o padrão Rz 40 (Ra = 10 $\mu\text{m}$ ).....	130
Figura 100 - Resultados para o padrão Rz 20 (Ra = 5,4 $\mu\text{m}$ ).....	130
Figura 101 - Resultados para o padrão Rz 10 (Ra = 2,2 $\mu\text{m}$ ).....	130
Figura 102 - Resultados para o padrão Rz 6,3 (Ra = 1,3 $\mu\text{m}$ ).....	131
Figura 103 - Resultados para o padrão Rz 3,2 (Ra = 0,51 $\mu\text{m}$ ).....	131
Figura 104 - Erro(%) x n° de pontos adquiridos para o Ra. ....	132
Figura 105 - Erro(%) x qualidade mínima admissível para o Ra. ....	133
Figura 106 - Resultados para o parâmetro Ra em função das qualidades de 65 a 85.....	133
Figura 107 - Erro(%) x qualidade mínima admissível para nova análise do Ra. ....	134
Figura 108 - Erro(%) x n° de pontos adquiridos na nova análise do Ra.....	134
Figura 109 - Qualidade mínima admissível x n° de pontos adquiridos na nova análise. ....	135
Figura 110 - Resultados para o padrão Rz 80 (Rz = 78 $\mu\text{m}$ ).....	136
Figura 111 - Resultados para o padrão Rz 40 (Rz = 41 $\mu\text{m}$ ).....	137
Figura 112 - Resultados para o padrão Rz 20 (Rz = 20 $\mu\text{m}$ ).....	137
Figura 113 - Resultados para o padrão Rz 10 (Rz = 9,8 $\mu\text{m}$ ).....	137
Figura 114 - Resultados para o padrão Rz 6,3 (Rz = 6,5 $\mu\text{m}$ ).....	138
Figura 115 - Resultados para o padrão Rz 3,2 (Rz = 3,5 $\mu\text{m}$ ).....	138
Figura 116 - Erro(%) x n° de pontos adquiridos para o Rz. ....	139
Figura 117 - Erro(%) x qualidade mínima admissível para o Rz. ....	140
Figura 118 - Resultados do parâmetro Rz em função das qualidades de 65 a 85. ....	140
Figura 119 - Erro(%) x qualidade mínima admissível para nova análise do Rz. ....	141
Figura 120 - Erro(%) x n° de pontos adquiridos na nova análise do Rz.....	141
Figura 121 - Avaliação tridimensional da superfície do padrão Rz 80. ....	142
Figura 122 - Análise de um corpo de prova após teste de desgaste. ....	143
Figura 123 - Análise de projétil via digitalização 3D a Laser. ....	144
Figura 124 - Interface do banco de texturas desenvolvido.....	145
Figura 125 - Ferramenta para análise de repetição do módulo da textura.....	146
Figura 126 - Ecossistema do banco de texturas.....	147
Figura 127 - Nuvem de pontos do couro de cobra; (a) nuvem de pontos bruta .....	149
Figura 128 - Nuvem de pontos e malha de triângulos da textura couro de cobra. ....	149
Figura 129 - Módulo de repetição da textura couro de cobra em escala de cinzas. ....	150
Figura 130 - Eletrodo projetado em software CAM.....	150
Figura 131 - Rolo de gravação com a textura couro de cobra.....	151
Figura 132 - Textura do couro de cobra aplicada em couro bovino.....	151
Figura 133 - Textura da arraia em programa CAM para usinagem.....	152
Figura 134 - Textura da arraia; couro natural, cera e latão banhado em ouro.....	153
Figura 135 - Peças desenvolvidas pela equipe LdSM com a textura da arraia. ....	153
Figura 136 - Peças desenvolvidas por empresas do Sindijóias-RS com a textura da arraia... 154	154
Figura 137 - Textura da palha de milho; (a) palha natural (b) módulo em escala de cinzas.. 154	154
Figura 138 - Comparação entre a palha de milho natural e a textura obtida em prata. ....	155
Figura 139 - Textura da palha de milho usinada em osso para peças de artesanato. ....	155
Figura 140 - Textura da palha do milho; (a) resina de PU para usinagem.....	156
Figura 141 - Dominó de texturas; (a) resina termofixa de PU (b) usinado em osso. ....	156
Figura 142 - Dominó de texturas desenvolvido pela equipe LdSM.....	157

**LISTA DE TABELAS**

Tabela 1 - Normas vigentes sobre rugosidade superficial (junho de 2006). .....	51
Tabela 2 - Superfície (geométrica, real e efetiva) e perfil obtido através dela. ....	54
Tabela 3 - Desvios de superfície. Fonte: adaptado de Silva (2002). ....	55
Tabela 4 - Valores normalizados para os parâmetros de rugosidade. Fonte:González (1998). ....	60
Tabela 5 - Números de classe para rugosidade. ....	60
Tabela 6 - Principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Ra. ....	61
Tabela 7 - Valores de <i>cutoff</i> para perfis periódicos. Fonte: ISO 4288:1996. ....	62
Tabela 8 - Valores de <i>cutoff</i> para perfis não periódicos (Ra). Fonte: ISO 4288:1996. ....	62
Tabela 9 - Principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Rq. ....	63
Tabela 10 - Principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Rz. ....	64
Tabela 11 - Valores de <i>cutoff</i> para perfis não periódicos (Rz). Fonte: ISO 4288:1996. ....	65
Tabela 12 - Principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Rt. ....	66
Tabela 13 - Viscosidade em função da temperatura para alguns termoplásticos. ....	85
Tabela 14 - Valores de contração (%) para alguns termoplásticos. ....	89
Tabela 15 - Características das lentes do scanner 3D a Laser utilizadas no LdSM. ....	101
Tabela 16 - Valores de Ra e Rz para os padrões de rugosidade utilizados. ....	104

## RESUMO

A textura é considerada um aspecto da superfície associado ao toque e às sensações causadas por superfícies externas de objetos através do sentido do tato, exercendo grande influência na interação entre um produto e seu usuário. Neste sentido, a textura superficial pode ser considerada a “pele do objeto”, a interface entre o produto (material) e seu utilizador, capaz de transmitir diferentes sensações e percepções aos usuários. A aplicação de texturas, por alterar características superficiais do material, influencia também no desempenho dos produtos quando em uso. Pode-se verificar a influência da textura em aspectos econômicos, tolerâncias dimensionais, na tribologia (atrito, desgaste e lubrificação), fadiga, corrosão, escoamento de fluidos, transferência de calor e propriedades óticas das superfícies.

Neste sentido, o objetivo geral do presente trabalho é utilizar a digitalização tridimensional a Laser como ferramenta para desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao Design de Produtos. No que diz respeito ao desenvolvimento de texturas, foi intenção entender os mecanismos de geração de padrões tridimensionais e desenvolver uma metodologia para tal fim. Quanto à caracterização, foi possível desenvolver um sistema de medição de parâmetros de rugosidade, através de um scanner tridimensional a Laser, visando à obtenção de dados quantitativos. Através da digitalização e processamento de dados dos padrões de rugosidade foi possível concluir que o limite de operação do equipamento utilizado ocorre com rugosidades médias ( $R_a$ ) da ordem de  $5\mu\text{m}$  com erro médio de 10%. Os resultados e conclusões das análises de rugosidade foram fundamentais para o entendimento do mecanismo de processamento dos pontos oriundos da digitalização. Através destes dados foi possível realizar digitalizações com maior qualidade de superfícies tridimensionais.

Observa-se que este estudo trouxe contribuição para a área de desenvolvimento de produtos, uma vez que através da texturização pode-se diferenciar e inovar artefatos, bem como promover uma maior interação entre produto-usuário, estimulando percepções táteis e visuais. O desenvolvimento de uma metodologia para aquisição de texturas, processamento de dados, parametrização de um módulo de repetição e geração de arquivos CAD/CAM também foi uma importante contribuição do presente trabalho. Através do desenvolvimento de um banco de texturas compreendeu-se a necessidade de inovar nesta área que, até então, não dispunha de uma forma sistemática para organizar e classificar as texturas visando à aplicação na indústria. O uso inovador das texturas é promovido com a criação deste banco de texturas,

o qual se coloca como uma referência aos designers, engenheiros e demais projetistas de uma proposta nova na construção de produtos. Acredita-se que com este trabalho a pesquisa seja estimulada, desenvolvendo novos caminhos tanto na área do Design quanto da Engenharia.

## ABSTRACT

Texture is considered an aspect of surface associated to touching and to sensations caused by external object surfaces through the sense of touch; exerting great influence in the interaction between a product and the consumers. In this way, the superficial texture may be considered the "skin of the object ", the interface between a product (material) and its user, capable to transmit different sensations and perceptions to people. The application of textures, due to change in superficial characteristics of materials, also influences in the product performance when it is in use. The influence of textures can be verified in economic aspects, dimensional tolerances, in tribology (friction, wear and lubrication), fatigue, corrosion, fluids flow, heat transfer and optical properties of surfaces.

The aim of this work is to use the three-dimensional Laser scanning as a tool for development and characterization of textures applied to Product Design. In respect to texture development, the goal was to understand the mechanisms of three-dimensional patterns generation and to develop a methodology to it. In respect to texture characterization, it was possible to develop a roughness parameters measurement system, through three-dimensional Laser scanner, aiming at the attainment of quantitative data. With roughness standards scanning and its data processing, it was possible to conclude that the operation limit of the used equipment occurs with average roughness (Ra) of the order of  $5\mu\text{m}$  with an error of 10%. The roughness analysis results and conclusions had been basic for the understanding of the digital points processing mechanism. Due to these data it was possible to carry better quality to three-dimensional surfaces scanning.

One can observe that this study brought contributions to the product development area, since texturing can promote differentiated and innovative devices, as well as provide a bigger interaction between product-user, stimulating tact and visual perceptions. The development of a methodology for texture acquisition, data processing, repetition module parameterization and CAD/CAM files generation also was an important contribution of the present work. Due to the development of a texture database it was understood the necessity of innovating in this area that, so far, did not make use of a systematic form to organize and to classify textures aiming at their application in industry. The innovative use of textures is promoted with the creation of this texture database, which stands to designers and engineers

as a reference of a new proposal in product development. It is believed that with this work the research is stimulated, developing new ways both in Design and in Engineering.

## INTRODUÇÃO

A textura é considerada um aspecto da superfície associado ao toque e pode exercer grande influência na interação entre um produto e seu usuário. Manzini (1989) define a textura superficial como a “pele do objeto”, capaz de transmitir diferentes sensações e percepções aos usuários. A aplicação de texturas, por alterar características superficiais do material, veículo através do qual a textura se manifesta, influencia também no desempenho dos produtos quando em uso. Antes de discutir as texturas e suas aplicações, tanto no Design quanto na Engenharia de Superfícies, faz-se necessário a apresentação de alguns conceitos importantes, a fim de fornecer subsídios para o melhor entendimento das discussões realizadas ao longo do trabalho.

Segundo o *International Council Design of Societies of Industrial Design* - ICSID (2006), Design é uma atividade criativa que visa estabelecer qualidades multifuncionais para objetos, processos, serviços e seus sistemas durante todo o ciclo de vida. Portanto, o Design é o fator central para a humanização inovadora das tecnologias e o fator crucial para o intercâmbio cultural e econômico. Baseados na definição do ICSID, órgãos nacionais criaram suas próprias definições acerca do Design. O Programa Brasileiro de Design - PBD (Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC) praticamente transcreve esta definição: “atividade criativa que estabelece as funções e qualidades de diferentes objetos, processos, serviços e sistemas, abrangendo todo seu ciclo de vida, **preocupando-se especialmente com a interação entre estes e seus usuários**”. O PBD indica que o Design é fundamental para a humanização inovadora de tecnologias e o intercâmbio econômico e cultural entre os povos”. Para a Rede Gaúcha de Design - RGD, entende-se por Design a melhoria dos aspectos funcionais, ergonômicos e visuais dos produtos, de modo a atender às necessidades do consumidor, melhorando o conforto, a segurança e a satisfação dos usuários. Segundo Bonsiepe (1997), Design é a “atividade projetual, responsável pelas características Estruturais, Estético-Formais e Funcionais de um produto para fabricação em série”. Cabe salientar que a textura pode prover ao produto características estruturais, estéticas, formais e/ou funcionais, seja individual ou simultaneamente.

De acordo com Bonsiepe (1997), o Design consiste no “domínio no qual se estrutura a interação entre usuário e produto, para facilitar ações efetivas”. Para o autor, todo design é design de interfaces, no sentido de que o designer, em geral, não vai produzir a forma que o produto funciona (tarefa da engenharia, programação, entre outras áreas de desenvolvimento), mas sim a interação do produto com o usuário [Wikipédia, 2006]. Entende-se por “interface com o usuário” o mecanismo por meio do qual se estabelece uma comunicação entre um dispositivo e o ser humano. Neste contexto, uma das principais interfaces material/usuário é a própria textura presente na superfície do produto.

A palavra superfície vem do latim *super* (superior) + *facies* (face) e etimologicamente significa face ou parte exterior dos corpos. De acordo com o dicionário Aurélio (1999), usualmente, uma superfície pode ser definida como a parte externa de um corpo, também representando idéia de face, aparência e aspecto; e, geometricamente, como uma configuração geométrica de duas dimensões. Segundo a Enciclopédia Wikipédia (2006), matematicamente (topologia), uma superfície é um espaço bidimensional e, em um espaço tridimensional, as superfícies podem representar os limites de objetos sólidos tridimensionais. Na geometria euclidiana, de acordo com Silva (2005), o ponto é o elemento básico, que não tem partes e que não tem grandeza alguma; linha é o que tem comprimento e não tem largura (uma dimensão), sendo suas extremidades pontos; superfície é o elemento que tem comprimento e largura (duas dimensões), sendo suas extremidades linhas; e sólido é o que tem comprimento, largura e espessura (três dimensões), sendo suas extremidades superfícies. Segundo Wong (1998) o desenho se refere à criação de um mundo bidimensional por meio de esforços conscientes de organização dos vários elementos. Essa representação inclui duas dimensões, comprimento e largura, e que em conjunto estabelecem uma superfície plana, sem profundidade. Já a representação tridimensional mostra as formas e materiais tangíveis no espaço real, possibilitando informações para percepção humana que levam a uma compreensão completa da realidade do produto. Cabe salientar que o material é o veículo no qual a textura e suas inerentes percepções se manifestam.

Neste sentido, independentemente de uma definição popular ou geométrica, as superfícies representam a interface dos objetos reais (tridimensionais) com o meio externo e, assim, suas características podem ser associadas com a interação produto-usuário. Esta interação é um fator de extrema relevância para o Designer, o qual deve, então, entender a

importância das superfícies, bem como as características e propriedades dos materiais que as veiculam, no projeto de produtos.

O termo “Design de Superfície”, apesar de etimologicamente interessante para expressar o desenvolvimento de superfícies baseadas na relação produto-usuário, vem sendo empregado geralmente resumindo-se à área gráfica artística. Segundo Rùthschilling (2006), o termo inglês “*Surface Design*” normalmente é traduzido como “Design Têxtil” ou “Desenho (Industrial) de Estamparia”, denominações usadas no Brasil que se referem somente ao campo têxtil e de impressão de desenhos sobre tecidos. A autora propõe uma definição mais abrangente para o termo: “consiste na criação de imagens bidimensionais, projetadas especificamente para geração de padrões, que desenvolvem-se de maneira contínua sobre superfícies de revestimentos”. Para o PBD, Design de Superfície é o ramo do design gráfico voltado à criação de grafismos, ilustrações ou outros tipos de composições para aplicação em diferentes tipos de superfícies. Destacam-se as usadas no revestimento de paredes, pisos ou calçadas, como pastilhas, azulejos, lajotas, papéis, tecidos, carpetes, divisórias, etc. Discussões em torno da definição de Design de Superfícies vêm ocorrendo e no que diz respeito às texturas, considera-se que elas podem ser somente visuais (bidimensionais) ou também táteis, apresentando leve relevo. No que diz respeito à geração de padrões em relevo e a composições através de elementos tridimensionais, aplicáveis ao design de produtos, o termo “textura” precisa ser melhor compreendido.

Textura pode ser definida como um aspecto da superfície associado ao toque; o tato ou forma de uma superfície ou substância; suavidade, rugosidade, etc. de algo [Wikcionário, 2006]. Segundo a Enciclopédia Wikipédia (2006), textura refere-se às propriedades de tocar e sensações causadas por superfícies externas de objetos através do sentido do tato. O termo textura também pode ser utilizado para descrever sensações não-táteis. Texturas ainda podem ser consideradas como um padrão em pequena escala onde o elemento individual que formará o todo não é distinguível. Esta última definição aproxima-se do conceito de rugosidade, abordado com profundidade na seção 1.4.

No que diz respeito à interação do produto com o usuário, as texturas mostram papel fundamental, visto que a texturização de superfícies influencia na percepção de um usuário ao vê-la e/ou tocá-la. De acordo com Kunzler (2003) as diferenças na percepção tátil devem considerar as variáveis de rugosidade (aspereza), a dureza e a condutividade térmica do

material. Estas são as três características associadas ao material que são percebidas ao tocar em um objeto e juntas podem identificar por completo um relevo. Para Ruiz (1994) a textura pode ser apreciada mediante o sentido do tato ou o da visão, ou através de ambos de uma vez. Cada material possui uma textura diferente segundo sua natureza, orgânica ou inorgânica, segundo sua composição física e segundo os processos de fabricação a que foi submetido.

No que diz respeito à estética da superfície, estudos sobre a rugosidade e a texturização superficial também já vêm sendo realizados [Stout (1999), Evans & Bryan (1999)]. O uso das texturas pode ser estendido a muitos e distintos produtos. A texturização permite a junção sutil das peças cobrindo diversas imperfeições do processo industrial. Assim, a textura é uma qualidade superficial que permite disfarçar as imperfeições dos próprios materiais que compõem um produto e também de seus processos de confecção.

As texturas influenciam também o comportamento dos produtos quando em uso. Tecnicamente, a textura de uma superfície costuma ser associada à rugosidade superficial e pesquisadores de diferentes áreas vêm estudando sua influência no desempenho dos produtos industriais. Euitiz (2002) afirma que o acabamento final e a textura de uma superfície são de grande importância e influência para definir a capacidade de desgaste, lubrificação, resistência à fadiga e aspecto externo de uma peça ou material e que, por isso, a rugosidade é um fator que deve ser levado em consideração. As superfícies podem ser projetadas com texturas específicas para prover determinada função a um produto. Stout (1999), classifica as superfícies funcionais em Superfícies de Engenharia (*Engineered surfaces*) e Superfícies Estruturadas (*Structured surfaces*).

Segundo o dicionário Aurélio (1999), estrutura é o conjunto formado, natural ou artificialmente, pela reunião de partes ou elementos, em determinada ordem ou organização; a disposição dos elementos ou partes de um todo; a forma como esses elementos ou partes se relacionam entre si, e que determina a natureza, as características ou a função ou funcionamento do todo. Todas as superfícies possuem textura e estrutura, mas segundo Stout (1999), as superfícies estruturadas são aquelas em que a estrutura da superfície foi projetada intencionalmente para uma específica performance funcional. Evans & Bryan (1999) relacionam as superfícies estruturadas a padrões de repetição, no entanto, os mesmos reconhecem que estas superfícies não necessariamente devem ser periódicas. Estes autores

ainda afirmam que muitas vezes a função destas superfícies não pode ser relacionada com os tradicionais parâmetros de acabamento de superfície (ex. Ra e Rq).

Para Stout (1999), as superfícies de engenharia são produzidas especificamente de modo a alterar as camadas da superfície e da sub-superfície para dar a performance requerida. Evans & Bryan (1999), afirmam que todas as superfícies podem ser consideradas superfícies de engenharia, pois a fabricação gera variações na geometria e/ou nas propriedades do material próximo à superfície. Este conceito pode ser mais facilmente relacionado com a rugosidade superficial.

A rugosidade é formada por sulcos ou marcas deixadas na superfície da peça pelo processo de fabricação. Segundo Kindlein (2006), “à luz do Design, entende-se por processo produtivo toda e qualquer transformação aplicada sobre materiais, para que estes dêem origem a um produto. Tais processos, juntamente com a seleção de materiais, viabilizaram e racionalizaram a manufatura do projeto, e vêm proporcionando uma constante evolução nas técnicas de produção”. Assim, pode-se afirmar que a rugosidade, a exemplo da textura, está presente em todos os produtos e influencia não só em aspectos técnicos, mas também em aspectos estéticos, uma vez que está diretamente ligada com o acabamento superficial do produto.

A determinação da rugosidade torna-se também importante no desenvolvimento dos atuais processos de fabricação à medida que fornece dados para inspeção da superfície e controle de qualidade da mesma. Para o controle de qualidade, inspeção e ensaios finais nos produtos acabados existem normas vigentes, as quais são ditadas no Brasil pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT). Segundo a ABNT, define-se por Normalização o “processo de estabelecer e aplicar regras a fim de abordar ordenadamente uma atividade específica, para o benefício e com a participação de todos os interessados e, em particular, de promover a otimização da economia, levando em consideração as condições funcionais e as exigências de segurança”. A norma ABNT NBR ISO 4287 aborda as especificações geométricas do produto no que diz respeito a termos, definições e parâmetros da rugosidade. A referida norma está em consonância com as normas internacionais de rugosidade e, assim, os trabalhos sobre este tema desenvolvidos no Brasil também podem ser consultados, comparados e utilizados internacionalmente.

O Design por abranger todas as áreas industriais, torna necessário o aprimoramento das técnicas de aquisição e caracterização das texturas, a fim de que com estes dados se possa dispor de texturas diferenciadas e inovadoras. Assim, sistemas com alta tecnologia para aquisição de imagens e dados, como o Scanner 3D a Laser, softwares vetoriais e sistemas CAD/CAE/CAM tornam-se ferramentas fundamentais para esta função. O processo de Digitalização Tridimensional, através do scanner 3D, permite obter com grande precisão detalhes de superfícies, texturas e objetos. Através dos modelos 3D digitalizados podem ser realizadas análises de superfícies, medidas de rugosidade, desgaste e centro de gravidade, construção de moldes, etc., e aplicar os resultados com grande fidelidade em produtos inovadores.

Neste sentido, o objetivo geral do presente trabalho é utilizar a digitalização a tridimensional a Laser como ferramenta para desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao Design de Produtos. No que diz respeito ao desenvolvimento de texturas, foi intenção entender os mecanismos de geração de padrões tridimensionais e desenvolver uma metodologia para tal fim, bem como discutir a inter-relação entre Textura x Material x Usuário. Quanto à caracterização, foi possível desenvolver um sistema de medição de parâmetros de rugosidade, através de um scanner tridimensional a Laser, visando à obtenção de dados quantitativos. Para atingir os objetivos a presente dissertação foi estruturada em quatro capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto, a qual aborda as texturas e suas aplicações, definições sobre a rugosidade e seus parâmetros, normas técnicas para determinação do estado de superfícies e também sobre a técnica de digitalização tridimensional a Laser.

O segundo capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados nos procedimentos experimentais, os quais foram baseados no scanner tridimensional a Laser, nas normas técnicas e em padrões de rugosidade.

No terceiro capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos através do procedimento experimental.

O quarto capítulo apresenta as conclusões, tomadas com base na discussão realizada através dos resultados obtidos, e também sugestões para trabalhos futuros. Por fim são apresentadas as referências bibliográficas utilizadas para a realização desta dissertação de mestrado.

## 1. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 1.1. As texturas e a subjetividade

A textura refere-se às propriedades de tocar e às sensações causadas por superfícies externas de objetos através do sentido do tato [Wikipédia, 2006]. Sendo a textura uma característica da superfície associada ao toque, ela exerce grande influência na interação entre um produto e seu usuário. Neste sentido, a textura superficial pode ser considerada a “pele do objeto”, a interface entre o produto (material) e seu utilizador, capaz de transmitir diferentes sensações e percepções aos usuários. Segundo Silva (2006) diversas áreas, como a ergonomia e a psicologia, vêm estudando o ato de tocar uma superfície. Ainda segundo o autor, a ergonomia cognitiva pode beneficiar-se das texturas através do aumento do nível da percepção de um objeto pelo usuário e a interface do objeto com o meio (textura) influencia diretamente na relação usuário-produto, pois o toque é um dos principais aspectos sensoriais ligados à emoção.

De acordo com Manu (1995), o usuário procura geralmente objetos que possam suprir, além de sua função básica, também, suas necessidades emocionais. Os objetos não são somente a solução das necessidades mecânicas que executam; somente uma função necessária à vida, mas também servem para trazer satisfação e um sentido de completude. As emoções não devem ser vistas como uma consequência, mas como algo que o designer deve constantemente procurar; algo que deve vir antes mesmo do projeto, o que também não significa que a funcionalidade está em segundo lugar. Neste sentido, Norman (2002) indica claramente que um bom projeto ocorre quando beleza e usabilidade estão em balanço. Segundo Dischinger (2006), a consciência desta interação do produto com emoções e o efeito que produzirá no usuário é essencial ao projetar-se. A primeira impressão de um produto é associada na maior parte à superfície do material, que é a interface (pele do produto) entre o usuário e o objeto e também é o lugar onde acontece materialmente boa parte da passagem de informações. A ligação entre o produto e a emoção pode ser estabelecida e intensificada com o uso da textura, a qual é uma ferramenta que sustenta o design emocionalmente dirigido. O relevo pode influenciar a ambos sentidos: o visual e o tátil. O sentido do toque, aquele que a pele reserva para ser percebido sobre todo o corpo, está conectado não somente aos instintos

de proteção e segurança, mas também a outros sentimentos primários presentes desde os primeiros momentos no mundo exterior.

Segundo Ackerman (1996), o tato é o sentido prioritário a uma necessária condição interpretativa dos objetos, tornando-se essencial à vida humana. Um cego consegue realizar suas interpretações essencialmente pelo tato, onde a perda deste comprometeria a assimilação da realidade. Assim, o estudo de texturas também pode ter um grande caráter social e inclusivo, pois elas permitem facilitar a acessibilidade de pessoas portadoras de deficiências visuais. De acordo com Silva (2006), para estabelecer seu conhecimento, os deficientes visuais dependem do tato que é um sentido que inclui a percepção e a interpretação por meio da exploração sensorial. Para a maioria dessas pessoas o sentido do tato é extremamente desenvolvido e explorá-lo através do uso de texturas mostra-se imprescindível. Pode-se compor o uso de texturas com o uso de diferentes materiais, os quais trarão os resultados mais distintos possíveis. Usar texturas tridimensionais no revestimento superficial dos artefatos pode contribuir para uma comunicação melhor entre o consumidor e o produto.

A texturização, exercendo influência na percepção tátil de um produto, mostra-se uma importante ferramenta para trabalhar a interação produto-usuário. Manzini (1993) afirma que a antiga cultura do produto industrial liso/duro/frio, contra o qual se contrapõe o produto texturado/quente/macio, vem dando lugar a soluções intermediárias, dotadas de novas qualidades, produzindo superfícies “*high-touch*”. Kunzler (2003) vem ao encontro dessa afirmação e mostra que as diferenças na percepção tátil devem considerar as variáveis de rugosidade (aspereza), dureza e condutividade térmica do material. Nestes termos, Ruiz (1994) acrescenta que cada material possui uma textura diferente segundo sua natureza, orgânica ou inorgânica, e segundo sua composição física. Para Silva (2005) neste ambiente sensorial, a oportunidade de interação direta com os diferentes materiais, desde a concepção do produto, proporciona um avanço criativo em direção à percepção que, certamente, permitirá relacionar estética e conforto aliado à viabilidade técnica e econômica de produção para projetos de produto. Segundo Linden & Kunzler (2002) a seleção dos materiais a serem utilizados nos produtos industriais é um dos fatores determinantes para a sua qualidade e para o seu sucesso. Não apenas influencia o seu desempenho técnico, como seguramente é um dos fatores que afetam o consumidor/usuário na sua decisão, freqüentemente subjetiva, ao adquirir um determinado produto.

A dimensão subjetiva está associada a fatores como cultura, gostos e experiências individuais (muitas vezes não conscientes), valores, preconceitos, etc. Esse conjunto de fatores corresponde ao que Löbach (1981) classificou como funções estética e simbólica, complementares à função prática do produto, e ao que Bürdek (1994) considerou como a função de linguagem do produto. Recentemente, a Semântica de Produtos tem-se dedicado a investigar os significados que as pessoas atribuem aos produtos, a partir do seguinte axioma "o ser humano não responde às qualidades físicas das coisas, mas ao que elas significam para ele" (Krippendorff, 2000). A textura pode ou não conter padrões de repetição, mas independentemente disso, pode representar símbolos em relevo ou em sinais gráficos (signos) para comunicação com os usuários do produto. Segundo Santaella (2002), a interpretação de signos é definida pela Semiótica como uma primeira percepção carregada pela pregnância visual dos objetos ou materiais, provocando uma ligação entre uma indicação racional, que o signo se refere ou representa, ao efeito que o signo irá provocar em um possível intérprete. Assim, a utilização de signos nas texturas mostra-se uma alternativa bastante interessante para transmitir informações através da interface material x usuário. Silva (2005) exemplifica esta aplicação citando que a criação de signos é também usual no setor calçadista, onde a interpretação visual agregada à interpretação tátil (conforto dos pés) vem a estabelecer a caracterização das variáveis subjetivas ainda somadas às variáveis objetivas definidas pelas propriedades dos materiais e requisitos de operação.

Considerando a importância do material para a percepção do usuário, bibliotecas de materiais (materiotecas) vêm sendo desenvolvidas, visando auxiliar a pesquisa e a seleção de materiais. Segundo Silva (2005), a materioteca proporciona elementos técnicos, táteis e visuais, através de seu acervo e de seu banco de dados. Nestas bibliotecas podem ser encontrados materiais em suas mais variadas aplicações e acabamentos, bem como seus respectivos processos produtivos, possibilitando o aprimoramento de designers, engenheiros e demais projetistas na seleção de materiais para o projeto de novos produtos industriais. Silva (2005) ainda apresenta um tesouro, o qual o mesmo define como uma hierarquia de relacionamentos de palavras que possam estar associadas, representando, neste caso, características diversas das amostras cadastradas no sistema, com o propósito fundamental de viabilizar a busca por palavras-chave no momento da pesquisa de materiais. A materioteca possui dados técnicos dos materiais com variáveis objetivas e quantitativas, no entanto, torna-se possível realizar interpretações pessoais por parte do pesquisador neste ambiente, no que se refere às variáveis subjetivas, correlacionadas com as percepções dos sentidos. A Figura 1

apresenta esta relação de variáveis subjetivas (propriedades sensoriais) e de variáveis objetivas (propriedades técnicas). Uma discussão mais aprofundada sobre aspectos técnicos dos materiais, no que diz respeito à texturização, é realizada no capítulo 1.7.



**Figura 1 - Propriedades sensoriais (subjetivas) e propriedades técnicas (objetivas) dos materiais. Fonte: Silva (2005).**

Assim, conforme proposto por Silva (2005), é importante realizar um adequado trabalho de interação entre a linguagem técnica (objetiva) e a linguagem perceptiva (subjetiva), de modo que tanto o Designer quanto o Engenheiro possam identificar informações complementares as suas percepções tradicionais, provenientes de sua formação, fomentando a elaboração de novos projetos, capacitados à inovação. Para tanto, de acordo com o exposto, torna-se uma ferramenta fundamental para esta interação, não só o desenvolvimento, mas também a caracterização de texturas aplicadas aos produtos industriais. Cabe salientar que a avaliação do desempenho das superfícies texturizadas é essencialmente qualitativa e muitas vezes subjetiva, principalmente no que diz respeito aos aspectos de estética, percepção e emoção. Para caracterização das superfícies através de parâmetros quantitativos, costuma-se utilizar parâmetros de rugosidade, os quais utilizam métodos matemáticos para descrever sua topografia.

## 1.2. Texturas, Rugosidade e suas aplicações

A rugosidade, formada na superfície da peça pelo processo de fabricação, está presente em todos os materiais e produtos acabados. Ela influencia em muitos aspectos técnicos, tais como tolerâncias, atrito, desgaste, lubrificação, fadiga, corrosão, propriedades

ópticas, transmissão de calor, etc. A rugosidade é também importante em aspectos econômicos e estéticos, uma vez que está diretamente ligada com o acabamento superficial do produto. Uma exploração mais profunda a respeito da rugosidade é apresentada na seção 1.4.

### 1.2.1. Aspectos econômicos

Fabricar consiste basicamente em alterar uma matéria-prima com o intuito de obter um produto acabado. Segundo Kalpakjian (1985), os processos de fabricação representam, nos países industrializados, um terço do produto interno bruto. Sendo a rugosidade consequência direta da fabricação, sua aplicação pode ter importante papel econômico. A texturização, seja ela funcional, estética, ou estético-funcional, também corresponde ao acabamento superficial e, neste sentido, também tem importante papel econômico. O papel econômico da textura possui duas faces, uma de aumentar o custo de fabricação e outra de aumentar o valor agregado ao produto.

Para González (1998), no acabamento superficial de um componente usinado deve-se levar em conta não somente o aspecto estético ou uma função específica, mas também que deve ser produzido ao menor custo possível, considerando que existe uma relação direta entre o grau de acabamento e o tempo necessário para atingi-lo, como mostra a Figura 2.

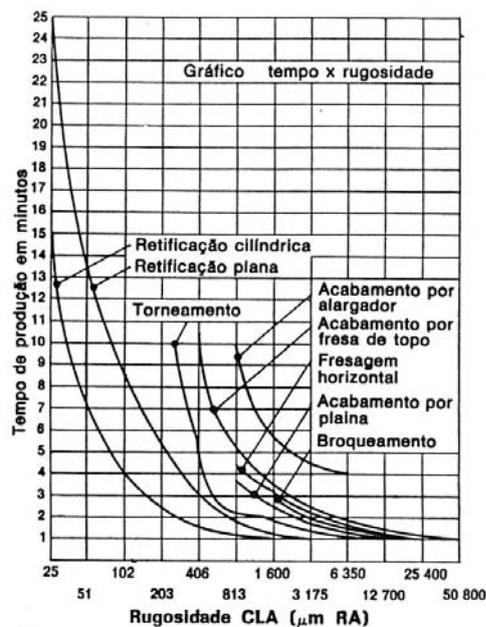


Figura 2 - Processos de acabamento superficial em relação a seu tempo de obtenção e correspondente valor de rugosidade. Fonte: González (1998).

### 1.2.2. Tolerâncias

Segundo Ferrante (1996) define-se tolerância como a máxima diferença dimensional permissível em qualquer das cotas da peça, enquanto que rugosidade superficial refere-se à inevitável presença de irregularidades na superfície da mesma. Assim, a tolerância está diretamente ligada à rugosidade superficial da peça. A Figura 3 mostra que para uma peça possuir baixa tolerância (alta precisão), a mesma deve necessariamente apresentar também baixa rugosidade.

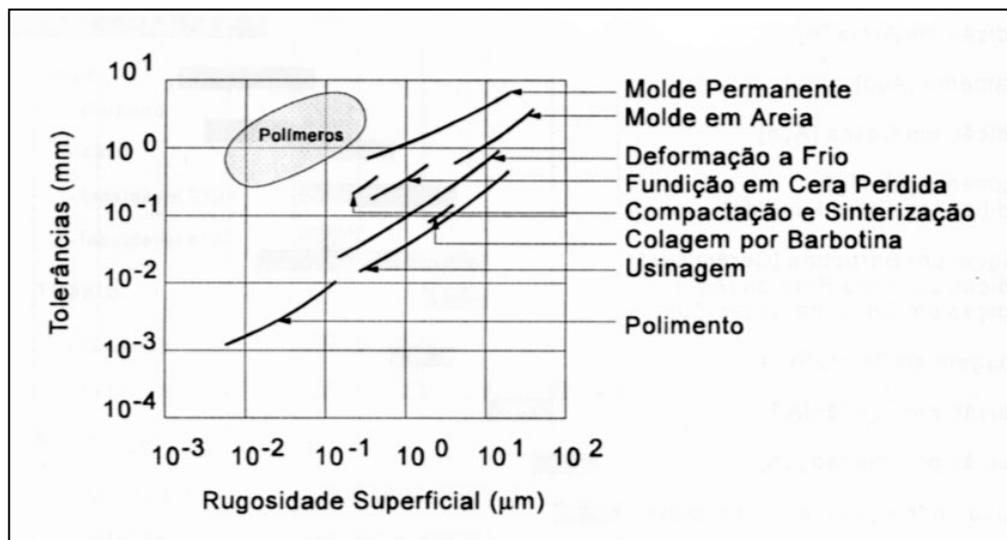
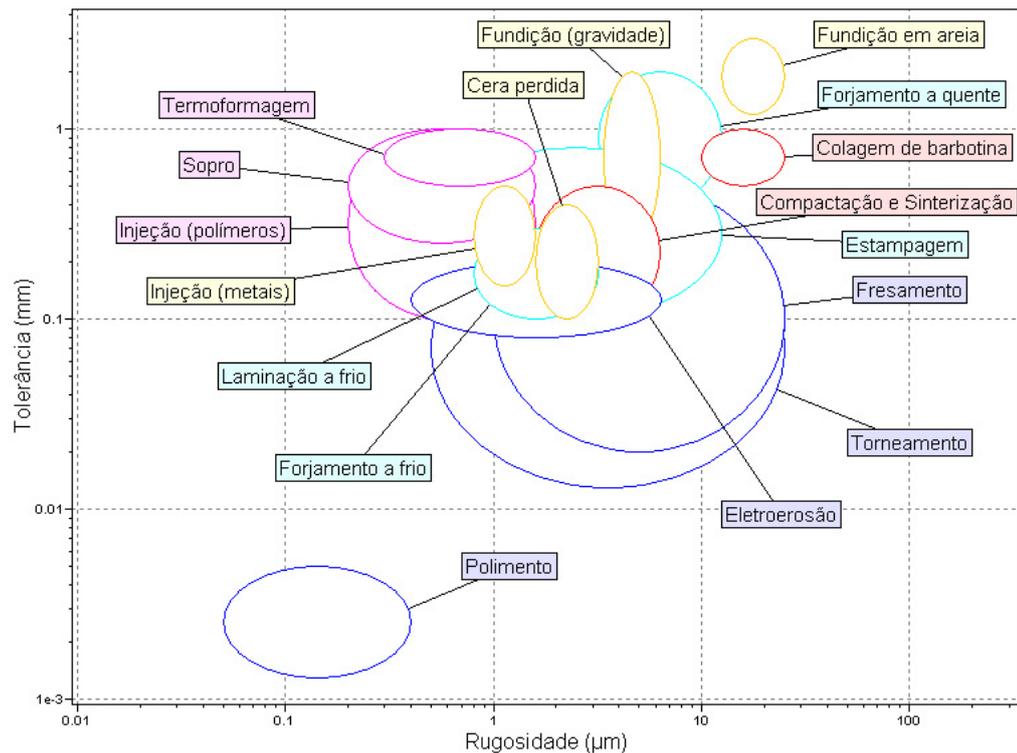


Figura 3 - Tolerâncias e Rugosidade Superficial. Fonte: Ferrante (1996).

González (1998) afirma que uma tolerância dimensional estrita não é funcional se não for obtida com um acabamento adequado. Por exemplo, em um acoplamento com jogo no qual furo e eixo estejam em movimento relativo, superfícies com rugosidade pronunciada estarão expostas ao desgaste rápido que fará variar as características funcionais do acoplamento estabelecido. A Figura 4 é um mapa para seleção de processos de fabricação e apresenta faixas de tolerância e de rugosidade superficial para diversos processos de fabricação.



**Figura 4 - Mapa de seleção de processos de fabricação: tolerância x rugosidade superficial.**  
**Fonte: realizado pelo autor com uso do software CES (2005).**

### 1.2.3. Tribologia - Atrito, desgaste e lubrificação

Segundo Rossetti (2006), em grego, a palavra *tribien* significa esfregar e a tribologia passou a significar a ciência das interfaces em movimento relativo. As propriedades mecânicas das interfaces que são estudadas em tribologia incluem atrito, escorregamento, lubrificação e desgaste. Para Kawakame (2006), a tribologia, "a ciência do atrito, desgaste e lubrificação de superfícies sólidas em movimento relativo", atualmente é considerada como uma das linhas principais de pesquisa da ciência e engenharia dos materiais. Ferreira (2000) afirma que a tribologia - ciência do atrito, do desgaste e matérias relacionadas - é uma área tecnológica recente, mas da maior importância, pois sempre foi intenção do ser humano diminuir os esforços devidos aos atritos e evitar os desgastes, causadores do desperdício de materiais. O autor ainda coloca que a importância desta ciência para um correto projeto de máquinas e equipamentos, assim como para uma correta manutenção dos mesmos, é inquestionável.

A base da tribologia é a existência do atrito. Holanda (1999) define atrito como “fricção entre dois corpos; designação comum aos fenômenos em que o movimento relativo entre duas superfícies em contato é freado pelas forças de adesão existentes entre as superfícies”. O atrito pode ser dividido em atrito de escorregamento, existente entre duas superfícies sólidas em contato e que deslizam uma sobre a outra, e atrito de rolamento, existente entre uma superfície sólida e outra superfície que rola sobre ela. Do ponto de vista da mecânica dos fluídos, a viscosidade pode ser considerada como o atrito interno de um fluido. Segundo Rabinowicz (1965), as primeiras investigações sobre o atrito incluem registros de Amontons (1699), Coulomb (1785) e Morin (1833) e adotaram a hipótese de que o atrito ocorre devido ao travamento mútuo de protuberâncias ou asperezas nas superfícies dos materiais em contato, e deste modo pode-se explicar porque a força de atrito é proporcional à carga e independe da área de contato. Outra hipótese discutida, principalmente por Hardy (1919) e Tomlinson (1929), foi de que o atrito ocorre devido a forças adesivas entre as superfícies em contato, porém isso implica em que o atrito seja proporcional à área de contato, o que é contrário às evidências experimentais.

Por volta de 1940 descobriu-se que existe uma substancial diferença entre a área de contato aparente e a área de contato real. A partir de então adotou-se a hipótese de que a área de contato real pode ser considerada proporcional ao carregamento e independente da área de contato aparente. A rugosidade está ligada à área de contato real entre duas superfícies e por este motivo é bastante discutida neste campo. Texturas intencionalmente projetadas podem minimizar, maximizar, ou ainda atingir um determinado patamar desejado de atrito.

Rabinowicz (1965), trabalhando com ligas de cobre, mostrou que em superfícies muito lisas o atrito tende a ser alto porque a área de contato cresce excessivamente e em superfícies muito rugosas o atrito é alto por causa da necessidade de elevar uma superfície por cima das asperezas de outra. O autor também mostrou que em faixas intermediárias de rugosidade o atrito é mais baixo e sofre pouca influência da rugosidade, este comportamento pode ser observado na Figura 5.

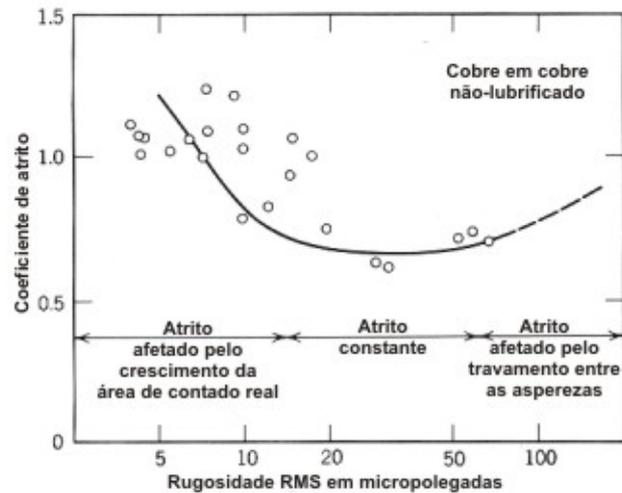


Figura 5 - Atrito e Rugosidade para ligas de cobre. Fonte: Rabinowicz (1965).

Segundo Myshkin (1998), atualmente, os pesquisadores concordam que o atrito é composto por componentes mecânicos (deformação) e moleculares (adesão), porém, ainda são discutidos os pesos de cada componente. Sviridenok (1996), confirmando o postulado por Rabinowicz (1965), mostra que para rugosidades muito baixas, as forças de adesão passam a ter uma significativa contribuição para a natureza do atrito e o comportamento do desgaste, conforme a Figura 6.

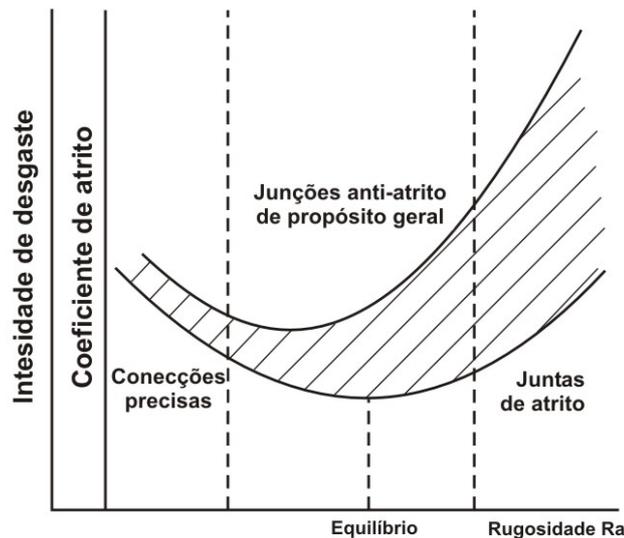
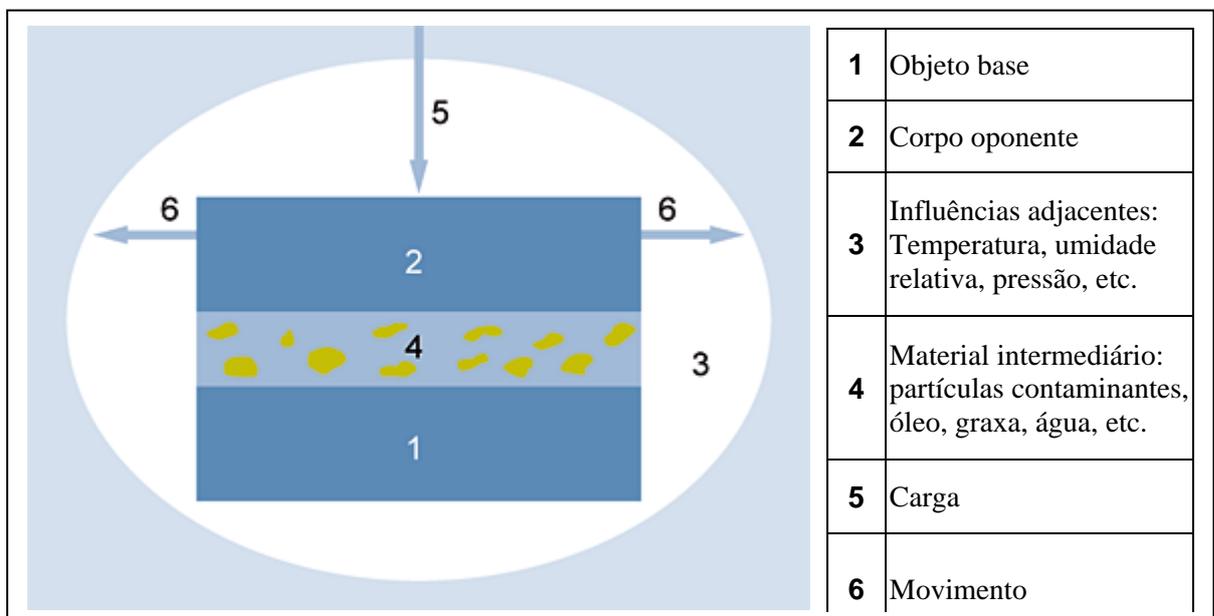


Figura 6 - Atrito e Rugosidade para várias superfícies. Fonte: Sviridenok (1996).

Cabe salientar que apesar de muitas vezes indesejado, o atrito é também muitas vezes necessário. Sem o atrito as correias não poderiam mover as máquinas e uma pessoa não sairia

do lugar porque seus pés escorregariam sobre a superfície. O atrito é prejudicial no momento em que ele desgasta as superfícies que deslizam uma sobre a outra, aumenta a força necessária para mover um corpo e produz calor.

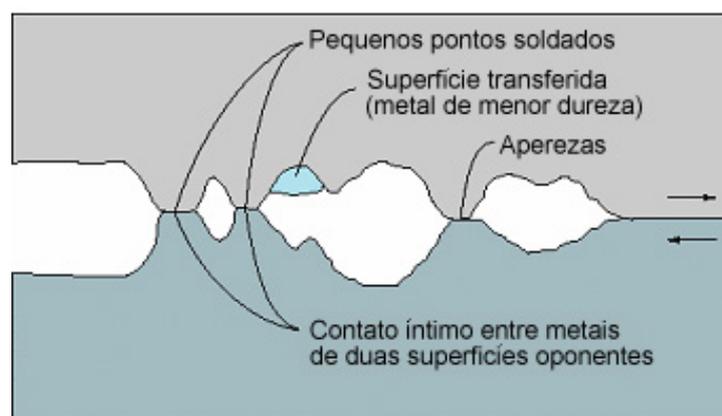
Segundo Kawakame (2006), a resistência ao desgaste não é verdadeiramente uma propriedade dos materiais e sim um comportamento complexo que depende de vários fatores. As taxas de desgaste em um sistema tribológico no qual dois corpos sólidos deslizam um contra o outro dependem não só das propriedades dos materiais envolvidos, mas também da geometria do contato, da pressão de contato, da rugosidade da superfície, da velocidade de deslizamento, da temperatura e do meio ambiente, da presença e eficácia de qualquer lubrificante, e de outros detalhes. Um sistema tribológico consiste nas superfícies de dois componentes que se encontram em contato móvel um com o outro e com a área adjacente (Figura 7). O tipo, evolução e extensão do desgaste são determinados pelos materiais e acabamentos dos componentes, eventuais materiais intermediários, influências da área adjacente e condições de operação [Balzers, 2005]. Segundo Rabinowicz (1965), o desgaste pode ser definido como a remoção de material de superfícies sólidas como resultado de ação mecânica; e a palavra desgastar, segundo Holanda (1999), significa “gastar ou consumir pelo atrito”.



**Figura 7 - Sistema Tribológico. Fonte: Balzers (2005).**

Segundo Mendes (2006), existem vários tipos de desgaste, sendo os principais os desgastes abrasivo, adesivo, químico (corrosão) e por fadiga. O desgaste abrasivo consiste no

polimento e abrasão da superfície por partículas de material mais duro ou contaminantes sólidos. No desgaste adesivo (Figura 8) as superfícies, ao entrarem em contato, sofrem micro-soldagem das rugosidades e sua posterior separação não ocorre na interface original; acontece preferencialmente em regimes de lubrificação limite. O desgaste corrosivo é favorecido devido à reação química com o ambiente envolvente, o atrito entre as superfícies promove a remoção de filmes óxidos formados e permite que o ataque à superfície continue. O *fretting* é causado pela fadiga superficial ou sub-superficial, geralmente por contato de rolamento e a erosão (cavitação) pela formação e arrebentamento de bolhas nas superfícies devido a mudanças rápidas de pressão.



**Figura 8 - Desgaste adesivo. Fonte: Mendes (2006).**

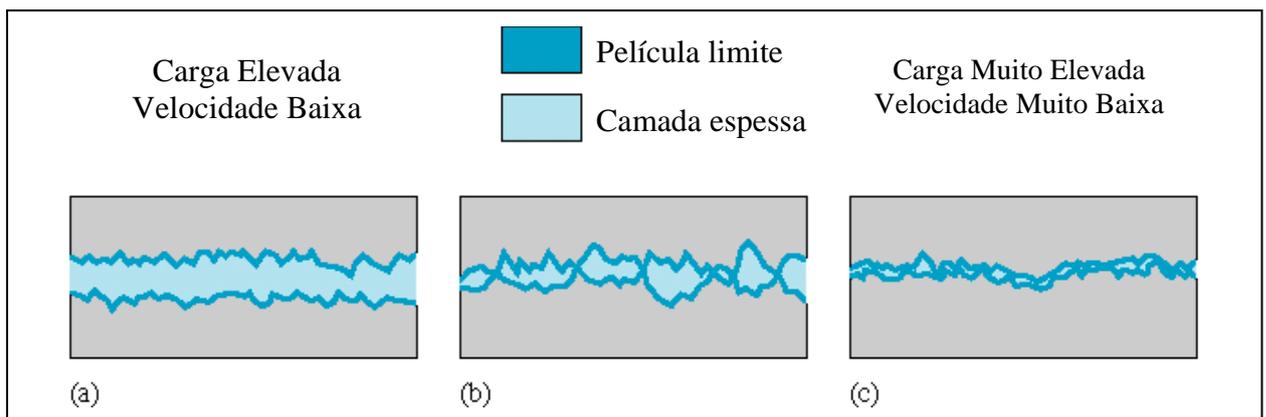
O uso de lubrificantes pode diminuir drasticamente o atrito e conseqüentemente o desgaste entre duas superfícies deslizantes entre si. Segundo Mendes (2006), dentre outras, as principais funções da lubrificação são separar as superfícies em movimento, dissipar o calor gerado pelo atrito e controlar o desgaste corrosivo. A lubrificação também pode ser dividida em vários tipos. Mendes (2006) define quatro situações principais de lubrificação: lubrificação hidrodinâmica, elasto-hidrodinâmica, lubrificação limite e não-lubrificação. Segundo Moreno (2000), sob condições a seco, nenhum lubrificante é utilizado na interface e somente as camadas de óxido existentes nas superfícies estão presentes. Neste caso, o atrito é alto, situação não desejável em muitas aplicações.

Moreno (2000) afirma que condições hidrodinâmicas existem quando uma espessa camada de lubrificante está presente entre as superfícies e que, neste caso, as condições de atrito são governadas pela viscosidade do lubrificante e pela velocidade relativa entre as

peças. Para Ursa (2006) a hidrodinâmica é a condição de lubrificação plena, onde a película ou cunha de óleo separa completamente as superfícies em movimento relativo.

Ursa (2006) afirma que a elasto-hidrodinâmica difere da teoria hidrodinâmica clássica por levar em consideração a influência da pressão na viscosidade e nos materiais. Já BP (2006) a define como o regime de lubrificação caracterizado pelas elevadas cargas unitárias e altas velocidades impostas em elementos rolantes solidários que se deformam elasticamente devido à incompressibilidade da película de lubrificante sob pressões muito elevadas. Mendes (2006) cita que este regime ocorre tipicamente em uma película muito fina de óleo sob extrema pressão.

Ursa (2006) afirma que na lubrificação limite ou restrita há a formação de uma película muito fina ou incompleta, ou seja, não há o desenvolvimento de um filme homogêneo de fluido lubrificante e ocorre contato parcial entre as superfícies. Para Moreno (2000), o uso de um fino filme lubrificante (lubrificação limite) é a situação mais comum encontrada no dia-a-dia, pois aplicações com aumento de temperatura na interface e altas pressões de contato normalmente não possibilitam a presença de um regime hidrodinâmico. Mendes (2006) ainda apresenta um estado de lubrificação entre a hidrodinâmica e a limite, chamada de lubrificação mista, onde existe algum contato entre as superfícies, conforme a Figura 9.



**Figura 9 - Lubrificação (a) Película Fina, (b) Mista, (c) Limite. Fonte: Mendes (2006).**

A lubrificação, assim como o atrito, é um fenômeno que depende da velocidade de escorregamento entre as superfícies. Segundo Rabinowicz (1965), a rugosidade também apresenta influência no atrito em superfícies lubrificadas por líquidos. Em certas velocidades, as superfícies lisas podem funcionar em um estado hidrodinâmico de lubrificação (totalmente

lubrificadas), enquanto que superfícies rugosas normalmente apresentam lubrificação limite. Este fator, por exemplo, faz com que pneus de automóvel com ranhuras sejam melhor do que pneus lisos em uma pista molhada. A Figura 10 mostra, para uma velocidade  $v_c$ , esta diferença entre superfícies lisas e rugosas.

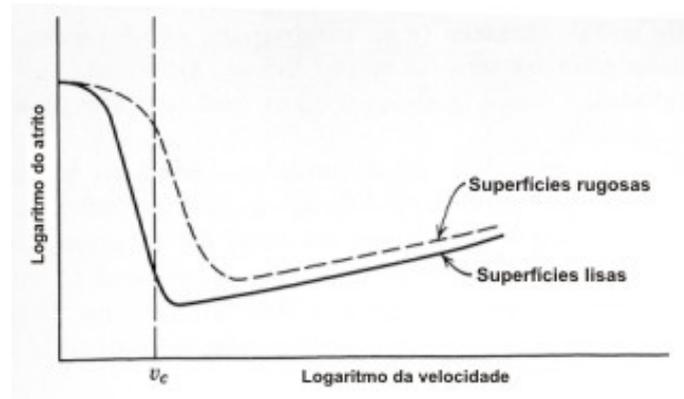


Figura 10 - Atrito em função da velocidade. Fonte: Rabinowicz (1965).

Mendes (2006) mostra que a lubrificação hidrodinâmica ocorre quando a espessura do filme lubrificante é maior do que as rugosidades da superfície. González (1998) afirma que a efetividade de um filme de óleo na lubrificação de dois componentes em movimento será nula se a profundidade da textura for maior que a espessura dele, já que isso significa que haverá contato metal-metal, podendo influir não somente a sua altura como também a sua forma, como mostra a Figura 11.

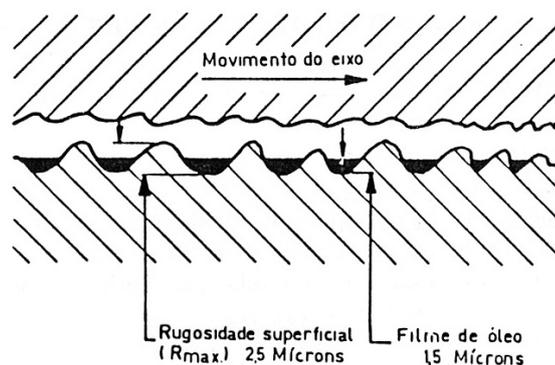


Figura 11 - Rugosidade e lubrificação. Fonte: González (1998).

Conforme exposto, as texturas podem apresentar papel fundamental nas características tribológicas dos produtos industriais, uma vez que elas alteram as condições de atrito, de desgaste e de lubrificação das suas superfícies. A utilização de texturas projetadas para determinado sistema tribológico pode ser um fator diferencial para o sucesso do produto.

#### 1.2.4. Fadiga e Corrosão

Segundo Strohaecker (2003), fadiga, por definição, é a ruptura progressiva que ocorre em componentes e estruturas devido a solicitações dinâmicas e cíclicas. Esta forma de falha ocorre com um nível de tensões consideravelmente inferior ao limite de resistência a tração ou ao limite de escoamento para carga estática. O termo “fadiga” é usado, pois normalmente a falha ocorre após um longo período de tensão repetitiva. O autor afirma que a fadiga “é catastrófica e traiçoeira”, já que ocorre repentinamente e sem avisos. O processo de falha por fadiga é caracterizado por três etapas distintas: (a) iniciação da trinca, onde uma pequena trinca nucleia em algum ponto de alta concentração de tensões; (b) propagação da trinca, durante a qual ela avança a cada ciclo de tensões; e (c) a fratura final, que ocorre muito rapidamente uma vez que a trinca tenha atingido o seu tamanho crítico. Ao tracionar uma peça, a região entre dois planos de escorregamentos se desloca, aumentando sua densidade de discordâncias (encruamento), já no ciclo de compressão este plano fica ancorado e outro plano é que escorrega. Isto dá origem a micro intrusões e micro extrusões, os quais com o carregamento continuado podem dar origem microtrincas (Figura 12).

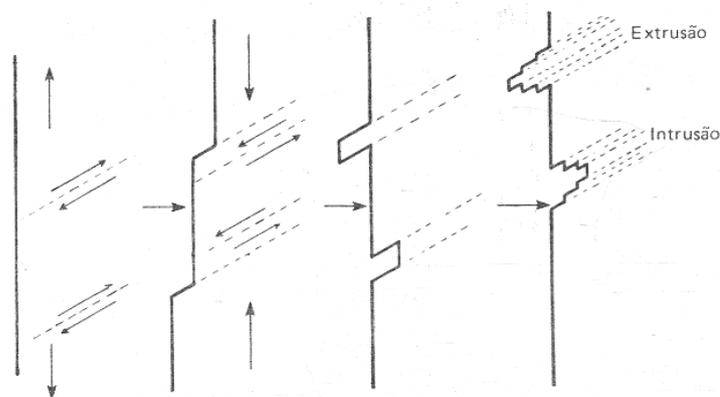
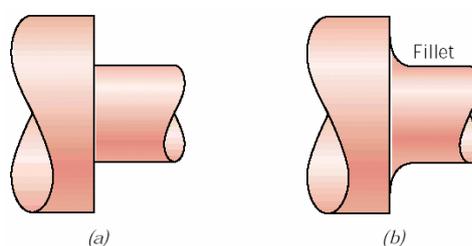


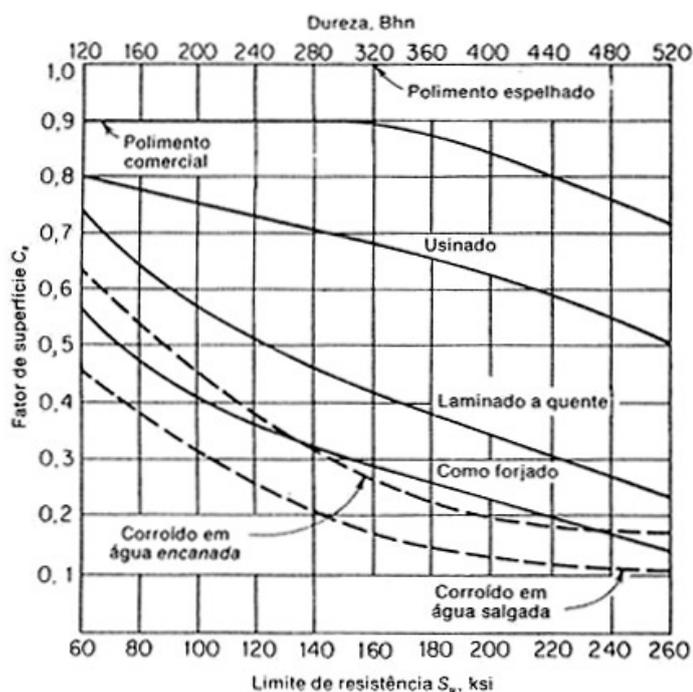
Figura 12 - Nucleação de fadiga, intrusões e extrusões na superfície.

As trincas associadas com falhas por fadiga quase sempre se iniciam (nucleiam) na superfície em algum ponto concentrador de tensões como cantos vivos e riscos superficiais. Em materiais de alta resistência e sujeitos a carregamentos críticos, texturas devem ser aplicadas cautelosamente, pois qualquer entalhe ou descontinuidade geométrica pode atuar como um fator de concentração de tensões e sítio para iniciação de uma trinca de fadiga. Quanto menor o raio de curvatura, mais severa será a concentração de tensões. A probabilidade de falhas por fadiga pode ser reduzida evitando essas irregularidades estruturais ou então efetuando alterações no projeto de modo a eliminar cantos vivos (entalhes) através de uma suavização do mesmo (Figura 13).



**Figura 13 - Utilização de raios ao invés de entalhes para minimizar a fadiga.**

A rugosidade influencia bastante o desempenho em fadiga de determinada peça, assim, o acabamento superficial é um fator determinante para sua performance. Segundo González (1998), eixos ou pontas de eixo requerem acabamentos lisos em seus pontos críticos e em alguns casos precisam ser polidos por rolagem para torná-los mais resistentes. Segundo Strohaecker (2003), um dos métodos mais eficazes para se aumentar o desempenho em relação à fadiga consiste na imposição de tensões residuais compressivas numa camada superficial externa fina. Assim, uma tensão de tração superficial de origem externa será parcialmente anulada, reduzindo a probabilidade de formação de uma trinca. Tensões residuais de compressão são comumente introduzidas mecanicamente através de deformações plásticas localizadas na região da superfície externa. Em um processo conhecido como jateamento (*shot peening*), partículas pequenas e duras são projetadas com velocidades elevadas contra a superfície a ser tratada. A Figura 14 indica o quanto a rugosidade superficial, caracterizada pelos diversos processos de fabricação, influencia o comportamento em fadiga de materiais. Na referida figura, o fator de superfície é um coeficiente que multiplica o limite de resistência à fadiga, ou seja, quanto maior este fator, maior a resistência à fadiga da peça.

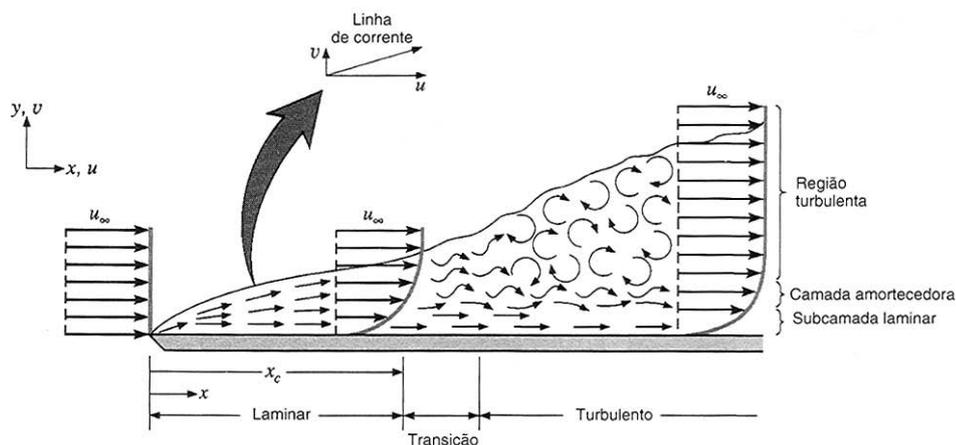


**Figura 14 - Fator de redução do limite de fadiga devido a vários tratamentos superficiais.**  
**Fonte: Strohaecker (2003).**

De acordo com Strohaecker (2003), a corrosão afeta o desempenho em fadiga, diminuindo o limite de fadiga da peça, conforme também pode ser na Figura 14. O fenômeno da corrosão pode ser caracterizado como a destruição do metal através de uma ação mecânica, química ou eletroquímica, que, uma vez iniciada, tende a continuar com progressiva intensidade, levando a rápida deterioração do material. Em alguns casos, a própria película formada por reações de oxidação, age como uma camada protetora, retardando o processo corrosivo. Especificamente nos metais, a formação desta película de óxido do próprio metal, que, por si só, não é prejudicial ao metal de base, a menos que sua continuidade superficial seja alterada ou rompida por agentes mecânicos, físicos ou químicos, protege o substrato e impede a progressão do efeito corrosivo destrutivo [Gomes, 2005]. A rugosidade superficial facilita a adesão de partículas na superfície da peça, o que pode ser prejudicial por acelerar a corrosão, ou benéfico por permitir uma melhor adesão de películas protetoras, sejam do próprio metal oxidado, ou intencionalmente depositadas para inibir a corrosão. Por outro lado, a rugosidade da superfície pode aumentar sua área de contato com o meio e assim influenciar significativamente o grau de resistência à corrosão. González (1998) coloca que, no que diz respeito à corrosão, superfícies com um acabamento superficial esmerado retêm quantidade menor de líquidos ou vapores corrosivos, tornando-as mais resistentes à ação corrosiva.

### 1.2.5. Escoamento de Fluidos

Existem basicamente dois tipos de escoamento de fluidos: o laminar e o turbulento. Segundo Shames (1995), o escoamento laminar é uma configuração ordenada, onde as camadas do fluido são consideradas deslizando umas sobre as outras, enquanto que o escoamento turbulento apresenta flutuações irregulares, podendo ser considerado como a superposição de um escoamento aleatório sobre um escoamento ordenado. Incropera & DeWitt (1998) afirmam que pequenas perturbações nas linhas de corrente de um escoamento laminar podem acabar levando a condições de turbulência. Essas perturbações podem ter origem na corrente livre ou ser induzidas pela rugosidade da superfície. O início da turbulência depende do fato de essas perturbações serem amplificadas ou atenuadas na direção do escoamento do fluido, o que, por sua vez, depende da razão entre as forças de inércia e as forças viscosas (o número de Reynolds). Se o número de Reynolds for pequeno, as forças de inércia são pequenas em relação às forças viscosas e as perturbações tendem a ser dissipadas mantendo o escoamento em regime laminar. Para um número de Reynolds alto, as forças de inércia são suficientemente elevadas para amplificar as perturbações e ocorre a transição para o regime turbulento. A Figura 15 apresenta este comportamento para uma placa plana. Cabe salientar que o número de Reynolds é diretamente proporcional à velocidade do fluido e ao comprimento da placa.



**Figura 15 - Escoamento laminar e turbulento sobre uma placa plana.**

**Fonte: Incropera & DeWitt (1998).**

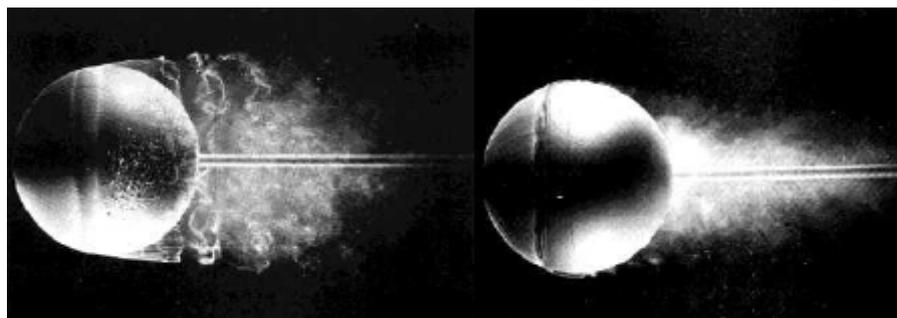
Quando as partículas de um fluido em escoamento entram em contato com uma superfície parada, elas passam a ter velocidade nula e a atuar então no retardamento do movimento das partículas da camada de fluido adjacente. Esse retardamento do movimento

ocorre sucessivamente para cada camada de fluido, até uma determinada distância da superfície, onde o efeito se torna desprezível. Dessa forma, o escoamento do fluido é caracterizado pela existência de duas regiões distintas, uma fina camada de fluido (camada limite), onde os gradientes de velocidade e as tensões cisalhantes são grandes, e uma região exterior à camada limite (corrente livre), onde estes gradientes e tensões são desprezíveis. Conforme pode ser observado na Figura 15, com o aumento da distância percorrida pelo fluido (tamanho da placa), os efeitos da viscosidade penetram cada vez mais na corrente livre, e a camada limite aumenta [Incropera & DeWitt, 1998].

Considerando superfícies em movimento, por exemplo uma bola, Rubini & Aguiar (2004) colocam que a camada limite é uma região que tende a se mover junto com a superfície. Para os autores, isso explica porque as pás de um ventilador ficam sujas, pois as partículas de poeira acumuladas na superfície estão dentro da camada limite, onde não há vento para varrê-las. Uma superfície, ao deslocar-se em um fluido (gás ou líquido), levando de arrasto consigo a camada limite gasta maior quantidade de energia. Segundo França (2002) o arrasto depende da forma e da rugosidade da superfície. Assim, a utilização de texturas superficiais permite alterações consideráveis no que diz respeito à resistência devido ao arrasto, conforme será abordado a seguir.

Para baixos números de Reynolds (menores velocidades e/ou menores diâmetros), a camada limite é laminar e envolve completamente a bola, já para Reynolds um pouco maiores, a camada limite separa-se da esfera na parte posterior. A separação se deve ao fato de que as partículas de fluido que se chocam com a superfície frontal da esfera são levadas ao repouso, com um conseqüente aumento de pressão. A partir deste ponto, o fluido avança para as próximas regiões de menor pressão (gradiente de pressão favorável) e a camada limite desenvolve-se até o momento em que a pressão atinge um valor mínimo. Na parte traseira da esfera o fluxo ocorre com um gradiente de pressão desfavorável e o fluido não tendo energia suficiente para vencer a pressão crescente desacelera, podendo parar e inverter sua direção formando vórtices e se afastando da superfície. As partículas que se afastam da superfície formam, na parte posterior da esfera, uma chamada esteira, a qual contribui para a força de arrasto [Shames, 1995]. Assim, ocorre uma diminuição significativa da pressão na parte de trás da esfera, os efeitos inerciais passam a dominar e há uma tendência de aumentar o arrasto. Como já exposto, com o suficiente aumento do número de Reynolds (maiores velocidades e/ou maiores diâmetros), o escoamento torna-se turbulento. A turbulência permite que a

camada limite resista melhor à tendência de separação, e assim o ponto de descolamento move-se mais para trás da esfera, diminuindo a área da esteira. A contração da esteira reduz a área da esfera submetida a baixas pressões, causando uma diminuição da resistência do ar. Este fenômeno é conhecido como crise do arrasto e pode ser observado na Figura 16 [Rubini & Aguiar, 2004].



**Figura 16 - Separação da camada limite em uma esfera; (a) laminar e (b) turbulenta. Fonte: Rubini & Aguiar (2004).**

Segundo Rubini & Aguiar (2004), a textura da superfície também afeta o escoamento na camada limite. Uma esfera rugosa irá sofrer a crise em um número de Reynolds inferior ao de uma esfera lisa. A rugosidade precipita a turbulência na camada limite e, conseqüentemente, diminui a resistência do ar a altas velocidades. Parece estranho que uma bola áspera ofereça menos resistência ao ar do que uma lisa, mas é exatamente o que acontece. Por exemplo, as bolas de golfe têm buracos cavados por toda a sua superfície, pois isto permite que elas sejam arremessadas a maiores distâncias. Atualmente até algumas bolas de futebol vêm apresentando texturas similares às bolas de golfe (Figura 17).



**Figura 17 - Bolas texturizadas; (a) golfe e (b) futebol. Fonte: Rubini & Aguiar (2004).**

Scott (2005) reporta que texturas vêm sendo empregadas em aviões, especialmente nas asas, visando criar o mesmo efeito das reentrâncias nas bolas de golfe. Neste caso o objetivo é criar a turbulência para retardar a separação da camada limite e aumentar a sustentação do avião. Ainda em referência à bola de golfe, Sharkoon (2005) apresenta um ventilador com esta textura na superfície da hélice (Figura 18). Neste caso a textura fornece um maior fluxo de ar, tornando o ventilador mais eficiente a menores velocidades de rotação, conseqüentemente, ou seja, menor consumo de energia e maior capacidade de arrefecimento. A textura também permite uma operação com menor vibração e menor ruído sonoro.



**Figura 18 - Ventilador com hélice texturizada. Fonte: Sharkoon (2005).**

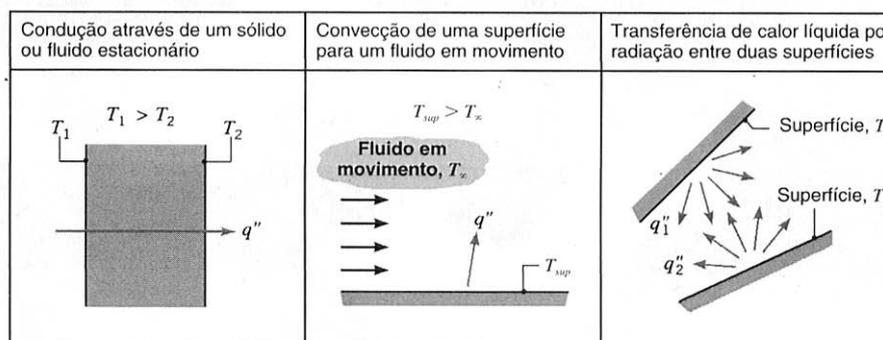
A possibilidade de aplicação de texturas com vistas ao melhor escoamento de fluidos também é uma realidade no atletismo. Knobel (2004) afirma que o limite físico dos atletas de grande porte está sendo atingido e que nos últimos anos eles têm se beneficiado de incríveis melhorias tecnológicas para continuar batendo recordes. Roupas com texturas especiais, por exemplo para natação e ciclismo, vêm sendo desenvolvidas com vistas à redução do atrito do corpo com a água. Apesar de esse atrito superficial ser relativamente pequeno em comparação com as demais forças contrárias ao movimento do nadador na água, ele pode provocar atrasos de alguns centésimos de segundos, cruciais para uma medalha ou recorde. Segundo Cohen (2001), os fabricantes de maiôs combatem o atrito com um traje mais hidrodinâmico, com pequenas estruturas em forma de V, inspirado na pele de tubarão. Minúsculos sulcos no tecido permitem que a água passe pelo corpo mais livremente. O fluxo da água é direcionado sobre o corpo, reduzindo o arrasto e a turbulência na piscina. Na realidade a textura da pele do tubarão muda conforme a região do corpo para poder acoplar o fluxo de água às diferentes

formas de sua anatomia; isso já está presente nos novos trajes, reduzindo em torno de 4% o atrito superficial, e inclusive varia conforme o sexo do nadador e a modalidade de nado escolhida [Knobel, 2004].

O escoamento de fluidos sobre superfícies é particularmente importante em aplicações que envolvam transferência de calor. O tipo de escoamento do fluido exerce grande importância na remoção de calor por convecção.

### 1.2.6. Transferência de Calor

Segundo Incropera & DeWitt (1998) transferência de calor, ou simplesmente calor, é a energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura. Sempre que existir uma diferença de temperatura em um meio ou entre meios diferentes, haverá, necessariamente, transferência de calor. No desenvolvimento de um produto em que é importante o comportamento térmico, devem-se considerar três modos distintos de transferência de calor: condução, convecção e radiação térmica (Figura 19).



**Figura 19 - Modos de transferência de calor: condução, convecção e radiação.**  
**Fonte: Incropera & DeWitt (1998).**

A condução ocorre quando existe um gradiente de temperatura em um meio estacionário que pode ser um sólido ou um fluido. Neste modo há troca de energia cinética entre as moléculas do meio, devido às vibrações e colisões entre elas. A condução é importante nos casos onde ocorre contato físico direto entre a superfície e o usuário. O modo de transferência por convecção ocorre entre uma superfície e um fluido (líquido ou gás) em movimento, quando eles se encontram em temperaturas diferentes. A convecção é composta pela transferência de energia devido ao movimento molecular aleatório (difusão) e ao

movimento global do fluido. Este movimento global permite o transporte da energia de ou para pontos mais afastados do meio fluido. A radiação térmica é a energia emitida, através de ondas eletromagnéticas (fótons), por toda superfície que esteja a uma temperatura absoluta não-nula. Normalmente é estudada a radiação emitida por sólidos, no entanto, as emissões também ocorrem a partir de gases e líquidos. A transferência de calor por radiação não necessita de um meio material e, de fato, ocorre mais eficientemente no vácuo [Incropera & DeWitt, 1998]. A textura superficial influencia direta ou indiretamente nos três modos de transferência de calor, ou seja, tanto na condução, quanto na convecção e na radiação.

#### a) Influência na Condução

Em sistemas compostos de mais de um componente, ocorre uma queda de temperatura nas interfaces entre os materiais. Esta mudança na temperatura superficial é conhecida como resistência térmica de contato e é atribuída principalmente aos efeitos da rugosidade da superfície. Pontos de contato se entremeiam com falhas que são, na maioria dos casos, preenchidas com ar. Portanto, na prática, a transferência de calor é devida à condução através da área de contato real e à condução e/ou radiação através das falhas (Figura 20). Tipicamente, a área de contato é pequena e, sobretudo no caso de superfícies rugosas, a principal contribuição para a resistência térmica de contato é fornecida pelas falhas. Para sólidos cujas condutividades térmicas são superiores à do fluido presente nas falhas (fluido interfacial), a resistência de contato pode ser reduzida pelo aumento da área dos pontos de contato. Tal aumento pode ser obtido por um acréscimo na pressão de contato e/ou pela redução da rugosidade das superfícies em contato [Incropera & DeWitt, 1998]. González (1998) mostra esta influência da rugosidade superficial na transmissão de calor por condução entre duas superfícies (Figura 21). A resistência de contato também pode ser reduzida pela seleção de um fluido com elevada condutividade térmica para preencher as falhas (utilizado, por exemplo, em processadores).

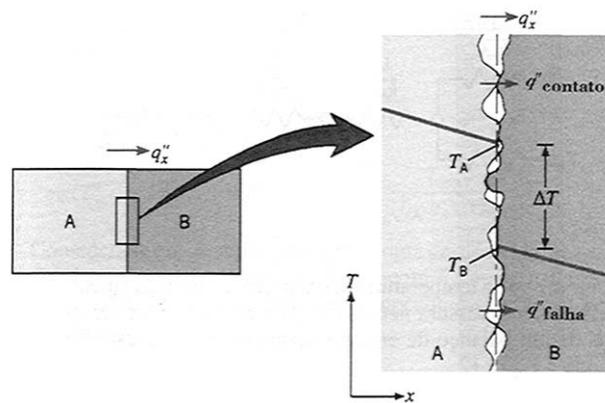


Figura 20 - Resistência térmica de contato. Fonte: Incropera & DeWitt (1998).

Na tentativa de maximizar a transferência de calor, especialmente em aplicações onde se deseja remover calor de uma superfície quente, utilizam-se superfícies estendidas. O termo superfícies estendidas é comumente usado em referência a um sólido onde há transferência de energia por condução no interior de suas fronteiras e por convecção (e/ou radiação) entre suas fronteiras e a vizinhança. As extensões dessas superfícies visam aumentar a área de troca de calor e são comumente chamadas de aletas. Superfícies aletadas são facilmente encontradas em trocadores de calor de processadores, condicionadores de ar, etc. Nestes casos, as aletas são projetadas para máxima performance, no entanto, para aplicações menos extremas, uma superfície texturizada cumpre com a troca calor e ainda provê ao produto melhor aspecto, desempenhando, assim, papel estético-funcional.

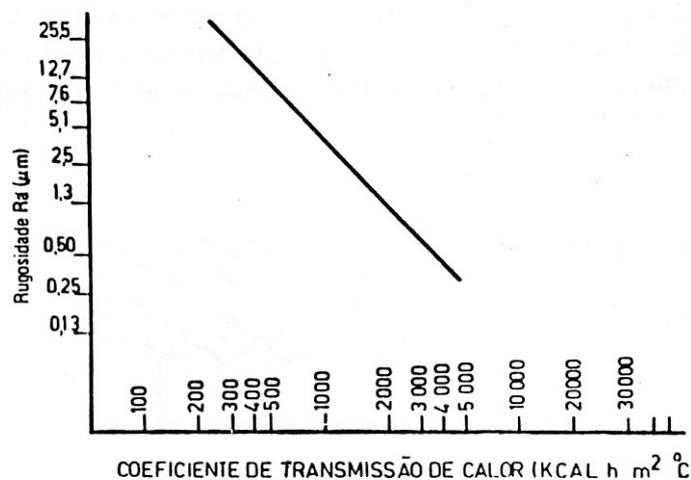
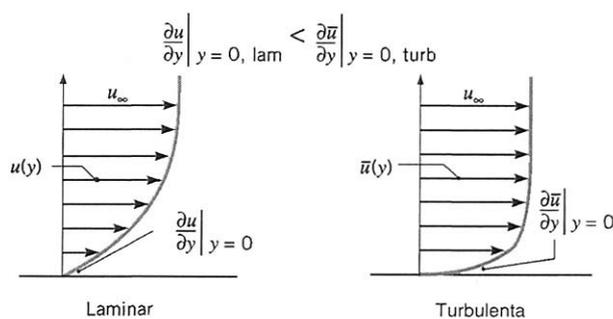


Figura 21 - Rugosidade superficial e transmissão de calor. Fonte: González (1998).

## b) Influência na Convecção

A convecção, condicionada pelo movimento global do fluido, é dependente do tipo de escoamento que ocorre sobre a superfície do material. Conforme já exposto na seção 1.2.5, existem basicamente dois tipos de escoamento de fluidos: o laminar e o turbulento. Incropera & DeWitt (1998) mostram que a melhor mistura associada à condição de turbulência tem o efeito de tornar os perfis de velocidade, temperatura e concentração mais uniformes (Figura 22). Desta forma, os gradientes de temperatura e concentração na superfície, e, portanto, as taxas de transferência por convecção de calor e de massa, são muito maiores em um escoamento turbulento. Normalmente é desejável se ter essas condições de escoamento, entretanto, elas trazem consigo o efeito adverso de aumentar a exigência de potência na bomba ou no compressor / ventilador. A utilização de uma textura adequadamente projetada permite, neste caso, obter uma melhor relação entre o ganho de transferência de calor e a perda de carga, ocasionados pela topografia da superfície (textura).

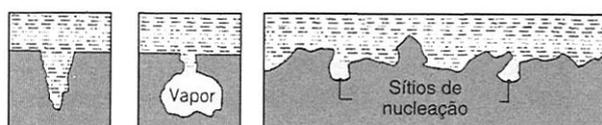


**Figura 22 - Perfis de velocidade para escoamento laminar e turbulento.**  
**Fonte: Incropera & DeWitt (1998).**

Os processos de convecção com mudança de fase no fluido podem fornecer coeficientes de transferência de calor bastante superiores do que os processos convencionais sem mudança de fase. São importantes, em particular, os processos que ocorrem na interface sólido-líquido, como a ebulição e a condensação. Tais processos são considerados tipos do modo de transferência de calor por convecção por envolverem a movimentação do fluido. Nesses casos, os efeitos do calor latente associado à mudança de fase são significativos. Por exemplo, devido à mudança de fase, a transferência de calor para ou a partir do fluido pode ocorrer sem modificar a sua temperatura.

Segundo Incropera & DeWitt, 1998, a textura superficial (introdução de ranhuras, entalhes, por usinagem ou jateamento) pode causar um grande aumento no fluxo térmico no

regime de ebulição nucleada. Uma superfície rugosa possui inúmeras cavidades que servem para aprisionar vapor, fornecendo sítios maiores e em maior quantidade para o crescimento das bolhas (Figura 23). Superfícies com cavidades reentrantes, formadas mecanicamente ou por usinagem, vêm sendo desenvolvidas com vista a assegurar maior aprisionamento do vapor e aumento na taxa de transferência de calor superior a uma ordem de grandeza.



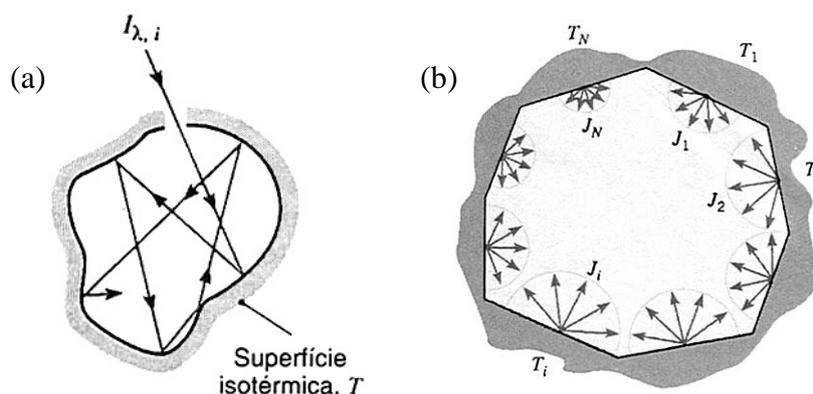
**Figura 23 - Formação de sítios de nucleação. Fonte: Incropera & DeWitt (1998).**

### c) Influência na Radiação

A radiação térmica compreende uma faixa de comprimentos de onda da ordem de 0,1 a 100  $\mu\text{m}$ , o que abrange parte do espectro ultravioleta e todo o espectro de luz visível e infravermelho. Todos os objetos emitem (e trocam) radiação, assim, para efeito de troca de calor, considera-se a taxa líquida de transferência de calor por radiação. A emissão é um fenômeno volumétrico, no entanto, como na maioria dos sólidos e líquidos a radiação emitida pelas moléculas localizadas no interior do volume é em grande parte absorvida pelas moléculas a elas adjacentes, a radiação pode ser tratada como um fenômeno de superfície [Incropera & DeWitt, 1998].

A radiação emitida por uma superfície se propaga em todas as direções possíveis. Também, a radiação que incide sobre uma superfície pode vir de diferentes direções e a maneira pela qual a superfície responde a essa radiação depende da direção. É neste contexto que a textura superficial ganha importância, pois ela permite a variação de direções na superfície de um produto. Assim, a texturização influencia na capacidade de absorção e emissão de uma superfície. A Figura 24 (a) mostra este efeito em uma superfície interna com temperatura uniforme. Ao considerar as trocas entre duas ou mais superfícies utiliza-se o conceito de fator de forma. Neste caso, entende-se por fator de forma uma relação geométrica que descreve a fração de energia que deixa uma superfície e chega a uma segunda superfície [Incropera & DeWitt, 1998]. Ele leva em consideração a distância entre cada superfície e sua orientação no espaço com relação à outra, computada como o ângulo entre cada vetor normal

às superfícies e o vetor desenhado do centro de uma superfície para o centro de outra superfície.



**Figura 24 - Radiação térmica; (a) absorção em uma cavidade com temperatura uniforme; (b) emissão em diversas superfícies. Fonte: Incropera & DeWitt (1998).**

Uma superfície pode ser dividida em um conjunto de superfícies menores com diferentes inclinações, como pode ser observado na Figura 24 (b), e, deste modo, a transferência total de calor por radiação é o somatório da contribuição de cada elemento da superfície. Na prática isso significa que a transmissão de calor por radiação depende do quanto uma superfície “enxerga” à outra ou mesmo a si própria. Assim, também no que diz respeito à radiação térmica a texturização mostra-se importante, uma vez que cada componente da textura será uma destas superfícies capazes de aumentar ou diminuir a absorção de calor, bem como de direcionar a emissão de calor da superfície de um produto.

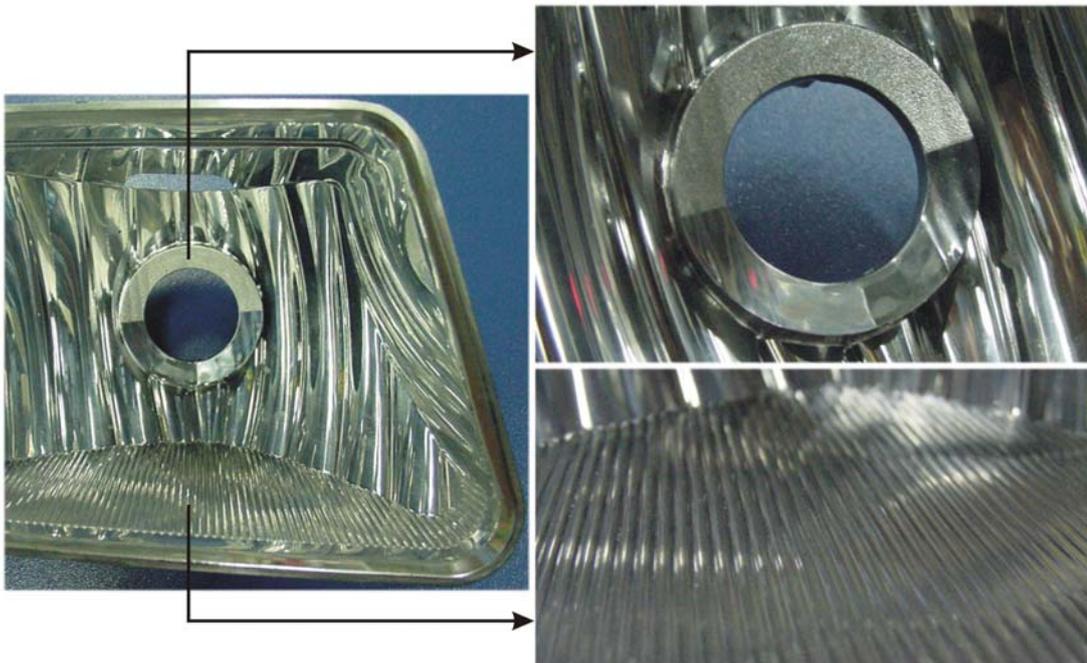
O comportamento da superfície de um produto em relação à transferência de calor por radiação é equivalente para a reflexão da luz visível. Uma vez que a luz visível pertence ao espectro da radiação térmica, as texturas que alteram as propriedades de radiação da superfície alteram também suas propriedades óticas.

### 1.2.7. Propriedades Óticas

Segundo González (1998) a especularidade é muito importante quando se necessita refletir, por exemplo, um raio Laser de medição, pois com uma superfície metálica lapidada pode-se obter um espelho refletor sem os inconvenientes de um similar de vidro que tem uma

espessura (material refringente) e uma camada de material refletor aderida, causando erros por refração. Dias (2002) afirma que na ausência de rugosidade superficial, os modos de reflexão e transmissão de uma onda seriam uma simples propagação de planos de onda em direção oposta. No caso ideal são bem conhecidos os coeficientes de reflexão e transmissão para incidência normal sobre uma interface lisa. Porém, na presença de rugosidade superficial, as ondas tanto refletidas como transmitidas tornam-se complexos modos de espalhamento, possuindo desta forma coeficientes de reflexão e transmissão modificados.

Para uma perfeita reflexão da luz a superfície deve ser a mais lisa possível, polida e com rugosidade extremamente baixa, como no caso de espelhos. No entanto, para aplicações onde deseja-se refletir a luz para diferentes direções, as texturas tornam-se importantes. Um exemplo da aplicação de texturas em superfícies especulares são os faróis e sinaleiras de automóveis, onde podem ser texturizadas superfícies transparentes e espelhadas (Figura 25).



**Figura 25 - Superfícies texturizadas com aplicações óticas,**

### 1.3. Normas Técnicas para Rugosidade

Para a determinação de parâmetros quantitativos de rugosidade, existem normas que estabelecem definições e procedimentos para a medição de superfícies. Segundo Pessoa (2001), a *International Organization for Standardization* (ISO) é uma organização, sediada em Genebra (Suíça), reconhecida e aceita internacionalmente no estabelecimento de normas técnicas desenvolvidas e avaliadas no âmbito de competência de suas delegações nacionais. O Instituto Brasileiro de Normas Técnicas (INMETRO) representa o Comitê Brasileiro de Certificação (CBC) na ISO e, assim possui, além das responsabilidades atribuídas a seus membros, a de divulgar, avaliar e preservar a aceitação, o uso e integridade da marca ISO. A Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) é o organismo de certificação brasileiro, credenciado pelo INMETRO, para atuação em certificação de sistemas de garantia de qualidade no país e também de produtos. A ABNT atua desde 1950 no desenvolvimento de programas de certificação apropriados a diversas áreas da sociedade brasileira, em conformidade com os modelos internacionalmente aceitos e estabelecidos no âmbito do Comitê de Avaliação da Conformidade (CASCO) da ISO [Pessoa, 2001]. González (1998) apresenta, em seu trabalho, como principais fontes de normas de rugosidade a *International Organization for Standardization* (ISO), o *Deutsches Institut für Normung* (DIN) e a *Japanese Industrial Standards* (JIS).

Em 1995 a ISO implementou as Especificações Geométricas do Produto (GPS) e lançou um Relatório Técnico (*Technical Report*) visando prover informações para orientar o uso destas normas. O Relatório Técnico ISO/TR 14638:1995, intitulado *Geometrical product specification (GPS) – Masterplan*, dá uma visão geral da normalização internacional de Especificações Geométricas do Produto, explica o conceito de GPS e fornece um planejamento incluindo normas existentes e futuras normas. Durakbasa (2001) explica que as Especificações Geométricas do Produto são baseadas em regras e métodos matemáticos, consideração da macro e micro geometria, possibilidade de mensurar quantidades e especialmente tolerâncias, avaliação da incerteza, etc. Bennich (2003) traz uma definição mais completa: “as normas no campo das Especificações Geométricas do Produto são referentes a especificações de macro e micro geometria abrangendo a tolerância dimensional e geométrica, propriedades da superfície e os princípios de verificação relacionados, equipamentos de medição e requisitos de calibração incluindo a incerteza das medidas

dimensionais e geométricas”. Este último autor ainda acrescenta que a normalização inclui o leiaute básico e a explanação de símbolos e indicações em desenhos técnicos.

No que diz respeito a desenhos técnicos, foi formulada a ISO 1302:2002 intitulada *Geometrical Product Specifications (GPS) - Indication of surface texture in technical product documentation*. No Brasil ainda é vigente a norma de 1984, ABNT NBR 8404 - Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos, a qual fixa símbolos e indicações complementares para a identificação do estado de superfície em desenhos técnicos.

A partir do ISO/TR 14638:1995 foram elaboradas várias normas ISO sobre GPS e as associações nacionais de normas técnicas (ABNT, DIN, JIS, etc.) aderiram a elas. A principal norma sobre os parâmetros de rugosidade é a ISO 4287:1997. No Brasil, existe a norma equivalente ABNT NBR ISO 4287:2002, intitulada “Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade”. Esta norma especifica termos, definições e parâmetros para a determinação do estado da superfície (rugosidade, ondulação e perfil primário) pelo método do levantamento do perfil.

Cabe salientar que devido às normas GPS serem recentes, principalmente no Brasil, ainda está ocorrendo seu processo de difusão e deve-se atentar para não incorrer em enganos normativos. Percebe-se que modernos equipamentos para medição de parâmetros de rugosidade, inclusive com catálogos de datas posteriores a 2002, trazem inscrições do tipo “de acordo com a DIN 4772” ou “de acordo com a DIN 4768”, porém, estas normas já foram canceladas e substituídas por normas GPS. Por exemplo, uma busca no site da *Deutsches Institut für Normung* (DIN), realizada em junho de 2006, retornou apenas a norma D 4772, de 1997, da ASTM (*American Society for Testing and Materials*). Esta norma apresenta um método de teste para absorção de água e, portanto, não diz respeito ao assunto em questão.

No Brasil a primeira norma sobre rugosidade foi a ABNT NB 93, de 1964, a qual foi substituída, em 1988, pela NBR 6405 - Rugosidade das superfícies que, por sua vez, também foi cancelada e substituída por uma norma GPS. Salienta-se também aqui a necessidade de atualização quanto às normas, pois atualmente a norma NBR ISO 6405 trata de máquinas rodoviárias e, como já apresentado, a norma vigente para rugosidade no Brasil é a NBR ISO 4287:2002. A própria ABNT emite uma nota na NBR ISO 4287 ressaltando essa mudança nas normas: “Na ISO 4287-1:1984, o símbolo Rz era usado para indicar a altura das

irregularidades sobre dez pontos. Em alguns países existem instrumentos para medição da rugosidade de superfícies em uso que medem o parâmetro Rz antigo. Por isso deve-se tomar cuidado ao usar documentos técnicos e desenhos existentes, porque os resultados obtidos com diferentes tipos de instrumentos apresentam diferenças nem sempre desprezíveis”. A Tabela 1 apresenta as principais normas vigentes (em junho de 2006) referentes à rugosidade superficial.

**Tabela 1 - Normas vigentes sobre rugosidade superficial (junho de 2006).**

<b>GPS - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade.</b>			
<b>Internacional</b>	<b>Brasileira</b>	<b>Alemã</b>	<b>Japonesa</b>
ISO 4287:1997	ABNT NBR ISO 4287:2002	DIN EN ISO 4287:1998	JIS B 0601:2001
<b>Normas complementares à anterior (referências normativas).</b>			
<b>Internacional</b>	<b>Brasileira</b>	<b>Alemã</b>	<b>Japonesa</b>
ISO 3274:1996	Em tramitação (Projeto nº. 04:005.06-022)	DIN EN ISO 3274:1998	JIS B 0651:2001
ISO 4288:1996	-	DIN EN ISO 4288:1998	JIS B 0633:2001
ISO 11562:1996	-	DIN EN ISO 11562:1988	JIS B 0632:2001
<b>Indicação do estado de superfícies em desenhos técnicos.</b>			
<b>Internacional</b>	<b>Brasileira</b>	<b>Alemã</b>	<b>Japonesa</b>
ISO 1302:2002	ABNT NBR 8404	DIN EN ISO 1302	JIS B 0031:2003

A ABNT NBR ISO 4287 apresenta três referências normativas, as quais constituem prescrições para a referida norma:

a) ISO 3274:1996. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments*. Descreve perfis e a estrutura geral de instrumentos de contato (stylus) para a medição de rugosidade e ondulação superficial. Especifica as propriedades do instrumento que influenciam a avaliação do perfil. Substitui a primeira edição da ISO 3274:1975 e a ISO 1880:1979.

b) ISO 4288:1996. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture*. Especifica

procedimentos para a comparação de valores medidos com os limites de tolerância para os parâmetros de textura superficial definidos nas ISO 4287, ISO 12085, ISO 13565-2 e ISO 13565-3. Também fornece procedimentos para a medição de parâmetros do perfil de rugosidade utilizando instrumentos de contato (*stylus*) de acordo com a ISO 3274. Substitui a primeira edição.

c) ISO 11562:1996. *Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Metrological characteristics of phase correct filters*. Descreve as características metrológicas de filtros para correção de fase dos perfis de superfícies medidos. Em particular especifica como separa os comprimentos de onda longos e curtos constituintes de um perfil de superfície.

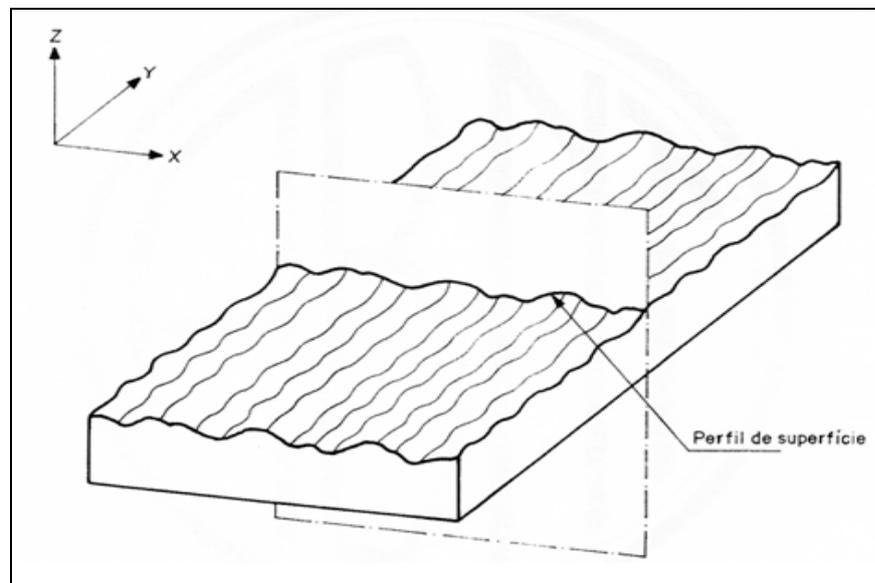
A ABNT ainda não regulamentou normas equivalentes às ISO 3274, ISO 4288 e ISO 11562. Apenas para a primeira existe um projeto de regulamentação como NBR ISO 3274, mas sem data prevista para implementação. A recomendação citada na NBR ISO 4287 é para que, neste caso, sejam seguidas as referidas normas ISO mais atualizadas.

#### **1.4. Parâmetros de Rugosidade**

Superfícies reais, por mais perfeitas que sejam, apresentam particularidades que são uma herança do método empregado em sua obtenção, por exemplo: torneamento, fresamento, retífica, brunimento, lapidação, etc. As superfícies assim produzidas se apresentam como um conjunto de irregularidades, com espaçamento regular ou irregular e que tendem a formar um padrão ou textura característicos em sua extensão. A rugosidade é formada por sulcos ou marcas deixadas pelo agente que atacou a superfície no processo de usinagem (ferramenta, rebolo, partículas abrasivas, ação química, etc.) e se encontra superposta a um perfil de ondulação provocado por deficiência nos movimentos da máquina, deformação no tratamento térmico, tensões residuais de forjamento ou fundição, etc. [González, 1998]. Segundo Euitiz (2002) o acabamento superficial de pode apresentar erros de forma macrogeométricos e microgeométricos. A rugosidade superficial é o conjunto de irregularidades da superfície real, definidas convencionalmente em uma secção onde os erros de forma e as ondulações tenham sido eliminados. Assim, antes de estudar a rugosidade propriamente dita, algumas definições precisam ser exploradas.

A superfície, como já definida, caracteriza-se pela fronteira de um material com o com o ambiente. De acordo com Silva (2002) e González (1998), ela pode ser dividida em superfície geométrica, real e efetiva (Tabela 2). A superfície geométrica é aquela especificada nos projetos, de geometria e topografia ideal, mas os desvios gerados no processo de fabricação não permitem que seja obtida de forma absoluta. A superfície real é aquela que de fato é obtida após o último processo de fabricação. Já a superfície efetiva é a superfície que de fato foi medida, a partir da superfície real, com as limitações da utilizada para tanto.

Segundo Silva (2002), embora seja possível reproduzir tridimensionalmente uma porção da superfície, o mais comum é encontrar representações em duas dimensões, denominadas de perfis. Na verdade, para a maioria dos instrumentos de medição da textura, a representação tridimensional é obtida através de alinhamentos de um número finito de perfis paralelos e adjacentes. Quanto maior o número desses perfis, melhor será a representação tridimensional da superfície. O perfil é a intersecção da superfície com um plano perpendicular a ela (Figura 26). O perfil também pode ser classificado como geométrico, real ou efetivo (Figura 27), dependendo da superfície da qual ele foi obtido. A Tabela 2 apresenta as definições das superfícies e dos perfis obtidos a partir delas.



**Figura 26 - Perfil de superfície. Fonte: NBR ISO 4287 (2002).**

Tabela 2 - Superfície (geométrica, real e efetiva) e perfil obtido através dela.

	<b>Geométrico(a)</b>	<b>Real</b>	<b>Efetivo(a)</b>
<b>Superfície</b>	Superfície ideal, na qual não existem erros de forma e acabamento, por definição perfeita. Na realidade não existe, é apenas uma referência. Por exemplo, superfícies modeladas em CAD.	Superfície que limita o corpo e o separa do meio que o envolve. É gerada pelo método empregado em sua produção. Trata-se da superfície fabricada, a qual pode ser vista e tocada.	Superfície avaliada pela técnica de medição, com forma aproximada da superfície real de um corpo. Porém é relativa ao sistema de medição, ou seja, é a superfície apresentada pelo instrumento.
<b>Perfil</b>	Intersecção da superfície geométrica com um plano perpendicular. Por exemplo, uma superfície plana perfeita cortada por um plano originará um perfil geométrico que será uma linha reta.	Intersecção da superfície real com um plano perpendicular. Neste caso o plano cortará a superfície deixada pelo método de fabricação e originará uma linha irregular.	Imagem aproximada do perfil real obtido por um meio de avaliação ou medição. Por exemplo, o perfil apresentado por um registrador gráfico, sem qualquer filtragem.

Fonte: adaptado de González (1998).

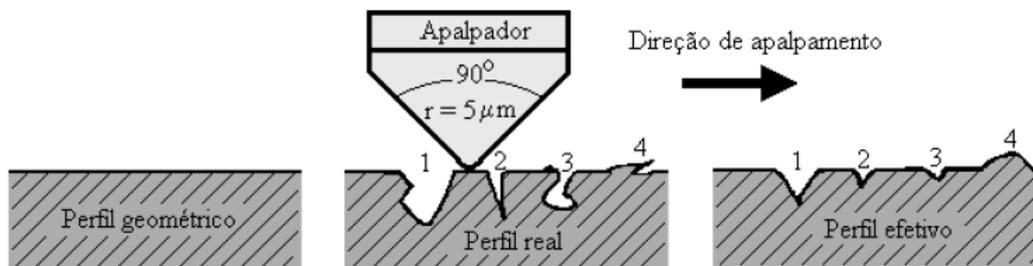


Figura 27 - Perfil geométrico, real e efetivo. Fonte: Silva (2002).

No perfil real podem ser encontrados seis tipos diferentes de desvios, que são gerados em função de causas bem específicas dentro do processo de confecção da superfície e que são caracterizados pelas suas formas geométricas (Tabela 3). Eles são classificados por ordens e encontram-se ilustrados na Figura 28 [Silva, 2002]. Segundo Bet (1999), cada desvio possui características distintas, mas não se encontram nitidamente separados, sendo que eles se sobrepõem formando o perfil completo.

Tabela 3 - Desvios de superfície. Fonte: adaptado de Silva (2002).

Ordem	Tipos de desvio	Causas geradoras dos desvios de superfície
1ª (Forma)	Planicidade, cilindricidade, retilinearidade	Defeitos nas guias das máquinas, deformações por flexão da peça, fixação errada da peça, desgaste nas guias da peça.
2ª (Ondulação)	Onda	Fixação excêntrica ou defeito de forma de uma fresa, fixação excêntrica da peça, vibrações da máquina, da ferramenta ou da peça, deflexão da peça durante a usinagem.
3ª (Rugosidade)	Ranhuradas ou raias	Forma da ferramenta, incluindo gumes e raio de quina, avanço ou profundidade de corte.
4ª (Rugosidade)	Estrias, escamas, protuberâncias	Processo de formação do cavaco (cavaco arrancado, cavaco de cisalhamento, gume postiço), deformação do material com jato de areia.
5ª (Rugosidade)	Microestrutura do material	Processo de cristalização, modificação da superfície por ataque químico e corrosão.
6ª	Reticulado cristalino do material	Processo físico e químico da estrutura da matéria, tensões de deslizamento na estrutura reticular do material.

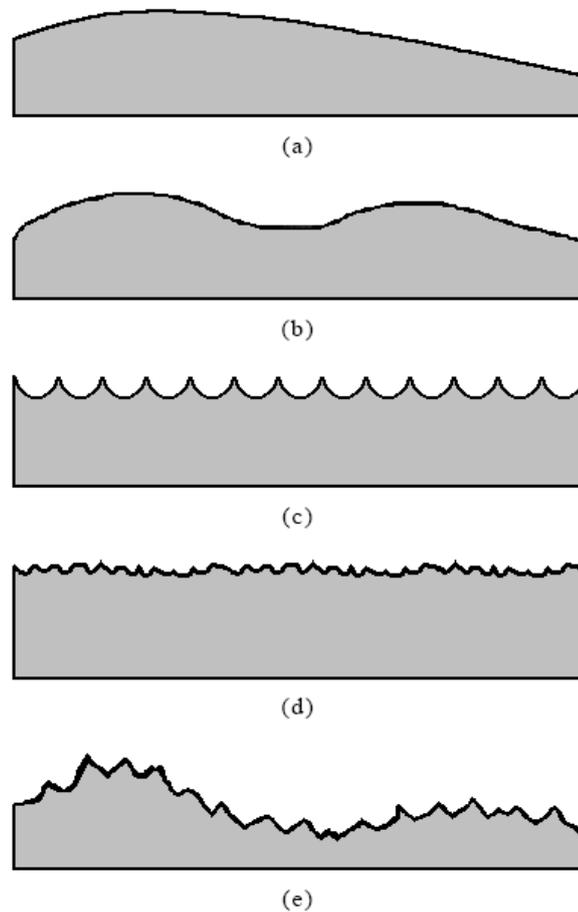


Figura 28 - Desvios de superfície; (a), (b), (c) e (d) 1ª, 2ª, 3ª e 4ª ordens respectivamente; (e) superposição desses desvios. Fonte: Silva (2002).

A abordagem realizada, na prática consiste em separar o perfil da superfície em vários comprimentos de onda (de 1ª a 6ª ordem) e considerá-lo como sendo o resultado da sobreposição destas ondas. Com base nestas definições, a norma ISO 3274 apresenta o conceito de perfil primário, também adotado pela ABNT NBR ISO 4287. Este trata-se do perfil resultante após a remoção da forma nominal (1ª ordem) e da aplicação de um filtro  $\lambda_s$  (remoção da 6ª ordem). A NBR ISO 4287 define filtros para separação dos comprimentos de onda ( $\lambda$ ), conforme Figura 29, enquanto que a ISO 11562 especifica os filtros para separação do perfil em componentes de ondas longas (ondulação) e ondas curtas (rugosidade). O filtro  $\lambda_s$  define a separação entre os componentes da rugosidade e os componentes de onda mais curtos presentes na superfície. O filtro  $\lambda_c$  define a separação entre os componentes da rugosidade e da ondulação. O filtro  $\lambda_f$  define a separação entre os componentes da ondulação e os componentes de ondas mais longas presentes na superfície.

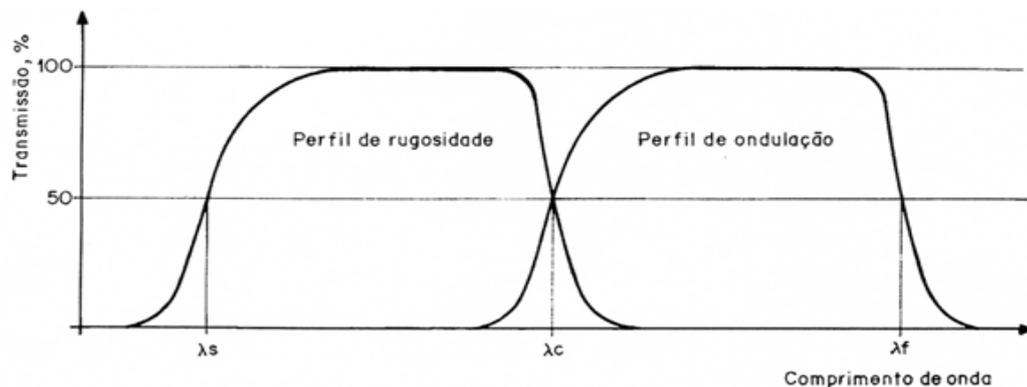


Figura 29 - Filtros para os perfis de rugosidade e ondulação. Fonte: NBR ISO 4287 (2002).

Assim, a NBR ISO 4287 define o perfil de rugosidade como o “perfil derivado do perfil primário pela eliminação dos componentes de comprimento de ondas longas usando filtro de perfil  $\lambda_c$ ”. A Figura 30 representa o algoritmo utilizado no procedimento de filtragem. Mummery (1992) mostra a diferença nos perfis de rugosidade e ondulação de acordo com o comprimento de onda ( $\lambda_c$ ) utilizado no referido filtro (Figura 31).

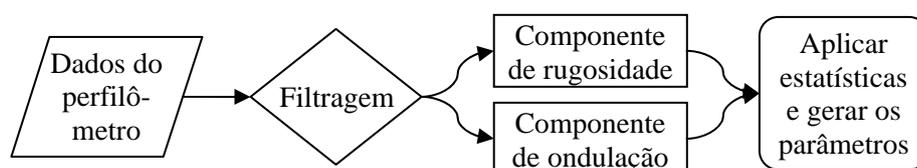
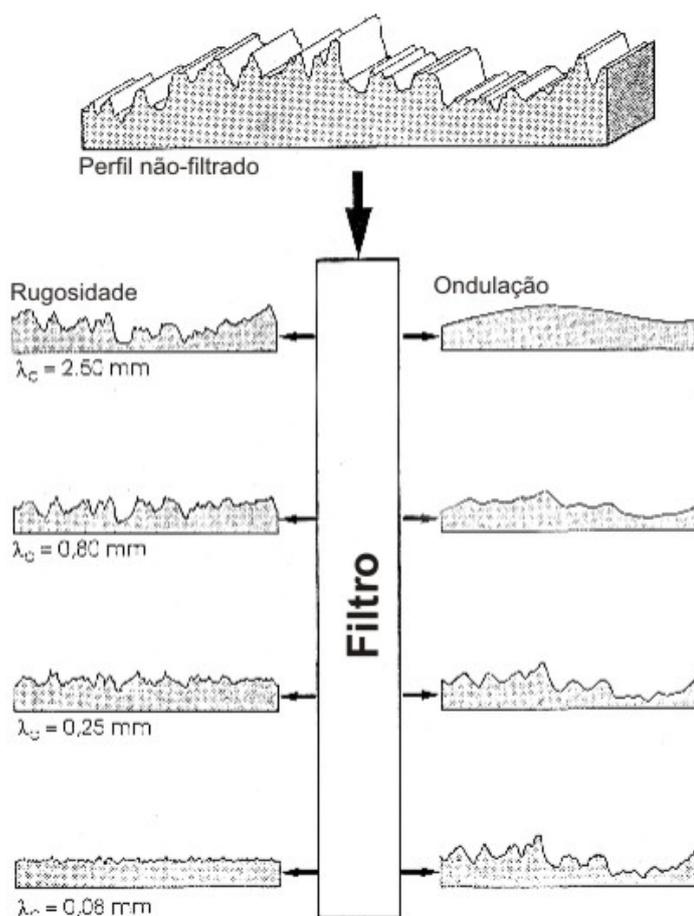


Figura 30 - Algoritmo para o procedimento de filtragem



**Figura 31 - Perfis de rugosidade e ondulação de acordo com o filtro  $\lambda_c$  utilizado.**  
**Fonte: Mummery (1992).**

A NBR ISO 4287 define diversos parâmetros para avaliação dos diferentes perfis de superfície. Os parâmetros geométricos calculados a partir do perfil primário são representados pela letra “P”, os referentes ao perfil de rugosidade pela letra “R” e os referentes ao perfil de ondulação pela letra “W”. Por exemplo, a altura máxima do perfil, representada pela letra “z”, será respectivamente Pz, Rz e Wz. Os parâmetros de rugosidade são medidos como desvios em relação às linhas médias dos perfis. A NBR ISO 4287 define como linha média para o perfil primário a “linha determinada pelo ajuste dos mínimos quadrados à linha da forma nominal do perfil”. Mummery (1992) mostra que para obter o perfil correto de uma superfície plana basta nivelar o perfil através de uma equação polinomial de grau 1 (Equação 1) pelo método dos mínimos quadrados (Figura 32). Para superfícies não planas (cilíndricas, por exemplo), é necessário usar a linha de referência adequada de acordo com o perfil nominal.

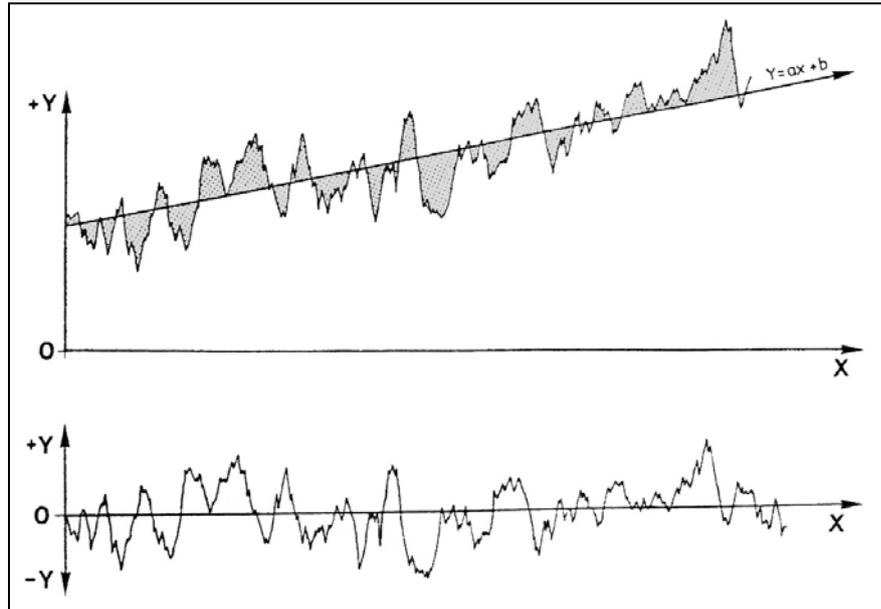


Figura 32 - Perfil medido e perfil nivelado. Fonte: Mummery (1992).

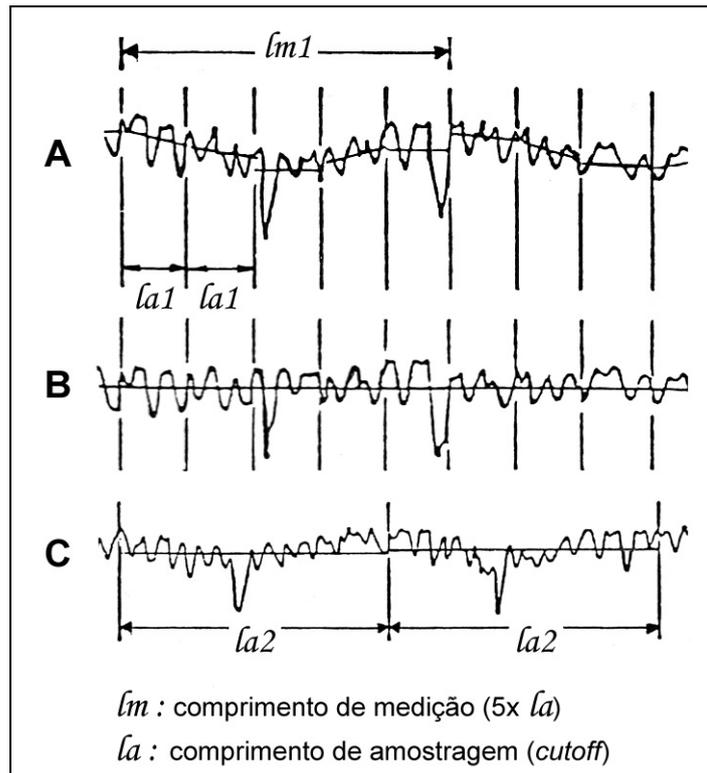
O método dos mínimos quadrados estabelece a linha média a partir da qual o valor da soma dos quadrados das ordenadas é mínimo e também que a soma das áreas do perfil acima da linha média é igual à soma das áreas abaixo da mesma. O método dos mínimos quadrados é calculado através das equações 1, 2 e 3.

$$z = ax + b \quad \text{Equação 1}$$

$$a = \frac{n \cdot \sum (x_i \cdot z_i) - \sum x_i \cdot \sum z_i}{n \cdot \sum (x_i)^2 - (\sum x_i)^2} \quad \text{Equação 2}$$

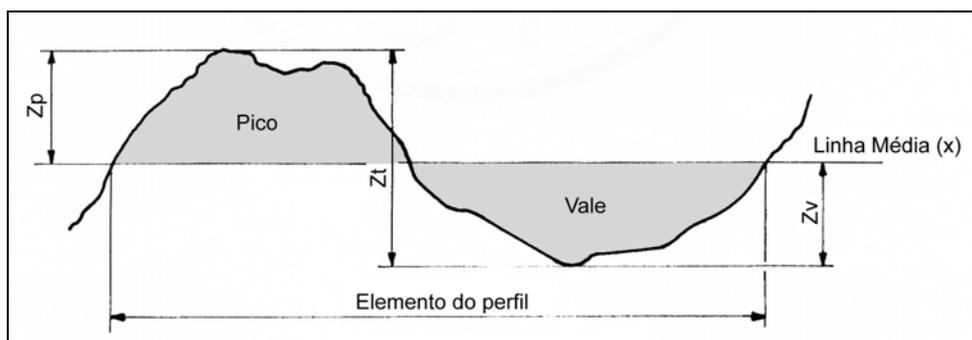
$$b = \frac{\sum z_i}{n} - a \frac{\sum x_i}{n} \quad \text{Equação 3}$$

Os parâmetros geométricos são avaliados por diferentes comprimentos de amostragem. Este comprimento para os parâmetros de rugosidade é numericamente igual ao valor utilizado no filtro  $\lambda c$  e também é conhecido como “*cutoff*”. A norma ISO 4288 define estes comprimentos e recomenda que seja utilizado um comprimento de medição igual a cinco vezes o comprimento de amostragem. Gonzalez (1998) mostra a importância da correta seleção do valor de *cutoff*, a Figura 33 ilustra (a) um perfil primário, (b) o perfil de rugosidade obtido com a total exclusão da ondulação (valor de *cutoff* correto) e (c) o mesmo perfil com eliminação apenas parcial da ondulação (devido a um valor de *cutoff* muito grande).



**Figura 33 - Comprimentos de amostragem; (a) perfil primário, (b) perfil de rugosidade e (c) perfil de rugosidade com ondulação.**

Para avaliação dos parâmetros de rugosidade o perfil 2D pode ser representado em um plano cartesiano onde o eixo  $x$  corresponde a sua linha média e as alturas dos pontos do perfil são representadas em um eixo  $z$ . Assim pode-se representar a altura do perfil em função do comprimento como  $Z(x)$ . Os intervalos de pontos acima da linha média são nomeados picos, sendo a altura máxima de um pico chamada de  $Z_p$ , enquanto que os intervalos de pontos abaixo da linha média são nomeados vales, sendo a profundidade máxima de um vale chamada de  $Z_v$ . A composição de um pico e um vale adjacente é dito um elemento do perfil e sua altura total  $Z_t$  é calculada pela soma da altura do perfil  $Z_p$  com a profundidade do vale  $Z_v$ . A Figura 34 apresenta um elemento do perfil e suas dimensões.



**Figura 34 - Elemento do perfil.**

Gonzalez (1998), citando as normas DIN, apresenta valores normalizados para a indicação dos parâmetros de rugosidade (Tabela 4). Tais valores destinam-se a padronizar e limitar o número de valores a serem utilizados na especificação do grau de rugosidade de uma peça em desenhos técnicos.

**Tabela 4 - Valores normalizados para os parâmetros de rugosidade. Fonte:González (1998).**

Especificação do grau de rugosidade ( $\mu\text{m}$ )					
0,008	0,040	0,20	1,00	5,0	25,0
0,010	0,050	0,25	1,25	6,3	32,0
0,012	0,063	0,32	1,60	8,0	40,0
0,016	0,080	0,40	2,00	10,0	50,0
0,020	0,100	0,50	2,50	12,5	63,0
0,025	0,125	0,63	3,20	16,0	80,0
0,032	0,160	0,80	4,00	20,0	100,0

No Brasil, a norma NBR 8404:1984 especifica que a característica principal, ou seja, o valor do parâmetro Ra pode ser indicado pelos números da classe de rugosidade correspondente. As classes são divididas em 12 grupos de acordo com o acabamento da superfície, conforme Tabela 5.

**Tabela 5 - Números de classe para rugosidade.**

Classe da Rugosidade	Rugosidade Média Ra ( $\mu\text{m}$ )
N 12	50
N 11	25
N 10	12,5
N 9	6,3
N 8	3,2
N 7	1,6
N 6	0,8
N 5	0,4
N 4	0,2
N 3	0,1
N 2	0,05
N 1	0,025

### 1.4.1. Parâmetro Ra - Desvio aritmético médio do perfil de rugosidade

O parâmetro Ra é definido como a média aritmética dos valores absolutos das ordenadas de afastamento,  $Z(x)$ , dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média, dentro de um comprimento de amostragem (*cutoff*). O cálculo do valor de Ra pode ser realizado utilizando a Equação 4.

$$Ra = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \quad \text{Equação 4}$$

Devido a sua facilidade de obtenção o parâmetro Ra é o mais utilizado na indústria, principalmente quando é necessário o controle da rugosidade continuamente nas linhas de produção, em superfícies onde o acabamento apresenta os sulcos de usinagem bem orientados (torneamento, fresagem, etc.) e também nos acabamentos com fins apenas estéticos. A Tabela 6 apresenta as principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Ra.

**Tabela 6 - Principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Ra.**

<b>Vantagens do parâmetro Ra:</b>	<b>Desvantagens do parâmetro Ra:</b>
<p>É o parâmetro de maior utilização no mundo.</p> <p>Pode ser empregado na maioria dos processos de fabricação.</p> <p>Devido a sua ampla aplicação, grande parte dos equipamentos apresentam este parâmetro (analógicos ou digitais).</p> <p>Os riscos superficiais inertes ao processo, não alteram substancialmente o seu valor.</p> <p>Para a maioria das superfícies o valor de rugosidade neste parâmetro está de acordo com a curva de Gauss que caracteriza a distribuição da amplitude.</p>	<p>O valor de Ra em comprimento de amostragem representa a média da rugosidade, por isso, se um pico ou vale não típico aparece na superfície, o valor da média não sofrerá grande alteração, ocultando tal efeito.</p> <p>O valor de Ra não define a forma das irregularidades do perfil, dessa forma poderemos ter um mesmo valor de Ra para superfícies originadas por processos de usinagem diferentes.</p> <p>Nenhuma distinção é feita entre picos e vales.</p> <p>Para alguns processos de fabricação onde há uma frequência muito alta de vales ou picos, como é o caso dos sinterizados, o parâmetro não é adequado já que a distorção provocada pelo filtro eleva o erro até níveis inaceitáveis.</p>

Fonte: adaptado de Gonzalez (1998).

Para efetuar a medição do parâmetro Ra existem duas situações diferentes na seleção do valor de *cutoff*, dependendo do perfil ser periódico ou não periódico. Quando o perfil é periódico o valor de *cutoff* depende da distancia entre os sulcos deixados pelo avanço da ferramenta, por exemplo, no processo de usinagem, conforme Tabela 7.

**Tabela 7 - Valores de *cutoff* para perfis periódicos. Fonte: ISO 4288:1996.**

<b>Distância entre os sulcos (mm)</b>	<b><i>Cutoff</i> (mm)</b>
Menor que 0,04	0,08
De 0,04 a 0,13	0,25
De 0,13 a 0,4	0,8
De 0,4 a 1,3	2,5
Maior que 1,3	8

Segundo Gonzalez (1998), esta classificação resulta da exigência de que o comprimento de onda limite seja no mínimo 2,5 vezes maior que a distância entre os sulcos e de no máximo 8 vezes. Já no caso de perfil aperiódico, o valor de *cutoff* tem relação com o grau de rugosidade média Ra a ser avaliado (Tabela 8). Para definir o valor aproximado da rugosidade pode-se usar inicialmente um valor de *cutoff* também aproximado (geralmente usa-se o valor 0,8mm).

**Tabela 8 - Valores de *cutoff* para perfis não periódicos (Ra). Fonte: ISO 4288:1996.**

<b>Rugosidade Ra (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b><i>Cutoff</i> (mm)</b>
Menor que 0,02	0,08
De 0,02 a 0,1	0,25
De 0,1 a 2	0,8
De 2 a 10	2,5
Maior que 10	8

#### **1.4.2. Parâmetro Rq - Desvio médio quadrático do perfil de rugosidade**

O parâmetro Rq é definido como a raiz quadrada da média dos quadrados das ordenadas de afastamento,  $Z(x)$ , dos pontos do perfil de rugosidade em relação à linha média,

dentro de um comprimento de amostragem (*cutoff*). O cálculo do valor de Rq pode ser realizado utilizando a Equação 5.

$$Rq = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l Z^2(x).dx} \quad \text{Equação 5}$$

Conhecido também como rugosidade RMS (Root Mean Square), o parâmetro Rq, por utilizar a média dos quadrados, é mais sensível aos picos e vales do que o Ra. Este parâmetro é empregado em superfícies onde o acabamento apresenta os riscos de usinagem bem orientados e principalmente em superfícies onde o parâmetro Ra tem pouca resolução. A Tabela 9 apresenta as principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Rq. No cálculo do Rq utilizam-se os mesmos valores de *cutoff* apresentados na Tabela 7 e na Tabela 8 (Ra), de acordo com o tipo de perfil.

**Tabela 9 - Principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Rq.**

<b>Vantagens do parâmetro Rq</b>	<b>Desvantagens do parâmetro Rq</b>
<p>Comparado com Ra, este parâmetro tem o defeito de dar peso extra para altos valores.</p> <p>Para superfícies onde a detecção de picos ou vales se torna importante e mesmo quando estes aparecem ao acaso, evidenciando-os mais que o Ra, pois eleva o erro ao quadrado, acentuando-o.</p>	<p>É pouco utilizado.</p> <p>É mais difícil de ser obter graficamente que o Ra.</p> <p>Assim como o Ra, não define a forma das irregularidades.</p> <p>Normalmente deve vir acompanhado de um parâmetro como o Rt.</p>

Fonte: adaptado de Gonzalez (1998).

### 1.4.3. Parâmetro Rz - Altura máxima do perfil de rugosidade

O parâmetro Rz é definido como a soma da altura máxima dos picos do perfil ( $Z_p$ ) com a profundidade máxima dos vales do perfil ( $Z_v$ ), dentro de um comprimento de amostragem (*cutoff*). Este parâmetro pode ser calculado ou obtido graficamente, como mostra a Figura 35.

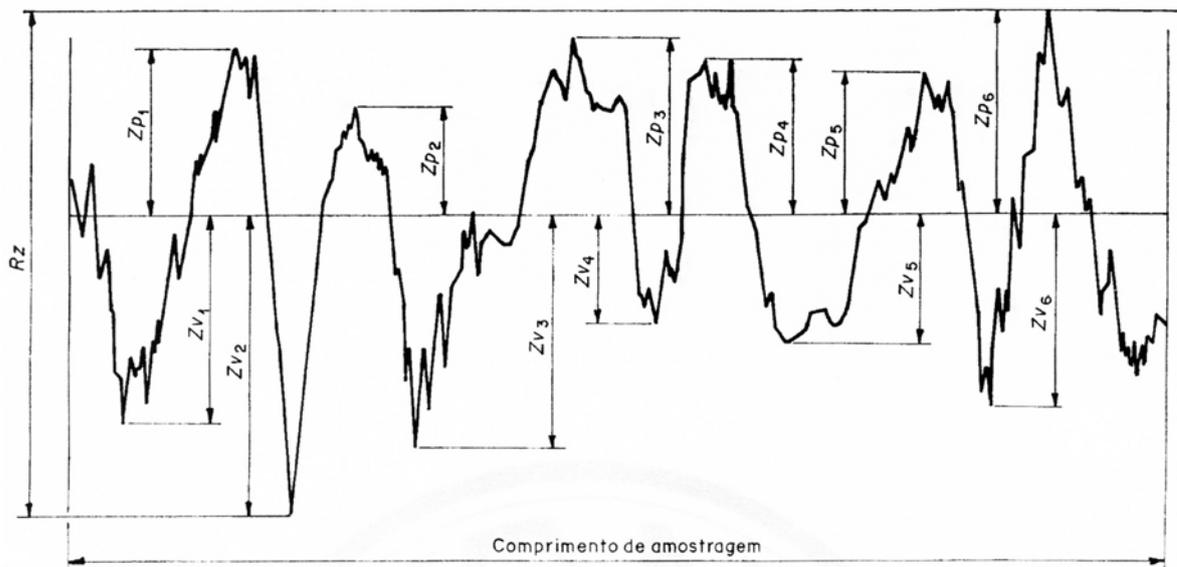


Figura 35 - Representação gráfica do perfil indicando o parâmetro Rz.

Na representação gráfica do perfil, este valor corresponde à altura entre os pontos máximo e mínimo do perfil, dentro do comprimento de amostragem. Este parâmetro pode ser utilizado nos casos em que pontos isolados não influenciam na função da peça a ser controlada, por exemplo em superfícies de apoio e de deslizamento, ajustes prensados, etc.; e em superfícies onde o perfil é periódico e conhecido. A Tabela 10 apresenta as principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Rz.

Tabela 10 - Principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Rz.

Vantagens do parâmetro Rz	Desvantagens do parâmetro Rz
<p>Informa sobre a destruição média da superfície vertical.</p> <p>É de difícil obtenção através de equipamentos que fornecem gráficos.</p> <p>Em perfis periódicos possui alta definição da superfície.</p> <p>Riscos isolados serão considerados apenas parcialmente, de acordo com o número de pontos isolados.</p>	<p>Em algumas aplicações essa consideração parcial dos pontos isolados não é aconselhável, pois um ponto isolado acentuado será considerado somente em 20% mediante divisão de 1/5.</p> <p>Não possibilita nenhuma informação sobre a forma do perfil, bem como da distância entre ranhuras.</p> <p>Nem todos os equipamentos fornecem este parâmetro.</p>

Fonte: adaptado de Gonzalez (1998).

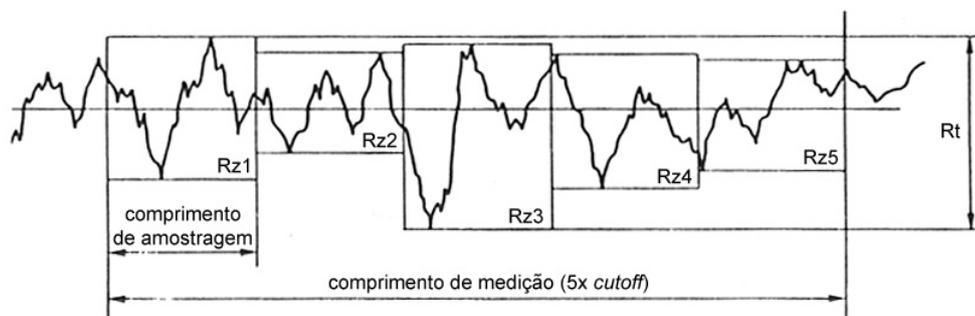
No cálculo do  $R_z$  para perfis periódicos utilizam-se os mesmos valores de *cutoff* apresentados na Tabela 7, já no caso de perfis aperiódicos, estes valores têm relação com o grau de rugosidade  $R_z$  a ser avaliado, conforme a Tabela 11.

**Tabela 11 - Valores de *cutoff* para perfis não periódicos ( $R_z$ ). Fonte: ISO 4288:1996.**

Rugosidade $R_z$ ( $\mu\text{m}$ )	<i>Cutoff</i> (mm)
Menor que 0,1	0,08
De 0,1 a 0,5	0,25
De 0,5 a 10	0,8
De 10 a 50	2,5
Maior que 50	8

#### 1.4.4. Parâmetro $R_t$ - Altura total do perfil de rugosidade

O parâmetro  $R_t$  é definido como a soma da altura máxima dos picos do perfil ( $Z_p$ ) com a profundidade máxima dos vales do perfil ( $Z_v$ ), dentro do comprimento total de avaliação ( $5X$  o *cutoff*). A exemplo do  $R_z$ , este parâmetro pode ser obtido graficamente como mostra a Figura 36.



**Figura 36 - Representação gráfica do perfil indicando o parâmetro  $R_t$ .**

Este parâmetro corresponde à altura total de todo o perfil de rugosidade, independentemente dos valores de rugosidade para cada comprimento de amostragem. Sua aplicação ocorre em superfícies de vedação, assentos de anéis de vedação, superfícies dinamicamente carregadas, tampões em geral, parafusos altamente carregados e em superfícies de deslizamento onde o perfil efetivo é periódico. A Tabela 12 apresenta as principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro  $R_t$ . Para calcular o  $R_t$

utilizam-se os mesmos valores de *cutoff* apresentados na Tabela 7 e na Tabela 11 (Rz), de acordo com o tipo de perfil.

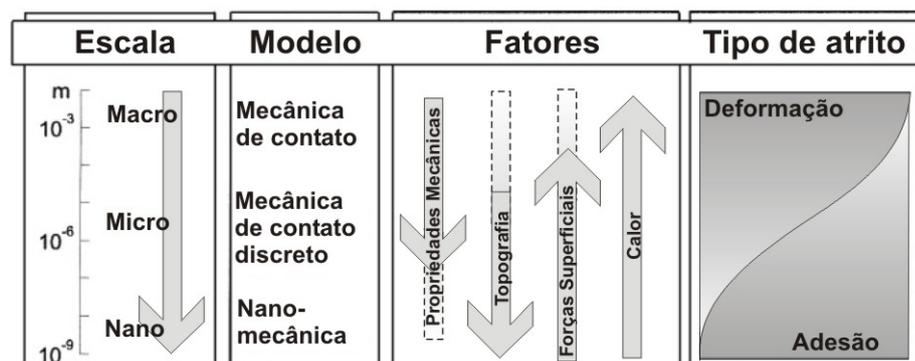
**Tabela 12 - Principais vantagens e desvantagens da utilização do parâmetro Rt.**

Vantagens do parâmetro Rt	Desvantagens do parâmetro Rt
Informa sobre a máxima deterioração da superfície vertical da peça.	Em alguns casos, a rigidez de avaliação leva a resultados enganosos.
É de fácil obtenção quando o equipamento fornece o gráfico de superfície.	Pode dar uma imagem errônea da superfície, pois avalia erros que muitas vezes não representam a superfície como um todo.
Tem grande aplicação na maioria dos países.	Individualmente não apresenta informações suficiente a respeito da superfície, isto é, não informa sobre a forma da superfície.
Fornecer informações complementares ao parâmetro Ra.	

Fonte: adaptado de Gonzalez (1998).

### 1.5. Medição de Rugosidade

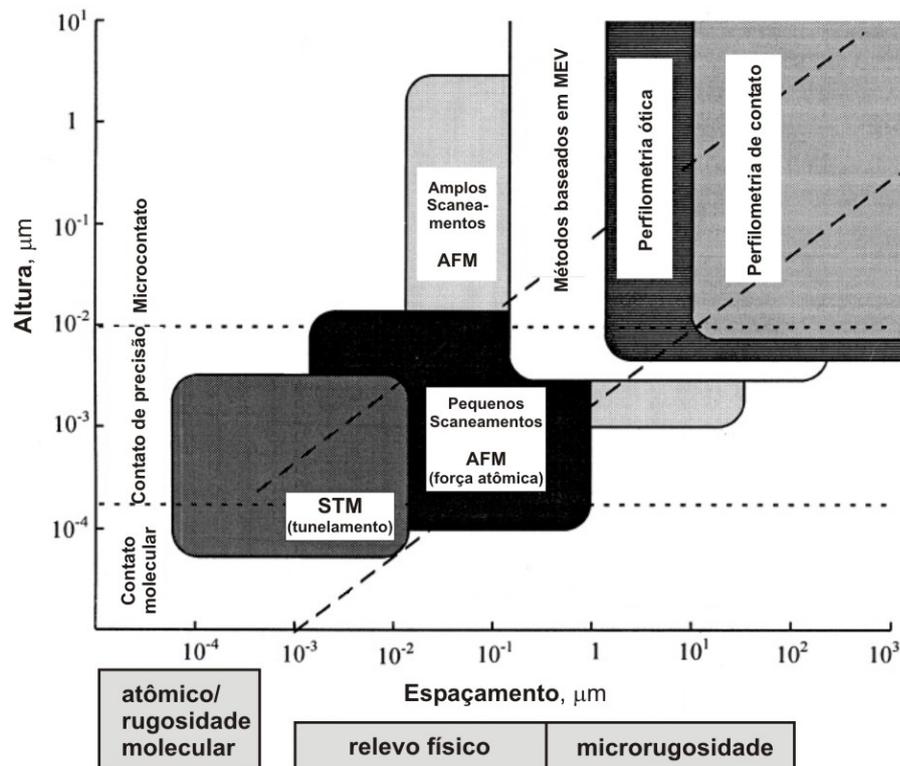
Conforme descrito no item 1.4, uma superfície é composta por várias escalas de rugosidade superpostas umas às outras. Segundo Zahouani (2001), as características da rugosidade multi-escala são relacionadas com diferentes aspectos dos processos pelos quais a superfície passou e, cada uma delas, influencia de maneira diferente o comportamento da peça final. Myshkin (1998) afirma que um modelo de superfície real deve considerar os níveis de rugosidade, microrugosidade e submicrorugosidade. Na transição da macro-escala para a micro e nano-escala vários fatores devem ser levados em consideração, principalmente a correlação entre os mecanismos de deformação e adesão referentes à fricção, conforme já descrito no item 1.2.3. Algumas variáveis importantes são apresentadas na Figura 37.



**Figura 37 - Escalas de rugosidade e sua influência na fricção. Fonte: Myshkin (1998).**

Para grande parte das aplicações de engenharia a rugosidade é medida em micrometros, no entanto ela pode fornecer informações em diferentes níveis de investigação. Garbacz (2006) afirma que, na área da engenharia civil, uma escala milimétrica permite caracterizar os principais tratamentos superficiais para o concreto. Glenn (2006), ao trabalhar com superfícies montanhosas em atividade sísmica, utiliza medições topográficas via satélite para calcular rugosidades acima de cinco centímetros. Escalas muito menores também vêm sendo estudadas, por exemplo, Bhattacharya (2005), assim como Chan (2005), trata de aplicações óticas, índices de refração e principalmente de reflexão, citando rugosidades nanométricas. Segundo estes autores, em alguns espelhos especiais a rugosidade pode chegar a três nanômetros e só pode ser medida por microscopia de força atômica.

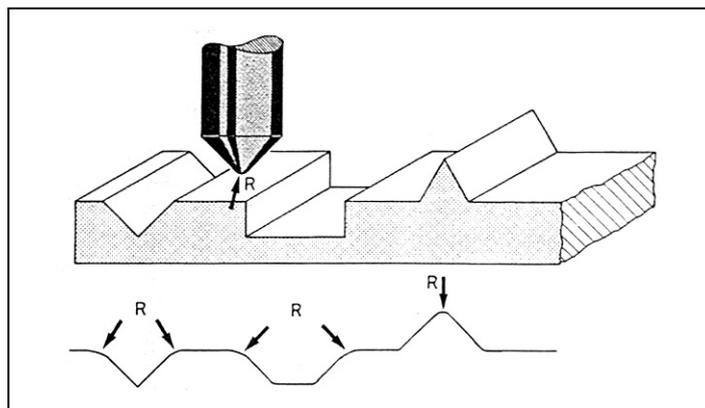
Dentro deste contexto, diversos métodos de medição de rugosidade vêm sendo desenvolvidos para atender às demandas das várias áreas do conhecimento envolvidas. A Figura 38 apresenta uma relação dos principais métodos utilizados com suas respectivas faixas de operação.



**Figura 38 - Principais métodos de medição de rugosidade e suas faixas de operação.**  
Fonte: Myshkin (1998).

A forma mais utilizada para aquisição do perfil rugosidade superficial é através de equipamentos conhecidos como rugosímetros. Os Rugosímetros eletromecânicos têm sido muito utilizados nos últimos 50 anos [Royo, 1999]. Tipicamente seu princípio de operação é um apalpador (*stylus*) que percorre a superfície enquanto que seus deslocamentos de altura (verticais) são convertidos em sinais elétricos por um transdutor. O sinal elétrico passa por um amplificador, por um filtro 2RC (composto basicamente por dois resistores e dois capacitores) e por um conversor AD (analógico-digital) para então ser obtido o perfil de rugosidade. Faccio (2003) afirma que os perfis de rugosidade costumam ser obtidos por contato direto, através de rugosímetros, e dois grandes efeitos podem modificar a aquisição do perfil analisado, e conseqüentemente fornecer perfis de superfície que não retratem a realidade: a carga aplicada ao apalpador de leitura e o raio da ponta do apalpador.

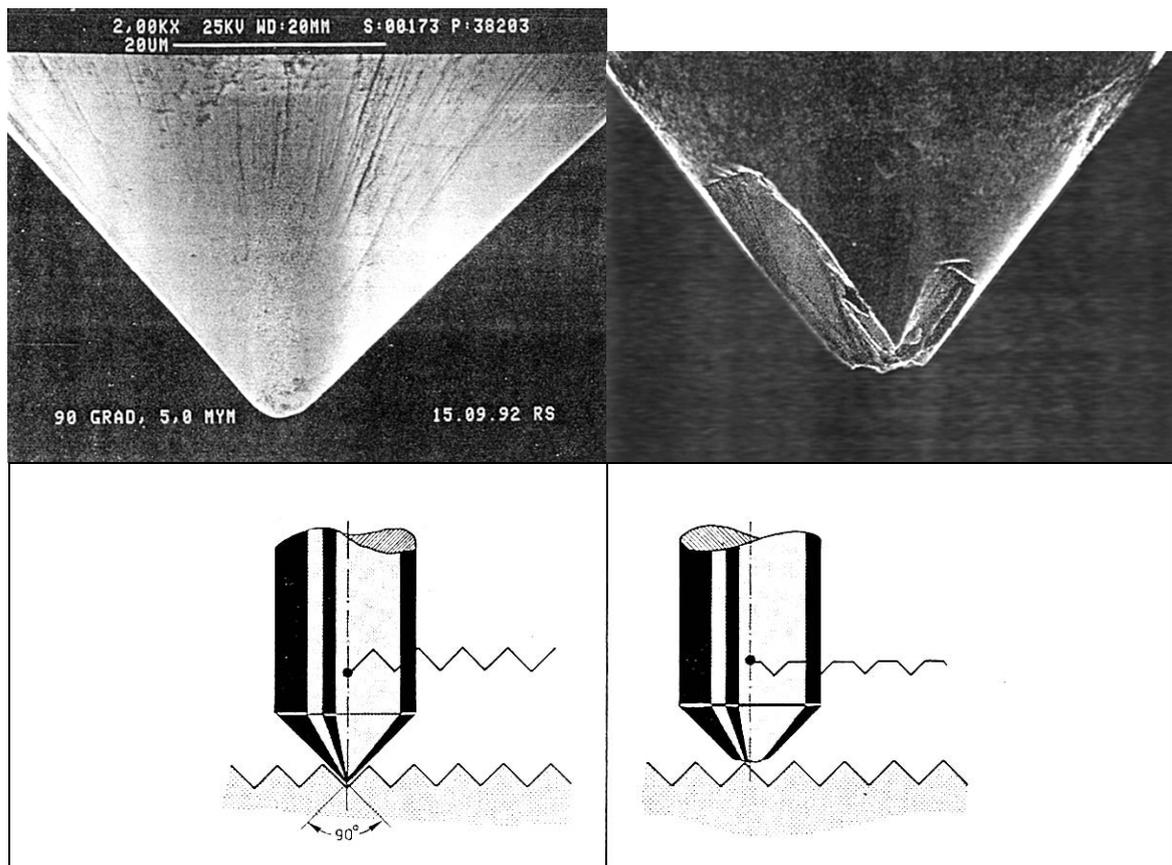
Segundo Mummery (1992) a ponta de um apalpador convencional é de diamante, forma um ângulo de  $90^\circ$  e possui um raio de  $5\mu\text{m}$  em sua extremidade. Este ângulo de  $90^\circ$  ( $45^\circ$  para cada lado de uma componente normal) evita que o apalpador caia ou trave em superfícies com mais de  $45^\circ$ . Esse autor afirma que a geometria da ponta do apalpador é a primeira fonte de erros no sistema com contato (Figura 39) e, visto que existem diferentes tipos de ponta, medições realizadas com um apalpador não necessariamente terão alguma relação com outro.



**Figura 39 - Comparação entre o perfil real e o perfil medido com um apalpador.**  
**Fonte: Mummery (1992).**

Com relação à distorção causada pela carga aplicada ao apalpador, Faccio (2003) salienta: “sumariamente pode-se afirmar que é praticamente impossível obter uma leitura de perfil por contato, sem que este contato não danifique a superfície em questão, portanto

alterando o perfil analisado e diferenciando-o do registrado pelo aparelho”. A ponta do apalpador sendo de diamante, material de altíssima dureza, acaba por causar riscos na superfície medida. No entanto, pelo diamante ser um material frágil, ela também pode sofrer avarias principalmente devido ao mau uso. Por este motivo ela precisa ser checada regularmente através de um padrão de referência calibrado. A Figura 40 apresenta imagens de microscopia eletrônica de varredura (MEV) de uma ponta convencional e uma ponta danificada, bem como o efeito destas pontas no perfil medido.

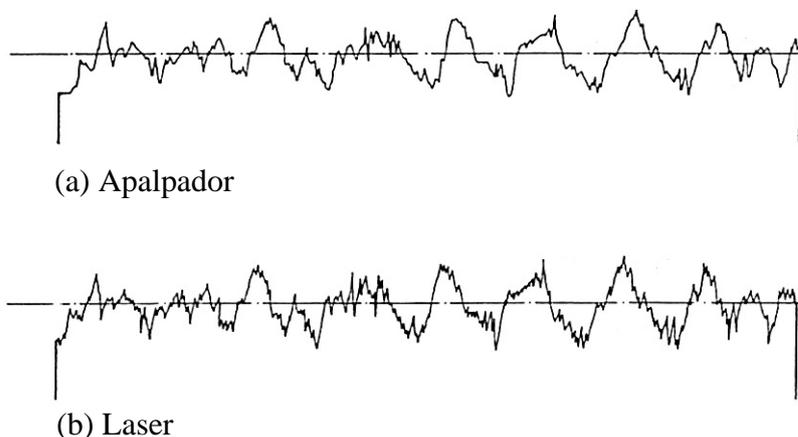


**Figura 40 - Efeito de uma ponta danificada sobre um perfil.**  
 Fonte: adaptado de Mummery (1992).

Assim, o desenvolvimento de metodologias alternativas para determinação da rugosidade superficial apresentam-se de forma atrativa. As técnicas não destrutivas, em particular, vêm despertando interesse de vários pesquisadores [Royo, 1999].

Garbacz (2006) afirma que diferentemente de outras áreas, no campo da rugosidade superficial, diferentes técnicas de medição costumam apresentar diferenças consideráveis. O autor coloca que técnicas óticas, como o Laser, são capazes de produzir uma imagem mais

detalhada do perfil da superfície em comparação com métodos mecânicos e, assim, os valores de parâmetros descritivos de rugosidade obtidos com Laser costumam ser de 1 a 7 vezes maiores do que os anteriores; apenas os valores principais do perfil de rugosidade são similares para ambos os métodos e tipos de tratamento. Mummery (1992) compartilha da mesma opinião e ainda afirma que a diferença é maior para superfícies mais suaves, pois em baixas rugosidades os vales são menores e o apalpador mecânico não consegue atingi-los devido a seu raio finito. A Figura 41 mostra uma comparação entre um perfil medido com um apalpador de ponta  $5\mu\text{m}$  e o mesmo perfil medido através de laser. Este último autor ainda coloca que consistem limitação para sistemas a laser as superfícies com ângulos muito retos, pois nestes casos a luz pode ser espalhada, causando um perfil com falhas de continuidade.



**Figura 41 - Comparação entre perfil medido (a) com apalpador e (b) através de laser.**

**Fonte: Mummery (1992).**

## **1.6. Digitalização Tridimensional a Laser**

A digitalização Tridimensional é utilizada basicamente para captar imagens e dados em 3D e, com auxílio de ferramentas computacionais, permite obter com grande precisão detalhes de superfícies, texturas e mesmo de objetos inteiros. Atualmente, diversos sistemas de digitalização 3D de modelos reais estão disponíveis, sendo divididos, de forma geral em sistemas com contato e sistemas sem contato. Os sistemas baseados em contato são normalmente bastante úteis para formas simples, onde apenas poucos pontos são necessários. Estes equipamentos, normalmente em forma de braço mecânico, permitem uma grande liberdade de movimento. Entretanto, este é geralmente mais lento, tendo também a limitação

de não poder ser utilizado em superfícies que se deformem com o contato. Segundo Freitas (2006), existem diversos sistemas de digitalização sem contato, dentre os quais podem ser citados: triangulação por Laser, triangulação por cores, fotogrametria por conjuntos de câmeras CCD, fotogrametria por fotografias digitalizadas, radar Laser, tomografia, tunelamento, luz infravermelha com CCD linear e sensor conoscópico a Laser; este último é utilizado neste trabalho (capítulo 2.1).

O cabeçote de digitalização conoscópico consiste na emissão, através de um diodo, de um feixe de Laser, o qual é refletido por um divisor de feixe e incide pontualmente sobre a peça a ser medida. A luz dispersada retorna da peça, passa através do divisor de feixe, por um cristal birrefringente e é detectada pelo sensor CCD (Dispositivo de Carga Acoplado) conforme a Figura 42. O Dispositivo de Carga Acoplado ou CCD (do inglês *charge coupled device*) é um tipo de sensor formado por um conjunto de capacitores sensíveis a luz. O cristal birrefringente modifica diferentemente a velocidade de cada raio de luz de acordo com seu ângulo, criando um padrão de franjas com alto contraste no detector CCD. Uma vez que o ângulo do raio de luz é função da distância entre um plano de referência e o ponto de Laser projetado no objeto, esta distância pode ser então determinada pela análise das características do padrão criado. A relação entre o sinal no detector CCD e a distância dos objetos é determinada por um processo preciso de calibração realizado para cada lente objetiva utilizada [Optimet, 2005].

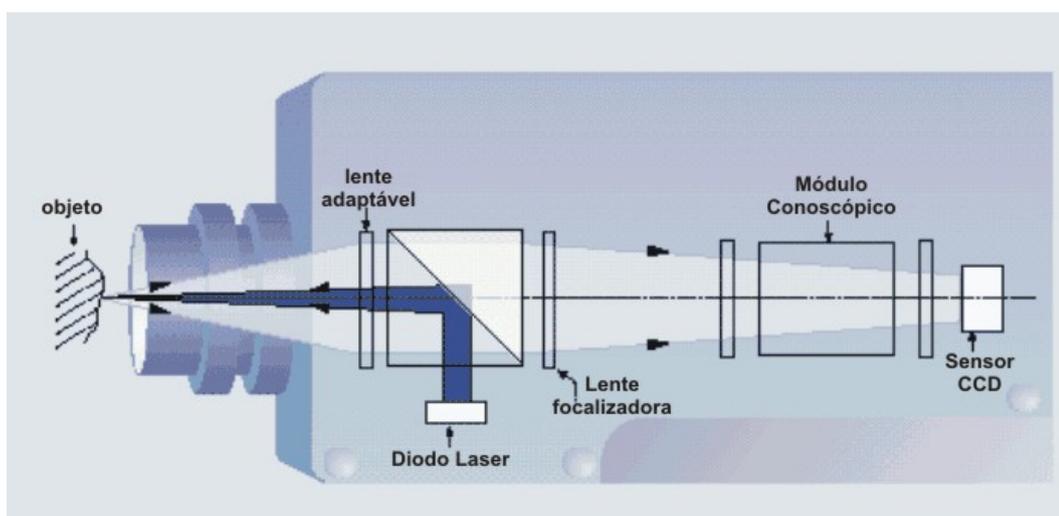
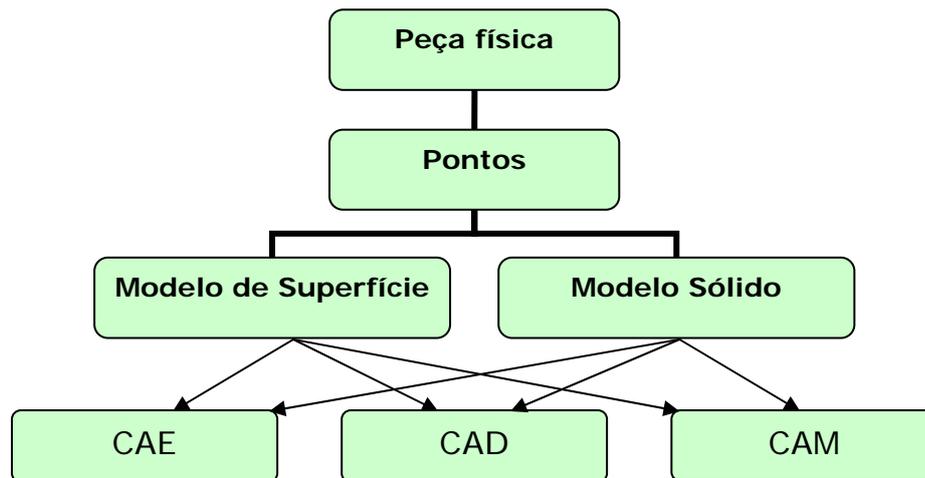


Figura 42 - Princípio de operação do sensor conoscópico a Laser. Fonte: Optimet (2005).

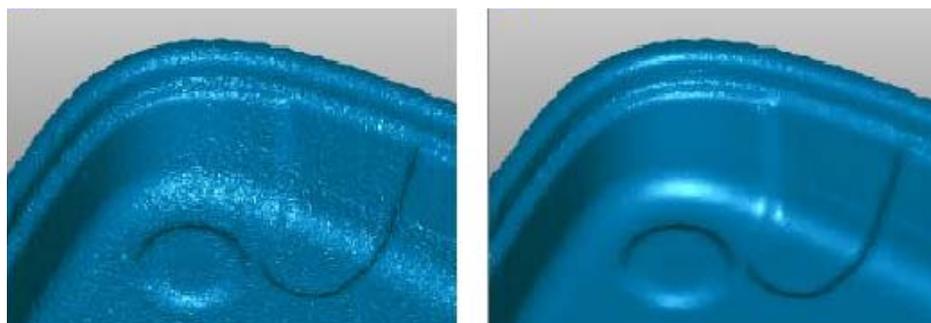
A digitalização tridimensional a Laser é mais precisa e rápida do que os sistemas com contato, porém depende de alguns fatores, como opacidade e cor da superfície a ser digitalizada (scaneada). É adequada para objetos com grande quantidade de detalhes, independentemente de características de dureza, tendo em vista que não há um contato entre o instrumento e peça digitalizada. Segundo Sokovic (2005) a Digitalização Tridimensional a Laser é um método rápido e preciso no eixo Z, sendo também possível digitalizar materiais macios (que se deformem com o contato) ou até mesmo líquidos. Segundo Ferreira (2003), a digitalização e reconstrução de formas complexas de objetos têm evoluído rapidamente nos últimos anos, sendo que o método de scaneamento 3D a Laser traz uma maior automação na aquisição de dados. Segundo Freitas (2006), os dados fornecidos pela digitalização 3D são sempre um conjunto de coordenadas de pontos. As coordenadas podem ser simplesmente  $[x,y,z]$ ,  $[x,y,z,c]$  para os digitalizadores capazes de capturar outros parâmetros do ponto, como cor ou temperatura, ou ainda  $[x,y,z, i,j,k]$  para digitalizações que incluam a inclinação da sonda manual utilizada. A organização dos pontos, a incerteza das coordenadas e a velocidade de leitura dependem da tecnologia empregada no digitalizador. Também dependem do equipamento: o volume, a forma, o material, a cor e o acabamento superficial dos modelos físicos que podem ser usados.

Geometricamente, os dados são processados como coordenadas da superfície no espaço tridimensional  $(x,y,z)$ . Uma varredura superficial pode retornar milhares de pontos, de acordo com o tamanho da área analisada e o espaçamento entre pontos utilizado. Este conjunto de milhares de pontos é chamado de “nuvem de pontos” e após manipulação computacional permite gerar curvas, malhas, superfícies e sólidos tridimensionais compatíveis com sistemas CAD/CAE/CAM. A obtenção de modelos virtuais a partir de modelos físicos ocorre em um processo inverso à engenharia convencional (onde a partir do virtual obtém-se o físico) e por isso esta técnica é conhecida como Engenharia Reversa (Figura 43).



**Figura 43 - Aplicação da digitalização Tridimensional na Engenharia Reversa.**  
**Fonte: adaptado de Freitas (2006).**

A realização das diversas atividades de projeto, como modificações de geometria em CAD (Projeto Auxiliado por Computador - do inglês *Computer Aided Design*), simulações de cinemática de mecanismos e análises de resistência em CAE (Engenharia Auxiliada por Computador - do inglês *Computer Aided Engineering*), planejamento de processos de fabricação com CAPP (*Computer Aided Process Planing*) ou programação de usinagem CAM (Fabricação Auxiliada por Computador - do inglês *Computer Aided Manufacturing*), depende da produção de representações válidas sob cada um desses pontos de vista. Assim, para aplicações de engenharia, é necessário aplicar filtros nos pontos obtidos pela digitalização, de modo a eliminar ruídos (fontes de erro). Segundo Freitas (2006), o resultado de uma digitalização é muito dependente da qualidade do equipamento de Digitalização, da preparação da amostra e das condições externas como temperatura, vibração, luminosidade, etc. Porém, por mais controlado que seja o processo, sempre haverá ruídos elétricos ou mecânicos, os quais causarão distorções indesejadas na nuvem de pontos. A Figura 44 mostra a importância da aplicação de filtros para a qualidade da superfície.



**Figura 44 - Aplicação de filtro para redução de ruído na superfície.** Fonte: Freitas (2006).

Considerando que a superfície digitalizada pode possuir alguns milhões de pontos, o arquivo gerado pode tornar-se muito pesado para manipulação em computadores convencionais. Assim, o uso de filtros torna-se também importante para reduzir o tamanho dos arquivos, facilitando sua posterior manipulação. Uma filtragem nos pontos de uma nuvem pode diminuí-la consideravelmente sem grande prejuízo de qualidade (geralmente em mais de 50%). Esta filtragem mantém apenas os pontos realmente significativos para representar o objeto, ou seja, quanto menos detalhes existirem na superfície da peça, menor será a quantidade de pontos que serão necessários para representá-la.

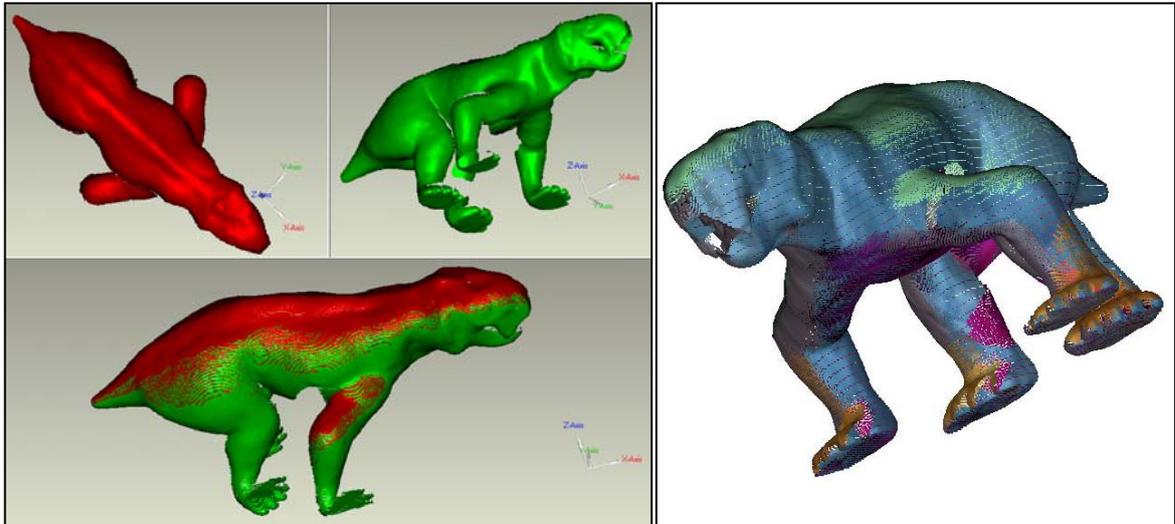
A partir da nuvem de pontos já filtrada, é possível unir os pontos três a três formando inúmeros triângulos, criando-se assim uma malha tridimensional da superfície da peça. Com a malha criada, é possível se fazer uma série de alterações, como suavizar a superfície, criar furos, alterar cantos vivos, entre outras possibilidades. A utilização de malhas é de fundamental importância, por exemplo, para análises da peça através do método de elementos finitos, ou ainda para renderizações e animações avançadas. Arquivos com dados de malhas de triângulos planos, os quais também contém informações sobre os vértices e as normais de cada triângulo, podem ser salvos no formato STL. O STL (de STereoLithography) é o formato padrão na indústria para os sistemas de Prototipagem Rápida. Freitas (2006) recomenda alguns procedimentos para a conversão do arquivo neste formato: a) usar tolerância de 0,01mm para que o modelo não fique facetado; b) fechar todos os furos porventura existentes na malha; c) orientar as normais dos triângulos para fora da superfície; d) exportar o arquivo no formato binário. Acrescenta-se a estes a importante eliminação de possíveis intersecções entre alguns triângulos. Para aplicações onde é necessário alterar consideravelmente a forma do objeto digitalizado, a utilização de arquivos STL torna-se bastante limitada. Nestes casos, pode ser necessário gerar superfícies NURBS a partir dos dados digitalizados.

As superfícies NURBS são assim chamadas por serem representadas através de curvas NURBS (*Non-Uniform Rational Bézier Splines*). Estas são curvas de forma livre que conectam uma série de pontos de controle, aos quais são associados vetores, permitindo a avaliação de valores numéricos em cada ponto da superfície. Mediante o uso de fórmulas e algoritmos as curvas e as superfícies são ajustadas e recalculadas continuamente, caracterizando um sistema inerentemente mais dinâmico. A modelagem NURBS pode ser utilizada para construção de superfícies complexas através de uma representação matemática

precisa de seus elementos. Por exemplo, uma esfera subdividida em vários triângulos (representação poligonal) necessita de muitos destes triângulos para que a esfera fique com a superfície suave. A mesma esfera pode ser representada por algumas poucas linhas NURBS que contêm informações matemáticas sobre a suavidade da esfera. Na prática isso implica em um arquivo bem mais leve e fácil de ser modelado. No entanto, a obtenção de uma superfície NURBS através da engenharia reversa é uma tarefa muito mais difícil do que a obtenção da mesma geometria em triângulos. Este fato se deve a que os produtos submetidos à digitalização normalmente não obedecem a simples equações matemáticas e, portanto, apenas com muita dificuldade e trabalho podem ser reproduzidos satisfatoriamente por uma superfície matematicamente construída [Freitas, 2006].

As superfícies normalmente são salvas em formatos neutros (independentes de um aplicativo específico), como o IGES (*Initial Graphics Exchange Specification*), os quais facilitam a troca de dados. Objetos tridimensionais também podem ser representados por arquivos do tipo VRML (*Virtual Reality Modeling Languages*), os quais permitem a apresentação de objetos e mundos tridimensionais através da Internet. Esta apresentação é mais do que simplesmente mostrar objetos 3D e cenas estáticas, pois possibilita que o visitante de um mundo virtual interaja com seus objetos.

Para objetos que possuem grandes dimensões ou complexidade elevada, pode ser necessário adquirir mais de uma nuvem de pontos de diferentes vistas. Nestes casos, as nuvens precisam ser registradas (montadas) para obtenção do modelo integral. No registro são necessárias áreas que se sobreponham entre as nuvens adquiridas, levando em consideração que alguns softwares podem efetuar esta etapa a partir de pontos em comum entre as diferentes nuvens (Figura 45). Para facilitar este processo podem ser utilizadas referências no objeto, por exemplo, pequenas esferas coladas à superfície da peça a ser digitalizada, as quais constituem áreas em comum entre as nuvens (Figura 46).



**Figura 45 - Registro de nuvens de pontos por sobreposição de pontos.  
Fonte: digitalização 3D e imagem realizadas pelo autor.**



**Figura 46 - Registro de nuvens de pontos através de esferas de referência.  
Fonte: digitalização 3D e imagem realizadas pelo autor.**

A reconstrução de objetos físicos através da técnica de digitalização tridimensional, muitas vezes associada à engenharia reversa, em seu surgimento significou fazer cópia de produtos, muitas vezes desrespeitando direitos autorais. No entanto, atualmente ela tem aplicações muito mais importantes devido a sua grande versatilidade, proporcionando sua utilização em diferentes áreas [Castle Island, 2004].

No Design de produtos, por exemplo, a técnica pode ser aplicada para atualização de um produto já existente, o qual pode ser digitalizado, modificado e novamente produzido. Estes procedimentos são particularmente importantes nos casos em que se deseja re-desenhar ou otimizar produtos já existentes, mas dos quais não se possui informação em CAD. Deste modo torna-se possível desenvolver um produto que melhor atenda as necessidades de mercado. A digitalização pode ser utilizada para documentação, por exemplo, na geração de desenhos técnicos (exigência das normas ISO série 9000), de produtos que não os tenham ou dos quais tenham sido extraviados. Neste contexto, a digitalização também pode ser empregada para o armazenamento virtual, o qual gera redução de custos e de espaço físico, além de evitar a perda de dados devido à degradação dos modelos físicos pelo tempo. O armazenamento virtual também permite o compartilhamento via rede e o uso simultâneo dos modelos virtuais, os quais podem ser rapidamente enviados e produzidos fisicamente por sistemas de prototipagem rápida. Esta técnica ainda pode ser utilizada para a criação de bancos de dados com de peças, produtos, obras de arte, monumentos, fachadas de prédios históricos, etc. permitindo formar uma espécie de “backup” do patrimônio histórico. Em posse do modelo 3D também é possível editá-lo e utilizá-lo em novos produtos industriais. A Figura 47 mostra um pingente, desenvolvido no LdSM, baseado em uma imagem da Nossa Senhora do Rosário já existente. Esta imagem foi digitalizada e editada em softwares CAD/CAM, criando-se assim um novo produto.



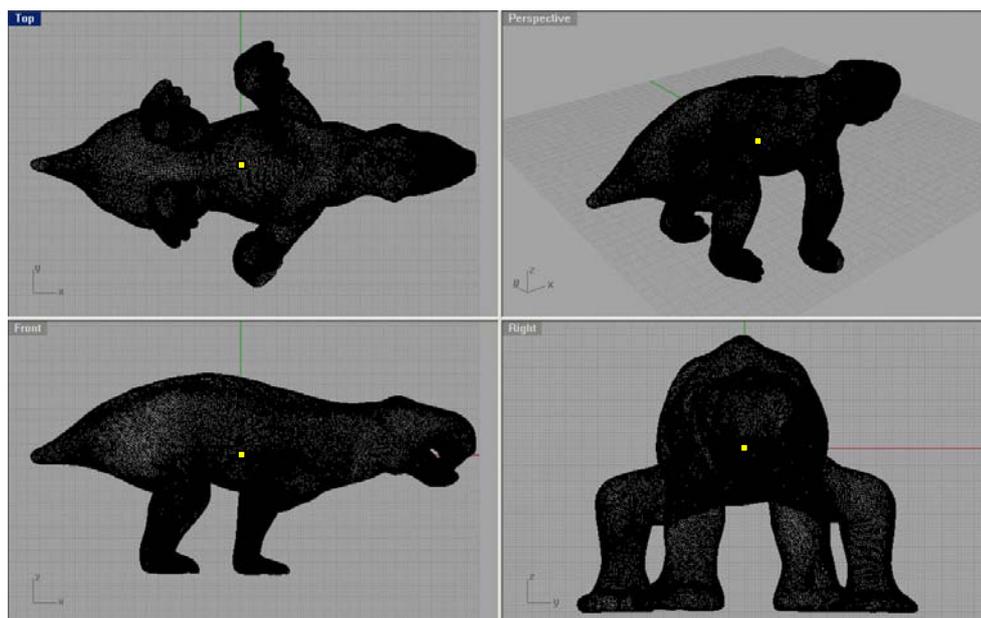
**Figura 47 - Pingente com a imagem de Nossa Senhora do rosário.  
(a) modelo físico; (b) modelo virtual digitalizado; (c) produto desenvolvido.  
Fonte: digitalização 3D e imagem realizadas pelo autor.**

Através de modelos digitalizados podem ser produzidos moldes para injeção de polímeros ou mesmo de metais. Este é um caso muito comum, por exemplo, na indústria calçadista, na qual a partir de um único modelo de sapato digitalizado espelha-se o mesmo, obtendo o pé oposto, e escalam-se os pares, obtendo assim toda a numeração. Este procedimento pode ser utilizado em diversos componentes do calçado como solados, palmilhas, saltos, etc. A Figura 48 mostra um modelo real e um modelo digitalizado.



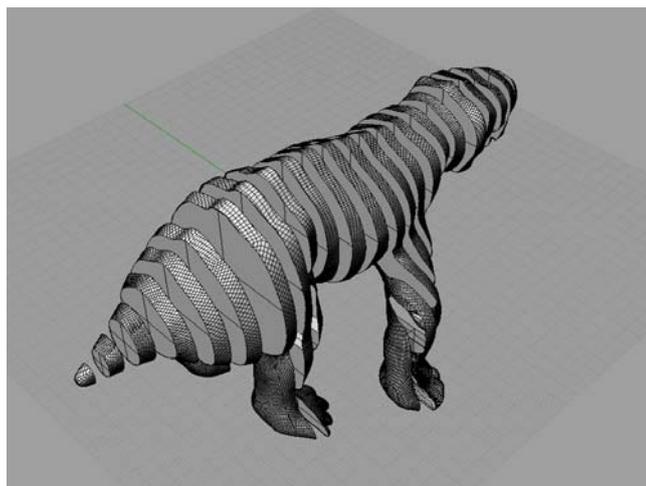
**Figura 48 - Salto de sapato feminino, (a) modelo físico em latão e (b) modelo virtual.**  
 Fonte: digitalização 3D e imagem realizadas pelo autor.

A partir do modelo tridimensional pode ser calculado o centro de massa de um objeto. Este tipo de medida foi utilizado pelo LdSM na área da paleontologia. Neste caso, após ser digitalizado um modelo em argila criado com base em fósseis de *dinodontossaurus* encontrados no RS, se determinou seu centro de massa através de softwares CAD (Figura 49).



**Figura 49 - Determinação do centro de massa de um *dinodontossaurus*.**  
 Fonte: digitalização 3D e imagem realizadas pelo autor.

A partir do posicionamento exato do centro de massa e do cálculo do volume do animal pré-histórico, foi possível, por exemplo, determinar a velocidade estimada que o mesmo atingia. Seccionando-se o modelo em diversas fatias (Figura 50) foi possível também, calcular os momentos de resistência da coluna vertebral e determinar se o animal poderia ficar ereto (Morato, 2005). Estes procedimentos seriam extremamente complexos ou até mesmo impossíveis sem o auxílio desta técnica.



**Figura 50 - Secções do modelo virtual de um *dinodontosaurus*.  
Fonte: digitalização 3D e imagem realizadas pelo autor.**

Procedimentos similares aos aplicados no caso do *dinodontosaurus*, podem ser aplicados também para análises de produtos, peças ou componentes de áreas como engenharia, design e arquitetura. Existem ainda diversos tipos de análises superficiais que podem ser realizadas a partir da digitalização, entre elas podem ser citadas as medidas de desgaste e de área superficial. Este tipo de análise é bastante útil, por exemplo, no controle de qualidade e na inspeção de produtos industriais. Exemplos de análises a partir de superfícies tridimensionais podem ser observados na seção 3.2.

A partir da Digitalização Tridimensional a Laser, obtém-se a textura de uma superfície com uma grande riqueza de detalhes, podendo esta ser aplicada com grande fidelidade a novos produtos industriais. O desenvolvimento de texturas é tratado com maior profundidade no capítulo 2.6.

## 1.7. Texturas x Materiais x Processos de Fabricação

A seleção do material adequado é fundamental no desenvolvimento do projeto e a aceitação do público e o bom desempenho do produto final são conseqüências desta etapa. A correta especificação do material pelo projetista, além de agilizar a fabricação, traz benefícios estéticos, técnicos, de durabilidade e distribuição ao produto. O projetista que não possui este conhecimento fica defasado, privando-se de utilizar novas técnicas e recursos [Kindlein, 2002]. No que diz respeito à texturização de superfícies, torna-se importante selecionar adequadamente materiais e processos de fabricação compatíveis, de modo a obter uma reprodução fidedigna à textura projetada.

Segundo Ferrante (1996), o processo de seleção de materiais deve ser considerado uma tarefa eminentemente interdisciplinar para o qual são necessários conhecimentos e informações de outras áreas, como o marketing e o planejamento estratégico. A dificuldade da seleção de materiais começa pela literatura técnica que deveria dar uma perspectiva de conjunto e adaptação interdisciplinar, porém ainda privilegia o tratamento de metais. Esta cultura se aplica em muitos livros destinados ao ensino de Engenharia e de Design que, por falta de atualizações das novas tecnologias e novos materiais para as publicações das últimas décadas, acabam, em suas páginas, menosprezando o tratamento dos outros materiais [Silva, 2005]. Assim, torna-se necessário avançar no processo seletivo de materiais, sem tentar escapar da complexidade defrontada na definição dos materiais adequados em um universo cada vez mais amplo de possibilidades, considerando que a correta seleção deve ser realizada de forma sistemática, em tempo adequado, possibilitando redução de custos e minimização de erros de projeto.

Segundo Silva (2005), as literaturas usuais, para estes procedimentos, baseiam-se na vasta influência da produção industrial tipicamente “metálica” das últimas décadas, porque as referências atuais, pela ampla exploração de materiais poliméricos e compósitos, não chegam a ser significativamente abordadas como referência comparativa, a menos que o material seja utilizado como um item conceitual de grande importância pelo projetista. Neste contexto, a explosão dos inúmeros polímeros, oferecidos no mercado mundial, gera novas dificuldades no processo seletivo, tendo em vista a sua ampla capacidade de atendimento a propriedades distintas requeridas em um projeto.

A importância relativa que os materiais poliméricos conquistaram e buscam conquistar se reflete no crescente uso dos mesmos, explorando suas propriedades específicas de forma cada vez mais produtiva, de tal modo que o homem passe a identificar constantes necessidades para novos produtos, criando requisitos de projeto e induzindo a Engenharia de Materiais a disponibilizar novas alternativas de materiais. O panorama evolutivo dos materiais (Figura 51) mostra o crescimento da utilização de polímeros sintéticos nas últimas décadas e uma tendência de uso ainda maior destes materiais nos próximos anos. Neste contexto, apresenta-se a inter-relação entre as texturas e os materiais, especialmente no que diz respeito aos polímeros termoplásticos, bem como seus processos de fabricação. Essa abordagem é interessante, uma vez que os polímeros estão aumentando consideravelmente sua participação no mercado.

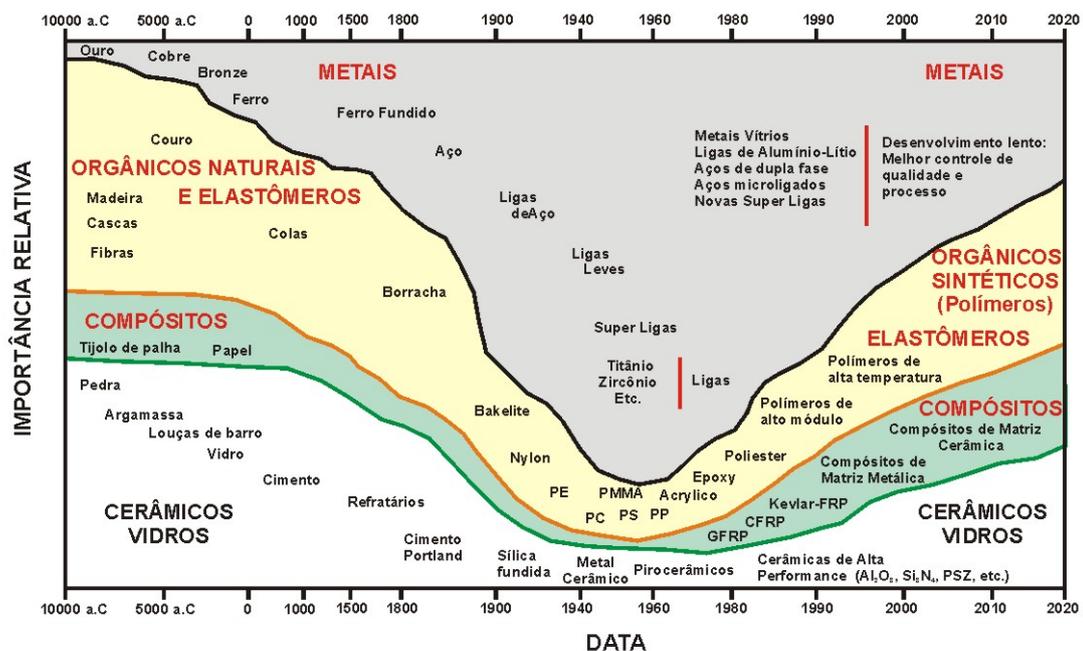


Figura 51 - Panorama evolutivo dos materiais. Fonte: Silva (2005).

Segundo Manzini (1993), a liberdade de formas permitida pelos plásticos levou a que estes fossem empregados em uma vasta gama de aplicações, especialmente aquelas em que as propriedades estruturais do aço ou das melhores madeiras não eram necessárias, mas onde eram essenciais baixos custos e facilidade de produção. A plasticidade destes materiais foi utilizada para moldá-los segundo várias formas geométricas, conferindo-lhes uma maior adaptabilidade e permitindo a integração de vários componentes funcionais em uma só peça. Esta liberdade de formas e adaptabilidade dos plásticos são características que os tornam

particularmente interessantes para aplicação no Design de produtos. Para Beall (2000), o impressionante crescimento do uso de plásticos é devido, em parte não pequena, à aceitação destes materiais pela comunidade do Design de produtos. Segundo este último autor, as duas principais razões desta preferência são que os produtos plásticos fornecem uma liberdade de design e são econômicos na produção.

Os plásticos têm desempenhado papel fundamental no progresso da dinâmica técnica, econômica e cultural que conduziu ao novo cenário de materiais. Na realidade, é complexo contar o número de materiais existentes, porque são inúmeros – tal como o são as possibilidades de combinar diversos componentes com vista a obter várias propriedades e tipos de desempenho [Manzini, 1993]. O avanço dos polímeros permitiu que eles ultrapassassem as aplicações simplesmente decorativas e fossem aplicados também em áreas técnicas. Podem-se citar como suas aplicações desde copos plásticos, embalagens de alimentos, carenagens de computadores e eletrodomésticos, como próteses médicas, blindagem de roupas e veículos, isolamentos, mobiliários e componentes da construção civil. A redução de peso também é uma das principais vantagens do uso de polímeros. Esta característica permitiu a eles a afirmação no setor automobilístico, onde praticamente dominam os espaços interiores e vêm ganhando força em outros componentes, como os pára-choques e carrocerias. No interior dos automóveis, especialmente nos painéis, nota-se uma grande variedade de recursos de texturização.

Vários autores referenciam a habilidade dos plásticos em “imitar” outros materiais [Manzini, 1993; Beall, 2000; Moldtech, 2001; Silva, 2005; Arino, 2005]. Adicionando cores aos plásticos podem ser criadas refinadas tonalidades semelhantes a materiais naturais como marfim, chifres, pedras, folhas (Figura 52), etc. A pigmentação nos plásticos pode reproduzir manchas e nós de diferentes tipos de madeira e couro. No entanto para obter uma aparência fidedigna a estes materiais é necessária a aplicação de texturas características, as quais não são alcançadas somente com a coloração. Nestes casos, a textura permite reproduzir a “granulação” da superfície e é obtida através de processos de moldagem. No setor coureiro-calçadista a estampagem de texturas em sintéticos imitando couro, copiando peles de répteis, entre outros animais, referencia uma alternativa sustentável para evitar a morte de espécimes do ecossistema. Esta propriedade de mimetismo dos materiais poliméricos ainda permite a substituição de materiais mais nobres e a conseqüente redução de custo sem a perda de aparência.



**Figura 52 - Planta artificial, polímero texturizado imitando folha natural.**

Na fabricação de artefatos plásticos a utilização de texturas também pode gerar componentes com menor custo, devido à redução de rejeitos, uma vez que elas podem disfarçar ou ocultar imperfeições superficiais e marcas de processamento. Marcas de fechamento de molde, de extração e de pontos de injeção, linhas de fluxo de material ou pequenos rechupes podem ser minimizados pela texturização. Mesmo os riscos, inevitáveis durante a utilização do produto, podem tornar-se menos visíveis em meio a uma textura.

Soma-se às vantagens expostas os aspectos técnicos já apresentados no item 1.2, bem como os aspectos relativos à percepção tátil e à interação produto-usuário já apresentados no item 1.1. Neste contexto, são inúmeras as vantagens de texturizar os polímeros, cabendo ao designer trabalhar com a aparência e o acabamento superficial como formas de diferenciar e agregar valor e qualidade aos produtos. Para possibilitar a aplicação de texturas nos produtos plásticos deve-se, primeiro, buscar a compreensão de como os materiais poliméricos (plásticos) são transformados em produtos. O primeiro passo para realizar uma abordagem do processamento dos materiais poliméricos é diferenciar entre polímeros termoplásticos e polímeros termofixos.

Os polímeros termoplásticos são tipicamente formados por moléculas lineares, longas, com ligações primárias fortes entre seus átomos e ligadas entre si por forças do tipo Van der Waals. São polímeros que amolecem quando aquecidos, voltando a endurecer quando resfriados. Os termoplásticos podem apresentar diferentes graus de cristalinidade (grau de ordem da estrutura molecular), podendo ser classificados como semicristalinos ou amorfos. São polímeros semicristalinos: polietileno (PE), polipropileno (PP), poli(tereftalato de etileno) (PET) e poliamida (comercialmente Nylon). Exemplos de polímeros amorfos são:

policarbonato (PC), poliestireno (PS), poli(cloreto de vinila) (PVC), poli(metilmetacrilato) (PMMA) e acrilonitrila-butadieno-estireno (ABS). O grau de cristalinidade é uma característica do polímero, mas pode ser influenciado pelo processamento.

Os polímeros termofixos se caracterizam pela existência de ligações cruzadas entre as suas moléculas. Estas ligações fazem com que, uma vez formado, o material não volte a amolecer com o aquecimento. Com o aumento da temperatura, as suas moléculas tendem a degradar-se antes da quebra da ligação cruzada. Em geral, os termofixos possuem resistência química e térmica superiores aos termoplásticos [Lesko, 1999]. São exemplos de termofixos a baquelite (polifenol-formaldeído), os poliésteres insaturados e as resinas epóxi.

O fato de um material polimérico pertencer a uma ou outra destas classes irá determinar de que maneira ele será processado. Contudo, apesar desta diferenciação, é possível resumir o processamento de polímeros a fazer fluir o material na sua forma plástica para dentro de um molde com a forma do produto e, uma vez lá dentro, estabilizar a forma do material através de um processo químico ou físico. O processamento de um material termofixo se caracteriza por uma mudança química irreversível que faz com que o material passe do estado líquido para o estado sólido (reação de cura), mantendo assim a forma do molde. Já o processamento de materiais termoplásticos, ao contrário dos termofixos, não apresenta nenhum precursor na forma líquida, havendo assim a necessidade de se fluir o material inicialmente sólido. Isto é feito aquecendo o material até uma temperatura em que ele seja capaz de fluir, passando então a ser chamado de “fundido”. A solidificação do fundido na forma do produto final se dá por simples resfriamento.

No entanto, a principal diferença entre termoplásticos e termofixos no que diz respeito à aplicação de texturas não está no fato de se utilizar alta temperatura no seu processamento ou não, e sim na enorme diferença de viscosidade que existe entre os termofixos na forma líquida e os termoplásticos fundidos. Os primeiros possuem viscosidades da ordem de 0,1 a 10 Pa.s, já os termoplásticos fundidos apresentam viscosidade da ordem de 100 a  $10^6$  Pa.s [Morton-Jones, 1989]. A Tabela 13 mostra valores de viscosidade, em função da temperatura, para alguns termoplásticos.

Tabela 13 - Viscosidade em função da temperatura para alguns termoplásticos.

Material	Viscosidade Aparente (Pa.s) em função da temperatura (°C)								
	150°	170°	190°	210°	230°	250°	270°	290°	310°
PEBD	115	85	65	50	40	30	25	20	
PVC	165	100	60						
PP			115	105	85	75	65	60	
HIPS				140	115	95			
SAN				210	175	130	90		
ABS				260	195	140			
PMMA				610	300	150	60		
PC						790	570	260	190
Nylon 66							115	80	55

Fonte: Morton-Jones (1989).

A viscosidade do material na forma plástica é determinante para a aplicação de texturas, pois é a característica que determina a habilidade deste material em fluir para pequenas reentrâncias (textura na superfície do molde) de maneira a reproduzi-las na superfície do produto. Um exemplo de aplicação de texturas em um Polímero termofixo é o dominó de texturas desenvolvido pela equipe do LdSM pelo processo de vazamento (*casting*) em moldes de silicone, utilizando uma resina de poliuretano [Dischinger, 2006]. A baixa viscosidade do polímero antes da reação de cura possibilita a reprodução das texturas do molde com alto grau de detalhamento.

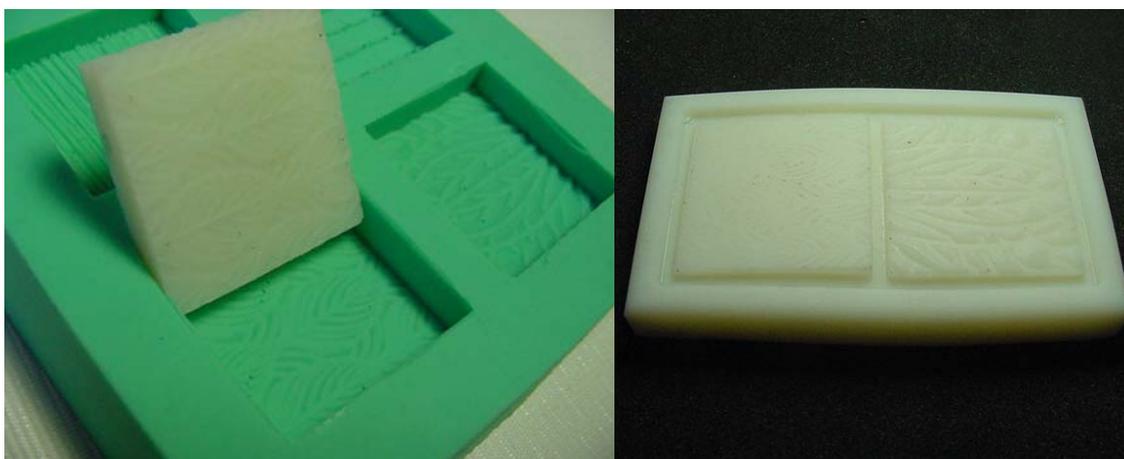


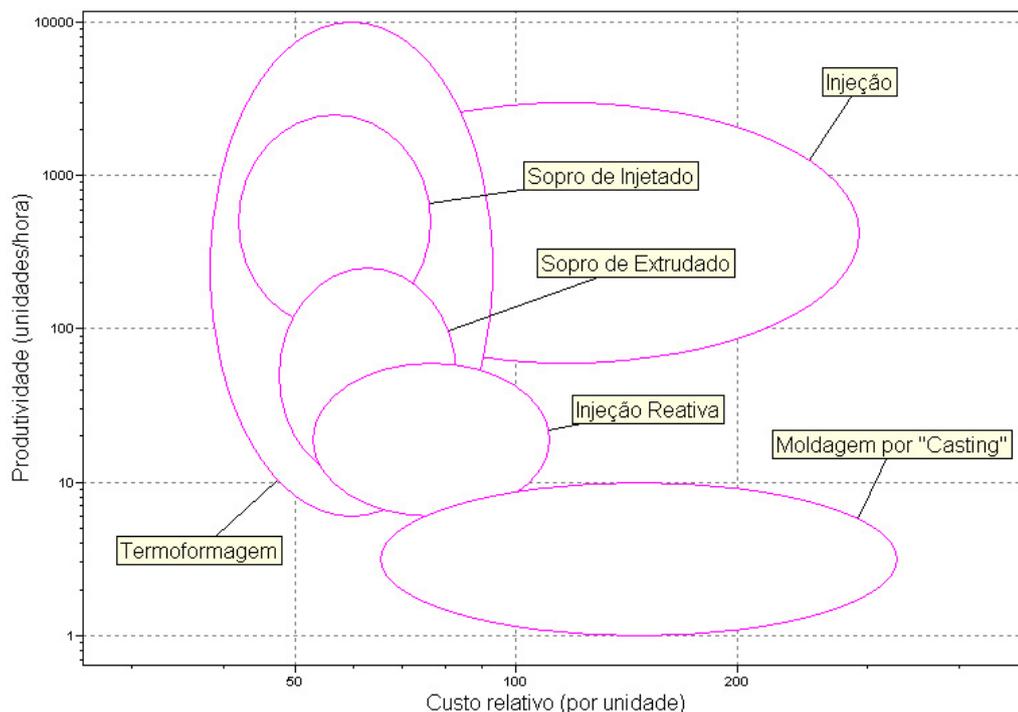
Figura 53 - Dominó de Texturas. Fonte: Dischinger (2006).

Assim, poder-se-ia concluir que é mais fácil aplicar texturas em produtos plásticos termofixos do que em termoplásticos já que os primeiros possuem menor viscosidade quando na forma líquida. Porém, não é apenas da habilidade do material em fluir e adquirir os detalhes do molde que depende a reprodução destes detalhes. São de extrema importância as condições de pressão (em geral altas para os termoplásticos) sob as quais o material é movido para dentro do molde. Além dos parâmetros de processo, deve-se ainda lembrar que os plásticos termofixos quase sempre são acrescidos de algum reforço (fibra de vidro, minerais particulados, etc.) para aumentar a sua pequena resistência mecânica, este reforço tem um grande impacto sobre o escoamento do material, tornando-o menos propenso a reproduzir os detalhes do molde.

Conclui-se então que a aplicação de texturas na superfície de produtos plásticos é altamente dependente do método de processamento (pressão e temperatura), uma vez que este altera as propriedades (principalmente a viscosidade) dos materiais utilizados. Desta forma, para avaliar a possibilidade de aplicar uma textura em um dado produto plástico, deve-se observar quais as condições de processamento e inferir se estas condições, juntamente com as propriedades do material, implicam ou não na habilidade de o sistema material-processo reproduzir os detalhes da superfície do molde.

Dentro do contexto do Design Industrial, é fundamental realizar a texturização em larga escala, através de produtos fabricados em série. A Figura 54 apresenta a relação entre custo relativo por unidade fabricada e produtividade dos principais processos de fabricação de produtos poliméricos. Nela é possível observar que os processos para termoplásticos (injeção, termoformagem e sopro) em geral apresentam maior produtividade associada a menores custos por unidade, quando comparados com os processos para termofixos (injeção reativa e “*casting*”).

Assim, os polímeros mais utilizados para a produção de artefatos em massa são os termoplásticos, os quais, ao contrário dos termofixos, são recicláveis e, também por isso, mais corretos do ponto de vista ambiental. Neste sentido, a seguir são discutidas características de processamento dos materiais poliméricos termoplásticos, visando à obtenção de texturas. Os processos industriais mais empregados para fabricação em série através destes materiais são: Injeção, Sopro, Termoformagem, Extrusão, Laminação e Usinagem.



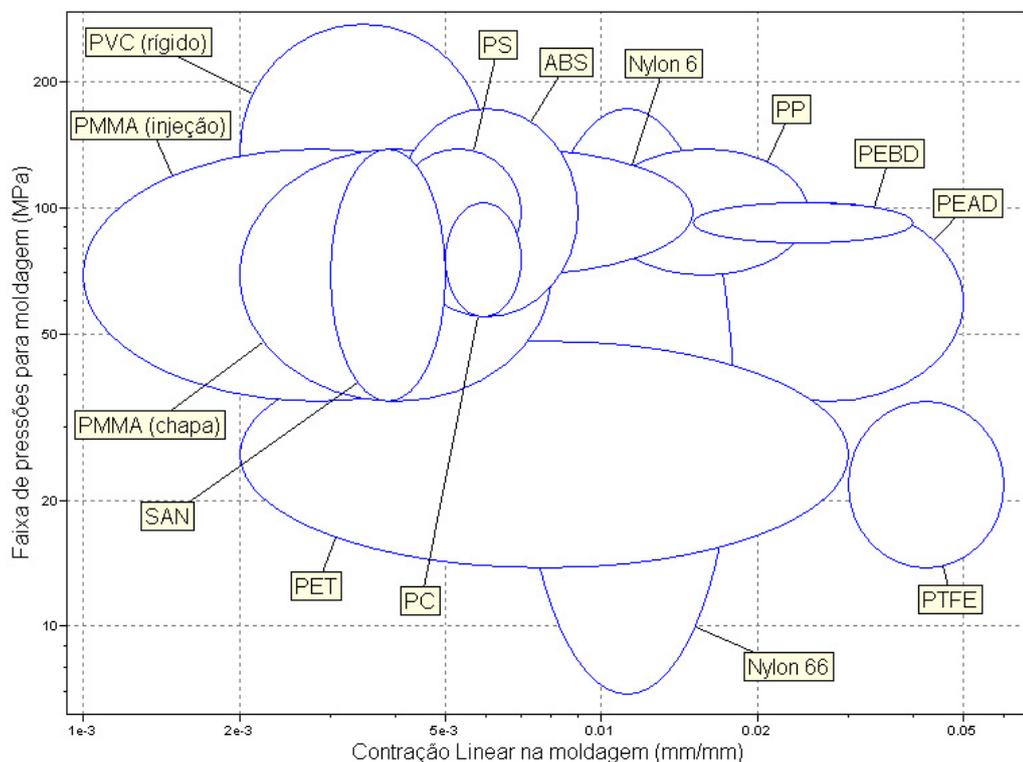
**Figura 54 - Relação entre custo relativo por unidade fabricada e produtividade dos principais processos de fabricação de produtos poliméricos.**  
**Fonte: estudo realizado pelo autor através do software CES (2005).**

### 1.7.1. Moldagem por injeção

A moldagem por injeção é o principal processo para produzir peças de plástico. Segundo Mascarenhas (2002), cerca de 32% das peças de plástico produzidas no Brasil são fabricadas por este processo. Através do processo de injeção é possível se obter peças complexas, de bom acabamento superficial e sem rebarbas em uma única etapa de produção, o que possibilita uma grande quantidade de peças produzidas por unidade de tempo. O processo consiste no preenchimento de um molde fechado com um plástico fundido através do uso de pressões consideravelmente elevadas e aumento de temperatura. Após, o molde é resfriado e a peça produzida é extraída pela abertura do molde, formando assim um processo descontínuo. O molde de injeção possui normalmente duas partes e é fechado por um sistema hidráulico. O projeto do molde, com a correta definição do ponto de fechamento e dos locais dos canais de injeção e de distribuição, se for o caso, é decisivo para se obter um produto de boa qualidade estrutural e visualmente atraente.

Os plásticos moldados por injeção são normalmente termoplásticos, embora termofixos também possam ser conformados por este método. Este processo permite moldar a maioria dos termoplásticos, exemplos dos materiais mais comumente empregados são: polietileno de baixa densidade (PEBD), o polietileno de alta densidade (PEAD), PP, PS e ABS. Através deste processo, são produzidas peças para automóveis, gabinetes eletrônicos, aparelhos domésticos, brinquedos, potes e tampas em geral.

A qualidade da texturização de uma peça pelo processo de injeção irá depender da pressão imposta na injeção do plástico (maior pressão também resulta em maior velocidade de injeção e conseqüente menor tempo de injeção) e da viscosidade do polímero, que por sua vez depende da temperatura do processo e das características físicas do plástico. Segundo Arino (2005) uma melhor cópia da textura do molde se obtém com maiores pressões e menores viscosidades. No entanto um excessivo aumento da pressão de injeção ou a excessiva diminuição da viscosidade de processamento pode causar o aparecimento de rebarbas devido ao fluxo do plástico pelas bordas do molde. A Figura 55 apresenta faixas de pressões para moldagem por injeção para alguns polímeros termoplásticos.



**Figura 55 - Faixas de pressões para moldagem e contração da peça moldada.**  
**Fonte: estudo realizado pelo autor através do software CES (2005).**

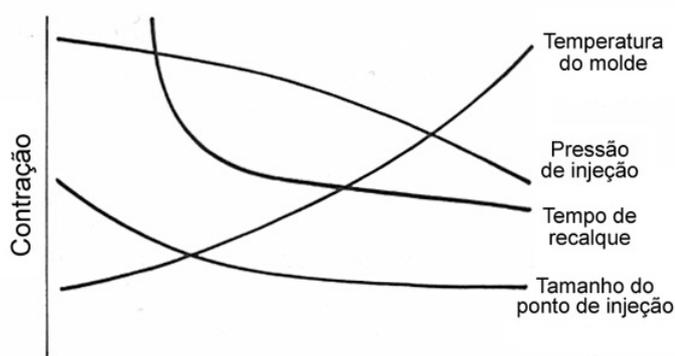
Outro fator de fundamental importância no processo de injeção é a contração da peça moldada (Figura 55). Segundo Morton-Jones (1989), a contração pode ser definida como a diferença das dimensões entre o molde e a peça moldada depois de resfriada e sua principal causa é a variação de densidade pelo aquecimento/resfriamento do material. O autor cita que polímeros semi-cristalinos sofrem maiores contrações (de 1 a 4%) enquanto que os polímeros amorfos apresentam contrações menores (de 0,3 a 0,7%), conforme Tabela 14.

**Tabela 14 - Valores de contração (%) para alguns termoplásticos.**

ABS	0,3 – 0,8	PEBD	2,0
Acrílico	0,2 – 0,8	PEAD	4,0
Nylon 66	1,5	PP	1,5
PC	0,6	PS	0,5

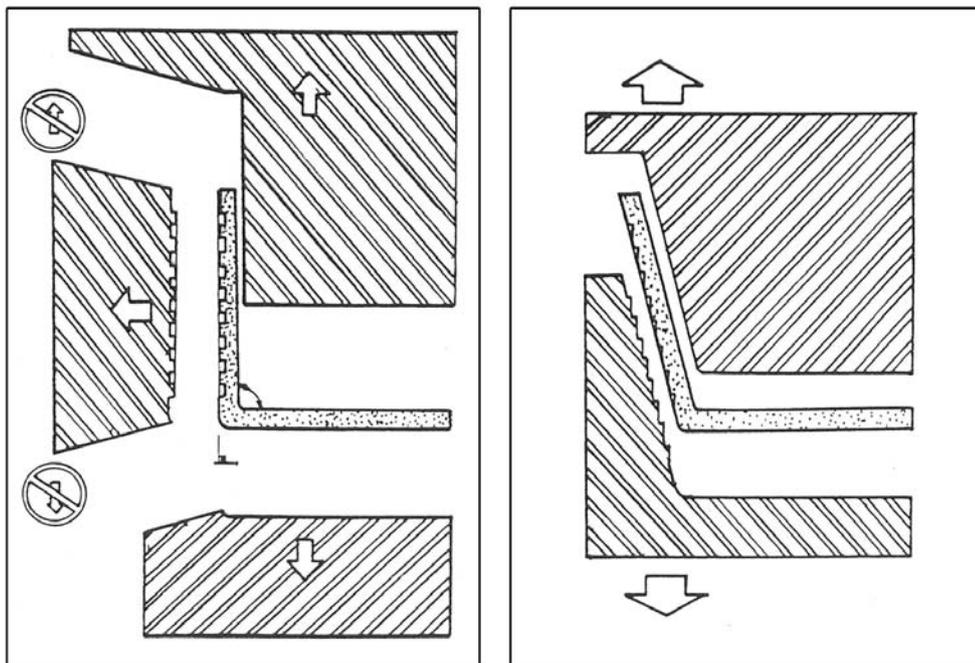
Fonte: Morton-Jones (1989).

No que diz respeito à reprodução de texturas, o controle da contração do material pode ser importante. Nos casos em que se deseja uma textura mais fina ou mesmo uma reprodução fidedigna de alguma textura projetada (maior precisão dimensional), a tendência é de escolha por polímeros menos cristalinos ou amorfos, no entanto, cabe salientar que a maior cristalinidade costuma acarretar em melhores propriedades mecânicas. Morton-Jones (1989) coloca que polímeros preenchidos (compósitos), especialmente com vidros, podem auxiliar na redução da contração. Outra alternativa para contornar o problema da contração é o redimensionamento (aumento em escala) do molde para compensar a redução das medidas após o resfriamento. As condições de processamento também afetam a contração do material, para reduzir o problema pode-se, por exemplo, minimizar a temperatura do molde, maximizar a pressão de injeção e manter a pressão por mais tempo (tempo de recalque) até o resfriamento da peça, conforme observa-se na Figura 56 [Morton-Jones (1989)].



**Figura 56 - Condições de processo e contração do material. Fonte: Morton-Jones (1989).**

A aplicação de texturas no molde de injeção influi na facilidade com que a peça é ejetada do mesmo. Para facilitar a extração de peças injetadas, normalmente na construção dos moldes utilizam-se ângulos (chamados de ângulos de saída) ao invés de paredes verticais com cantos retos. Para uma peça de textura lisa o ângulo de saída mínimo é de um grau. Para uma peça texturizada o ângulo de saída deve aumentar mais um grau para cada 0,025mm de profundidade da textura, ou seja, para uma peça com uma textura de profundidade 0,05mm, o ângulo de saída deverá ser de três graus [Borges, 1998]. Caso não seja possível adicionar esta inclinação no produto final, poderá ser necessário o uso de molde com gavetas (molde com mais de duas partes), o que traz uma grande desvantagem de custo para sua confecção e conseqüentemente para o produto final. A Figura 57 ilustra o uso de ângulo de saída e também o uso de molde com uma gaveta visando permitir a extração, sem dificuldades, de uma peça texturizada.



**Figura 57 - Extração da peça (a) molde com uma gaveta e (b) molde com maior ângulo de saída. Fonte: Borges (1998).**

Observadas as adequadas condições de processamento e características do molde, grande parte dos termoplásticos podem ser texturizados sem maiores problemas. Cabe salientar que a superfície do molde é fundamental para o acabamento da peça produzida e que o custo do molde representa a maior fração do custo de uma peça injetada. A Figura 58 apresenta um produto texturizado de ABS injetado.



**Figura 58 - Produto texturizado obtido por injeção de ABS, componente da indústria automobilística. Fonte: CST (2006).**

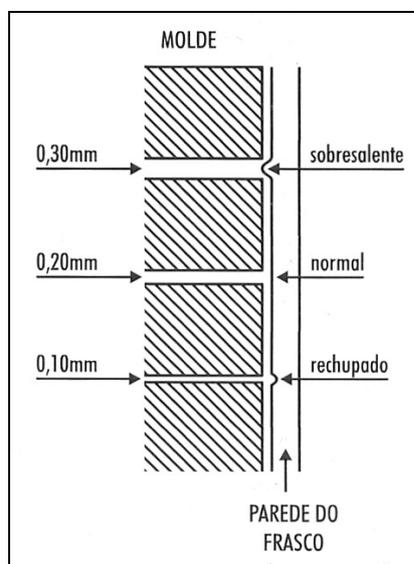
### **1.7.2. Moldagem por sopro**

A moldagem por sopro é aplicada quando se tem interesse em obter um produto oco, de pequena espessura de parede, como garrafas e potes de embalagens de alimentos. O processo se desenvolve em duas etapas bem distintas. A primeira etapa é a produção de um segmento de tubo pelo processo de extrusão ou injeção. O material recém conformado, chamado tecnicamente de parison (pré-forma), é transferido, então, para dentro de um molde bipartido que possui o perfil e a textura desejados na superfície exterior da peça. Ar é insuflado no interior do segmento de tubo, ainda em temperatura de processamento, a uma pressão que expande o material até obter o formato do molde. O processo de conformação por sopro é aplicado à transformação dos termoplásticos em geral, são exemplos comuns: PET, PVC, PEBD, PEAD e estireno-acrilonitrila (SAN).

Com relação ao projeto do molde, devem ser evitados cantos vivos, os quais geram pontos de fragilidade pela alta deformação do material nestes pontos. As ranhuras, comumente utilizadas para auxiliar na estrutura do corpo soprado, não devem possuir ângulos muito fechados e reentrâncias não são indicadas. Para aplicação de reentrâncias deve-se atentar para a espessura do parison, a qual deve ser o dobro da espessura do material na reentrância [Polisul, 1995].

A texturização de um produto pelo processo de sopro é possível, mas detalhes da textura do molde podem ser perdidos, ou por pressão insuficiente, ou pela viscosidade do

material, ou ainda por problemas relacionados com as saídas de ar do molde, que devem estar em posições corretas, bem como em quantidade e tamanho suficiente para que não ocorra o aprisionamento do ar nos sulcos da textura. Para a obtenção de uma superfície lisa de boa qualidade no corpo soprado é necessário que a cavidade dos moldes receba um tratamento de jato de areia, o qual tem por objetivo aumentar a rugosidade das paredes, para facilitar a saída de ar enclausurado entre o parison e o molde. Para corpos de pequeno volume recomenda-se o uso de areia com granulometria de 60 a 80 micra e para maiores volumes entre 30 e 40 micra [Polisul, 1995]. Neste sentido, pode-se afirmar que texturas com rugosidades nestas faixas não são transferidas satisfatoriamente para o produto. De fato, as peças sopradas não reproduzem fielmente a superfície do molde [Morton-Jones, 1989], sendo este processo mais adequado para produção de texturas maiores. Para obtenção de texturas com melhor qualidade, uma alternativa pode ser o projeto do molde específico para determinada textura, sem a intenção de que o molde seja idêntico à textura original, como na injeção. As paredes do molde devem contar com saídas de ar adequadas, as quais são fundamentais para a superfície da peça moldada (Figura 59). Tal feito depende da experiência do projetista de moldes e acarreta em custos maiores de molde e conseqüentemente no produto final.



**Figura 59 - Saídas de ar no molde de sopro. Fonte: Polisul (1995).**

No processo de sopro, nem sempre é possível proceder um aumento substancial da pressão, pelo fato de que o sistema de fechamento de molde, normalmente não possui a mesma robustez hidráulica como o da injeção. O excessivo aumento na pressão do ar soprado pode causar um fluxo de plástico pelas linhas de fechamento do molde, o que por sua vez,

pode causar rebarbas no produto final. Assim, para obtenção de texturas mais finas, a partir deste processo, é necessário um projeto mais cuidadoso do parison e do molde, bem como a utilização de máquinas mais modernas de sopro, as quais, segundo Moldtech (2001), permitem imprimir uma textura com maior definição. A Figura 60 apresenta um frasco de PET texturizado produzido através de injeção (pré-forma) e sopro (forma final).



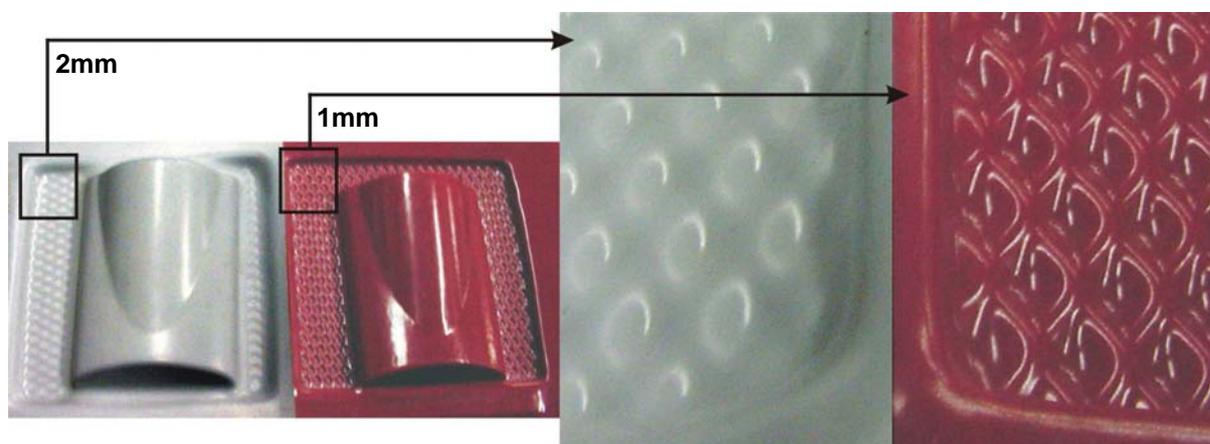
**Figura 60 - Frasco texturizado, PET moldado por sopro.**  
**Fonte: imagem realizada pelo autor.**

### **1.7.3. Termoformagem**

A termoformagem é o processo de produção onde se aquecem chapas planas de materiais termoplásticos, como polipropileno (PP), polietileno (PE), poliestireno (PS), polimetil-metacrilato (PMMA) ou policloreto de vinila (PVC) sobre um molde. A chapa do plástico obtém as formas do molde através da aplicação de pressão com ar comprimido sobre a folha do plástico ou através de vácuo aplicado entre a folha e o molde. O processo se desenvolve em quatro etapas: posicionamento da chapa sobre o molde; aquecimento sobre a chapa (com fechamento do molde); aplicação de pressão com ar comprimido ou vácuo para a chapa tomar a forma do molde; remoção da peça conformada. A termoformagem a partir do vácuo é a mais popularmente conhecida e costuma ser chamada pelo seu nome em inglês *vacuum forming*.

A termoformação é um processo de baixo custo em relação a equipamentos e ferramentas, possuindo ainda altas taxas de produção. Produtos de paredes relativamente finas são obtidos por termoformagem, tais como pratos, copos e embalagens plásticas em geral, o processo também encontra grande aplicação na produção de carenagens, por exemplo, o revestimento interno de geladeiras é uma aplicação típica da termoformagem. As peças produzidas por este processo não possuem na maioria das vezes grandes exigências de detalhes, nem especificações estreitas. Porém, com cuidados especiais e técnicas avançadas de acabamento, os materiais termoformados podem alcançar resultados similares aos produtos obtidos através da moldagem por injeção, podendo-se obter texturas como madeira, couro, liso, corrugado, jateado, lixado, etc.

A qualidade das texturas obtidas por termoformagem, além das características do material previamente discutidas, depende de características do molde e do processo. No que diz respeito ao molde, este deve apresentar adequados orifícios para saída de ar em situação similar ao molde de sopro, porém com a remoção de ar forçada através do vácuo. Para uma melhor reprodução de detalhes, recomenda-se que a gravação da textura no molde seja mais profunda do que a desejada no produto final [Moldtech, 2001]. Quanto às características do processo, a pressão de vácuo é fundamental na reprodução de detalhes da superfície do molde. Outro fator de suma importância é a espessura da chapa a ser moldada, uma vez que menores espessuras permitem reproduzir texturas mais finas. A Figura 61 mostra detalhes de chapas de 1 e 2mm de PS termoformadas.



**Figura 61 - Chapas de 1 e 2mm de PS termoformadas.**  
**Fonte: termoformagem realizada pelo autor no INT/RJ.**

#### **1.7.4. Extrusão**

O processo de extrusão é utilizado para a produção de perfis contínuos a partir de um material na forma de pequenos grãos (*pellets*). O material granulado passa por uma rosca inserida em um canhão cilíndrico submetido à temperatura de processamento e é fundido, formando uma carga de polímero altamente viscoso. Este material viscoso é forçado a passar sob pressão por uma matriz aberta. Muitas vezes, o processo de extrusão é utilizado como um procedimento anterior na indústria para a adição de componentes e aditivos ao plástico inicial, ou ainda, como etapa inicial do processamento em si, como no caso da fabricação do parison para o processo de sopro.

Pelo processo de extrusão são fabricados canos de PVC, trilhos de cortinas, mangueiras, tubulações de polietileno para gás, forros planos ou corrugados em PVC, podendo o processo ser utilizado para a maioria dos termoplásticos. A aplicação de texturas no processo de extrusão é possível se a textura desejada for linear na direção de extrusão, ou seja, em forma de linhas ao longo do perfil produzido. O efeito de inchamento, que ocorre no plástico na saída da matriz, pode dificultar a aplicação de texturas de boa qualidade, fazendo com que detalhes mais sutis desapareçam. Alternativamente, para obtenção de texturas, pode ser aplicada uma laminação no plástico imediatamente após a extrusão.

#### **1.7.5. Laminação**

Na área de materiais poliméricos, recebe o nome de laminação o processo de recobrimento de superfícies em geral com materiais plásticos, com a obtenção de produtos “multicamadas”. O processo se desenvolve pela passagem do substrato e do filme plástico por rolos quentes que promovem a aderência dos componentes. Desta forma podem ser produzidas lâminas com camadas de propriedades e funções diferentes, utilizando-se de materiais metálicos, poliméricos e naturais, como é o caso das embalagens do tipo longa-vida.

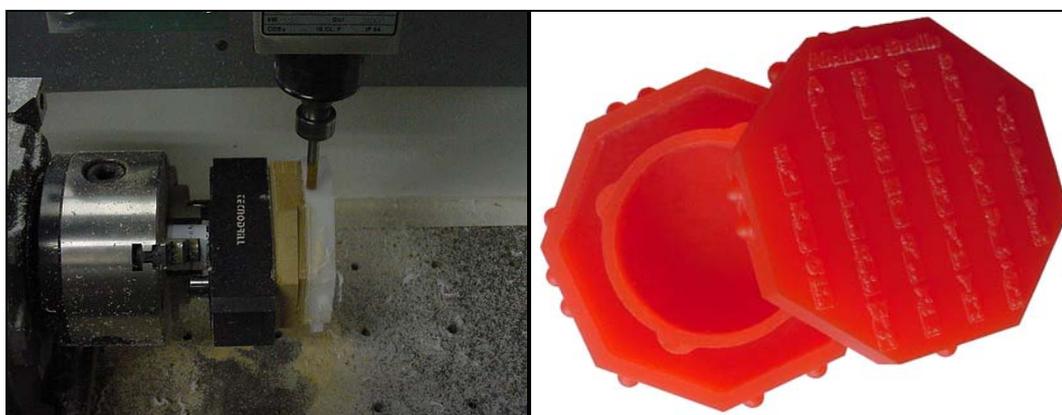
No processo de laminação podem ser aplicadas texturas através da impressão da textura nos rolos de compressão, ou ainda pela adição de uma camada texturizada sob a última camada de plástico. Uma vez que o material a ser laminado não é processado no estado fundido, ele pode reproduzir apenas parcialmente a textura impressa nos rolos. Assim, recomenda-se que a textura a ser gravada nos rolos de compressão seja mais profunda do que

a desejada no produto final [Moldtech, 2001]. A combinação da extrusão com a posterior laminação formam um processo contínuo e capaz de fornecer alta produtividade com baixos custos.

### 1.7.6. Usinagem

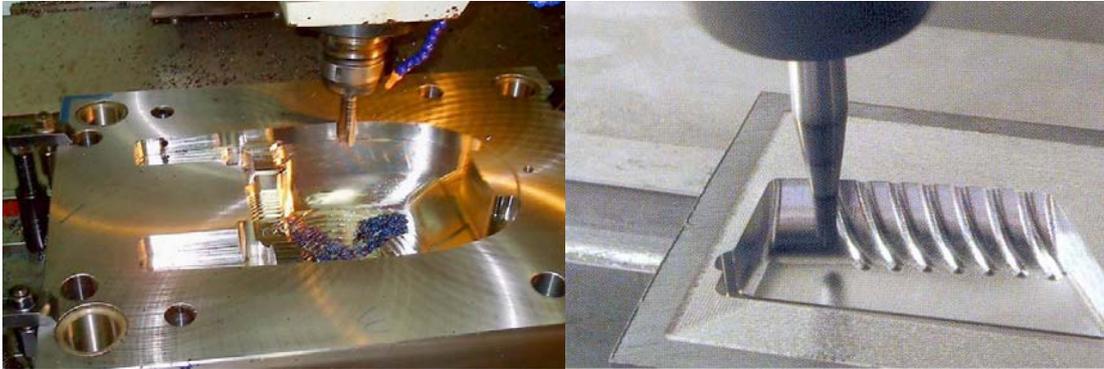
Operações de usinagem são aquelas que conferem à peça a forma, as dimensões, o acabamento, ou ainda uma combinação desses três itens, através da remoção de material [Ferraresi, 1998]. As peças plásticas produzidas por usinagem podem receber tratamento de texturização, dependendo do processo escolhido e das ferramentas utilizadas. Os processos de usinagem mais utilizados são o fresamento (maior versatilidade) e o torneamento (destinado à obtenção de superfícies de revolução). No fresamento o material é removido através de uma ferramenta giratória com múltiplos gumes cortantes (arestas) chamada fresa. Este processo pode ser utilizado para texturização de pequenos lotes. Também para pequena produção, através do torneamento podem ser formadas ranhuras paralelas em peças de revolução.

Devido à baixa produtividade em comparação com os processos de moldagem, os processos de usinagem, especialmente o fresamento, em plásticos são pouco utilizados em aplicações cotidianas. São mais empregados quando se trabalha com polímeros de engenharia em situações nas quais necessita-se de altíssimas precisões dimensionais. Estes processos também são empregados na produção em baixas escalas de polímeros que apresentam dificuldades de moldagem, como alguns polímeros de engenharia ou mesmo termofixos. O fresamento também é bastante utilizado como alternativa econômica para produção de protótipos plásticos (Figura 62).



**Figura 62 - Protótipo usinado em PU.  
Fonte: usinagem realizada no LdSM/UFRGS.**

Os processos de usinagem entram na indústria dos plásticos, na maioria das vezes, para a fabricação e texturização de moldes, seja para injeção, sopro ou termoformagem. Na produção da cavidade os processos mais utilizados são o fresamento e a eletroerosão, a qual consiste em remover material através de descargas elétricas em sua superfície. Para texturização, além destes dois métodos, são empregados diversos processos, como usinagem química, usinagem eletroquímica, ataque fotoquímico (PCE), ou processos a laser. A usinagem também é amplamente empregada no acabamento final dos moldes, especialmente os processos de polimento e jateamento. A Figura 63 apresenta a usinagem de moldes para injeção.



**Figura 63 - Usinagem de moldes para injeção.  
Fonte: Ho-Yo (2006) e Fer-Plastic (2006), respectivamente.**

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

Dadas as potencialidades da digitalização tridimensional a Laser, o presente trabalho busca utilizá-la como ferramenta para desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao Design de Produtos. No que diz respeito à caracterização das texturas, a partir da digitalização de uma superfície pode-se determinar seu perfil de rugosidade com algumas vantagens sobre os métodos por contato convencionais. Podem ser citadas como vantagens: a ausência de contato, preservando a integridade da superfície; a possibilidade de digitalização de diferentes materiais; uma medição mais detalhada, na qual podem ser aplicados filtros digitais para obtenção dos perfis desejados; a possibilidade de re-uso do mesmo perfil para diferentes parâmetros com diferentes filtros e a comparação entre eles (sem a necessidade de nova aquisição), uma vez que os dados podem ser salvos; a possibilidade de armazenamento digital dos dados para documentação; a possibilidade de automação das medições e uma maior velocidade no tempo de aquisição, principalmente devido ao fato de que o scanner pode ser programado para capturar mais de uma linha por operação, sem a necessidade de um novo *setup*.

### 2.1. Digitalização Tridimensional a Laser

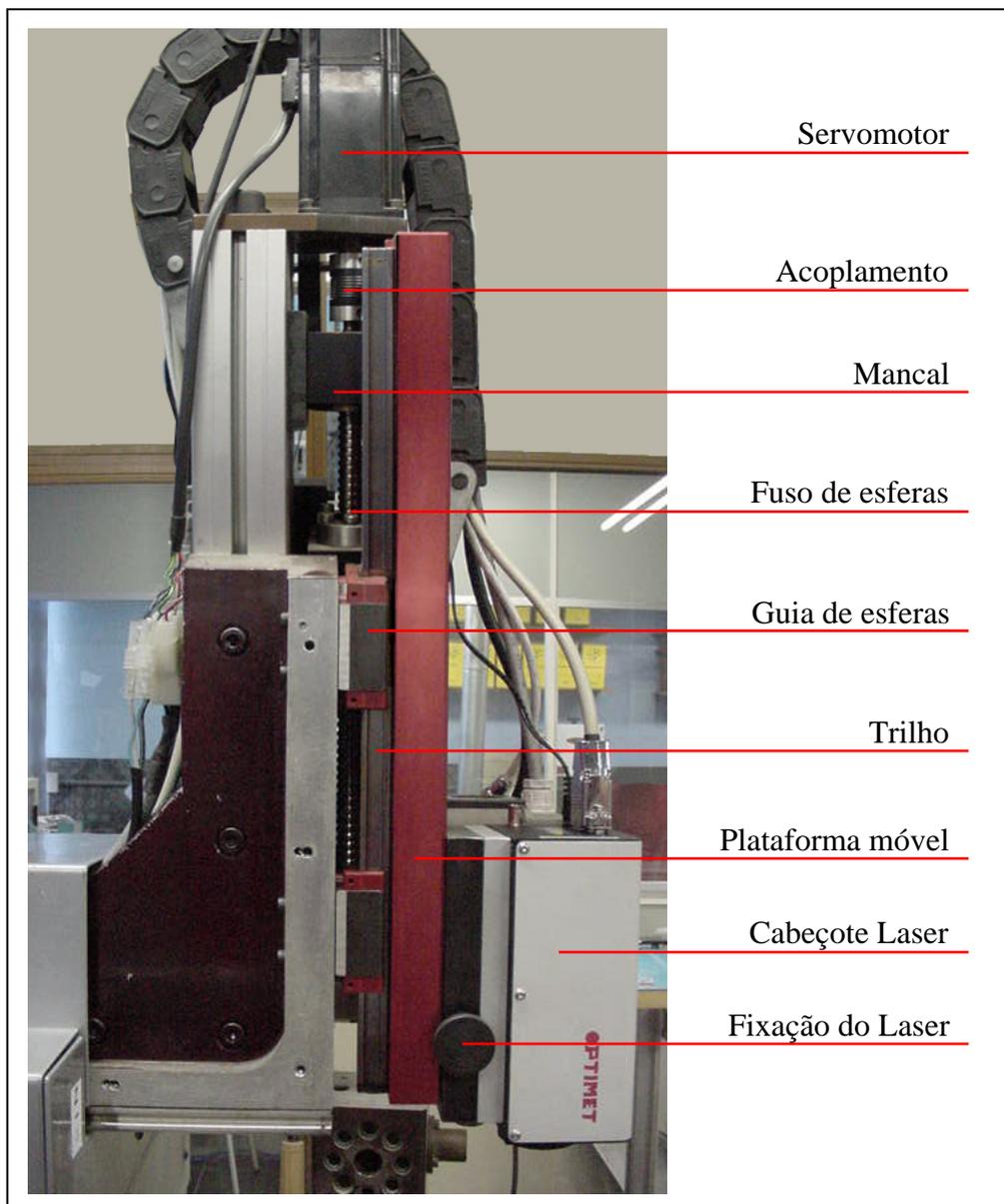
As aquisições de dados topográficos de superfícies, com o objetivo de desenvolver e caracterizar texturas, foram realizadas através da técnica de digitalização Tridimensional a Laser. Para tanto foi utilizado o scanner tridimensional a Laser, marca Tecnodrill, modelo Digimill 3D (Figura 64), instalado nas dependências do Laboratório de Design e Seleção de Materiais (LdSM) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). O referido equipamento foi desenvolvido em parceria do LdSM com a empresa Tecnodrill, de Novo Hamburgo – RS, durante projeto fomentado pela Financiadora de Estudos e Projetos - FINEP no ano de 2002. A principal vantagem do desenvolvimento deste equipamento nacional (com alguns componentes importados) foi a possibilidade de acompanhamento de sua construção, facilitando as etapas de treinamento e manutenção. O software de operação do equipamento

também é de produção local, fato que vem permitindo constantes atualizações e melhorias no sistema.



**Figura 64 - Scanner Tridimensional a Laser modelo Digimill 3D.**  
Fonte: equipamento instalado no LdSM/UFRGS.

O Digimill 3D é um equipamento CNC (controlado numericamente por computador), o qual possui dois cabeçotes, um para usinagem e outro para digitalização, ou seja, trata-se de um equipamento híbrido fresadora CNC e scanner tridimensional a Laser. Em seu funcionamento, o Scanner 3D movimentava-se sobre determinada peça no plano dos eixos X e Y, através do CNC, enquanto que o cabeçote Laser vai medindo a altura no eixo Z. Como resultado da varredura são obtidos arquivos de texto com os pontos da superfície do objeto descritos em coordenadas (x,y,z), ou seja, a já definida nuvem de pontos. Pode-se controlar a resolução (espaçamento entre os pontos), a qual é função da precisão de posicionamento nos eixos CNC, neste caso 0,0015 mm (1,5  $\mu$ m). Os três eixos da máquina funcionam através de fusos acionados por servomotores, conforme a Figura 65.



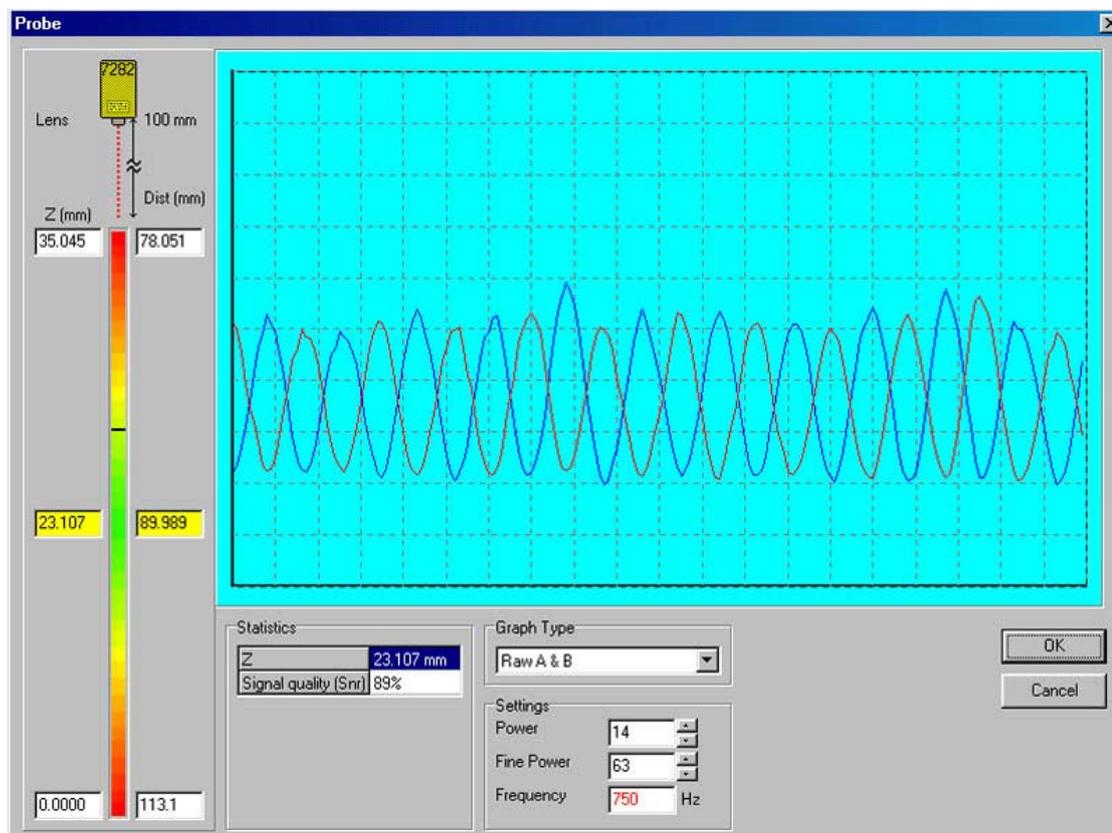
**Figura 65 - Funcionamento do eixo Z do equipamento CNC Digimill 3D.  
Fonte: equipamento instalado no LdSM/UFRGS.**

O cabeçote Laser utilizado tem por característica adquirir até 1000 pontos por segundo, sendo a precisão de sua medida variável conforme a lente utilizada. Também de acordo com a lente selecionada o equipamento pode operar em diferentes faixas de aquisição de dados. Estas faixas são menores à medida que é aumentada a resolução da lente. No LdSM são usadas três lentes (Tabela 15), de 25mm, 75mm e 100mm. Para a maioria das aplicações é utilizada a lente de 100mm, devendo-se isto a sua boa resolução e grande faixa de trabalho, proporcionando uma maior velocidade de digitalização. Nas medições de maior precisão utiliza-se a lente de 25mm, a qual possui precisão máxima de 0,0002mm (0,2 $\mu$ m).

Tabela 15 - Características das lentes do scanner 3D a Laser utilizadas no LdSM.

Scanner 3D	Lente	25 mm	75 mm	100 mm
Lente Feixe de Laser	Precisão ( $\mu\text{m}$ )	< 3 0,2 (máx.)	< 10 4,36 (máx.)	< 15 5,2 (máx.)
	Faixa não captada 1 (mm)	< 12,656	< 59,558	< 78,051
	Faixa de Operação (mm)	12,656 a 14,496 ( 1,84 )	59,558 a 77,737 ( 18,179 )	78,051 a 113,1 ( 35,049 )
	Faixa não captada 2 (mm)	> 14,496	> 77,737	> 113,1

A primeira etapa na digitalização de uma peça é a escolha da lente a ser utilizada de acordo com a necessidade. As lentes foram calibradas especificamente para cada cabeçote e os dados de sua calibração ficam armazenados em uma memória dentro do próprio cabeçote sendo acessados pelo software de aquisição cada vez que o equipamento é ligado. Uma vez determinada a lente, esta deve então ser informada ao software, através de lista disponível no mesmo. Para ajustar o cabeçote à faixa de operação, basta posicioná-lo na altura adequada sobre a peça, através do eixo Z. Ainda deve ser escolhida a potência utilizada no Laser para leitura, a mesma é dividida em uma escala que varia de 0 a 63 e possui um ajuste fino que tem a mesma variação. Quanto mais escura a superfície (maior absorção) ou mais polida (maior espalhamento) maior tende a ser a potência utilizada. A potência máxima (nível 63) do cabeçote é 1mW. A tela de configuração dos parâmetros do cabeçote Laser (Figura 66) apresenta a faixa de operação e a potência escolhida e, com base nestas, retorna a medida e um parâmetro de qualidade do sinal em percentagem. O sistema pode ser configurado para capturar apenas os pontos que possuam qualidade do sinal maior que determinado valor. A Optimet, fabricante do cabeçote, recomenda a utilização do valor de 80% para este parâmetro, no entanto a Tecnodrill, fabricante do Digimill 3D, recomenda a utilização de 65% em seu equipamento e inclusive mantém este valor como padrão no software de aquisição.



**Figura 66 - Tela de configuração dos parâmetros do cabeçote Laser.**

Depois de configurados os parâmetros do cabeçote Laser, devem ser configurados os parâmetros do processo (Figura 67). O equipamento opera realizando uma varredura em uma área retangular definida por dois pontos. Para definir esta área, posiciona-se o scanner em cada ponto desejado e clica-se em “selecionar”. Nesta etapa devem ser definidos a direção de digitalização (x ou y) e o espaçamento entre os pontos e entre as linhas (resolução). Por exemplo, se escolhida a direção de x, o espaçamento entre pontos corresponderá ao espaçamento das coordenadas x e o espaçamento entre linhas corresponderá ao espaçamento entre as coordenadas y. Uma vez que o cabeçote permite adquirir até 1000 pontos por segundo, o sistema ajusta automaticamente a velocidade de varredura de acordo com a resolução selecionada. O ajuste é realizado tomando como base o valor de 850 pontos por segundo, a fim de minimizar erros devido à velocidade de comunicação com o computador. Se houver necessidade, a velocidade de varredura ainda pode ser diminuída e, neste caso, a taxa de aquisição será menor do que os 850 pontos por segundo. Por fim seleciona-se o nome e o local para salvar o arquivo e inicia-se o procedimento de digitalização.

A Figura 67 apresenta a tela de configuração dos parâmetros do processo de digitalização, onde pode-se observar o valor padrão de qualidade do sinal em 65%.

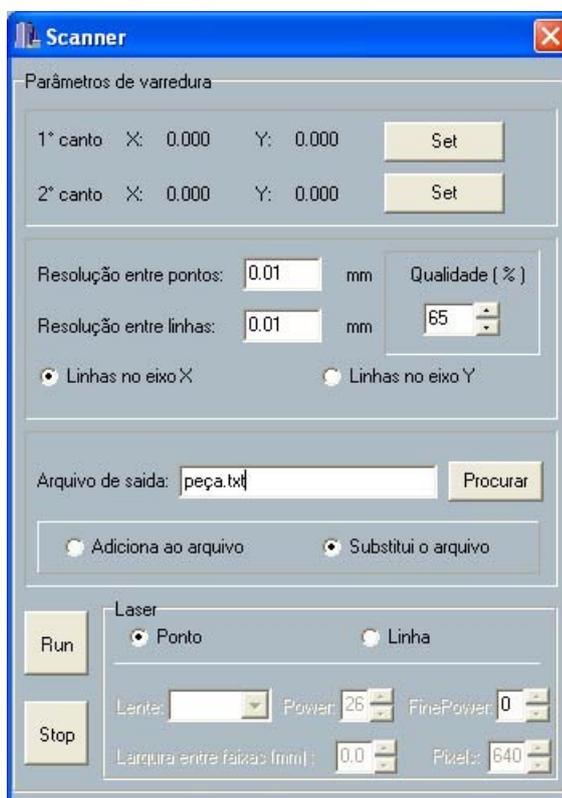


Figura 67 - Tela de configuração dos parâmetros do processo de digitalização.

## 2.2. Padrões de Rugosidade

Para verificar a viabilidade da medição de parâmetros de rugosidade através da digitalização tridimensional a laser foram utilizados seis padrões de rugosidades produzidos pela empresa alemã Massi (Figura 68). Tais padrões foram fabricados por torneamento (em alemão *drehen*) e seus valores de Ra e Rz são apresentados na Tabela 16.



Figura 68 - Padrões de rugosidade da fabricante Massi (Alemanha).

Tabela 16 - Valores de Ra e Rz para os padrões de rugosidade utilizados.

Padrão Nominal	Rugosidade ( $\mu\text{m}$ )	
	Rz	Ra
Rz 3,2	3,5	0,5
Rz 6,3	6,5	1,3
Rz 10	9,8	2,2
Rz 20	20,0	5,4
Rz 40	41,0	10,0
Rz 80	78,0	20,0

Cabe salientar que cada padrão foi classificado pela empresa fabricante de acordo com seu valor nominal de Rz, normalizado conforme a Tabela 4 já apresentada. Assim, por exemplo, o padrão com Rz nominal 80, na realidade apresenta Rz igual a  $78\mu\text{m}$ .

### 2.3. Seleção das variáveis de processo para a digitalização

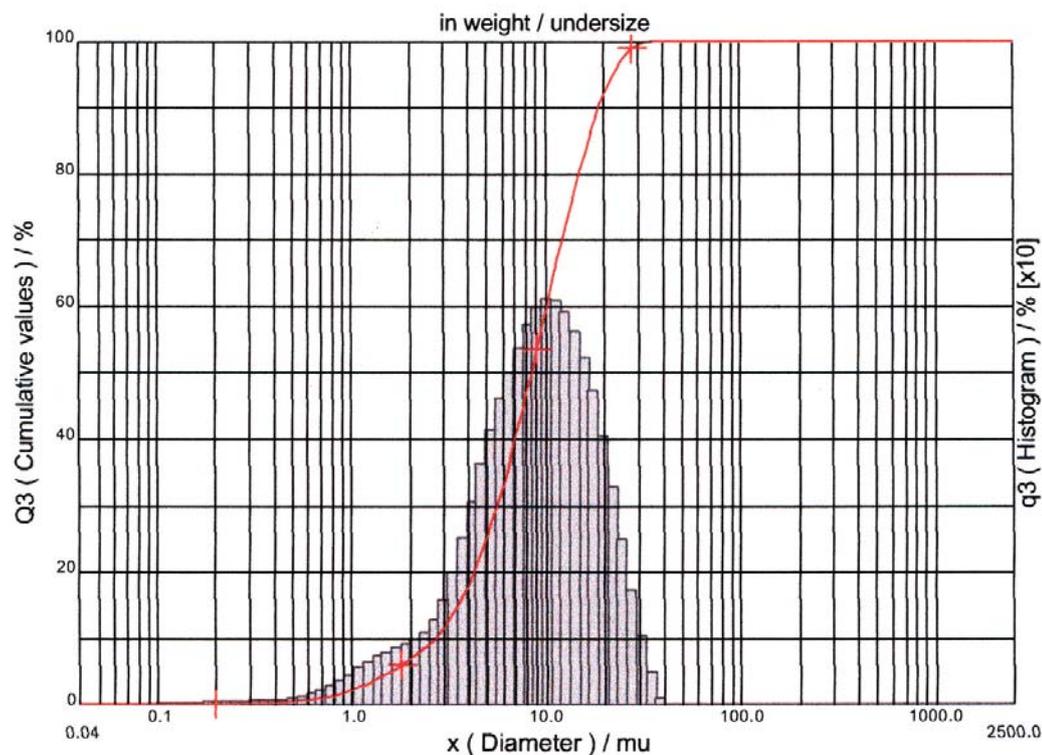
A primeira variável de processo é a precisão de medição do Laser. Visto que o eixo z é posicionado antes de iniciar e não se move durante o ciclo de digitalização, a precisão depende essencialmente da lente utilizada. Esta variável não é crítica para a aquisição da maioria das texturas, as quais foram capturadas com a lente de 100mm (precisão máxima de  $5,2\mu\text{m}$ ), porém torna-se capital na obtenção de perfis de rugosidade e, por isso, utilizou-se a lente de 25mm (precisão máxima de  $0,2\mu\text{m}$ ) para tal fim. Uma importante fonte de erro para a

medição em Z é o ruído inerente ao sistema eletrônico do cabeçote Laser. Este ruído é atenuado pelo aterramento do equipamento, apesar deste não ser realizado em condições ideais uma vez que a máquina encontra-se no sexto andar da Escola de Engenharia da UFRGS e divide o terra com outros dispositivos. O ruído pode ser parcialmente removido após a digitalização através de filtros digitais, os quais podem ser utilizados praticamente sem restrições para texturas, mas que, no entanto, devem ser evitados ou empregados com extrema cautela em perfis de rugosidade. Também podem ser citadas como fonte de erro as características óticas variáveis das superfícies a serem analisadas.

Outra variável de processo importante é a potência utilizada no Laser para leitura, a qual pode atingir um valor máximo de 1mW. Esta potência pode ser regulada através de uma escala de 0 (sem luz) a 63 (1mW), implicando em que cada degrau da escala corresponda a um incremento de aproximadamente 0,016mW. Ainda existe um ajuste fino de potência, também com uma escala de 0 a 63, permitindo então incrementos de 0,00025mW. A potência do Laser precisa ser aumentada tanto quanto mais escura for a superfície (maior absorção da luz) ou mais polida (maior espalhamento da luz). Superfícies brancas e opacas, por exemplo uma folha de papel, podem ser digitalizadas com a potência na escala 10 (0,16mW). Superfícies altamente especulares devem ser medidas com a potência máxima e ainda assim, podem necessitar receber algum recobrimento para viabilidade de digitalização. Tal recobrimento normalmente é realizado com revelador para ensaio de líquido penetrante, mas ainda podem ser aplicados revestimentos com talco, a base de tintas, etc. A aplicação do revelador de líquido penetrante justifica-se pela sua praticidade, uma vez que o produto é disponível em aerossol, o qual pode ser à base de álcool ou de água, ao secar torna-se um fino pó de coloração branca e opaca, podendo ser facilmente removido por estopas ou por lavagem.

Com o objetivo de avaliar a influência do recobrimento na topologia da superfície, realizou-se uma análise de tamanho de partículas por difração de laser, através do equipamento da fabricante francesa CILAS modelo 1180, nos pós obtidos após a secagem do revelador marca Metal-Chek D-70 (Figura 69). Por meio desta análise constatou-se que 90% das partículas possuem diâmetro menor que 18,87 $\mu$ m e que o tamanho médio de partícula é de 9,78 $\mu$ m. Assim, finas camadas deste tipo de revestimento puderam ser aplicadas sem grandes prejuízos na aquisição de texturas, porém, estas não foram aplicadas quando o objetivo

tratava-se de medir rugosidade, uma vez que poderiam gerar erros de magnitude expressiva para tal fim.



**Figura 69 - Análise de tamanho de partícula para o revelador Metal-chek D-70.**

Em função da potência utilizada e das qualidades óticas da superfície, o equipamento retorna um parâmetro de qualidade do sinal, o qual foi utilizado como referência para a aplicação ou não de revestimentos superficiais nas texturas. A qualidade do sinal é expressa como a porcentagem de sinal recebido em relação ao sinal emitido e não foi considerada como parâmetro de processo, uma vez que ela não pode ser alterada diretamente. O sistema pode ser configurado para capturar apenas os pontos que possuam qualidade do sinal acima de determinado valor e este sim foi considerado uma variável de processo. Esta variável exerce grande importância na aquisição dos dados, pois permite capturar ou descartar pontos da superfície digitalizada. Valores muito altos salvam apenas pontos teoricamente mais precisos, porém resultam em superfícies com mais descontinuidades, já valores muito baixos salvam pontos supostamente com menor precisão, apesar de resultarem em superfícies mais contínuas. A qualidade mínima admissível é recomendada como 80% pela fabricante do cabeçote Laser e como 65% pelo fabricante do Scanner 3D. Devido a esse não-consenso e a importância deste parâmetro, a influência do mesmo foi cuidadosamente analisada.

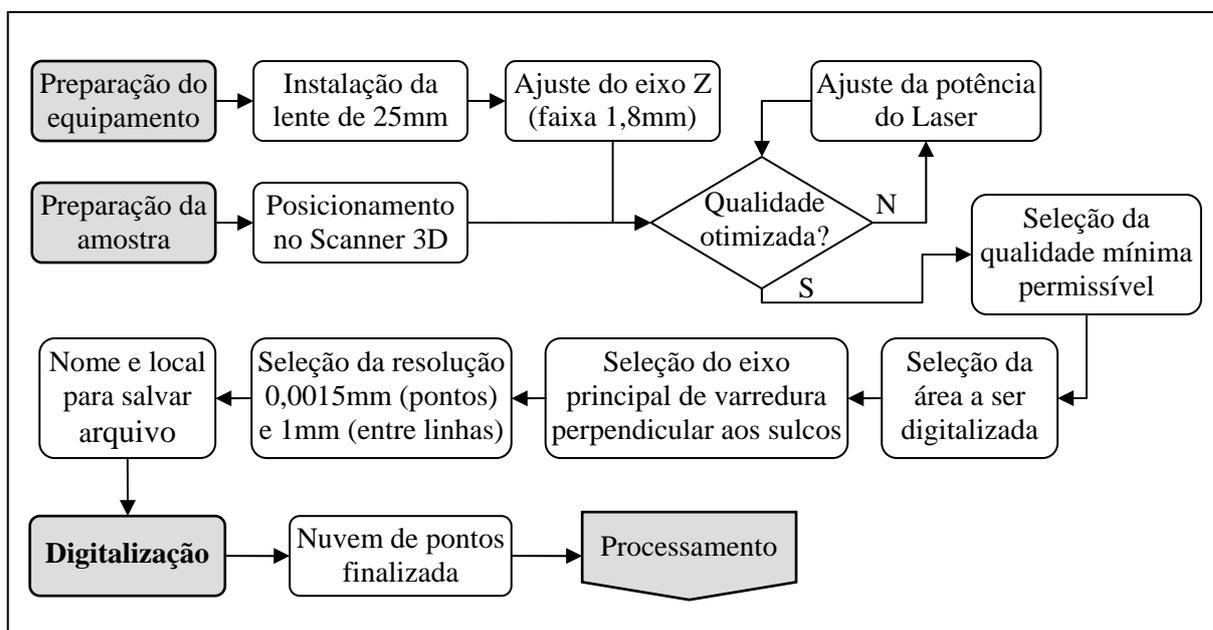
No que diz respeito à continuidade da superfície, bem como à densidade de pontos da mesma, pode ser também controlada a variável de espaçamento entre os pontos, chamada de resolução. A resolução limite é função da precisão de posicionamento nos eixos CNC, a qual possui valor máximo de 0,0015mm (1,5 $\mu$ m) por eixo. Quanto maior for o deslocamento, maior tende a ser o erro de posicionamento, o qual deve ser interpolado por todos os eixos movidos. Na digitalização podem-se utilizar resoluções diferentes para os eixos x e y, sendo que o espaçamento entre os pontos necessita ser menor que o tamanho dos detalhes que deseja-se alcançar, por exemplo, uma ranhura de 0,5mm pode não ser adquirida por pontos capturados a cada 1mm. Para texturas maiores um espaçamento de 0,1mm mostrou-se suficiente, porém, para medições de precisão, como no caso da rugosidade, a resolução máxima foi utilizada. Cabe salientar que quanto maior a resolução empregada, maior o tempo de digitalização e que ampliadas simultaneamente as resoluções dos dois eixos, o aumento de tempo ocorre em proporção quadrática ao valor acrescido.

Outra variável de processo analisada também diz respeito ao tempo de digitalização e à continuidade da superfície. Trata-se da velocidade de avanço do equipamento, a qual deve ser ajustada a sua taxa de aquisição de dados. O cabeçote permite adquirir até 1000 pontos por segundo, porém esta taxa de aquisição depende também da velocidade de comunicação com o computador. Para minimizar uma eventual perda de dados o sistema é configurado para uma taxa de 850 pontos por segundo. Assim, por exemplo, utilizando uma resolução de 0,1mm para captura de uma linha de 100mm (mil pontos) seria necessário um tempo aproximado de 1,2 segundos a uma velocidade de 85mm/s. Para a obtenção de texturas a taxa de aquisição foi mantida tal qual o padrão do sistema. Já para as medições de rugosidade, devido ao grande número de pontos por linha e ao pequeno espaçamento entre eles, detectou-se a necessidade de baixar a taxa de aquisição em 50% (425 pontos por segundo), de modo a permitir a captura de todos os pontos da superfície.

#### **2.4. Digitalização dos Padrões de Rugosidade**

A digitalização dos padrões de rugosidade ocorreu com a utilização do scanner tridimensional a Laser já descrito na seção 2.1. O procedimento realizado inclui a seleção da lente de maior precisão (25mm), colocação do padrão de rugosidade no scanner 3D, posicionamento do cabeçote Laser sobre o objeto e ajuste à faixa de operação (1,8mm)

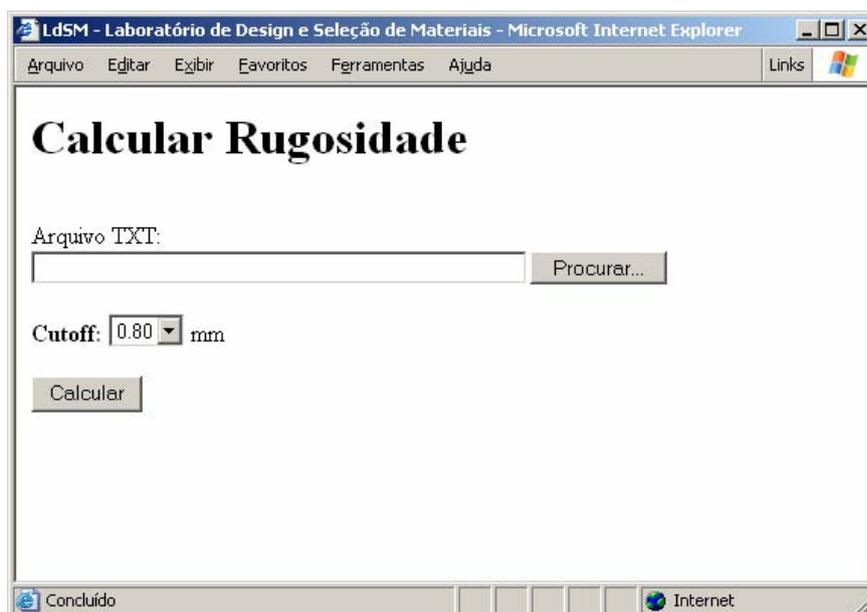
mantendo a rugosidade a uma distância entre 12,6 e 14,4mm da lente. Posicionados o objeto e o cabeçote, foi aferida a qualidade do sinal obtido e esta otimizada através do ajuste da potência do Laser. Visando identificar a influência da qualidade do sinal na medição, foram realizadas várias digitalizações com as qualidades mínimas admissíveis de 80 (recomendada pelo fabricante do Laser), 65 (recomendada pelo fabricante do Scanner), 50, 25, 10 e 2 (qualidade mínima). O eixo principal de varredura, conforme recomendação das normas, foi selecionado na direção perpendicular aos sulcos da rugosidade e utilizou-se a resolução máxima de 0,0015mm entre os pontos adquiridos. Aproveitando a capacidade de automação das medidas, selecionou-se um espaçamento de 1mm entre as linhas (perfis) de modo a obter 10 perfis da mesma peça a cada digitalização. Os nomes de arquivo foram padronizados contendo a medida nominal de cada padrão de rugosidade, bem como a qualidade mínima do sinal na aquisição. Depois de finalizado o *setup* iniciou-se a digitalização e os resultados constituíram nuvens de pontos contendo os perfis primários dos padrões de rugosidades digitalizados. A Figura 70 ilustra o procedimento realizado.



**Figura 70 - Procedimentos para a digitalização dos padrões de rugosidade.**

Ao finalizar as digitalizações, partiu-se para o processamento dos dados adquiridos de modo a separar os perfis e calcular os parâmetros de rugosidade. Conforme já exposto, a nuvem de pontos é salva em um arquivo de texto no formato TXT. Este formato é bastante simples e armazena essencialmente caracteres legíveis (letras, dígitos, espaços e pontuações) e alguns caracteres de controle básicos (tabulações, quebras de linha e retorno). Devido à

possibilidade de acessar e manipular os dados armazenados no arquivo de texto foi desenvolvido um programa para calcular os parâmetros de rugosidade (Figura 71). Para tanto utilizou-se a estrutura de servidor de Internet existente no LdSM, a qual permitiu que o referido programa pudesse ser executado remotamente e comandado à partir de qualquer computador sem a necessidade de instalação local.



**Figura 71 - Tela inicial do programa desenvolvido.**

O programa para processamento da nuvem de pontos foi concebido utilizando a linguagem PHP (*PHP Hypertext Preprocessor*), a qual opera através de software livre e utiliza código aberto (sem a necessidade de compilação). O PHP, por ser processado no servidor, é particularmente indicado para aplicações dinâmicas e de Internet, assim, a exibição de dados foi programada utilizando HTML (*HyperText Markup Language*), tornando o sistema acessível a partir de qualquer navegador. Ainda no que diz respeito à saída de dados do programa, utilizou-se o módulo GD para o PHP, o qual permitiu a criação de imagens dos perfis de rugosidade calculados.

Inicialmente foi analisada a formatação do arquivo TXT, visando elaborar uma rotina para separação dos dados. As nuvens de pontos foram salvas no arquivo da seguinte maneira: dado x1, espaço, dado y1, espaço, dado z1, quebra de linha, retorno de linha, dado x2, espaço, dado y2, etc.; conforme ilustra a Figura 72. Assim, o primeiro procedimento adotado foi a separação do arquivo em linhas, através da identificação das quebras de linha. A

seguir, através da identificação dos espaços, cada linha foi separada em três coordenadas. Ao final deste procedimento a nuvem de pontos estava transformada em uma matriz de variáveis que puderam ser operadas.



x	y	z
4.557	-10.155	-38.396
4.556	-10.155	-38.393
4.554	-10.155	-38.392
4.553	-10.155	-38.390
4.552	-10.155	-38.389
4.551	-10.155	-38.388
4.550	-10.155	-38.389
4.548	-10.155	-38.389
4.547	-10.155	-38.391
4.546	-10.155	-38.392
4.545	-10.155	-38.395
4.543	-10.155	-38.398
4.542	-10.155	-38.400
4.541	-10.155	-38.402
4.540	-10.155	-38.404

Figura 72 - Nuvem de pontos aberta em um processador de texto.

O segundo passo do processamento foi identificar qual dos eixos do equipamento (x ou y) tratava-se do eixo x do perfil. Tal feito foi realizado com a exclusão da coluna cujas duas primeiras coordenadas eram idênticas (no caso da Figura 72 foi excluído o eixo y, com valor constante de -10,155mm). Cabe salientar que antes da exclusão separou-se cada perfil constituinte da nuvem através da identificação do ponto de troca de valor desta coordenada fixa. De posse do eixo x o perfil está identificado, visto que o eixo z do equipamento coincide com o eixo z do perfil. Para cada perfil foi avaliado o tamanho em comprimento e em número de pontos, bem como foram calculados somatórios e médias das coordenadas para obter sua linha média. Com o valor de *cutoff* informado pelo usuário o programa desenvolvido calcula as linhas médias de cada comprimento de amostragem através do método dos mínimos quadrados. Depois de determinada a linha média, os pontos precisaram ser ajustados a esta por meio de uma translação de eixos de coordenadas. A partir da distância vertical do ponto digitalizado até a linha média calculada (M) e do ângulo da linha média com a horizontal ( $\alpha$ ), foi possível através de uma relação de triângulos calcular a distância correta do perfil a sua linha média (D), conforme ilustra a Figura 73.

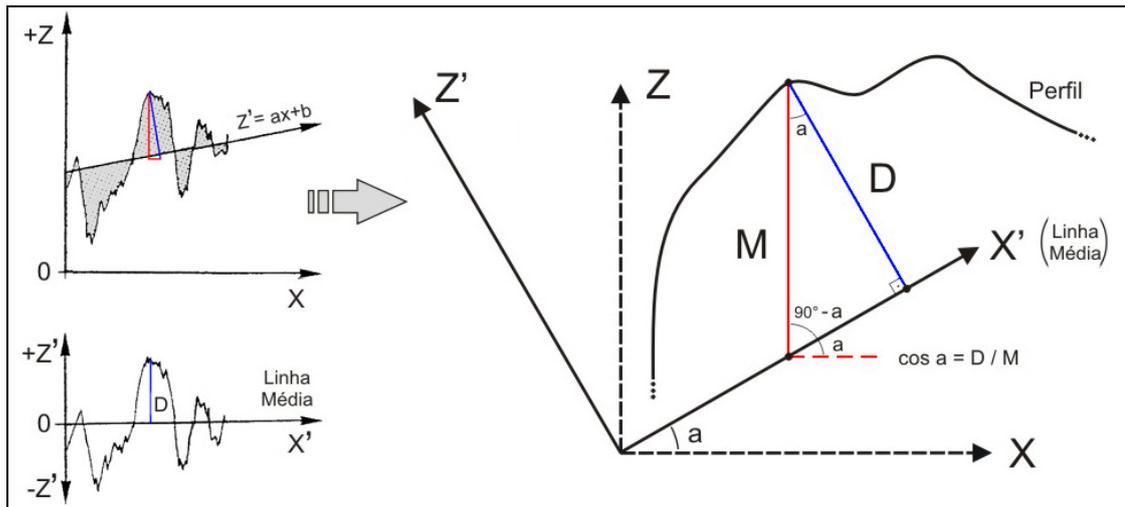


Figura 73 - Ajuste dos pontos digitalizados à linha média calculada.

Com os pontos finalmente ajustados, foram programados os cálculos dos parâmetros de rugosidade  $R_a$ ,  $R_q$  e  $R_z$  para cada comprimento de amostragem. Ao final desta etapa do processamento foram calculadas as médias dos referidos parâmetros a cada cinco *cutoffs*, de acordo com a recomendação da norma, bem como foi calculado o parâmetro  $R_t$ , o qual é baseado na medida dos cinco comprimentos de amostragem. Finalizados os cálculos, a última etapa do processamento consistiu na formatação e exibição dos dados. A Figura 74 mostra o algoritmo de processamento das nuvens de pontos digitalizadas.

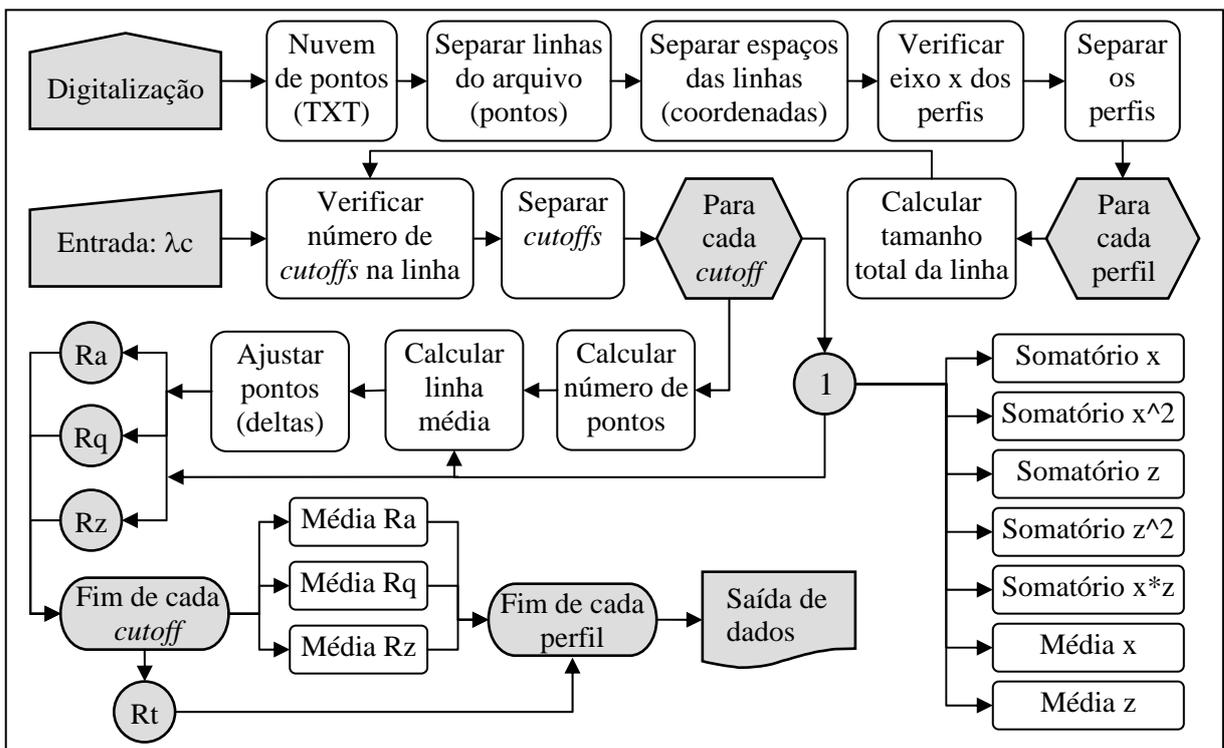


Figura 74 - Processamento da nuvem de pontos para cálculo de parâmetros de rugosidade.

A saída do programa desenvolvido (Figura 75) apresenta na parte superior da tela uma imagem dinâmica com o perfil de rugosidade. Esta imagem pode sofrer alterações de escala conforme operação do usuário e também pode ser percorrida no eixo x através de uma barra de rolagem. Abaixo desta imagem, à esquerda são exibidos os pontos digitalizados, ao centro os dados de cada *cutoff* e à direita os resultados finais da medição.

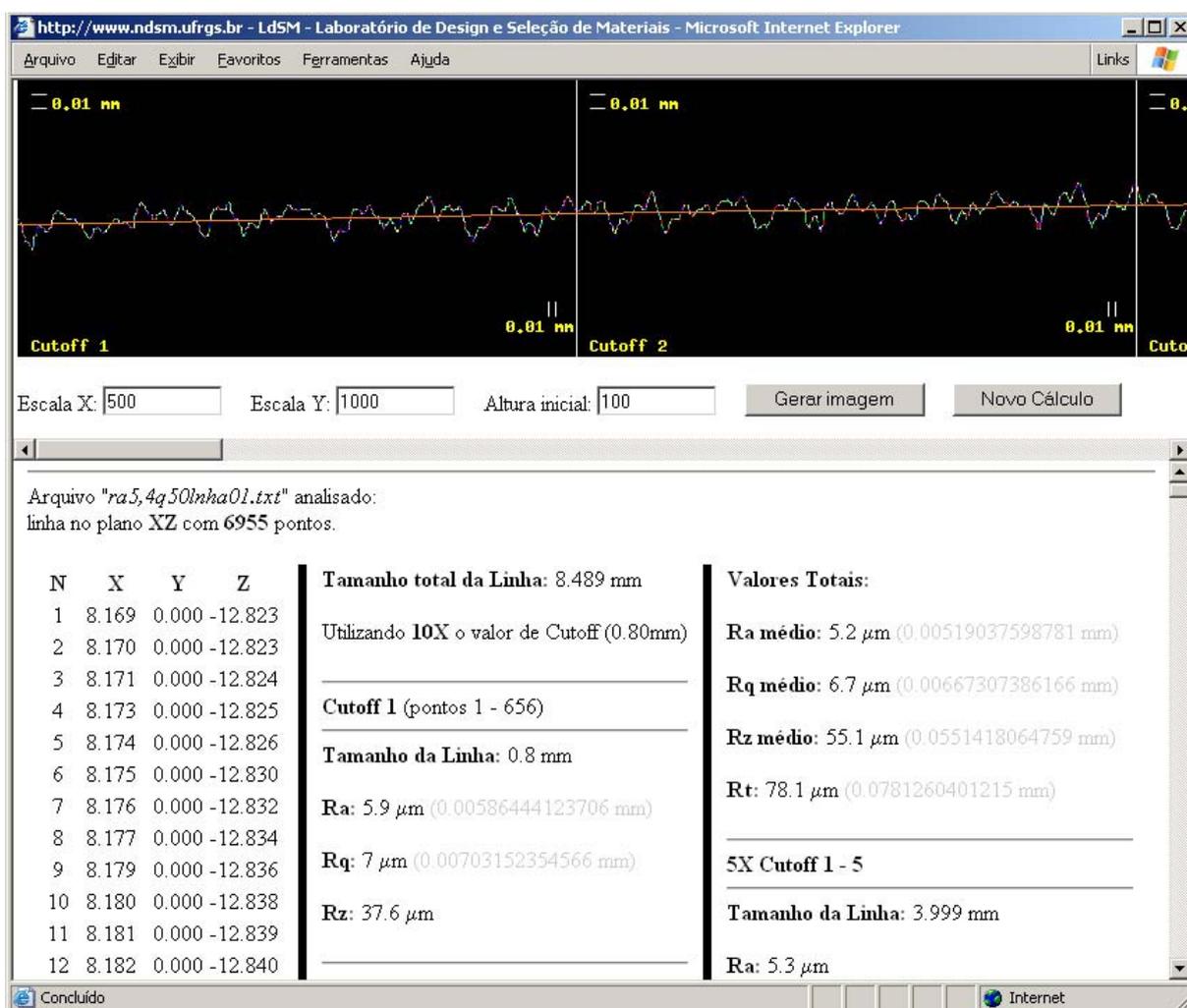
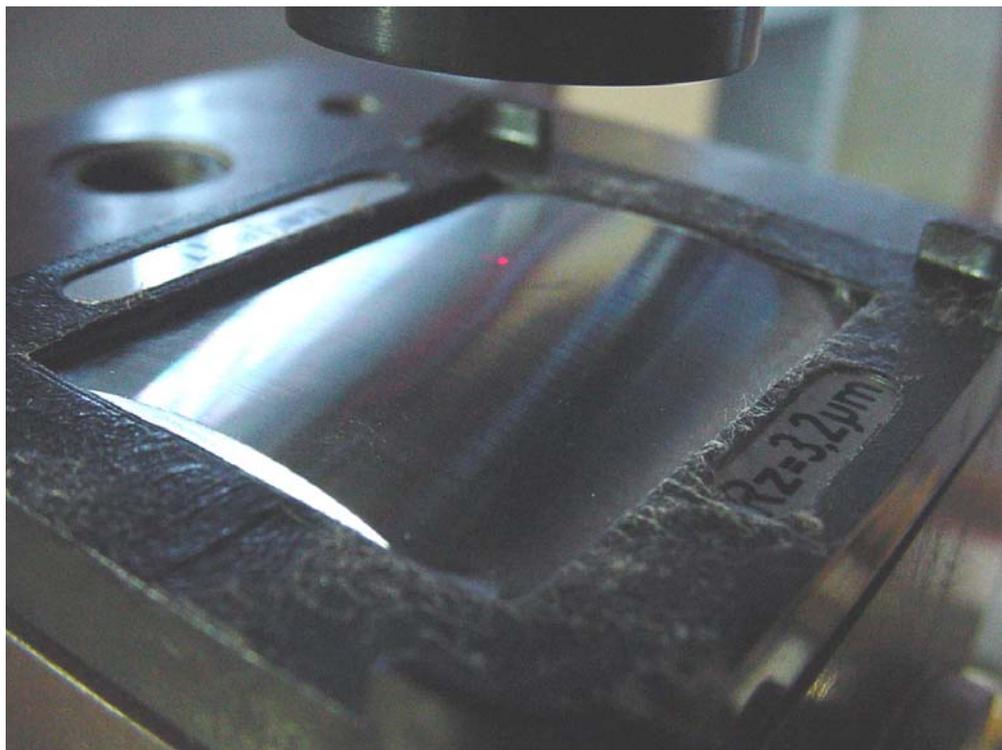


Figura 75 - Exibição de dados no programa desenvolvido.

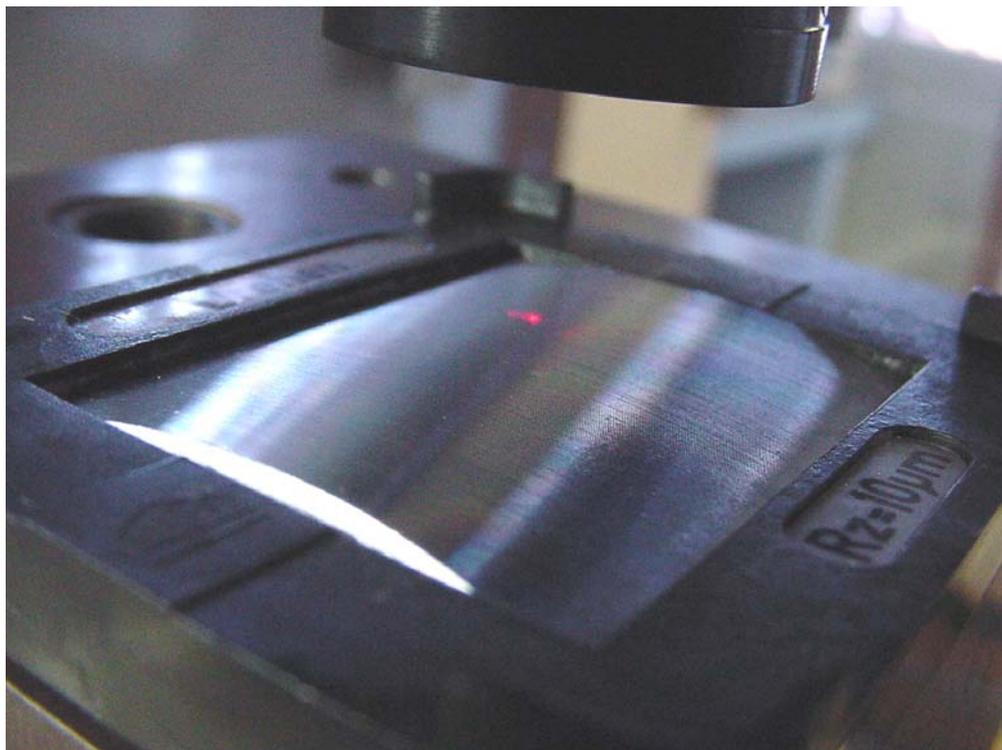
A concepção de um programa para cálculo dos parâmetros de rugosidade permitiu grande agilidade e automação na digitalização e no processamento dos dados adquiridos através desta. Para o processamento no programa desenvolvido foram digitalizados os padrões Rz 3,2  $\mu\text{m}$  (Figura 76), Rz 6,3  $\mu\text{m}$  (Figura 77), Rz 10  $\mu\text{m}$  (Figura 78), Rz 20  $\mu\text{m}$  (Figura 79), Rz 40  $\mu\text{m}$  (Figura 80) e Rz 80  $\mu\text{m}$  (Figura 81). Os resultados são apresentados e discutidos no capítulo 3.1.



**Figura 76 - Digitalização do Padrão Rz 3,2  $\mu\text{m}$ .**



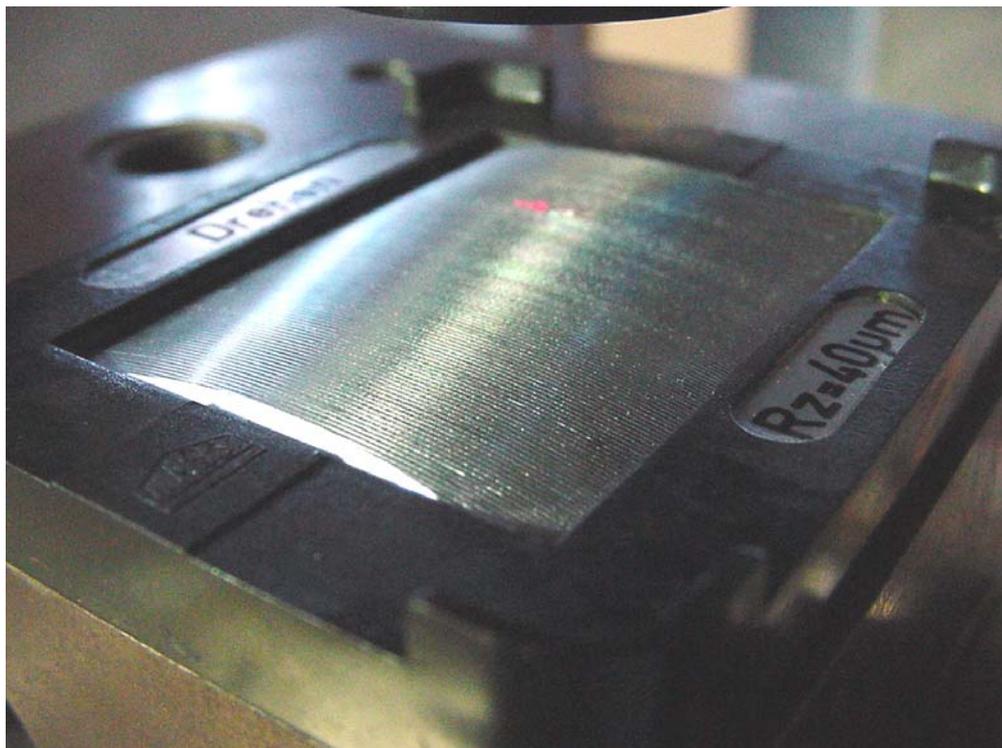
**Figura 77 - Digitalização do Padrão Rz 6,3  $\mu\text{m}$ .**



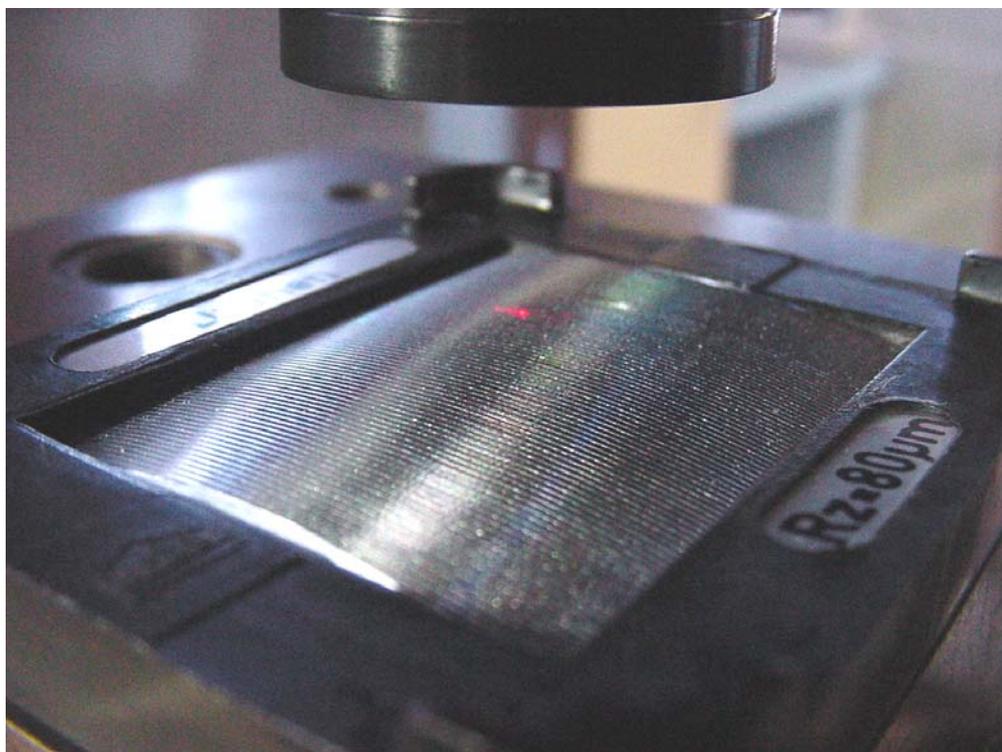
**Figura 78 - Digitalização do Padrão Rz 10 µm.**



**Figura 79 - Digitalização do Padrão Rz 20 µm.**



**Figura 80 - Digitalização do Padrão Rz 40  $\mu\text{m}$ .**



**Figura 81 - Digitalização do Padrão Rz 80  $\mu\text{m}$ .**

## 2.5. Superfícies Tridimensionais

Apesar dos parâmetros de rugosidade serem determinados a partir de perfis 2D, esta torna-se uma análise bastante limitada se comparada à potencialidade dos dados 3D fornecidos pela digitalização. Com a evolução das técnicas de digitalização tridimensional, existe uma tendência natural a métodos de avaliação sobre áreas e volumes. A partir de um volume de controle, pode-se, analogamente ao procedimento 2D realizado, determinar um “plano médio” da superfície através do método dos mínimos quadrados e então de posse deste plano realizar análises tridimensionais de desgaste, rugosidade e outros parâmetros geométricos indicativos do desempenho da superfície. Neste sentido, a partir dos padrões de rugosidade não foram obtidos apenas perfis, mas também áreas de 2mm x 2mm com intuito de analisar suas superfícies tridimensionalmente. As análises espaciais foram realizadas no software Geomagic Studio. As superfícies tridimensionais obtidas são apresentadas no capítulo 3.2.

Superfícies tridimensionais são também texturas e visto que a digitalização permite análises relativamente complexas de parâmetros superficiais, os procedimentos realizados para tal fim podem ser direcionados também para a aquisição de texturas com vistas à aplicação no Design de produtos. A metodologia desenvolvida para tanto é apresentada na seção 2.6.

## 2.6. Desenvolvimento de texturas

As texturas podem ser criadas basicamente através de estruturas bidimensionais (imagens) ou tridimensionais (objetos). Em ambos procedimentos é possível realizar uma criação livre, sem comprometimento geométrico com a imagem ou objeto de inspiração, ou realizar uma criação fidedigna à textura original. Quando a criação das texturas parte de uma estrutura bidimensional, conforme Kindlein (2004), o processo envolve a seleção de imagens, identificação das propriedades que compõem a essência de texturas em potencial e trabalho em softwares vetoriais para traçar curvas e formas que comporão o relevo, o qual é gerado com a exportação dos gráficos vetoriais para sistemas CAD e posterior modelagem para gerar volumes. No entanto, texturas que fogem a padrões geométricos podem ser extremamente complexas de serem obtidas através do método 2D. Este é o caso das texturas naturais, como

folhas, couros, pedras, etc., visto que em geral a natureza apresenta suas texturas de forma orgânica, sendo difícil sua modelagem através de softwares CAD. Para facilitar a modelagem, no método 2D, comumente as características da textura são simplificadas ou estilizadas (Figura 82). Assim, para obtenção de texturas fidedignas a objetos, naturais ou não, a digitalização 3D a Laser mostra-se uma ferramenta de grande importância e aplicação.



**Figura 82 - Textura do abacaxi; (a) fruta, (b) detalhe da textura e (c) parametrização.**

Buscando uma fonte para inspiração e criação de novas texturas aplicáveis em produtos industriais e principalmente diferenciadas, descobriu-se a biônica (Guanabara, 2005) como ferramenta ideal para esse estudo, uma vez que a mesma busca nos sistemas naturais formas, princípios, propriedades ou mecanismos aplicáveis no desenvolvimento de produtos. “As texturas originadas a partir da natureza são muito singulares; em um mundo de soluções artificiais é um retorno aos parâmetros orgânicos e emocionalmente apelativos” (Dischinger, 2006). A idéia de trabalhar com uma textura natural em comparação com as texturas artificiais comuns é de extrema importância na projeção de produtos diferenciados e inovadores.

A metodologia proposta consiste basicamente nas etapas de digitalização tridimensional a Laser, processamento dos dados adquiridos do scanner, parametrização da textura e geração de arquivos para CAD/CAM.

### **2.6.1. Digitalização**

A etapa de digitalização ocorre com a utilização do scanner tridimensional a Laser já descrito na seção 2.1. O procedimento consiste na seleção da lente adequada: lente de 25mm para relevos de até 1,8mm, lente de 75mm para relevos de até 18mm e lente de 100mm para relevos de até 35mm. Na prática, não havendo grande necessidade de precisão, utiliza-se como padrão a lente de 100mm a qual possui precisão máxima de 5,2 $\mu$ m. Seleccionada a lente,

coloca-se o objeto a ser digitalizado no scanner 3D, posiciona-se o cabeçote Laser sobre o objeto (dentro da faixa de operação da lente) e afere-se a qualidade do sinal. Caso esta não seja satisfatória, pode-se ajustar a potência do Laser ou, em último caso, aplicar um recobrimento sobre a superfície a ser digitalizada. Escolhida a qualidade mínima admissível para a aquisição de um ponto, seleciona-se a área ser digitalizada, o eixo principal de varredura (x ou y) e a resolução entre pontos e linhas a ser utilizada. Para a aquisição de texturas a resolução deve ser preferencialmente a mesma nos dois eixos, pois assim obtém-se uma superfície mais uniforme e o processamento da nuvem é facilitado devido à organização dos pontos. Cabe salientar que o espaçamento entre os pontos necessita ser menor que o tamanho dos detalhes que deseja-se alcançar e que para superfícies de textura claramente visível a olho nu, o espaçamento de 0,1mm fornece ótimos resultados. Finalizada a determinação dos parâmetros de processo, informa-se nome e local para salvar o arquivo e inicia-se a digitalização. Para áreas muito grandes, descontínuas ou que não caibam na faixa de operação da lente, desde que não se retire a peça do lugar inicial (para manter a mesma referência), pode-se realizar um novo procedimento de digitalização e adicionar os pontos no mesmo arquivo anterior. A Figura 83 ilustra estes procedimentos.

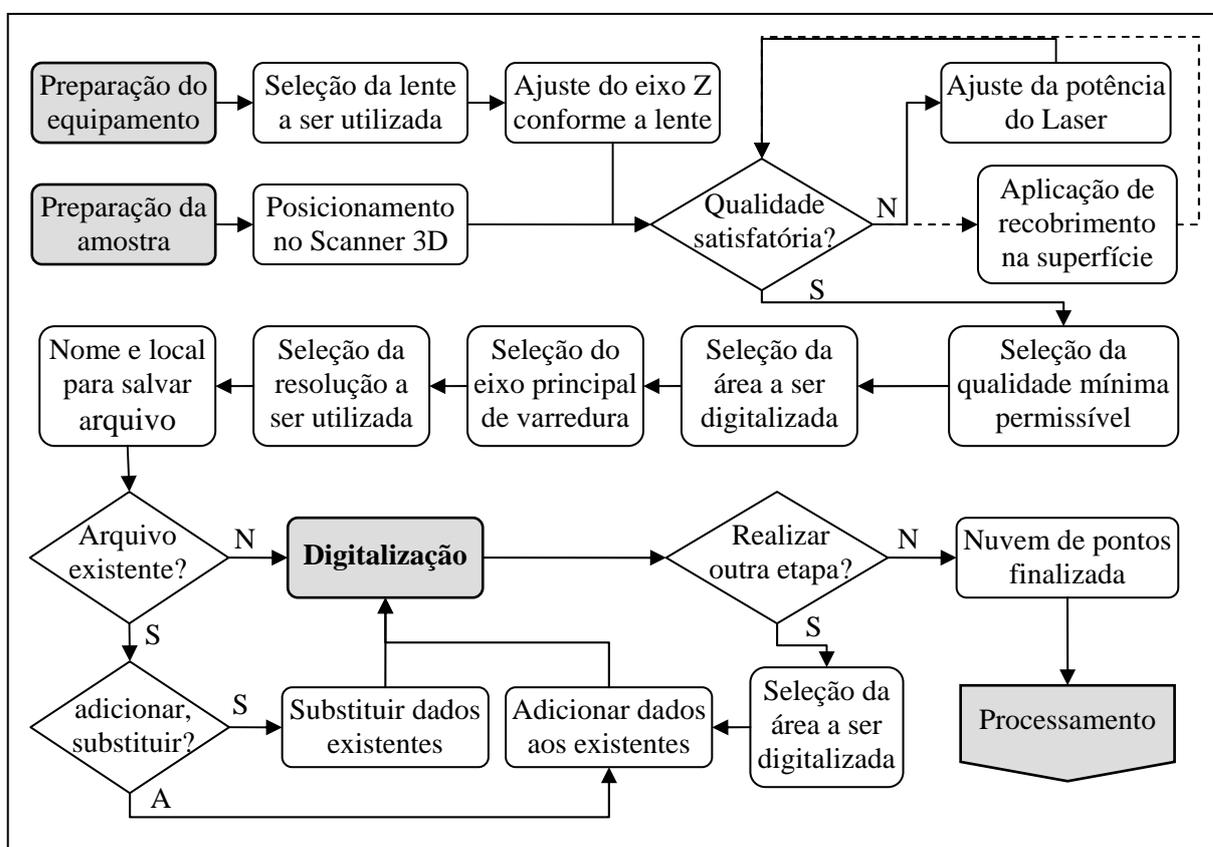


Figura 83 - Procedimentos para a digitalização tridimensional a Laser de uma superfície.

### 2.6.2. Processamento

Uma vez realizada a digitalização, parte-se para o processamento dos dados adquiridos. A primeira etapa no processamento da nuvem de pontos é a exclusão dos pontos desnecessários, geralmente pertencentes a dispositivos de apoio e fixação da peça, ou mesmo à mesa do scanner. As etapas seguintes necessitam de softwares específicos para o processamento de nuvens de pontos. São realizadas então a passagem de um filtro (com controle de sensibilidade) o qual elimina os pontos que estejam fora dos padrões, ou seja, destoando dos demais, e a passagem de outro filtro que permite a redução do ruído inerente ao processo de digitalização. Por fim pode ser realizada mais uma filtragem para reduzir o número total de pontos, finalizando a edição da nuvem de pontos. A partir da nuvem de pontos filtrada é possível construir uma malha de melhor qualidade. A Figura 84 apresenta a filtragem de uma nuvem, na vista de topo observa-se o espaçamento entre seus pontos.

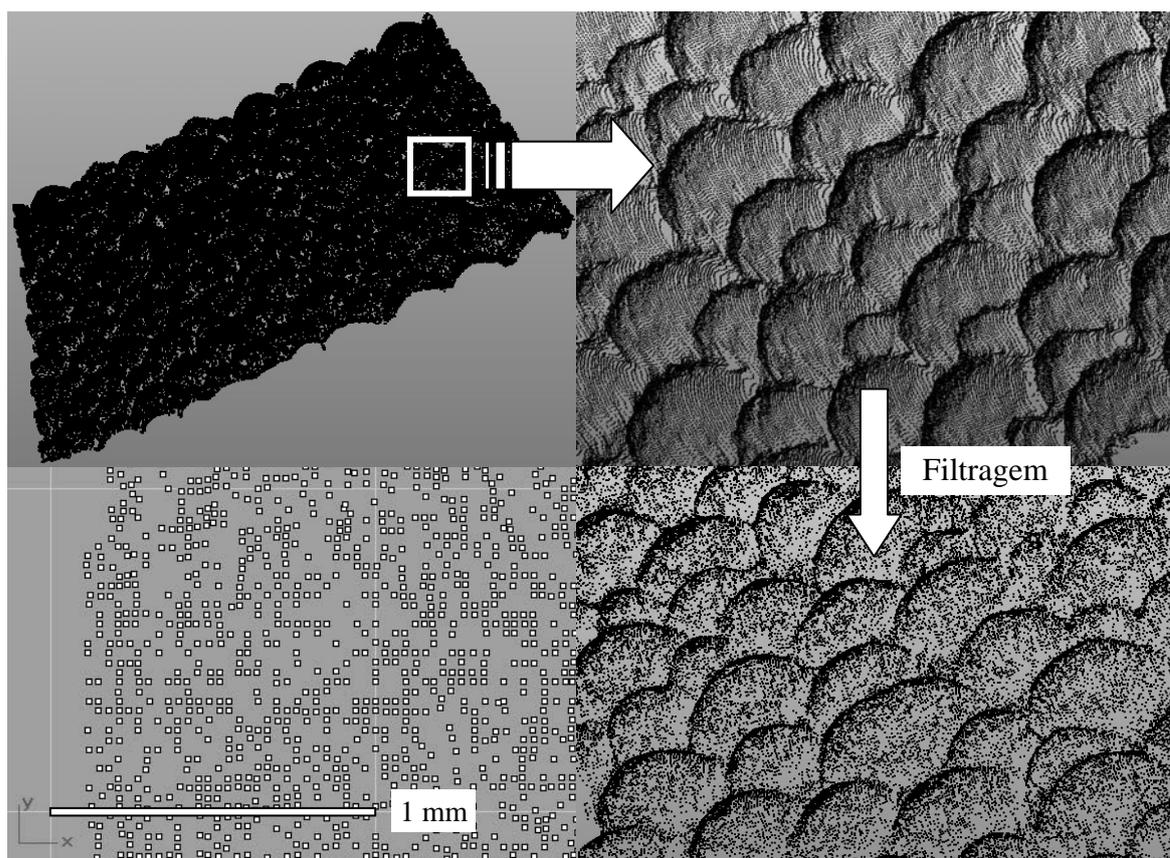
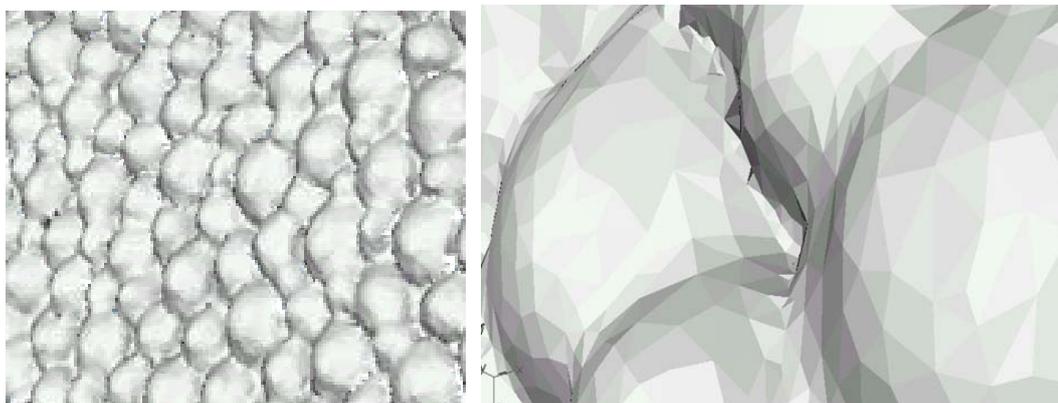


Figura 84 - Filtragem de uma nuvem de pontos.

A construção de uma malha de triângulos planos é realizada através da união, três a três, dos pontos constituintes da nuvem. Normalmente na malha gerada há a presença de algumas descontinuidades (furos) que precisam ser corrigidas. O fechamento de furos ocorre pela interpolação de pontos (vértices dos triângulos) seguindo a curvatura de suas regiões adjacentes. Pode-se aplicar um filtro para redução do número de triângulos com vistas a obter uma malha mais leve e fácil de manipular. Eventuais intersecções entre triângulos também devem ser removidas, o que é realizado excluindo os triângulos em intersecção e realizando uma operação de fechamento de furos. Por fim pode-se realizar uma suavização na malha, ou seja, a re-orientação de alguns triângulos tornando suas arestas mais tangentes à vizinhança, operação que melhora o aspecto da superfície. A Figura 85 mostra uma malha de triângulos obtida a partir de uma nuvem de pontos.



**Figura 85 - Malha de triângulos obtidas a partir da nuvem de pontos.**

Embora as malhas de triângulos sejam suficientes para trabalho na maioria dos sistemas CAD/CAM, ainda é possível a geração de superfícies NURBS a partir delas. Para tal feito são necessários procedimentos com elevado grau de trabalho, os quais consistem basicamente em extrair curvas geratrizes da malha, determinar a orientação das curvas, definir as curvas que serão arestas e as que serão referência para os pontos de controle e por fim gerar a superfície sobre as curvas e pontos de controle. Para o desenvolvimento de texturas esta etapa não foi necessária, pois uma vez que o objetivo é a obtenção de uma textura fidedigna à de um objeto real, não é intenção a edição avançada da superfície. A Figura 86 ilustra o processamento realizado nas nuvens de pontos digitalizadas.

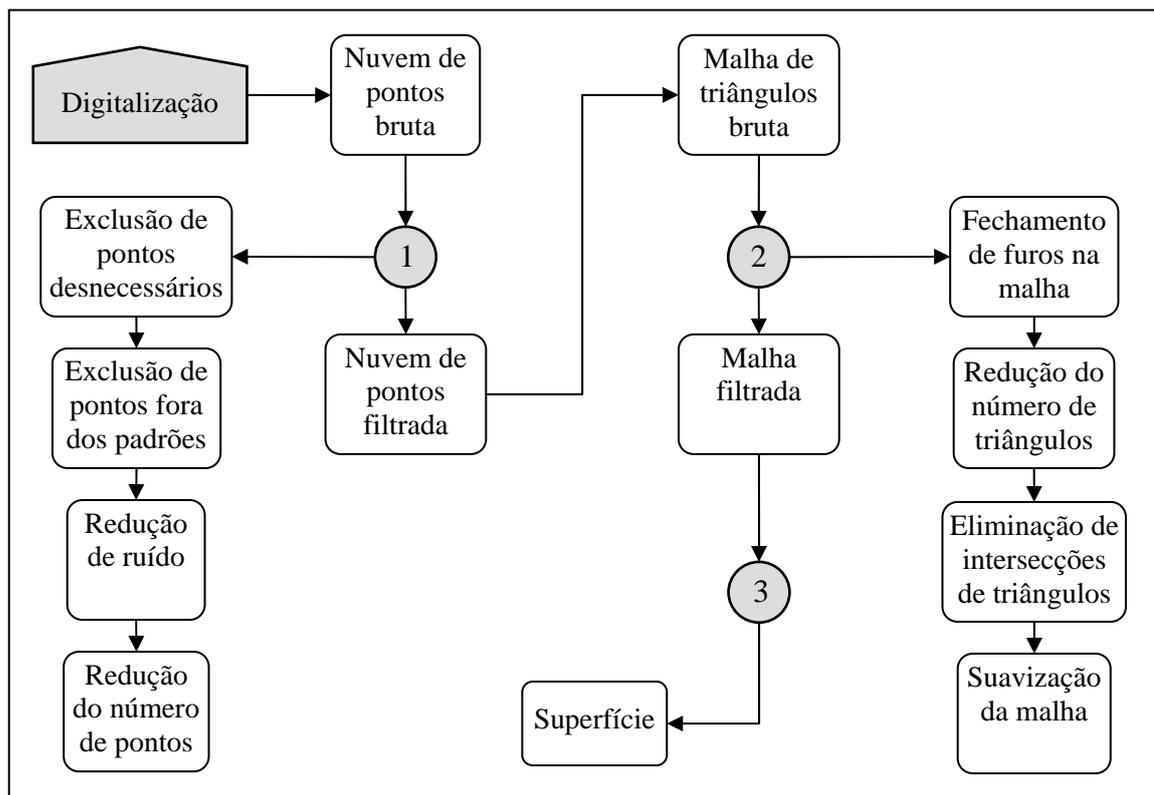
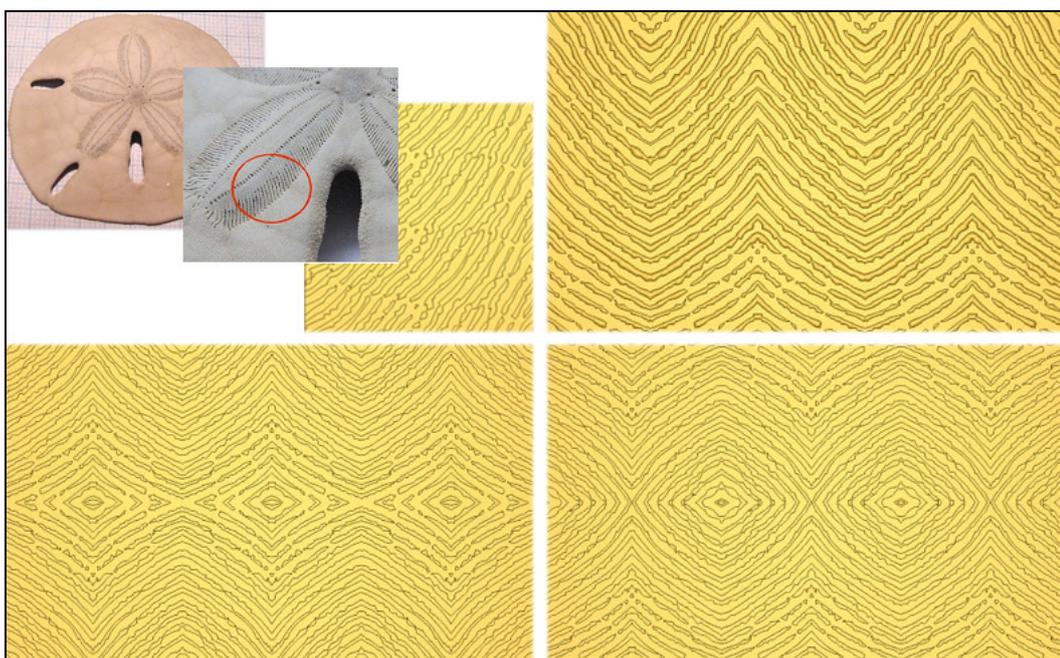


Figura 86 - Processamento da nuvem de pontos obtida através da digitalização 3D a Laser.

### 2.6.3. Parametrização

Normalmente busca-se a obtenção de texturas que possam ser aplicadas em superfícies de qualquer tamanho e reproduzidas em grande escala por processos industriais automatizados. Para tanto se faz necessário a organização destas texturas em módulos que possam ser repetidos a intervalos constantes. Segundo o Dicionário Aurélio (1999), módulo pode ser definido como a unidade planejada segundo determinadas proporções e destinada a reunir-se ou ajustar-se a outras unidades análogas, de várias maneiras, formando um todo homogêneo e funcional. O processo de obtenção de um módulo padrão de repetição é chamado de parametrização. A parametrização é realizada objetivando o perfeito encaixe entre os módulos, de modo a não deixar transparecer seus pontos de encontro e tornar a textura infinitamente contínua.

Um módulo, parametrizado ou não, pode ser repetido de maneiras diferentes. Basicamente as repetições ocorrem através de disposições simples lado a lado com os módulos perfeitamente alinhados ou através de disposições lado a lado com os módulos variando suas posições e/ou orientações. As repetições com módulos variando suas orientações, através de espelhamento por exemplo, podem gerar mosaicos bastante interessantes, porém com efeitos difíceis de serem imaginados durante a etapa de criação (Figura 87), os quais acabam por descaracterizar a textura original.



**Figura 87 - Repetições do módulo da textura bolacha do mar (*encope emarginata*).**

Na repetição lado a lado com os módulos alinhados é fundamental a parametrização do módulo para que possa-se obter um relevo contínuo e sem aparecimento de emendas. A operação de parametrização de uma textura 3D pode ser bastante complexa, exigindo habilidade e experiência do manipulador do relevo. Um software particularmente adequado para a manipulação de relevos é o ArtCAM, pois nele existem ferramentas para “esculpir” o relevo via computador. O referido software além de também ser um CAM, possuindo uma interface para a programação da usinagem da textura, ainda permite exportar os relevos nele modelados diretamente no formato STL.

A maneira mais fácil encontrada para a parametrização foi através da conversão do relevo em uma figura no formato mapa de bits - BMP (*bitmap*). Este formato consiste basicamente em uma representação de imagens gráficas através de pontos (*pixels*) dispostos em linhas e colunas, sendo o valor de cada ponto armazenado em um ou mais bits de dados (Figura 88). Conforme o número de cores da figura, mais bits são reservados para cada ponto, por exemplo, uma imagem monocromática necessita apenas de 1 *bit por pixel*, uma imagem em escala de cinzas (256 cores) utiliza 8 bits, enquanto que o formato mais comum com 16,78 milhões de cores utiliza 24 bits. A densidade de pontos, ou seja, a resolução da imagem, é comumente expressa em pontos por polegada - dpi (do inglês *dots per inch*) e também influi diretamente no tamanho do arquivo. A resolução de tela nos computadores convencionais é de 72 dpi, enquanto que imagens com boa resolução para manipulação costumam ficar entre 300 e 600dpi. Estas imagens podem ser compactadas, visando obter um menor tamanho de arquivo. Este é o caso dos arquivos com a extensão JPG ou JPEG (de *Joint Photographic Experts Group*), os quais são salvos no formato JFIF (*JPEG File Interchange Format*).

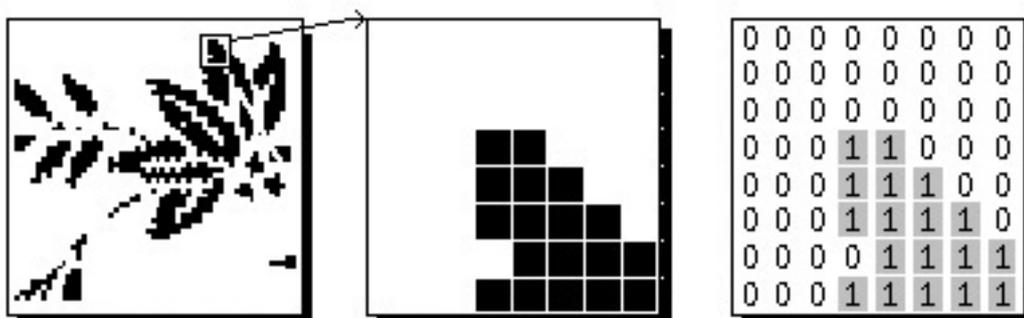


Figura 88 - Representação de uma imagem monocromática através de mapa de bits.

Um relevo (pontos  $x,y,z$ ) pode ser convertido em um mapa de bits mantendo suas coordenadas  $x$  e  $y$  representando a largura e a altura da imagem (linhas e colunas), enquanto que a profundidade do relevo ( $z$ ) passa a ser representada pelo valor correspondente à cor de cada ponto. Este valor atribuído a cada ponto pode ser representado em diversas escalas de cores. Para simples visualização pode-se utilizar uma escala com cores (Figura 89 a), pois facilita a diferenciação de cada valor pelo olho humano, fato que torna a escala com cores de grande utilização, por exemplo, na visualização científica. No entanto para trabalhar os dados através de editores de imagem, optou-se por trabalhar com a escala de cinzas (Figura 89 b). Apesar desta escala limitar-se a 256 cores (tons de cinza), sua escolha justifica-se por ela promover grande facilidade de manuseio, principalmente no que diz respeito à transição entre uma cor e outra, permitindo a edição de superfícies mais suaves.

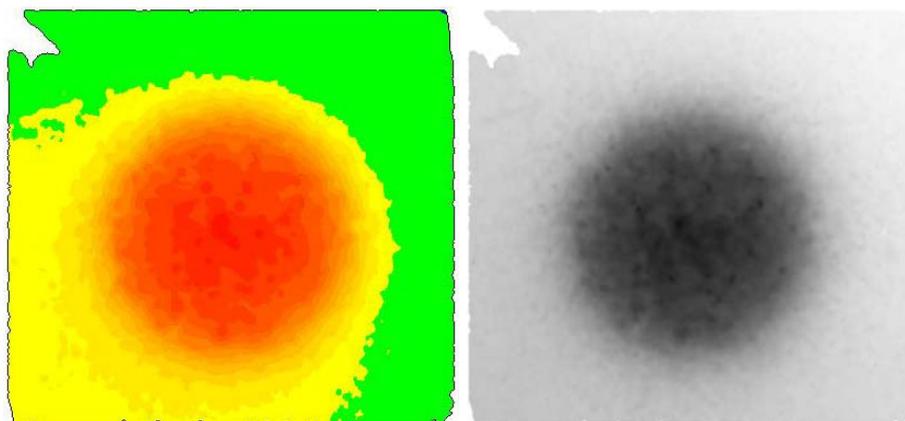


Figura 89 - Relevo (a) em escala de cores e (b) em escala de cinzas.

A escala de 256 tons de cinza mostra-se satisfatória no que diz respeito à manipulação de texturas, pois em relevos não muito altos a resolução obtida ainda é suficiente para trabalhos em CAD/CAM. Por exemplo, em uma textura com 2,56mm cada nível da escala corresponde a 0,01mm, sendo suficiente para uma operação de usinagem. Em casos extremos, como o de uma textura com 25,6mm (pouco mais de uma polegada), em que cada ponto corresponde a 0,1mm, pode ser necessário realizar mais de uma operação ou uma posterior suavização do relevo em CAD. A Figura 90 mostra a inserção da parametrização no processamento de uma nuvem de pontos.

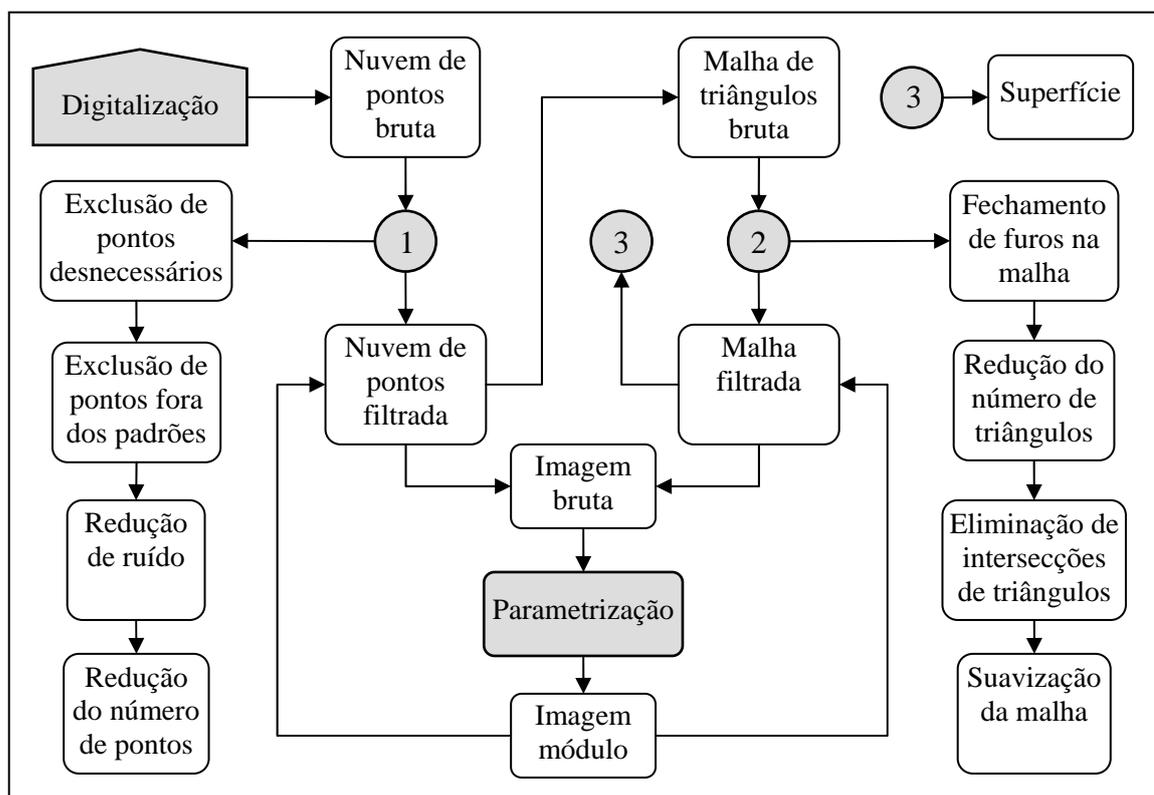


Figura 90 - Processamento com parametrização de uma nuvem de pontos digitalizada.

#### **2.6.4. Geração de arquivos**

Conforme já exposto no item 2.4, as saídas de dados do scanner tridimensional à Laser são nuvens de pontos armazenadas em arquivos de texto no formato TXT. A manipulação destes dados pode gerar diversos formatos diferentes de arquivos contendo pontos, curvas, malhas, superfícies, sólidos ou mesmo texto. O presente trabalho é baseado em formatos internacionais de arquivos, preferencialmente os quais não pertençam a nenhuma marca proprietária, visando a maior intercambialidade de dados. Assim, foram adotados os seguintes arquivos como padrão: TXT, para pontos (em forma de texto); STL, para malhas de triângulos; IGS, para superfícies; e BMP, para imagens em escala de cinzas.

A partir das texturas desenvolvidas, foram extraídos módulos os quais foram processados e salvos no formato STL. Alguns destes módulos foram importados no software ArtCAM para a programação da sua usinagem ou para a programação da usinagem de moldes e assim foram produzidos. Os arquivos contendo o modelo 3D (STL) e o código CNC para usinagem, bem como as imagens do processo de desenvolvimento das texturas foram armazenados em um banco de dados, o qual é apresentado no capítulo 3.3.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Digitalização dos Padrões de Rugosidade

Os padrões de rugosidade digitalizados foram processados no programa desenvolvido apresentado no capítulo 2.4. Como resultados iniciais são exibidas imagens dos perfis dos padrões Rz 80  $\mu\text{m}$  (Figura 91), Rz 40  $\mu\text{m}$  (Figura 92), Rz 20  $\mu\text{m}$  (Figura 93), Rz 10  $\mu\text{m}$  (Figura 94), Rz 6,3  $\mu\text{m}$  (Figura 95) e Rz 3,2  $\mu\text{m}$  (Figura 96). Cabe salientar que nas referidas figuras são apresentados os primeiros comprimentos de amostragem para cada perfil, estando estes em escalas diferentes, conforme o valor de *cutoff* recomendado pelas normas: 2,5 mm para os dois primeiros, 0,25 mm para o último e 0,8 mm para os demais.

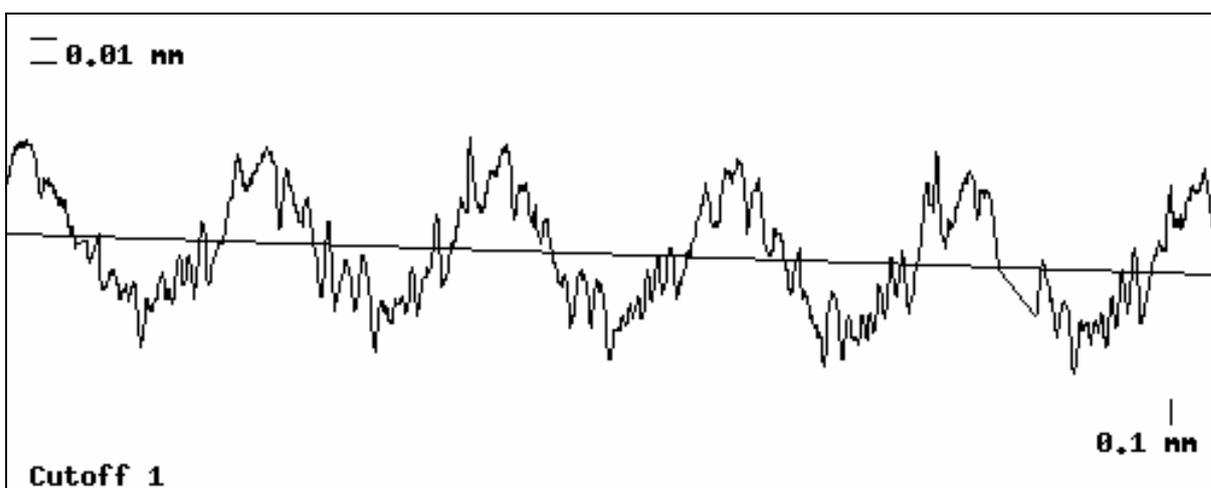


Figura 91 - Perfil obtido do padrão Rz 80 $\mu\text{m}$ , *cutoff*=2,5mm, escala x=200X y=1000X.

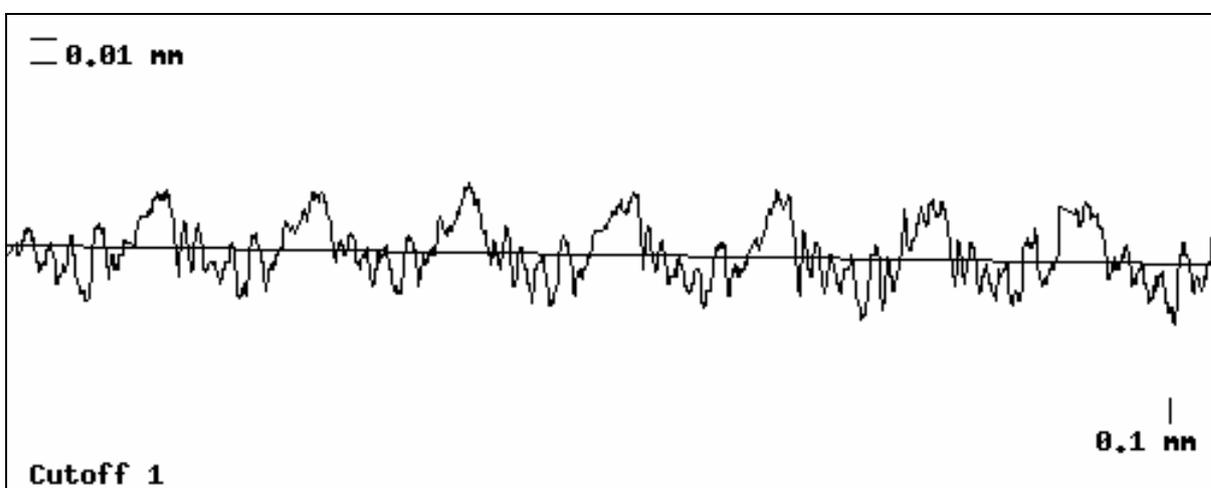


Figura 92 - Perfil obtido do padrão Rz 40 $\mu\text{m}$ , *cutoff*=2,5mm, escala x=200X y=1000X.

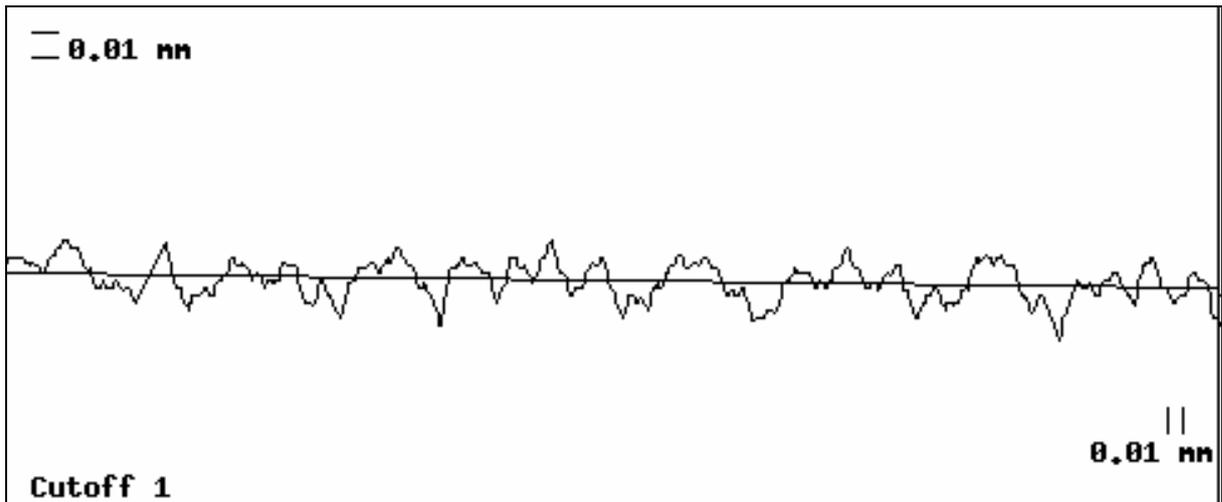


Figura 93 - Perfil obtido do padrão Rz 20µm, *cutoff*=0,8mm, escala x=600X y=1000X.

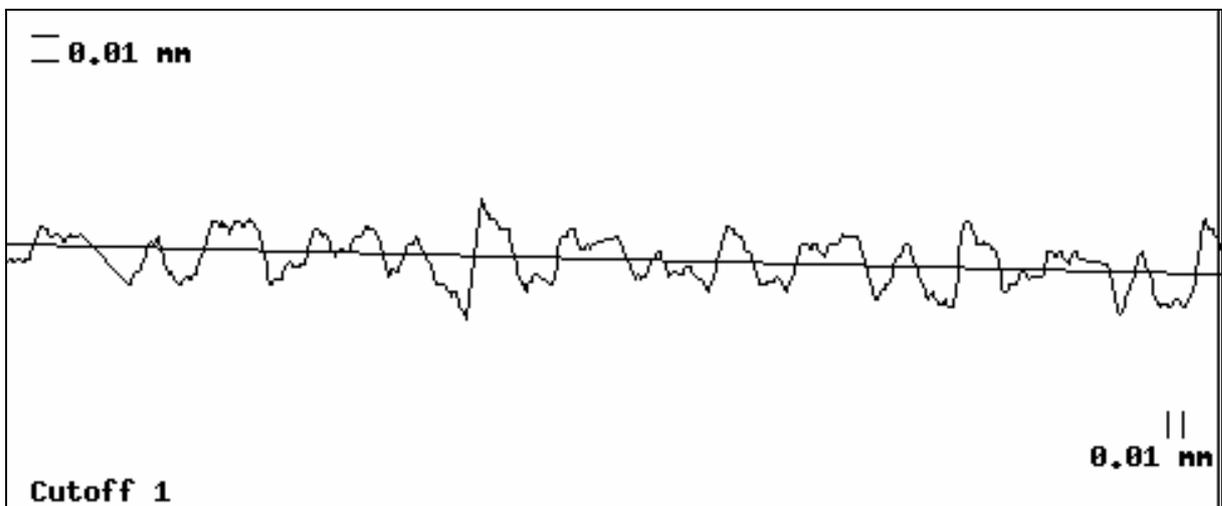


Figura 94 - Perfil obtido do padrão Rz 10µm, *cutoff*=0,8mm, escala x=600X y=1000X.

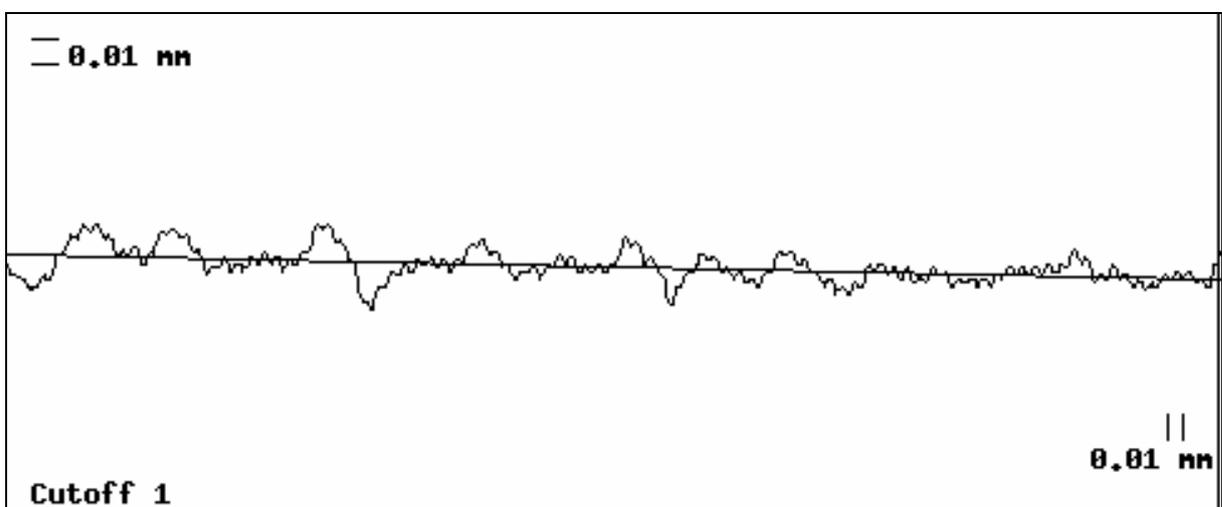


Figura 95 - Perfil obtido do padrão Rz 6,3µm, *cutoff*=0,8mm, escala x=600X y=1000X.

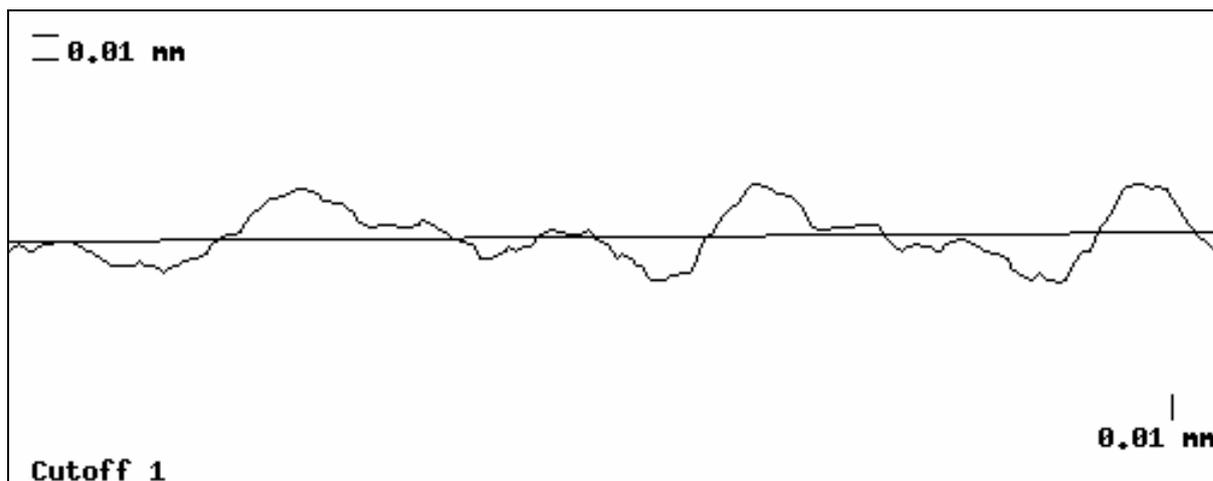


Figura 96 - Perfil obtido do padrão Rz 3,2 $\mu$ m, *cutoff*=0,25mm, escala x=2000X y=1000X.

Os perfis obtidos foram processados, também no programa desenvolvido, objetivando calcular os parâmetros de rugosidade Ra e Rz e compará-los com os valores informados nos padrões. Foi de grande influência nos resultados a escolha da qualidade mínima admissível para cada ponto adquirido, pois esta ditou o número de pontos constituintes no perfil e, por conseguinte, o erro das medições realizadas. A Figura 97 mostra a relação entre o número de pontos (o número máximo foi de 6.555) e a qualidade mínima admissível. Nota-se a queda exponencial do número de pontos com o aumento da qualidade mínima admissível, particularmente acentuada para qualidades acima de 65. Este fato implicou em diferentes respostas dos parâmetros Ra e Rz, os quais são apresentados separadamente nas seções 3.1.1 e 3.1.2, respectivamente.

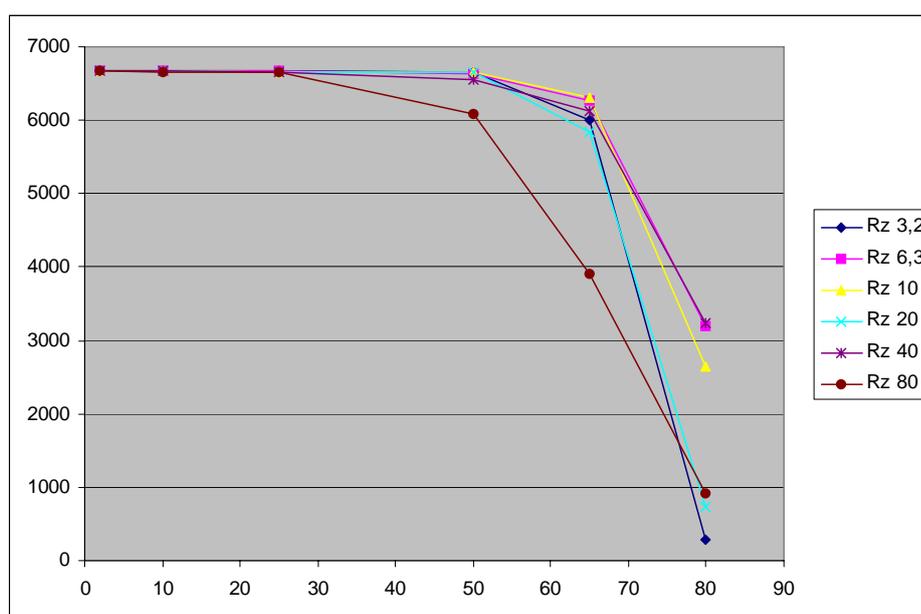


Figura 97 - Qualidade mínima admissível x nº de pontos adquiridos.

### 3.1.1. Resultados do parâmetro Ra

Os resultados dos cálculos dos parâmetros Ra dos padrões de rugosidade digitalizados foram compilados em planilhas e, a partir destas, foram gerados gráficos separadamente com os dados do padrão Rz 80  $\mu\text{m}$  (Ra 20  $\mu\text{m}$ , Figura 98), Rz 40  $\mu\text{m}$  (Ra 10  $\mu\text{m}$ , Figura 99), Rz 20  $\mu\text{m}$  (Ra 5,4  $\mu\text{m}$ , Figura 100), Rz 10  $\mu\text{m}$  (Ra 2,2  $\mu\text{m}$ , Figura 101), Rz 6,3  $\mu\text{m}$  (Ra 1,3  $\mu\text{m}$ , Figura 102) e Rz 3,2  $\mu\text{m}$  (Ra 0,51  $\mu\text{m}$ , Figura 103). As figuras apresentam uma linha de referência pontilhada, correspondente ao valor do respectivo padrão de rugosidade e outra linha na mesma tonalidade com os resultados das medições para cada qualidade mínima admissível utilizada. A linha de resultados contém barras de erros, as quais foram calculadas estatisticamente a partir da distribuição t de Student [Barbetta, 2004], utilizando um nível de significância de 95% de certeza. As tabelas de cálculos estatísticos são apresentadas no APÊNDICE A. Também são plotados nos gráficos o erro de medição, correspondente ao valor da média calculada menos o valor do padrão de rugosidade, bem como o número de pontos, o qual foi dividido por 1.000 por questões de escala. Cabe salientar que todas estas variáveis são exibidas em função dos valores de qualidade mínima admissível 2, 10, 25, 50, 65 e 80 plotados no eixo x.

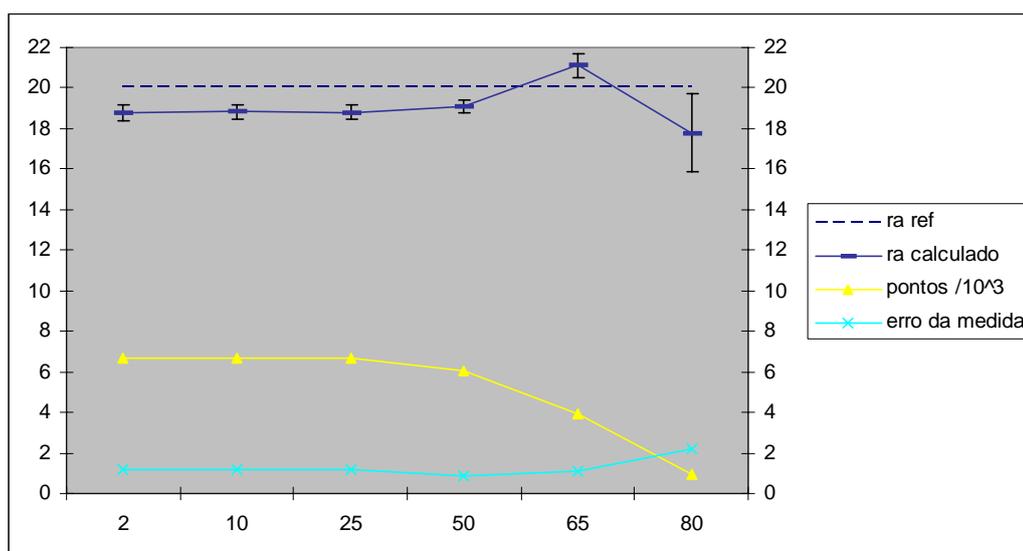


Figura 98 - Resultados para o padrão Rz 80 (Ra = 20  $\mu\text{m}$ ).

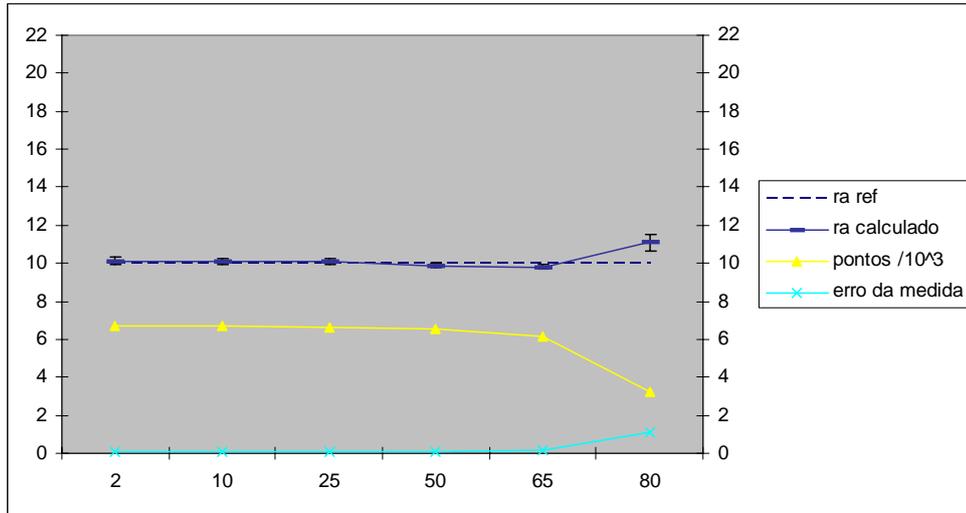


Figura 99 - Resultados para o padrão Rz 40 (Ra = 10 μm).

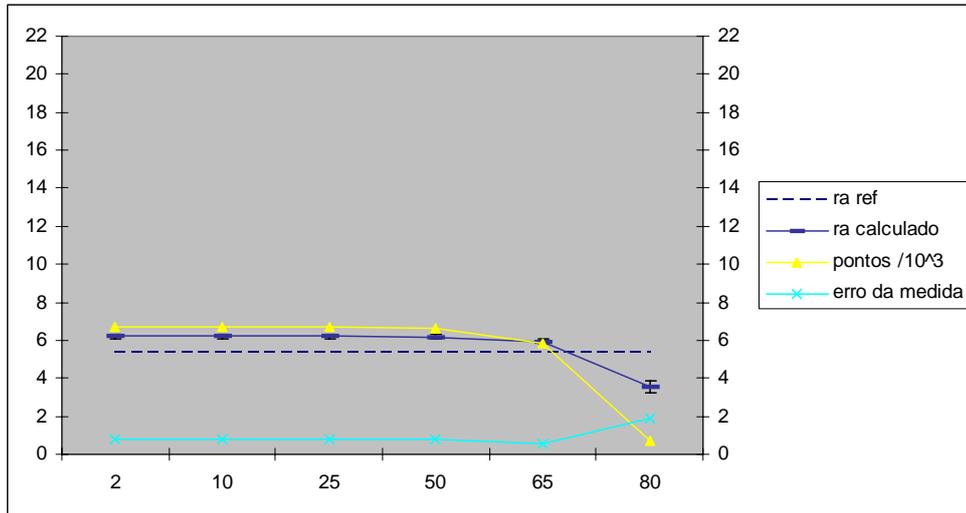


Figura 100 - Resultados para o padrão Rz 20 (Ra = 5,4 μm).

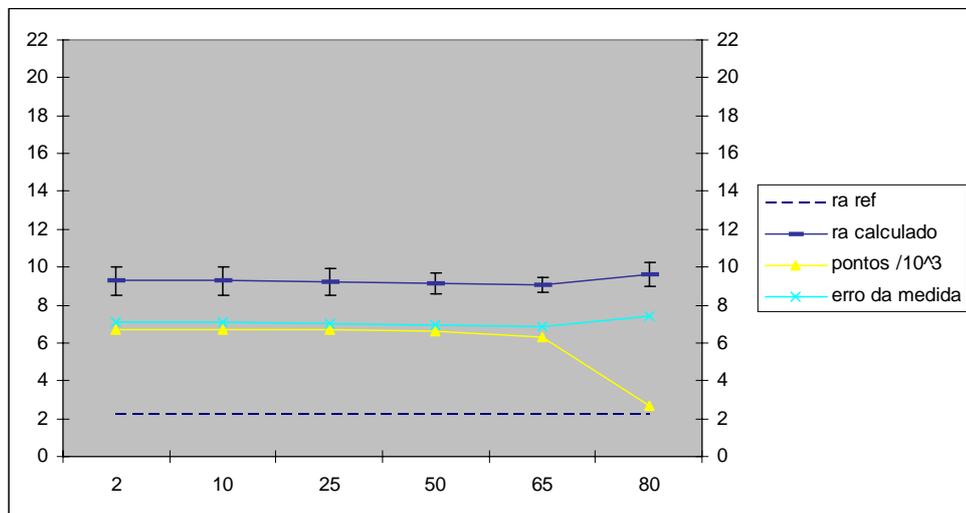
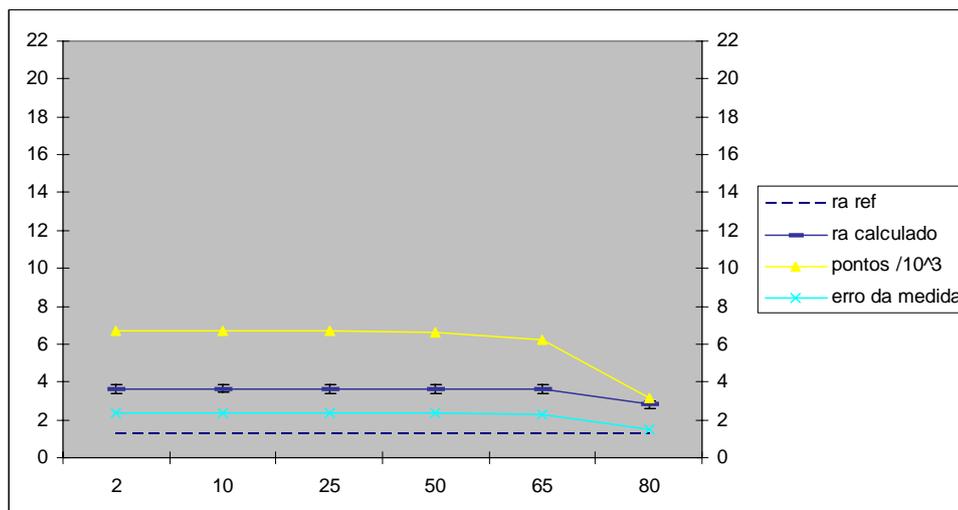
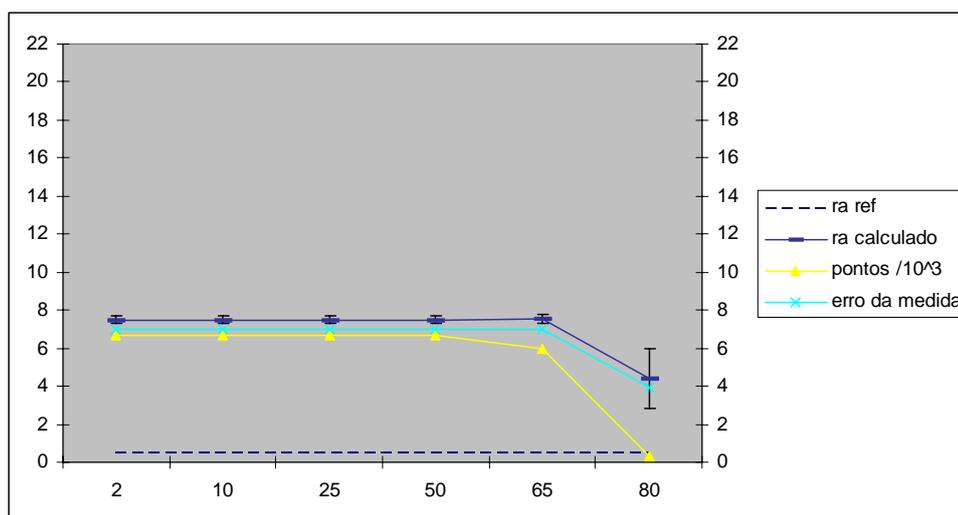


Figura 101 - Resultados para o padrão Rz 10 (Ra = 2,2 μm).



**Figura 102 - Resultados para o padrão Rz 6,3 (Ra = 1,3 µm).**

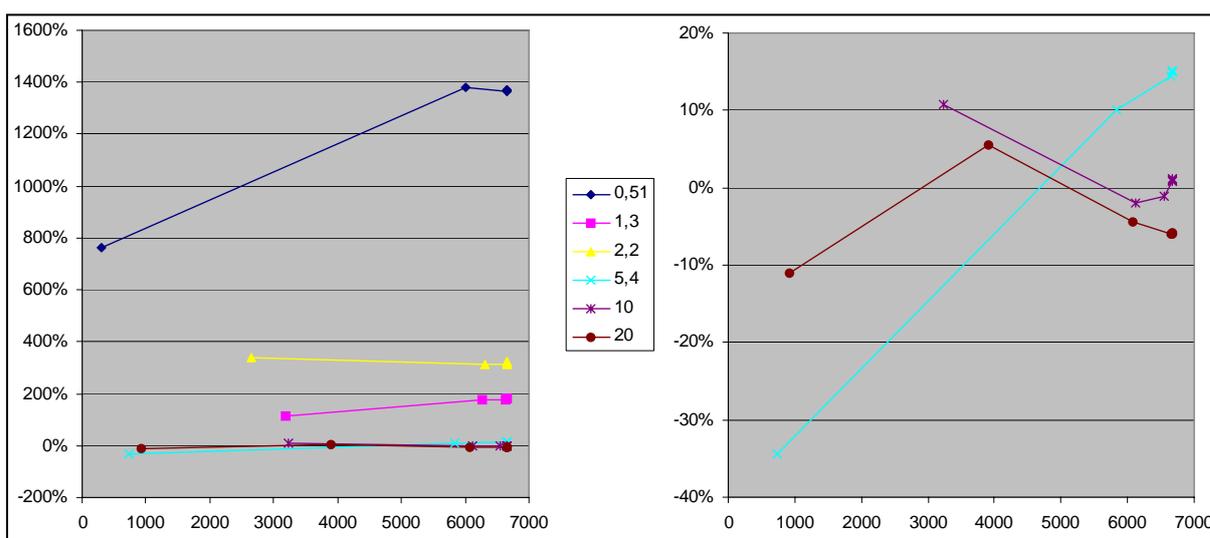


**Figura 103 - Resultados para o padrão Rz 3,2 (Ra = 0,51 µm).**

Os resultados mostram que os padrões Rz 80 (Ra 20 µm), Rz 40 (Ra 10 µm) e Rz 20 (Ra 5,4 µm) em algum momento, dependendo da qualidade mínima admissível utilizada, cruzaram a linha de referência, ou seja, apresentaram os valores esperados de rugosidade Ra. Já os padrões Rz 10 (Ra 2,2 µm), Rz 6,3 µm (Ra 1,3 µm) e Rz 3,2 µm (Ra 0,51 µm) não atingiram os resultados esperados, apresentando erros superiores a 100%, caracterizando assim a inviabilidade de comparação entre rugosidades desta ordem. Estes resultados estão de acordo com Garbacz (2006), o qual afirma que medições com Laser são capazes de produzir imagens mais detalhadas do perfil da superfície em comparação com métodos mecânicos e, assim, os valores de parâmetros obtidos com Laser costumam ser maiores do que os anteriores; e também com Mummery (1992), o qual afirma que a diferença é maior para

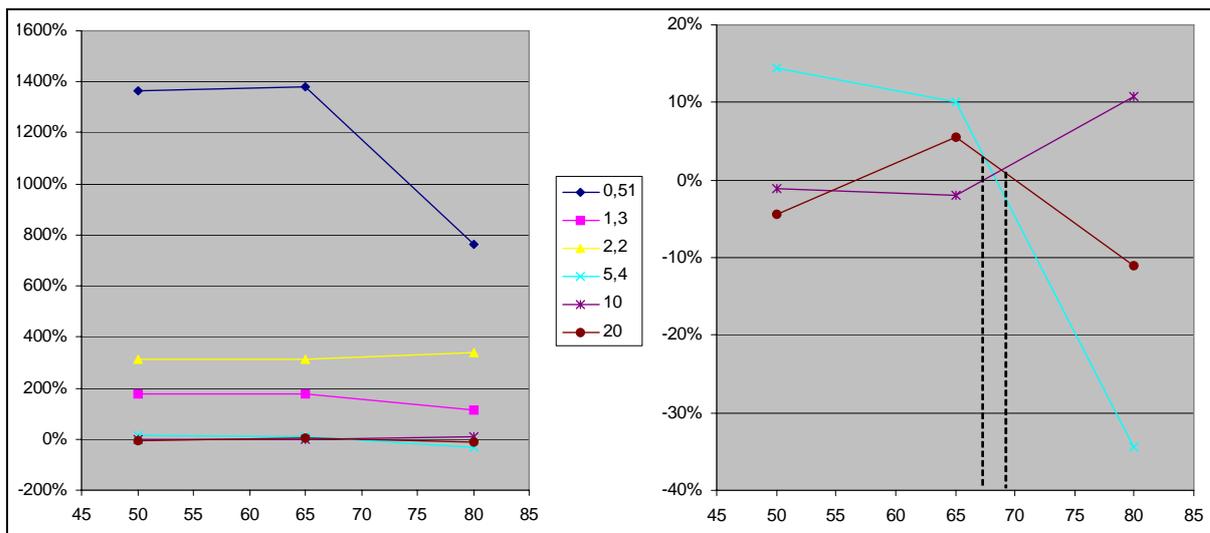
superfícies mais suaves, pois em baixas rugosidades os vales são menores e o apalpador mecânico não consegue atingi-los devido a seu raio finito.

Uma análise do erro em função do número de pontos (Figura 104) mostra que para o parâmetro Ra o erro tende a atingir valores negativos com a redução do número de pontos adquiridos. Levando em consideração que o padrão com Ra 0,51  $\mu\text{m}$  (Rz 3,2) apresenta erros de grande magnitude, o que também ocorre para o Ra 1,3  $\mu\text{m}$  (Rz 6,3) e 3,2  $\mu\text{m}$  (Rz 10), estes foram suprimidos do gráfico (Figura 104 b) para uma visualização em maior escala dos padrões que apresentaram erros aceitáveis. Assim, observa-se melhor a tendência de maiores erros, porém a valores negativos, com a redução do número de pontos. Na referida figura, isto não é notado para o Ra 10  $\mu\text{m}$  (Rz 40), pois este não apresentou acentuada queda no seu número de pontos.



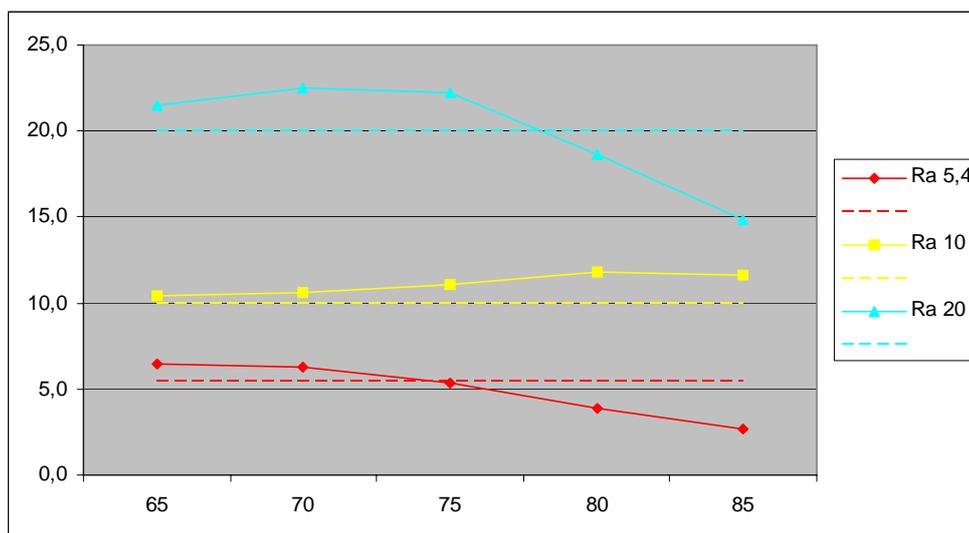
**Figura 104 - Erro(%) x nº de pontos adquiridos para o Ra.**

Cabe salientar que o número de pontos adquiridos não é diretamente controlável, mas sim a qualidade mínima admissível. Neste sentido, a Figura 105 mostra o erro em função da qualidade utilizada. Para esta análise, também foram suprimidos (Figura 105 b) os padrões com erros muito elevados, restando para avaliação os resultados dos padrões Ra 5,4  $\mu\text{m}$  (Rz 20), Ra 10  $\mu\text{m}$  (Rz 40) e Ra 20  $\mu\text{m}$  (Rz 80).



**Figura 105 - Erro(%) x qualidade mínima admissível para o Ra.**

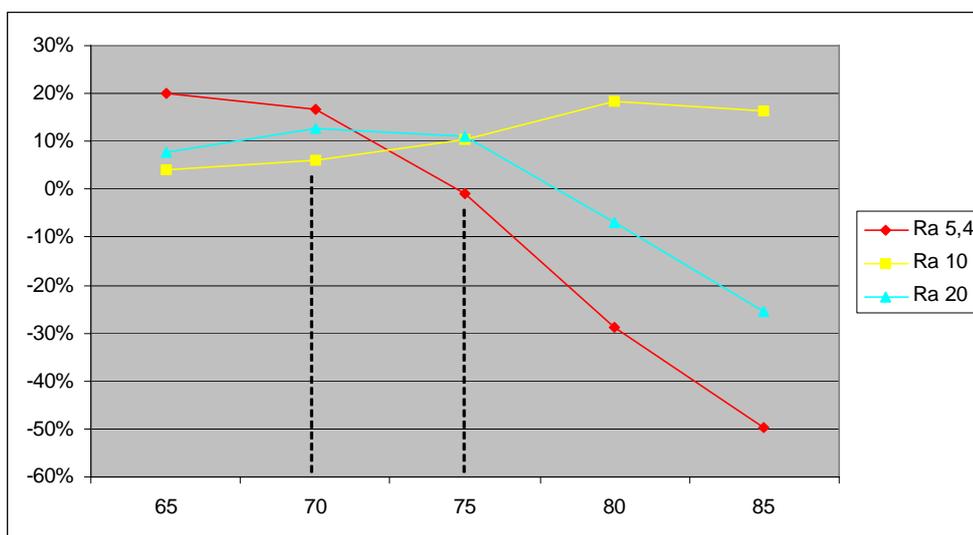
Na Figura 105 b, observa-se um erro aleatório para a qualidade mínima admissível de 80 e uma tendência de convergência a um erro mínimo na qualidade de aproximadamente 70. Baseando-se nesta tendência, foram realizadas novas análises nos padrões Rz 20 (Ra 5,4  $\mu\text{m}$ ), Rz 40 (Ra 10  $\mu\text{m}$ ) e Rz 80 (Ra 20  $\mu\text{m}$ ) com qualidades mínimas admissíveis de 65, 70, 75, 80 e 85, visando confirmar esta hipótese. A Figura 106 apresenta os resultados obtidos para as novas análises.



**Figura 106 - Resultados para o parâmetro Ra em função das qualidades de 65 a 85.**

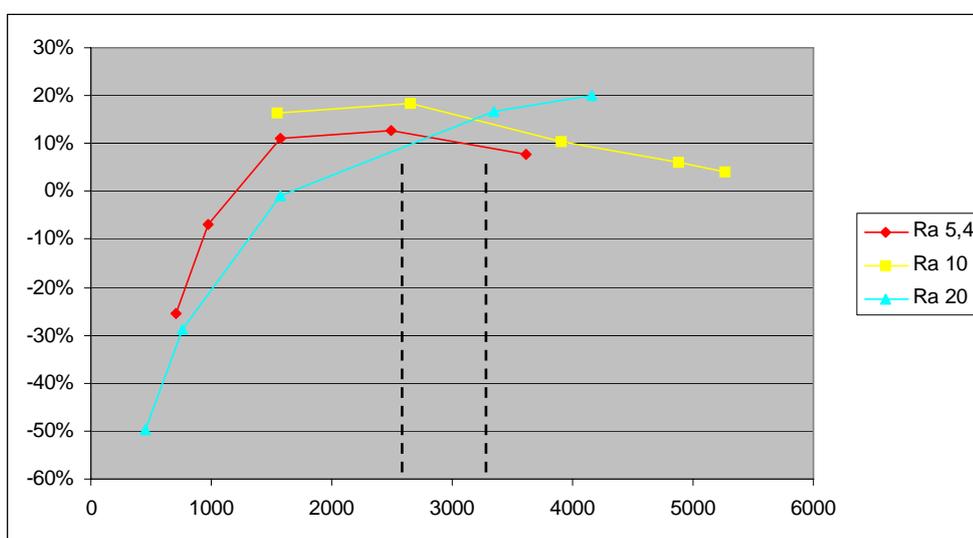
Cabe salientar que novamente o padrão Ra 10  $\mu\text{m}$  (Rz 40) apresenta comportamento diferenciado por não sofrer acentuada queda no seu número de pontos com o aumento da qualidade mínima admissível. O erro destas novas medições é apresentado em função da

qualidade na Figura 107. A análise desta figura confirma a hipótese de que existam grandes erros após a qualidade de 80 e também a tendência de convergência a um erro mínimo. Notadamente próximo a qualidade de 70 (e abaixo de 75) é possível admitir-se um erro padronizado na ordem de 10%.



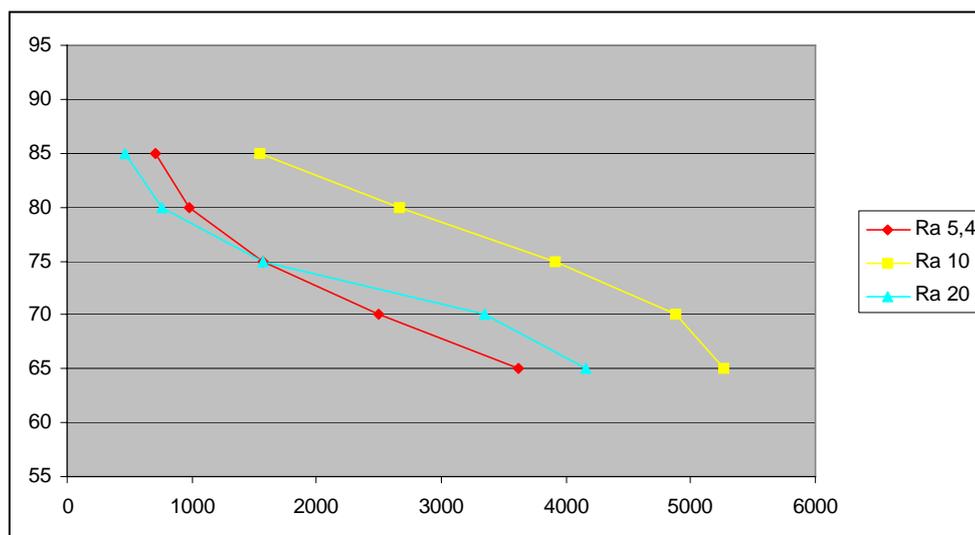
**Figura 107 - Erro(%) x qualidade mínima admissível para nova análise do Ra.**

Podem ser observadas a influência do número de pontos no erro através da Figura 108. Neste caso, a tendência de convergência ocorre próximo a 3.000 pontos, reforçando a ideia de um erro médio de 10%. Salienta-se mais uma vez que o Ra 10  $\mu\text{m}$  (Rz 40) apresenta sua curva aparentemente “incompleta”, pelo fato de o mesmo não apresentar grande queda do número de pontos com o aumento da qualidade.



**Figura 108 - Erro(%) x nº de pontos adquiridos na nova análise do Ra.**

Notadamente o Ra 10  $\mu\text{m}$  (Rz 40) apresentou um comportamento diferenciado, sendo mais constante e menos sensível à mudança de parâmetros. Este desempenho, conforme já citado, deve-se ao fato da aquisição de pontos suficientes, mesmo a altas qualidades mínimas admissíveis. A Figura 109 elucida este fato apresentando a relação entre o número de pontos e a qualidade mínima admissível para esta nova análise realizada com as qualidades de 65 a 85.



**Figura 109 - Qualidade mínima admissível x nº de pontos adquiridos na nova análise.**

Nota-se também na Figura 109 a tendência de uma redução mais severa do número de pontos para qualidades muito superiores, o que está de acordo com a realidade de que o sinal não pode ser 100% retornado e assim, na prática nenhum ponto possui qualidade 100. Para qualidades inferiores a 65 a maioria absoluta dos pontos é capturada, o que está de acordo com o fato já apresentado (Figura 97) de que com a qualidade mínima 50 praticamente todos os pontos são capturados, porém, salienta-se que neste caso não é realizado nenhum tipo de filtragem quanto à qualidade dos pontos, tornando maior a insegurança da medida.

Fica claro então que o ideal seria utilizar uma qualidade alta para adquirir muitos pontos, mas como na maioria dos casos isso não é possível, devido às condições da superfície e à impossibilidade de aplicar-lhe revestimentos, torna-se necessário realizar um balanço da maior qualidade possível sem a perda de muitos pontos. Para tanto, o software de aquisição poderia armazenar os pontos juntamente com suas respectivas qualidades (por exemplo, no formato “X Y Z Q”), pois assim seria possível realizar o cálculo da relação ótima pontos/qualidade para cada caso.

### 3.1.2. Resultados do parâmetro Rz

Para o cálculo dos parâmetros Rz utilizou-se procedimento análogo ao já apresentado para o Ra e foram gerados gráficos com os resultados do padrão Rz 80  $\mu\text{m}$  ( $Rz = 78 \mu\text{m}$ , Figura 110), Rz 40  $\mu\text{m}$  ( $Rz = 41 \mu\text{m}$ , Figura 111), Rz 20  $\mu\text{m}$  ( $Rz = 20 \mu\text{m}$ , Figura 112), Rz 10  $\mu\text{m}$  ( $Rz = 9,8 \mu\text{m}$ , Figura 113), Rz 6,3  $\mu\text{m}$  ( $Rz = 6,5 \mu\text{m}$ , Figura 114) e Rz 3,2  $\mu\text{m}$  ( $Rz = 3,5 \mu\text{m}$ , Figura 115). Assim como para o Ra, as figuras apresentam uma linha de referência pontilhada, correspondente ao valor do respectivo padrão de rugosidade e outra linha na mesma tonalidade com os resultados das medições para cada qualidade mínima admissível utilizada. A linha de resultados contém barras de erros, as quais também foram calculadas estatisticamente a partir da distribuição t de Student, utilizando um nível de significância de 95% de certeza. As tabelas de cálculos estatísticos para o Rz encontram-se juntamente com as do Ra no APÊNDICE A. Ainda são plotados nos gráficos o erro de medição, correspondente ao valor da média calculada menos o valor do padrão de rugosidade, bem como o número de pontos, o qual neste caso foi dividido por 100 por questões de escala.

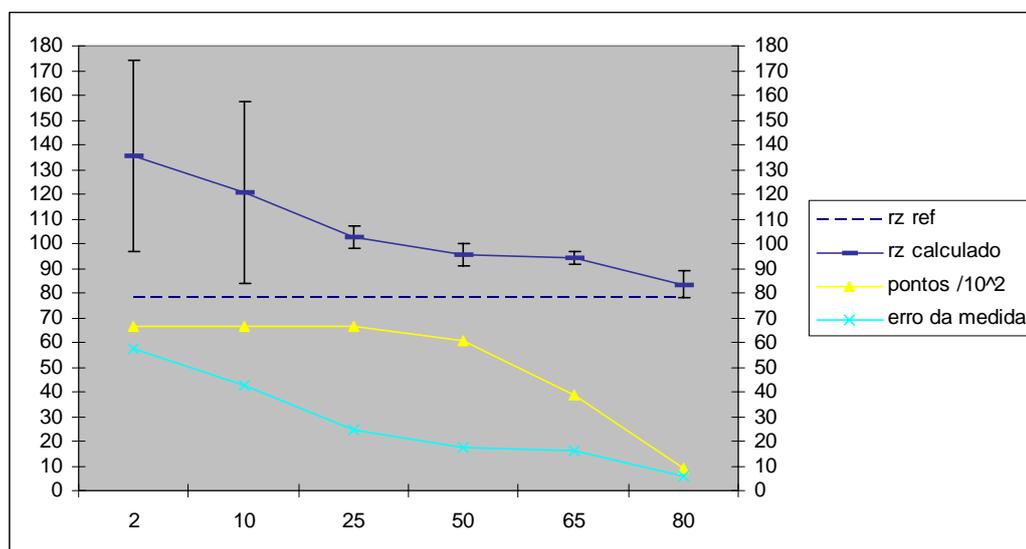


Figura 110 - Resultados para o padrão Rz 80 ( $Rz = 78 \mu\text{m}$ ).

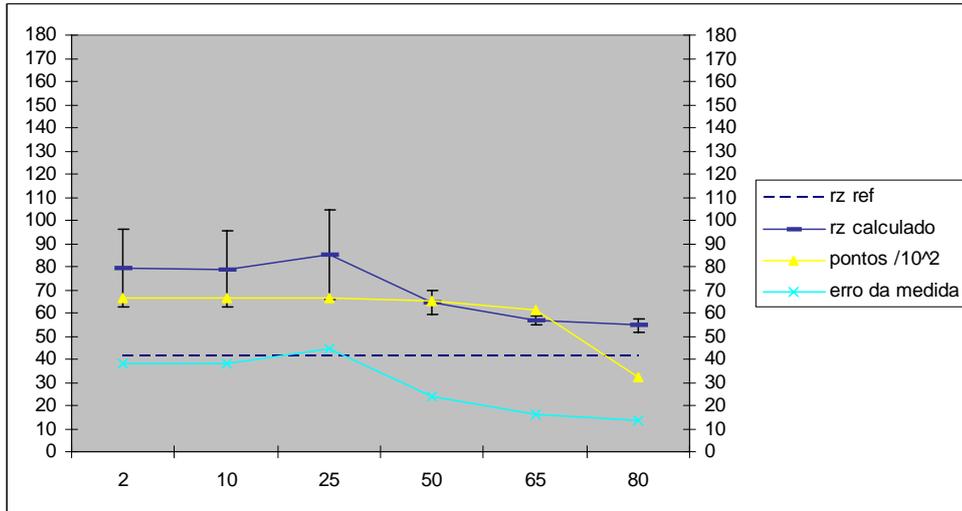


Figura 111 - Resultados para o padrão Rz 40 (Rz = 41 μm).

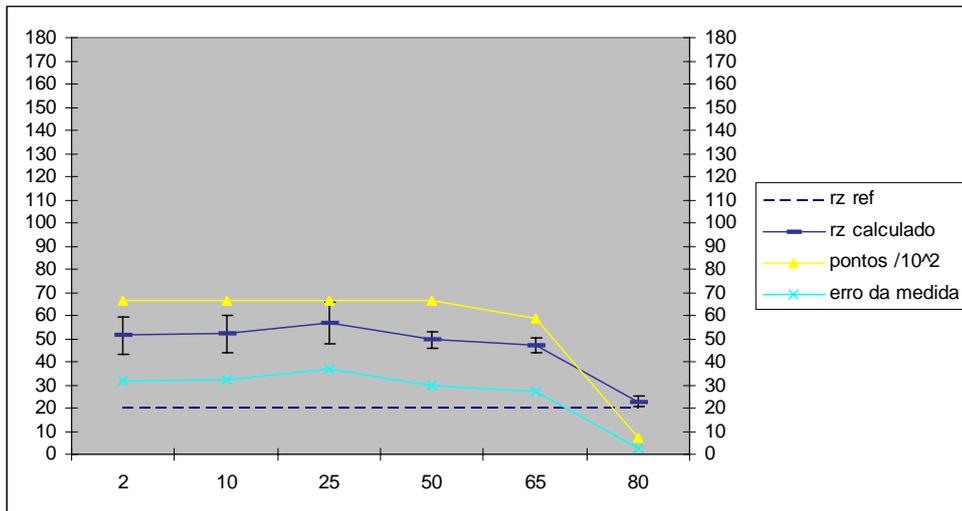


Figura 112 - Resultados para o padrão Rz 20 (Rz = 20 μm).

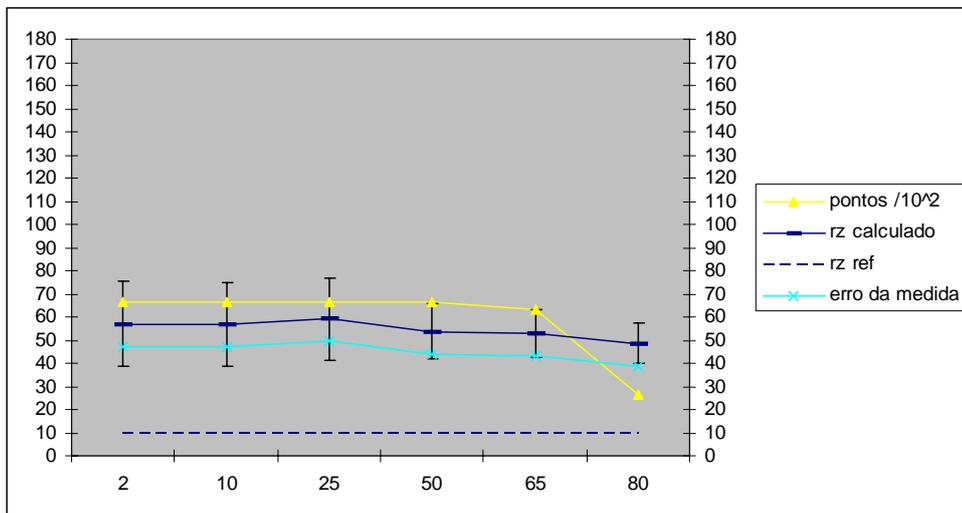


Figura 113 - Resultados para o padrão Rz 10 (Rz = 9,8 μm).

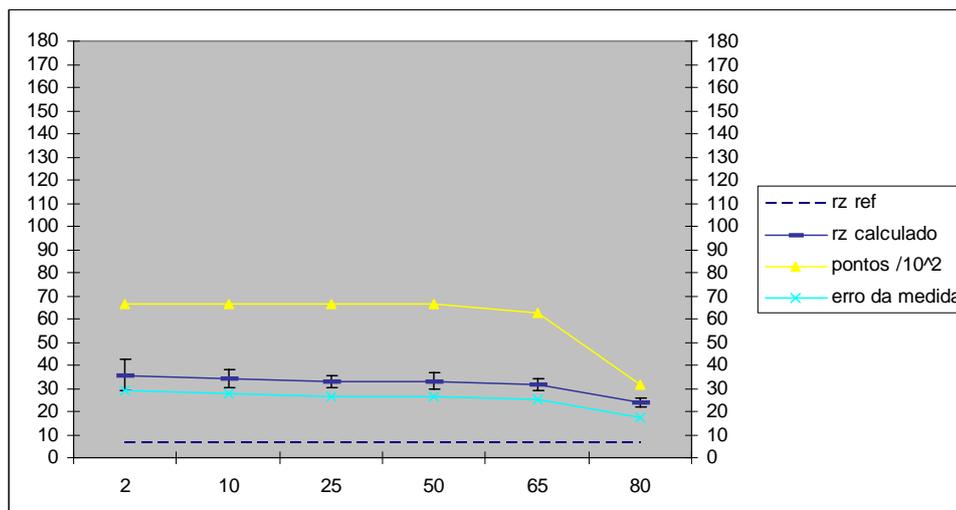


Figura 114 - Resultados para o padrão Rz 6,3 (Rz = 6,5 μm).

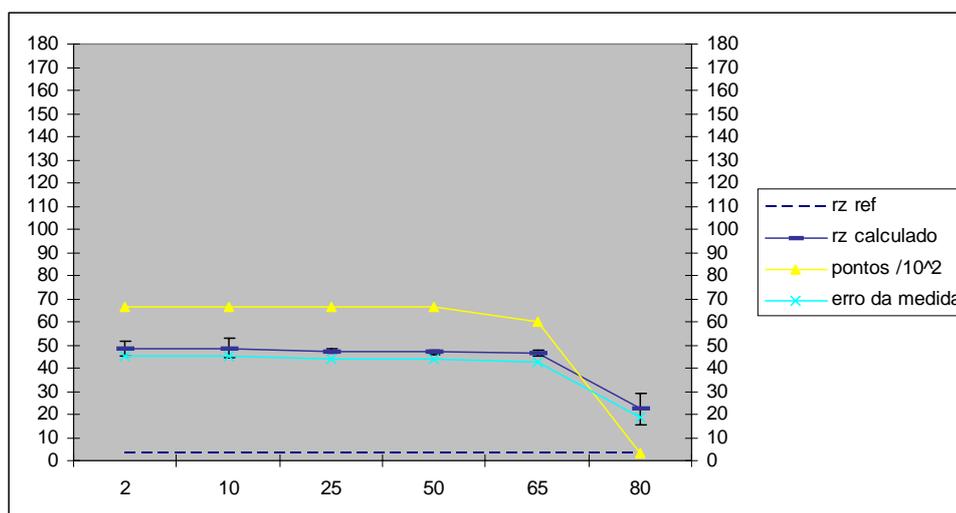
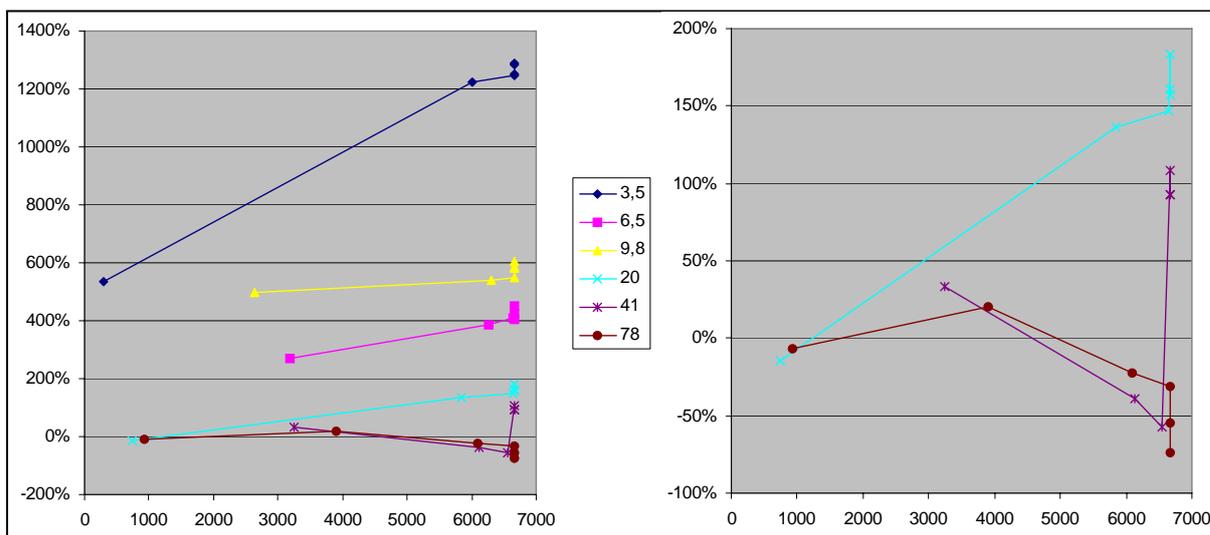


Figura 115 - Resultados para o padrão Rz 3,2 (Rz = 3,5 μm).

Os resultados mostram que os padrões Rz 80 (Rz = 78 μm), Rz 40 (Rz = 41 μm) e Rz 20 (Rz = 20 μm) tangenciam a linha de referência a uma qualidade mínima admissível de 80. Já os padrões Rz 10 (Rz = 9,8 μm), Rz 6,3 μm (Rz = 6,5 μm) e Rz 3,2 μm (Rz 3,5 μm), apesar de também se aproximarem da linha de referência, não atingiram os resultados esperados, apresentando erros superiores a 100%, caracterizando assim a inviabilidade de comparação entre rugosidades desta ordem. A exemplo do ocorrido com o Ra, estes resultados estão de acordo com Garbacz (2006), o qual afirma que parâmetros descritivos de rugosidade obtidos com Laser costumam ser de 1 a 7 vezes maiores do que os obtidos mecanicamente; e também com Mummery (1992), o qual afirma que a diferença é maior para superfícies mais suaves, pois em baixas rugosidades os vales são menores e o apalpador

mecânico não consegue atingi-los devido a seu raio finito. Ainda é importante destacar que as variações das medidas, representadas pelo erro da média (barras de erros dos gráficos), é de maior amplitude para o parâmetro Rz do que para o parâmetro Ra, especialmente em valores mais baixos de qualidade mínima admissível.

Os resultados apresentados provêm da mesma digitalização utilizada para cálculo do Ra, ou seja, são os mesmos perfis, então a relação entre o número de pontos e a qualidade é a mesma já apresentada na Figura 97. No entanto, o erro em função do número de pontos apresentou diferente comportamento. Neste caso, quanto menor o número de pontos, menor foi o erro da medida, conforme observa-se na Figura 116. Salienta-se também que as medições realizadas com todos os pontos (6.555) apresentaram erros de enormes proporções.



**Figura 116 - Erro(%) x nº de pontos adquiridos para o Rz.**

Esta diferença de comportamento do Rz, em relação ao Ra, se deve principalmente ao fato de que este parâmetro considera o máximo dos pontos e não a sua média. Assim, um único ponto fora do contexto pode causar grandes variações no valor de Rz, ao passo que pouca diferença faria no cálculo da média entre vários pontos. Isso também se reflete no erro em função da qualidade mínima admissível (Figura 117). Para o Rz observa-se uma considerável queda do erro na qualidade 80, bem como uma tendência de convergência do erro nas imediações desta qualidade.

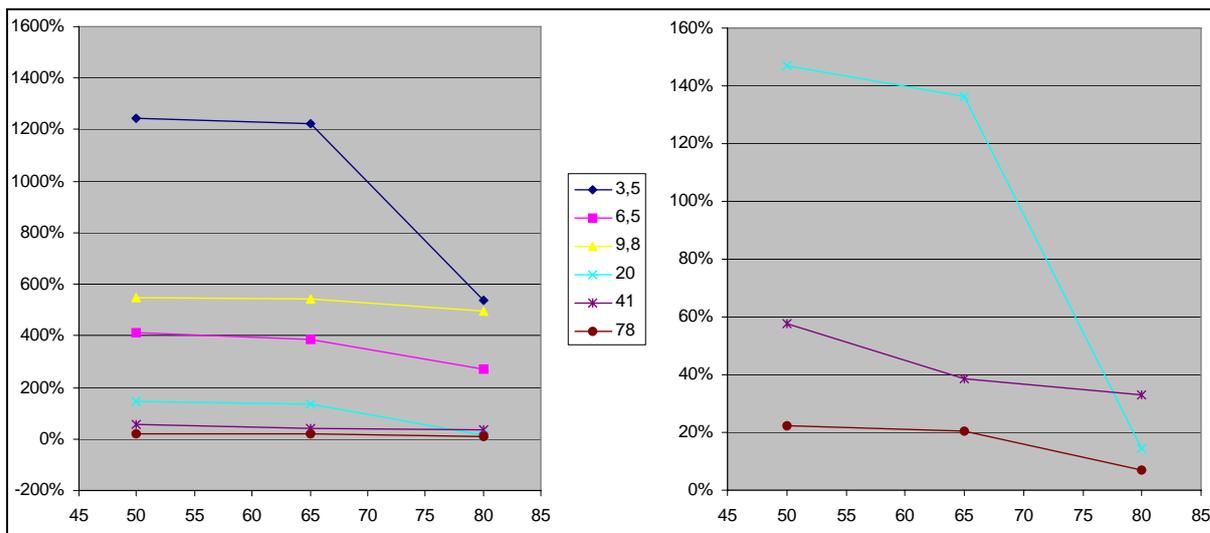


Figura 117 - Erro(%) x qualidade mínima admissível para o Rz.

Cabe salientar que valores de qualidade mais altos aprovam menos pontos, porém estes são mais precisos. No caso do Ra, por ser necessário um maior número de pontos, visto que isso implica na realidade da média, poucos pontos precisos apresentaram piores resultados do que mais pontos com uma tolerância maior. Já para o Rz, isso não ocorreu, pois, neste caso o que está em jogo são os pontos máximos e mínimos do perfil, o que torna este parâmetro muito mais sensível à precisão dos pontos. A exemplo do procedimento realizado para a avaliação do Ra, visando confirmar estas hipóteses foram realizadas novas análises com as qualidades 65, 70, 75, 80 e 85. Os resultados obtidos são apresentados na Figura 118.

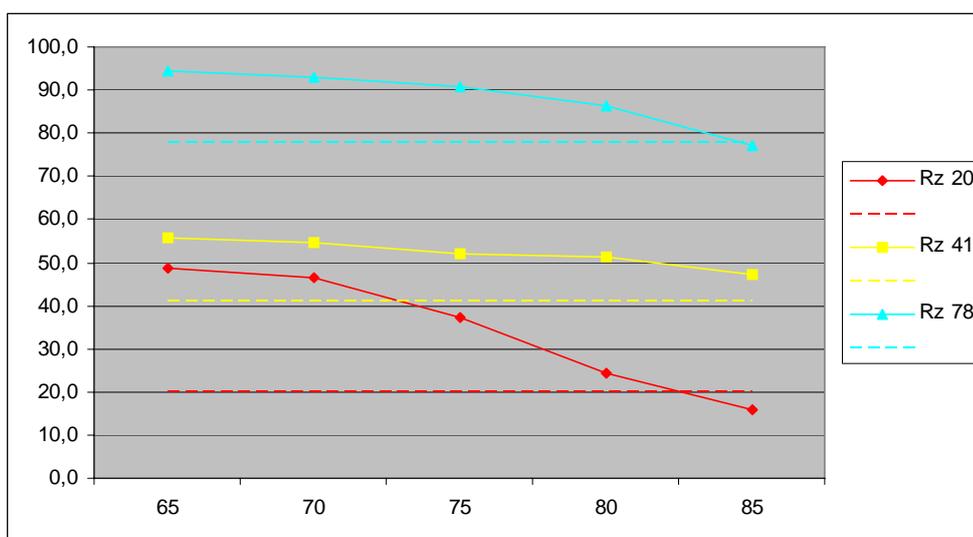
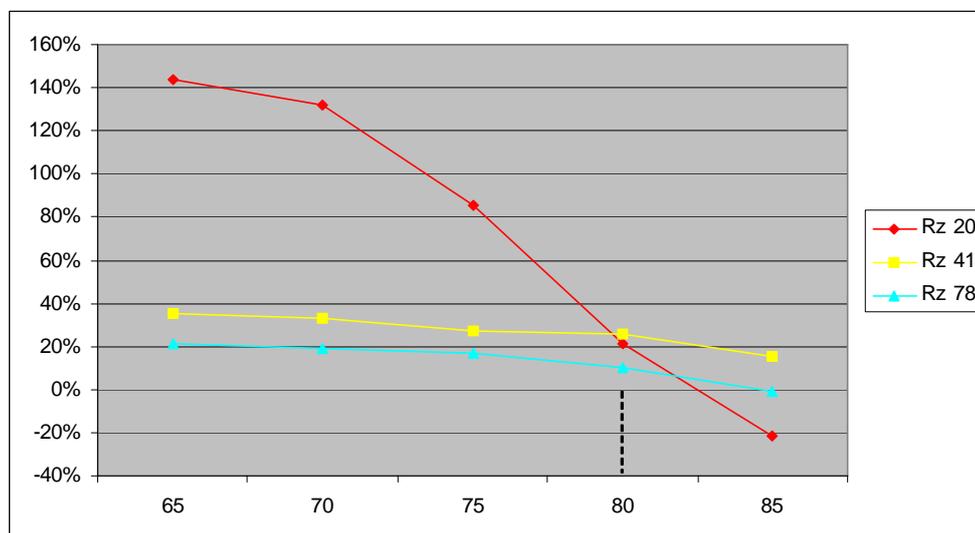


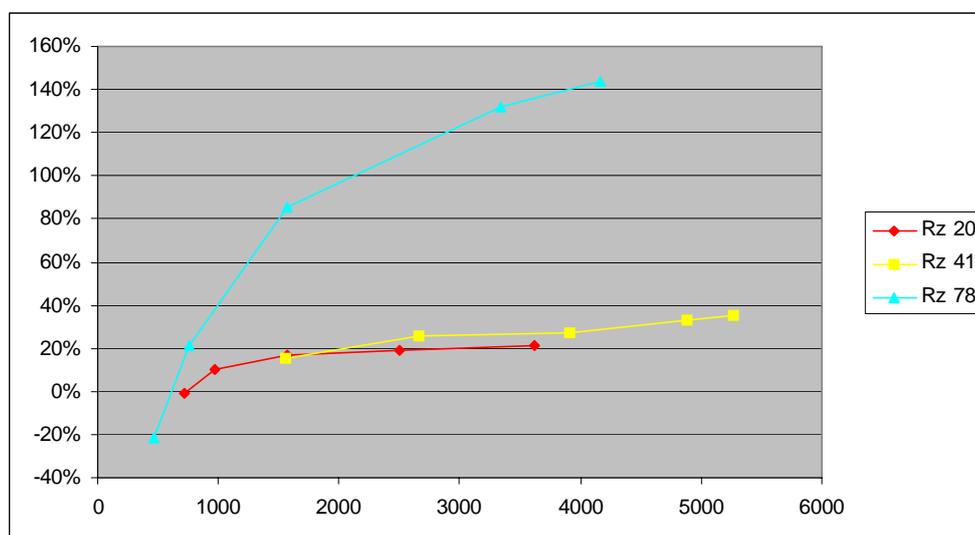
Figura 118 - Resultados do parâmetro Rz em função das qualidades de 65 a 85.

Os resultados obtidos comprovam a tendência de convergência do erro próximo à qualidade 80, o que fica ainda mais evidente na Figura 119. Nesta faixa é possível admitir-se um erro padronizado em torno de 20%.



**Figura 119 - Erro(%) x qualidade mínima admissível para nova análise do Rz.**

Nota-se também que acima da qualidade 80 o número de pontos fica muito reduzido, aumentando as chances de incorrer em erro. Por exemplo, na transição da qualidade 80 para 85, o Rz 20 passa de um erro de 20% para -20%. Esta influência do número de pontos no erro fica clara na Figura 120. Neste caso, a tendência de convergência do erro ocorre próximo a 1.000 pontos, com o erro em torno de 20%. Observa-se também o surgimento de valores negativos de erro com menos de 1.000 pontos, o que é justificado pelo fato de que nesta situação existem poucos pontos para obter uma amostra representativa da superfície.



**Figura 120 - Erro(%) x nº de pontos adquiridos na nova análise do Rz.**

Por fim, nota-se que o padrão Rz 40 ( $R_z = 41 \mu\text{m}$  e  $R_a = 10 \mu\text{m}$ ) novamente apresentou comportamento mais estável, devendo-se este ao mesmo fato já exposto de sua aquisição de pontos suficientes mesmo a altas qualidades mínimas admissíveis. Tanto para o Rz quanto para o Ra, a melhor situação mostrou-se com aumento da qualidade, mas sem a perda de muitos pontos. Isso ressalta a necessidade de realizar um balanço entre a qualidade mínima admissível e o número de pontos adquiridos. Assim, reafirma-se a sugestão para o software de aquisição armazenar juntamente com os pontos suas respectivas qualidades (por exemplo, no formato “X Y Z Q”) de modo a permitir a realização de cálculos da relação ótima pontos/qualidade para cada caso, o que culminaria em uma menor incerteza de medição.

### 3.2. Superfícies tridimensionais

Visto que a técnica de digitalização tridimensional a Laser fornece dados em 3D e que estes tem uma maior faixa de aplicações do que os tradicionais perfis 2D de rugosidade, foi realizada uma avaliação tridimensional da superfície do parâmetro de rugosidade Rz 80 a partir de seu plano médio (Figura 121).

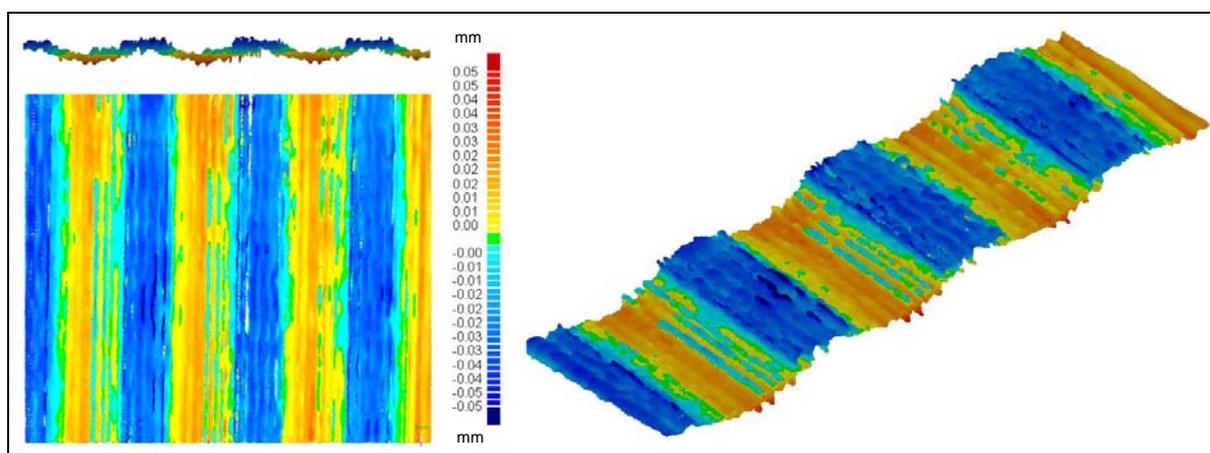
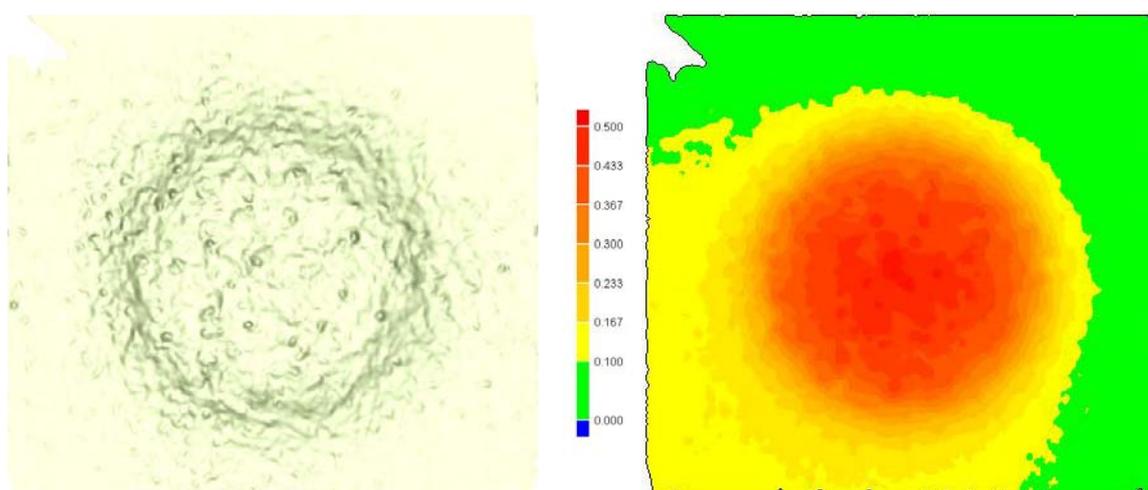


Figura 121 - Avaliação tridimensional da superfície do padrão Rz 80.

Primeiramente cabe salientar que esta avaliação permite a extração de linhas da superfície, as quais se retiradas de um plano normal são idênticas aos perfis primários e assim podem ser filtradas para a obtenção de perfis 2D de rugosidade. No entanto, a avaliação tridimensional permite uma análise da superfície como um todo, através dela pode-se notar a rugosidade e a ondulação da superfície tanto local quanto globalmente. Neste sentido, o

exame das superfícies tridimensionais permite realizar análises quantitativas, tanto através da extração de perfis, quanto através da escala de cores constante na imagem, bem como análises qualitativas da topografia da superfície.

A análise de superfícies tridimensionais obtidas através da digitalização torna-se ainda de maior importância visto que permite a avaliação de outros parâmetros além da rugosidade, tais como medidas de desgaste e de área superficial. A Figura 122 apresenta um estudo de caso realizado pelo autor onde pode ser observado o modelo 3D de um corpo de prova de alumina após um teste de desgaste e sua respectiva análise por computador mostrando a profundidade do desgaste sofrido.



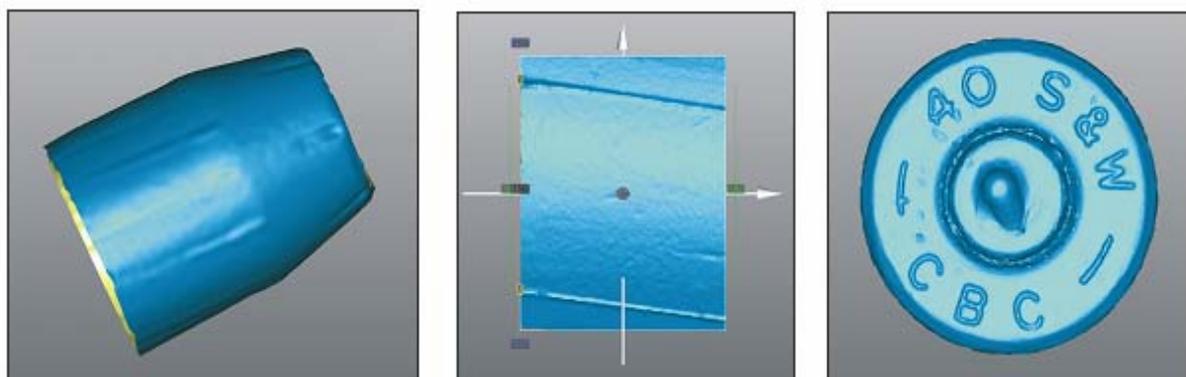
**Figura 122 - Análise de um corpo de prova após teste de desgaste.**

Através deste estudo de caso, salienta-se mais uma vez a possibilidade de análises tanto qualitativas (tais como geometria da erosão, marcas das partículas abrasivas na superfície, etc.), quanto quantitativas (tais como profundidades de desgaste, área superficial e volume removido). Este tipo de análise é importante no que tange ao controle de qualidade e à inspeção de peças e componentes, bem como à caracterização de texturas superficiais.

Outra área onde a análise tridimensional de superfícies e suas texturas possuem importante aplicação é a balística forense. Esta área busca identificar armas de fogo por intermédio de comparação de projetis (popularmente balas) e estojos-padrão, obtidos dessas armas. A identificação da marca e do calibre dos cartuchos é importante porque cada fabricante produz cartuchos para determinado calibre com características balísticas próprias.

Assim, os exames comparativos nos elementos de munição como projetis e estojos, podem ser macroscópicos e/ou microscópicos e visam identificar marcas (texturas), geralmente deixadas pelo acabamento (lixamento, brunimento, etc.) no cano e no percussor da arma questionada. Em via de regra a análise por exame microscópico é importante e decisiva para a comparação dos projetis, pois por meio dela é possível estabelecer a identificação individual de uma arma, a qual deve ser sempre realizada com auxílio de um confiável equipamento de comparação. Assim, o exame do projétil tem sua relevância porque é determinante na identificação da arma utilizada, após compará-lo com outros projetis-padrão.

No Brasil, atualmente esta análise é realizada pela polícia federal através de imagens fotográficas (2D) dos projetis, porém em alguns países essa análise já vem sendo realizada através de dados topográficos (3D) das superfícies dos projetis. A equipe LdSM, em conjunto com a polícia federal, realizou alguns estudos de captação de imagens 3D na área de balística (Figura 123), através dos quais foi possível identificar o tipo e fabricante da arma de fogo que disparou determinado projétil. A identificação da textura proveniente de uma arma em específico foi possível apenas para os casos em que esta apresentava-se bastante pronunciada. Algumas análises foram dificultadas por suas texturas possuírem rugosidades inferiores a  $5\mu\text{m}$ , de acordo com a limitação já exposta no item 3.1.1.



**Figura 123 - Análise de projétil via digitalização 3D a Laser.**

Cabe salientar que para uma aplicação eficiente na área da balística seriam necessárias algumas alterações no scanner 3D utilizado, tais como a aquisição de lentes de maior precisão, um maior controle de ruído e o desenvolvimento de acessórios de fixação e posicionamento dos projetis, a fim de suprir a polícia federal com uma ferramenta capaz de agilizar as perícias criminais e de rastrear as possíveis armas responsáveis pelo disparo de um específico projétil.

### 3.3. Banco de Texturas

O emprego da metodologia descrita no item 2.6 levou à criação de um Banco de Dados de Texturas, de modo a armazenar informações sobre cada uma das texturas de forma sistemática, bem como classificá-las de acordo com critérios pré-definidos. A programação do sistema do Banco de Texturas, a exemplo do programa desenvolvido para cálculo de rugosidade, foi realizada utilizando a linguagem PHP e implementada na estrutura de servidor de Internet existente no LdSM, conforme já descrito no item 2.4. O referido sistema possibilita aos usuários a visualização das texturas, bem como alteração de seus dados e cadastro de novos itens. Na página de consulta de uma textura específica (Figura 124), são dispostos dados básicos como imagens, nome, tipo e procedência. Também são disponibilizados links que levam o usuário aos arquivos que registram as etapas do desenvolvimento da textura, bem como a arquivos 3D e a arquivos CAD/CAM para a usinagem de peças.

The screenshot displays a web interface titled "Dados da Textura". On the left side, there are four images illustrating the texture development process: "Visão geral" (a green field), "Digitalização" (a green field with a grid overlay), "Imagem Frontal final" (a close-up of the green field), and "Imagem 3D final" (a 3D model of the field). The main area contains a table of metadata for the texture "Pelha do milho".

Título	Pelha do milho	única
Tipo	natural	
Nome Científico	Zea mays	
Autor	LdSM	
Procedência	Natureza	
Largura (x)	21.028 mm	
Comprimento (y)	35 mm	
Altura máxima (z)	0.7 mm	
Arquivo 2D (CDR)	0	
Arquivo 3D (STL)	Pelha do milho_natural_0.stl	<a href="#">baixar</a>
Arquivo CAM (ART)	Pelha do milho_natural_0.art	<a href="#">baixar</a>
Data de Criação	02/04/2004	
Observações	Amostra retirada de milho comum comprado no supermercado	
Status	Disponível	

At the bottom of the interface, there are navigation buttons: "Repetição", "Voltar", "Principal", and "Alterar". A footer contains the links "Anterior" and "Próxima".

Figura 124 - Interface do banco de texturas desenvolvido.

Foi elaborada também uma ferramenta para análise de repetição do módulo da textura, a qual permite montar imagens de até 3 linhas por 3 colunas (Figura 125) e assim simular uma texturização em áreas maiores.



**Figura 125 - Ferramenta para análise de repetição do módulo da textura.**

A estrutura do sistema (Figura 126) prevê a identificação e a classificação básica das texturas de acordo com sua funcionalidade, inspiração, características e origem do relevo. Esta organização teve início baseando-se em Kindlein (2004) e foi aprimorada seguindo os aspectos mostrados por An-Hsuan (1999). Esta estrutura foi chamada de ecossistema do Banco de Texturas e engloba características quantitativas, como altura mínima e altura máxima da textura, rugosidade e tamanho do módulo, e características qualitativas, divididas em zoomorfológicas (para as texturas naturais), superficiais, dimensionais, compositivas, formais, características de relevo e de aspecto. Estas também são subdivididas, por exemplo, dentro das características zoomorfológicas é possível classificar a textura entre os tipos animal, vegetal ou mineral. Ainda podem ser classificadas partes de animais, como pele, couro, pata, bico, etc., bem como partes de vegetais, tais como semente, folha, flor, fruto, caule, etc. Estas classificações no banco de texturas permitem a busca por palavras-chave que por sua vez podem prover o acesso a mais de uma solução possível ao mesmo problema.

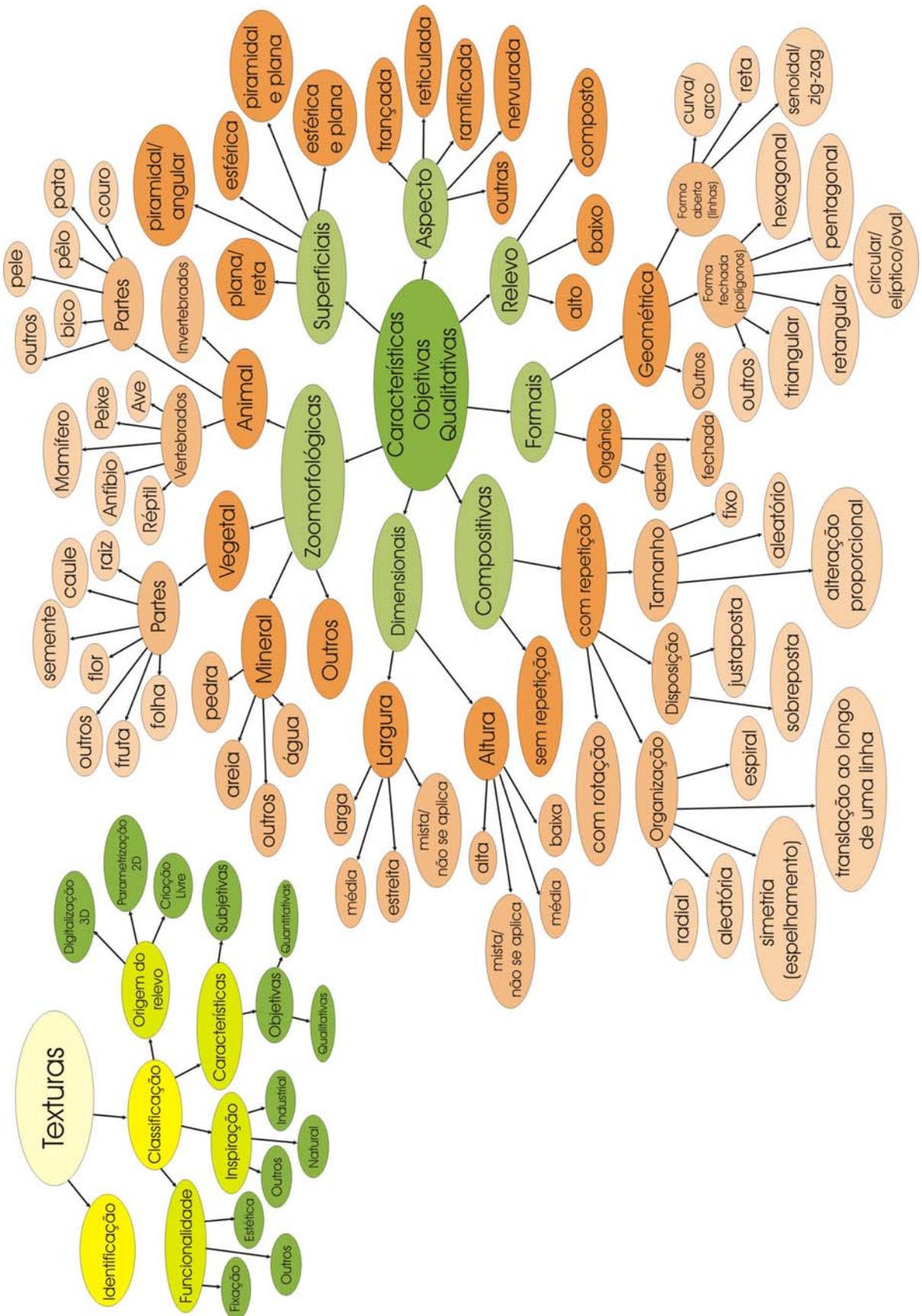


Figura 126 - Ecosistema do banco de texturas.

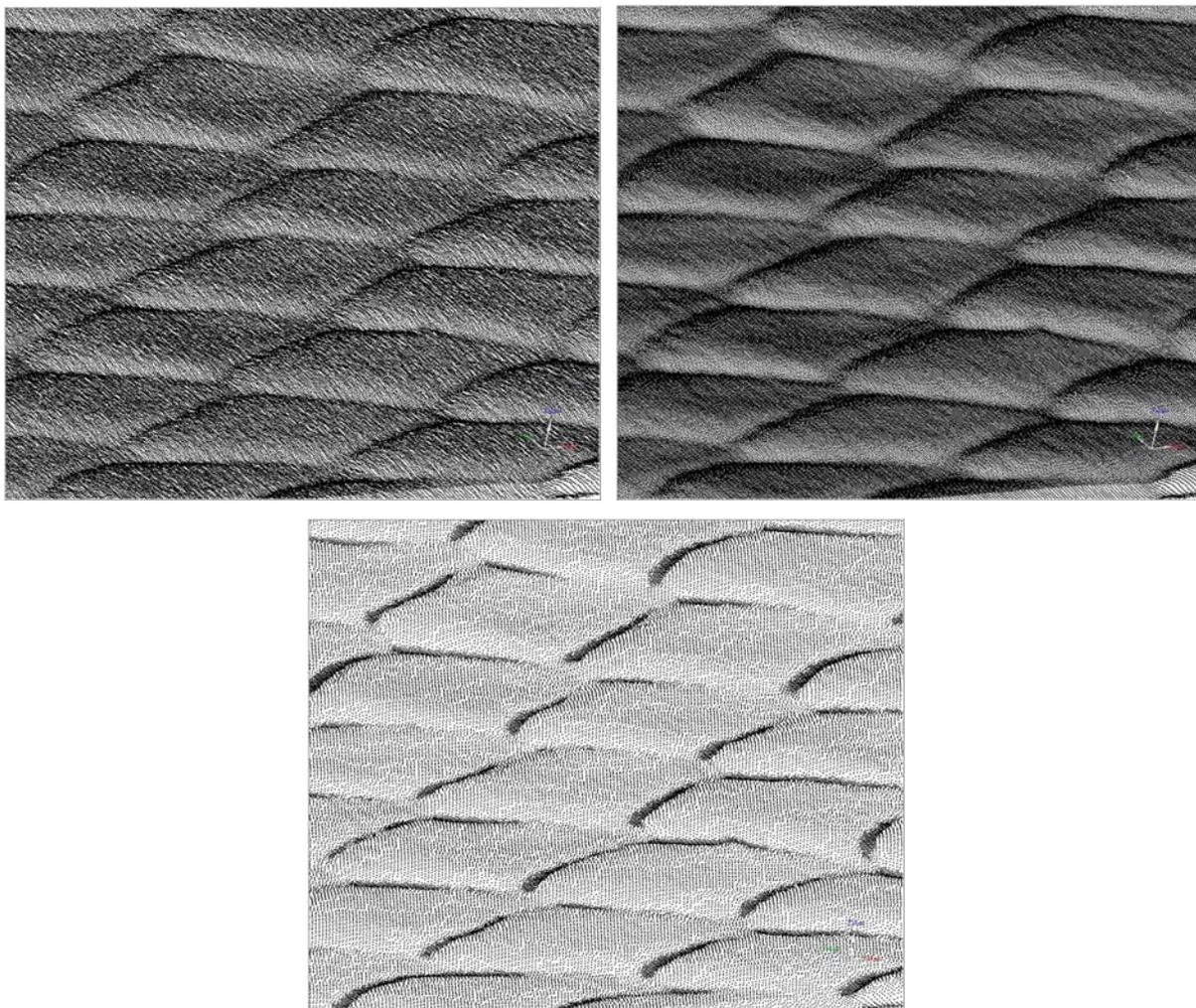
O Banco de Texturas foi disponibilizado para o cadastro das texturas desenvolvidas pela equipe do LdSM e atualmente (agosto de 2006) já reúne mais de 140 texturas prontas para a utilização em produtos industriais. Algumas das texturas desenvolvidas através da digitalização tridimensional e analisadas no escopo deste trabalho estão disponíveis à comunidade e são apresentadas como estudos de caso na seção 3.4. O APÊNDICE B apresenta imagens adicionais do banco de texturas.

### **3.4. Estudos de caso**

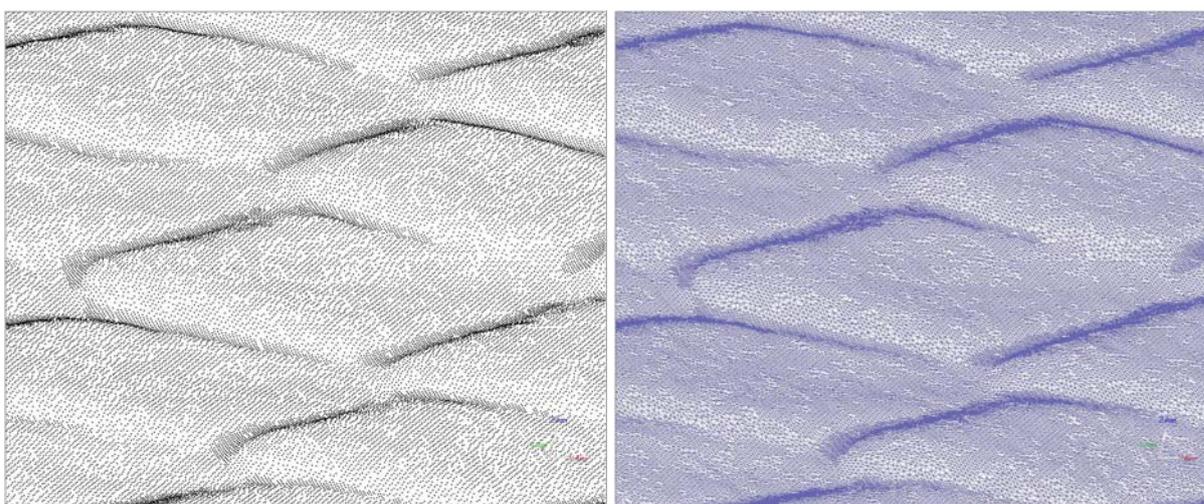
Visando apresentar a aplicação prática da metodologia desenvolvida, bem como a utilização direta de algumas das texturas obtidas da natureza em produtos industriais, neste item são apresentados três estudos de caso. Os estudos da textura do couro de cobra, do couro de arraia e da palha do milho demonstraram a viabilidade do uso da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento de texturas aplicadas ao Design de Produto.

#### **3.4.1. Textura couro de cobra**

Neste item é apresentado o desenvolvimento de uma textura através da digitalização de um couro de cobra. O procedimento ocorreu visando reproduzir esta textura em um couro bovino comum de modo a agregar valor ao mesmo. A digitalização foi realizada de acordo com a metodologia para o desenvolvimento de texturas proposta no presente trabalho, já apresentada no item 2.6. A Figura 127 apresenta um detalhe da nuvem de pontos obtida e as etapas de seu processamento, enquanto que a Figura 128 mostra a conversão da nuvem em malha de triângulos.

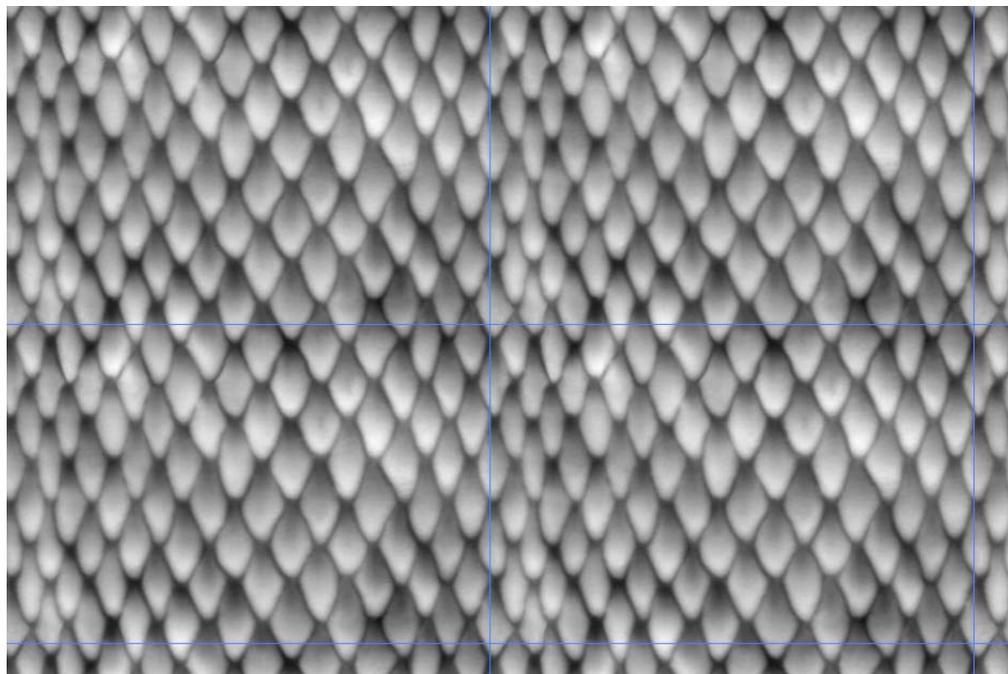


**Figura 127 - Nuvem de pontos do couro de cobra; (a) nuvem de pontos bruta (b) nuvem com filtro de ruído, (c) nuvem com redução do número de pontos.**



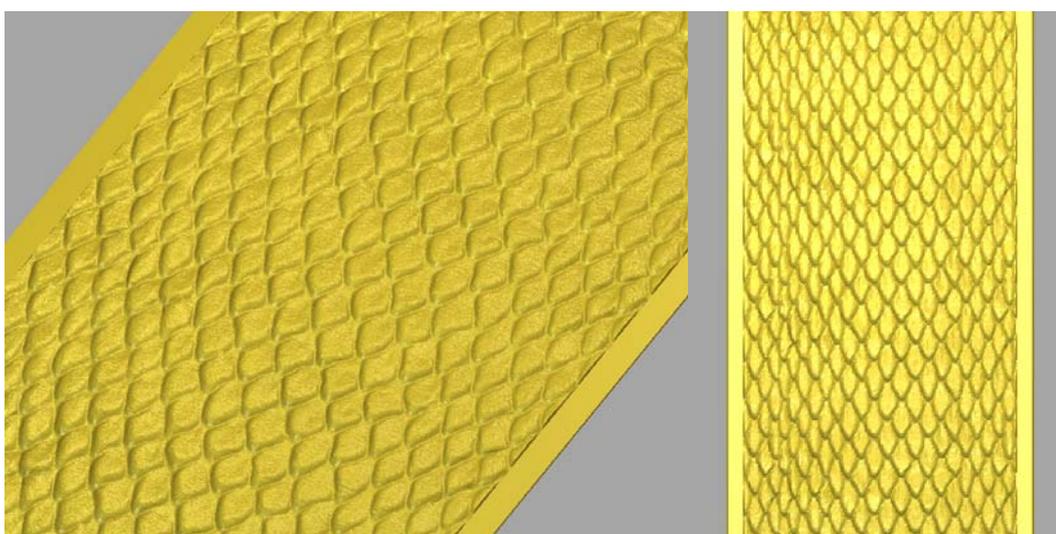
**Figura 128 - Nuvem de pontos e malha de triângulos da textura couro de cobra.**

De posse da malha foi gerada uma imagem em escala de cinzas, a qual foi trabalhada para a obtenção do módulo de repetição da textura (Figura 129).



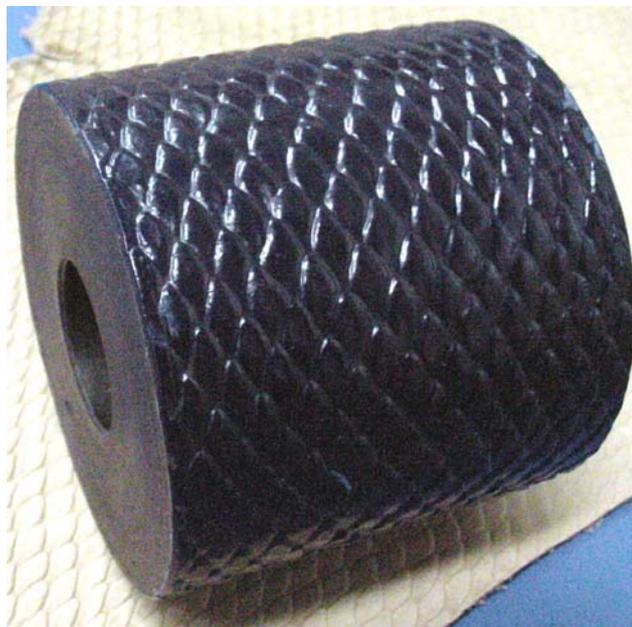
**Figura 129 - Módulo de repetição da textura couro de cobra em escala de cinzas.**

Através da possibilidade de colocar esta textura em repetição foi projetado em software CAM um eletrodo de grafite (Figura 130) para produção de um rolo de gravação através do processo de eletroerosão.



**Figura 130 - Eletrodo projetado em software CAM.**

O rolo de gravação (Figura 131) foi produzido pela revolução de um cilindro de aço alto carbono sobre o eletrodo plano desenvolvido.



**Figura 131 - Rolo de gravação com a textura couro de cobra.**

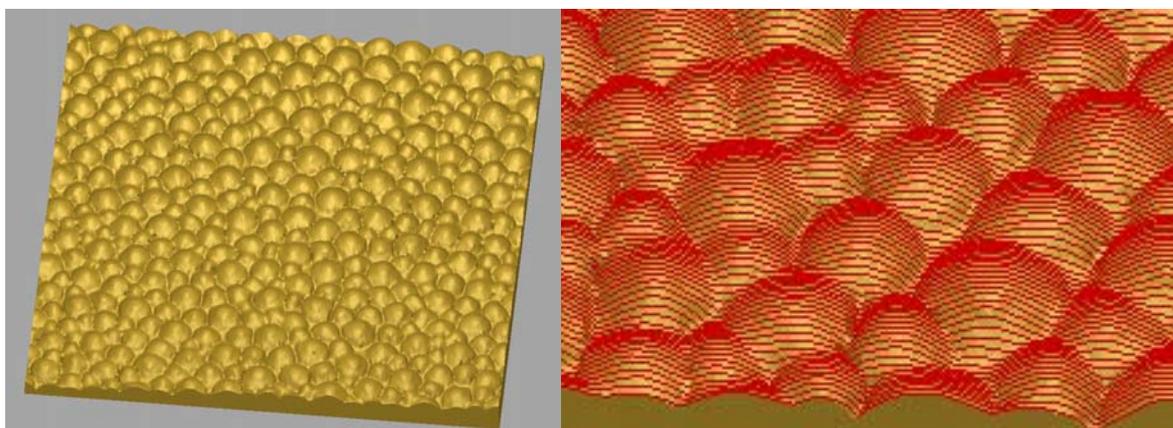
O rolo obtido foi utilizado para a produção de uma matriz para prensagem de couro. Como a textura do rolo contém os módulos de repetição, este pode ser deslocado em intervalos igualmente espaçados e assim produzir matrizes texturizadas de qualquer tamanho. A Figura 132 mostra um couro bovino prensado com a mesma textura do rolo de gravação, demonstrando a viabilidade da metodologia desenvolvida.



**Figura 132 - Textura do couro de cobra aplicada em couro bovino.**

### 3.4.2. Textura couro de arraia

Também utilizando a metodologia para o desenvolvimento de texturas proposta no presente trabalho, foi digitalizado um couro de arraia para aplicação na joalheria. Este procedimento tomou como base as tendências internacionais de utilização direta do couro do peixe arraia nas jóias. Com o desenvolvimento desta textura, através da digitalização, propôs-se o aproveitamento somente da morfologia do couro do animal, descartando o uso do couro propriamente dito, sem prejudicar, assim, o ecossistema. Após seu processamento a textura do couro de arraia foi levada a um software CAM para programação de sua usinagem (Figura 133).



**Figura 133 - Textura da arraia em programa CAM para usinagem.**

Foi realizada a usinagem de uma matriz em cera através da Fresadora CNC do LdSM/UFRGS, tornando física a textura manipulada anteriormente. A partir da matriz desenvolvida realizou-se o processo de fundição por cera perdida de modo a obter a textura em metal. Cabe salientar que este processo caracteriza-se por ser uma fundição de precisão utilizada para a produção de peças com formato complexo, melhor acabamento de superfície e tolerâncias mais estreitas. Assim foi possível a reprodução da textura do couro da arraia com grande precisão, conforme pode ser observado na Figura 134, a qual apresenta o couro natural, a textura em cera e a mesma textura em latão banhado em ouro.



**Figura 134 - Textura da arraia; couro natural, cera e latão banhado em ouro.**

A partir da textura do couro de arraia foram desenvolvidos projeto de jóias pela equipe do LdSM/UFRGS (Figura 135), bem como por empresas filiadas ao Sindijóias-RS (Figura 136). Para tanto disponibilizou-se às empresas lâminas de cera e de metal com a textura do couro de arraia. A referida ação visou auxiliar às empresas e ao próprio estado do Rio Grande do Sul no que tange ao desenvolvimento do setor joalheiro, agregando valor às peças e coleções desenvolvidas, bem como mostrando a grande capacidade de inovação em produtos industriais promovida pela técnica de digitalização tridimensional.



**Figura 135 - Peças desenvolvidas pela equipe LdSM com a textura da arraia.**



Figura 136 - Peças desenvolvidas por empresas do Sindijóias-RS com a textura da arraia.

### 3.4.3. Textura palha de milho

A metodologia para o desenvolvimento de texturas proposta no presente trabalho ainda permitiu a digitalização de uma palha de milho e a conseqüente aplicação de sua textura em diferentes materiais. A textura desenvolvida é apresentada na Figura 137, na qual observa-se a palha natural, seu módulo parametrizado em escala de cinzas e a textura obtida em vista frontal e perspectiva.

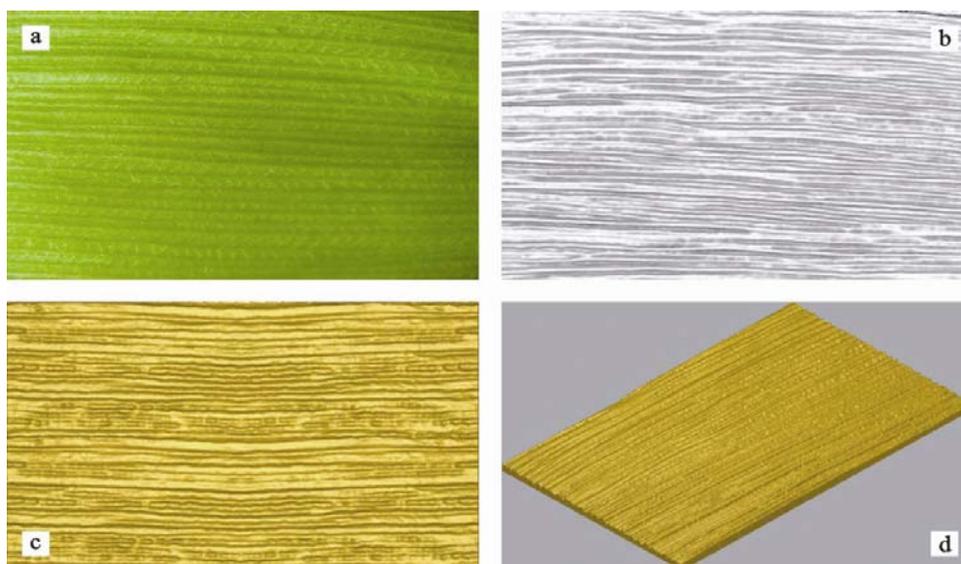


Figura 137 - Textura da palha de milho; (a) palha natural (b) módulo em escala de cinzas (c) vista frontal da textura obtida (d) textura em perspectiva.

Esta textura também foi trabalhada em softwares CAD/CAM a partir dos quais foi programada sua usinagem na fresadora CNC do LdSM/UFRGS. A exemplo da textura do couro de arraia, a palha de milho foi produzida em cera e posteriormente fundida em metal. A Figura 138 mostra a textura obtida em prata sobre a palha de milho que a originou. Através desta imagem salienta-se a precisão da técnica, a qual pode ser observada através da comparação entre os veios da textura natural que se encaixam com os veios da textura desenvolvida.



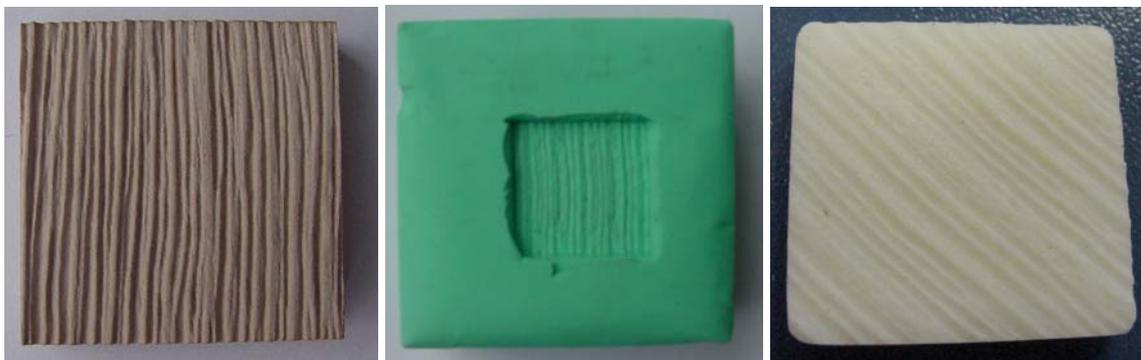
**Figura 138 - Comparação entre a palha de milho natural e a textura obtida em prata.**

Visto que os arquivos obtidos são compatíveis com os sistemas CAD/CAM, a textura também pôde ser usinada em outros materiais, como o osso bovino, visando sua aplicação em cabos para facas e canivetes, bem como em botões, presilhas e peças diversas para o artesanato, como ilustra a Figura 139.



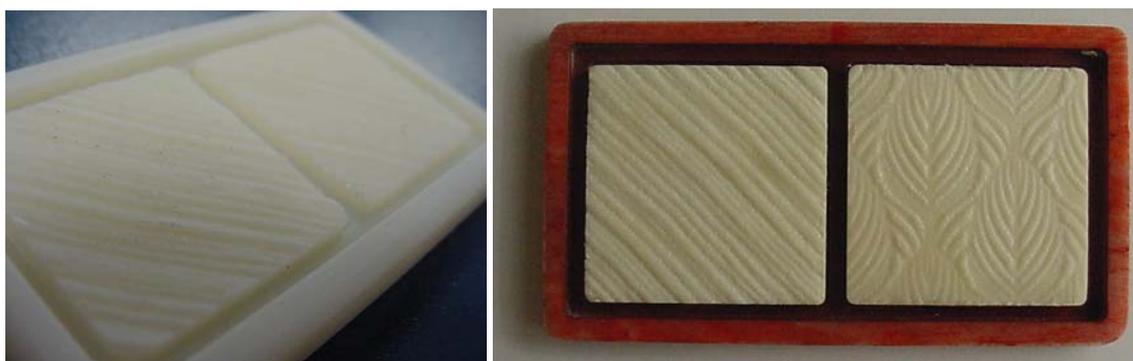
**Figura 139 - Textura da palha de milho usinada em osso para peças de artesanato.**

A textura da palha de milho ainda foi fresada em uma resina de poliuretano (PU) específica para usinagem, da qual foi extraído um molde de silicone para vazamento (*casting*) de várias peças de resina termofixa de PU, conforme pode ser observado na Figura 140.



**Figura 140 - Textura da palha do milho; (a) resina de PU para usinagem (b) molde de silicone (c) resina termofixa de PU.**

A textura da palha do milho foi escolhida pela equipe do LdSM/UFRGS para a elaboração de um jogo de dominó texturizado. O referido dominó foi desenvolvido visando à inclusão e a acessibilidade de pessoas portadoras de deficiências visuais. A Figura 141 ilustra duas versões deste jogo: uma produzida pelo vazamento (*casting*) de resina termofixa de PU e outra produzida por usinagem CNC em osso bovino.



**Figura 141 - Dominó de texturas; (a) resina termofixa de PU (b) usinado em osso.**

Com o referido dominó de design universal, os portadores de necessidades especiais visuais jogam utilizando a percepção tátil das peças, enquanto que e os videntes optam pela identificação visual e/ou tátil das mesmas. Cabe salientar que foram selecionadas texturas

desenvolvidas tanto pelo método 3D quanto pelo 2D e que fatores estéticos também foram considerados. Cabe também ressaltar que existe a possibilidade dos videntes jogarem com os olhos vendados o que acarretaria um novo desafio para estes usuários. A inovação desta proposta consiste na estimulação das memórias táteis dos usuários, videntes ou não, através do uso de texturas no lugar de números. A Figura 142 mostra algumas peças do jogo de dominó desenvolvido.



**Figura 142 - Dominó de texturas desenvolvido pela equipe LdSM.**

#### 4. CONCLUSÕES

Os designers, engenheiros e demais projetistas não devem limitar-se apenas à utilização de técnicas e tecnologias já existentes e difundidas; devem estar na vanguarda da tecnologia e também colaborar com o desenvolvimento de novas técnicas, detectá-las e aplicá-las no processo de criação de novos produtos. Neste contexto, a Digitalização Tridimensional a Laser vem se mostrando uma técnica que acrescenta, no processo de desenvolvimento, agilidade, qualidade e inovação. Estas características são reforçadas pela versatilidade que é inerente a técnica, a qual tem aplicações diferenciadas em diversas áreas do conhecimento.

Neste trabalho realizou-se o estudo da utilização da digitalização tridimensional a laser no desenvolvimento e caracterização de texturas aplicadas ao design de produtos. Observa-se que este estudo trouxe contribuição para a área de desenvolvimento de produtos, uma vez que através da texturização pode-se diferenciar e inovar artefatos, bem como promover uma maior interação entre produto-usuário estimulando percepções táteis e visuais. O desenvolvimento de uma metodologia para aquisição de texturas, processamento de dados, parametrização de um módulo de repetição e geração de arquivos CAD/CAM também foi uma importante contribuição do presente trabalho.

Através da digitalização e processamento de dados dos padrões de rugosidade foi possível concluir que o limite de operação do equipamento utilizado ocorre com rugosidades médias ( $R_a$ ) da ordem de  $5\mu\text{m}$ . Os parâmetros de rugosidade são bastante influenciados pela qualidade dos pontos capturados pelo sistema, o que ocorre devido ao descarte de alguns pontos não considerados satisfatórios. Para o parâmetro  $R_a$  obteve-se uma diferença de 10% em relação ao padrão medido mecanicamente, enquanto que para o parâmetro  $R_z$  obteve-se uma diferença de 20%. O parâmetro  $R_z$ , por trabalhar com os máximos e mínimos, mostrou-se mais sensível à qualidade dos pontos, enquanto que o parâmetro  $R_a$ , por trabalhar com a média, exigiu uma maior amostra (mais representativa) de pontos da superfície.

Os resultados e conclusões das análises de rugosidade foram fundamentais para o entendimento do mecanismo de processamento dos pontos oriundos da digitalização. Através destes dados foi possível realizar digitalizações com maior qualidade de superfícies

tridimensionais. Ainda no que diz respeito à caracterização de superfícies, a técnica mostrou-se uma potencial ferramenta para análises de desgaste e de área superficial, bem como de uso promissor na área da balística. Também os resultados e conclusões das análises tridimensionais foram importantes para a aquisição de texturas com vistas à aplicação no Design de Produtos, por exemplo, em termoplásticos injetados, peças de joalheria, brinquedos, artesanato, etc.

Através dos estudos de caso realizados este trabalho mostra a importância do uso de texturas com a intenção de alcançar um resultado diferenciado e agregar valor aos produtos industriais, bem como para promover a relação emocional que o produto estabelece com o usuário. Sendo o toque de fundamental importância para a percepção dos produtos, através dele o projetista consegue, ao trazer inovações na superfície dos objetos, atingir um público carente de novas experiências sensoriais. Um dos efeitos resultantes dessa ação é a maior durabilidade dada aos produtos uma vez que se criam vínculos afetivos mais profundos com o usuário.

No andamento do trabalho foram identificadas complexas formas de texturas, as quais ampliam de modo geral a compreensão da importância em desenvolver e definir o banco de texturas relacionando-o diretamente ao uso tecnológico. A textura pode não só aprimorar as características estéticas do produto, como pode ser utilizada com o objetivo funcional. Através do desenvolvimento do banco de texturas compreendeu-se a necessidade de inovar nesta área que, até então, não dispunha de uma forma sistemática para organizar e classificar as texturas visando à aplicação na indústria. O uso inovador das texturas é promovido com a criação deste Banco de Texturas, o qual se coloca como uma referência aos designers, engenheiros e demais profissionais das áreas de projeto de uma proposta nova na construção de produtos. Acredita-se que com este trabalho a pesquisa seja estimulada, desenvolvendo novos caminhos tanto na área do Design quanto da Engenharia.

#### 4.1. Sugestões para trabalhos futuros

Estudar a funcionalidade das texturas e incluir estes dados no banco desenvolvido. Incluir também no banco de texturas dados sobre a percepção (subjetivos), expandido seu uso.

Dar continuidade ao estudo de obtenção de padrões de texturas da natureza, ampliando o banco de texturas.

Estudar a relação artesanato e digitalização, por exemplo através de tramas, buscando reproduzir trabalhos realizados à mão em escala industrial.

Digitalizar texturas relativas a grupos étnicos, tais como a cerâmica Guarani, e estudar as técnicas de fabricação e os padrões de repetição destes artefatos.

Pesquisar junto a museus a possibilidade de obtenção texturas representativas de épocas. Estudar as texturas de afrescos de paredes e forros, com aplicação na área da arquitetura.

Desenvolver pesquisas com um Scanner 3D a Laser móvel (portátil), o qual poderia ser utilizado em situações onde não é possível levar a amostra a laboratório. Este equipamento encontraria grande aplicação nos casos de digitalização de objetos de elevado tamanho e/ou peso, bem como nos de objetos frágeis e/ou de grande valor, por exemplo, nas áreas da paleontologia e da museologia.

Promover alterações no software de aquisição de dados do scanner 3D a Laser, visando armazenar juntamente com os pontos suas respectivas qualidades (por exemplo, no formato "X Y Z Q") de modo a permitir a realização de cálculos da relação ótima pontos/qualidade para cada caso estudado.

Aprofundar o uso da digitalização tridimensional na área de análise de desgaste e estender seu uso a outras áreas como a odontologia, bem como à área da balística.

## REFERÊNCIAS

1. ACKERMAN, Diane. Uma História Natural dos Sentidos, Editora Bertrand Brasil, 2º ed. São Paulo, 1996.
2. AN-HSUAN, Tai. Sementes do Cerrado e Design Contemporâneo: Proposta de estudo estético-morfológico comparativo para o ensino do design e da arquitetura. Goiânia: Universidade Federal de Goiás, 1999.
3. ARINO, I. Appearance characterization of textured polymeric surfaces. Chalmers Tekniska Högskola, Gotemburgo (Suécia), 2005.
4. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. Especificações geométricas do produto (GPS) - Rugosidade: Método do perfil - Termos, definições e parâmetros da rugosidade: ABNT NBR ISO 4287, Rio de Janeiro, 2002.
5. BALZERS. Revestimentos BALINIT®, 2005. Disponível em: <<http://www.balzers.com.br/bbr/por/02-applications/01-wear-tribology/06-tribo-system/indexW3DnavidW263.php>> acessado em julho de 2006.
6. BARBETTA, P. A.; BORNIA, A. C.; REIS, M. M. Estatística para cursos de engenharia e informática. Editora Atlas, 2004.
7. BEALL, G. By Design: Part design 109 - Textured finishes. IMM Magazine Article Archive, 2000.
8. BENNICH, P. Traceability and Measurement Uncertainty in Testing. MetroTrade Workshop, Berlin, 2003.
9. BET, L. Estudo da medição da textura de superfícies com sondas mecânicas e com sondas ópticas tipo seguidor. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, 1999.
10. BHATTACHARYA, A.; NASAREK, M.; ZEIMER, U.; KLEIN, A.; ZORN, M.; BUGGE, F.; GRAMLICH, S.; WEYERS, M. Comprehensive characterization of MOVPE-grown AlGaAs/AlAs distributed Bragg reflector structures by optical reflectance, X-ray diffraction and atomic force microscopy. Journal of Crystal Growth, 274, 2005.
11. BONSIPEPE, G. Design: do Material ao Digital. FIESC/IEL. Florianópolis, 1997.
12. BORGES, Marcos. Design de peças em termoplástico de engenharia. GE Plastics, 1998.
13. BP PLC. BP Portugal - Comércio de Combustíveis e Lubrificantes S.A. Disponível em: <<http://www.bp.com/glossarylinks.do?categoryId=6146020&contentId=7008319>> acessado em julho de 2006.
14. BÜRDEK, Bernhard E. Diseño: História, Teoria y Prática del Diseño Industrial. Barcelona: Gustavo Gilli, 1994.
15. CALLISTER, William D., Jr.. Ciência e engenharia de materiais : uma introdução. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002.
16. CAMBRIDGE ENGINEERING SELECTOR. CES 4.5 - EDUPACK 2005 (software), Reino Unido: GrantaDesign, 2005.

17. CASTLE ISLAND CO. Reverse Engineering Tutorial, 2004. Disponível em: <[http://home.att.net/~castleisland/scn\\_c.htm](http://home.att.net/~castleisland/scn_c.htm)> acessado em março de 2006.
18. CHAN, K. Y.; TSANG, W. S.; MAK, C. L.; WONG K. H. Optical studies of 0.65PbMg<sub>1/3</sub>Nb<sub>2/3</sub>O<sub>3</sub>-0.35PbTiO<sub>3</sub> thin films. *Journal of the European Ceramic Society*, 25, 2005.
19. COHEN, David (Ed.). *Revista Época*. Editora Globo, Edição Especial: Olimpíadas, nº 7, 2001.
20. COMPLETE SURFACE TECHNOLOGIES INC., Michigan, EUA, 2005. Disponível em: <<http://www.cst-texture.com/grainvue.htm>> acessado em junho de 2006.
21. DIAS, Joanes Silva; MOTTA, Mauricio Saldanha. Caracterização da rugosidade superficial através de técnica ultra-sônica. XXI Congresso Nacional de Ensaio Não Destrutivos, Salvador, 2002.
22. DISCHINGER, M.C.T.; COLLET, I.B.; KINDLEIN Jr, W. Desenvolvimento de Texturas como Contribuição ao Design Emocional. 7º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Curitiba, 2006.
23. DISCHINGER, M.C.T.; GIGUER, R.F.; COLLET, I.B.; KINDLEIN Jr, W. Projeto e execução de um jogo de dominó baseado em texturas vegetais para portadores de necessidades especiais visuais. 7º Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design, Curitiba, 2006.
24. DURAKBASA, M.N.; AFJEHI-SADAT, A.; NOMAK, A. Dimensional and geometrical measurements and interpretation of measuring results on the basis of the skin-model. *Measurement Science Review*, Bratislava, Slovak, Vol. 1, Nº 1, 2001.
25. EUITIZ. *Calidad Superficial: Rugosidad, Tecnología Mecánica II*, Zaragoza, 2002.
26. EVANS, C. J.; BRYAN, J. B. "Structured", "Textured" or "Engineered" Surfaces. *Annals of the CCIRP*, Vol. 48/2, 1999.
27. FACCIO, Ian. Investigações sobre o acabamento superficial de usinagens com altíssima velocidade de corte. Escola Politécnica, USP, 2003.
28. FER-PLASTIC Industrial de Plásticos Ltda, São Paulo. Disponível em: <<http://www.fer-plastic.com.br/ferramenta.htm>> acessado em julho de 2006.
29. FERRANTE, Maurizio. *Seleção de Materiais*. São Carlos: EDUFSCar, 1996.
30. FERRARESI, Dino. *Usinagem dos metais*. São Paulo: Edgard Blucher, 1998.
31. FERREIRA, Aurélio Buarque de Holanda. *Novo Dicionário Aurélio - Século XXI*. Editora Nova Fronteira, 1999.
32. FERREIRA, J. Integration of reverse engineering and rapid tooling in foundry technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 2003.
33. FERREIRA, Luís Andrade. *Tribologia - Notas de Curso*. Editora Publindústria, 2000.
34. FRANÇA, F. A. *Determinação do arrasto total em perfil aerodinâmico*. Unicamp, 2002.
35. FREITAS, Gustavo. *Digitalização 3D em ambientes computacionais de suporte à Engenharia Simultânea aplicada ao setor de calçados (título provisório)*. Dissertação de mestrado em desenvolvimento. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

36. GARBACZ, A.; COURARD, L.; KOSTANA, K. Characterization of concrete surface roughness and its relation to adhesion in repair systems. *Materials Characterization*, 56, 2006.
37. GLENN, N. F.; STREUTKER, D. R.; CHADWICK, D. J.; THACKRAY, G. D.; DORSCH, S. J. Analysis of LiDAR-derived topographic information for characterizing and differentiating landslide morphology and activity. *Geomorphology*, 73, 2006.
38. GOMES, A. C. T. Análise da Corrosão e da Erosão-Corrosão do Aço Carbono em Meio com  $\text{H}_2\text{CO}_3$  e  $\text{CO}_2$ . Dissertação (Mestrado em Engenharia), Universidade Federal do Paraná, 2005.
39. GONZÁLEZ, Ricardo V. B. Rugosidade Superficial – Uma abordagem prática. Mitutoyo, São Paulo, 1998.
40. GUANABARA, Andréa Seadi; KINDLEIN JUNIOR, Wilson. Methodology for product design based on the study of bionics. *Materials & Design*, Volume 26, Issue 2, pg 149-155, abr, 2005
41. HO-YO Enterprise Co., Taipei, Taiwan. Disponível em: <[www.hoyo-mold.com](http://www.hoyo-mold.com)> acessado em junho de 2006.
42. INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P. Fundamentos de transferência de calor e massa. Ed. LTC, 4ª edição, 1998.
43. INTERNATIONAL COUNCIL DESIGN OF SOCIETIES OF INDUSTRIAL DESIGN - ICSID. Disponível em: <<http://www.icsid.org>> acessado em julho de 2006.
44. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Nominal characteristics of contact (stylus) instruments. ISO 3274:1996.
45. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Rules and procedures for the assessment of surface texture. ISO 4288:1996.
46. INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. Geometrical Product Specifications (GPS) - Surface texture: Profile method - Metrological characteristics of phase correct filters. ISO 11562:1996.
47. KALPAKJIAN, S. Manufacturing Process for Engineering Materials. Addison-Wesley Publishing Company, 1985.
48. KAWAKAME, Marcelo S. Atrito e Desgaste em Polímeros. Disponível em: <<http://www.unilubri.com.br/manuais.asp#>> acessado em junho de 2006.
49. KINDLEIN, W. Jr.; Etchepare, H.D.; Silva, F. P; Ravazolo, R. F. Desenvolvimento de uma interface amigável via internet: materiais e processos de fabricação para o design de produto. Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design. Brasília: P&D Design, 2002
50. KINDLEIN, Wilson Jr. et al. A natureza como fonte de inspiração para a criação e desenvolvimento de texturas aplicadas ao design industrial. In: Congresso Brasileiro de Pesquisa e Desenvolvimento em Design. São Paulo: Fundação Armando Álvares Penteado, 2004.
51. KINDLEIN, Wilson Jr. et al. Portal LdSM - Laboratório de Design e Seleção de Materiais. Disponível em <<http://www.ufrgs.br/ndsm>> acessado em junho de 2006.

52. KNOBEL, Marcelo. Rumo ao ouro, com ciência e tecnologia. *Jornal da Unicamp*, Edição 263, 2004.
53. KRIPPENDORFF, K. Product Semantics: a brief sketch. In *P&D Design 2000*, separata das conferências dos visitantes estrangeiros. Novo Hamburgo: AEND, 2000.
54. KUNZLER, Lizandra Stechman Quintana. Estudo das variáveis de rugosidade, dureza e condutividade térmica aplicado à percepção tátil. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003.
55. LESKO, Jim. *Industrial design: materials and manufacturing*. New York: John Wiley, 1998.
56. LINDEN, J. C. S.; KUNZLER, L. S. Q. A seleção de materiais e o conforto percebido em produtos. Gramado: ABERGO, 2001.
57. LÖBACH, B. *Diseño Industrial: bases para la configuración de los productos industriales*. Barcelona: Gustavo Gili, 1981.
58. MANU, Alexander. Tendências Futuras: A forma acompanha o estado de espírito. In: *Fórum Internacional Design e Diversidade Cultural*, Florianópolis, 1995. *Anais do Fórum Internacional Design e Diversidade Cultural*. Florianópolis: SENAI/LBDI, 1995.
59. MANZINI, E. A matéria da invenção. Centro Português de Design, Lisboa, 1993.
60. MANZINI, E. *La material dell'invenzione*. Arcadia Edizione, 2ª ed., 1989.
61. MASCARENHAS, W. N. Sistematização do processo de obtenção do leiaute dimensional de componentes de plástico moldados por injeção. Dissertação de Mestrado. Florianópolis: Programa de Pós-graduação em Eng. Mecânica, UFSC, 2002.
62. MENDES, Rosa. *Lubrificação e Lubrificantes*. Escola Superior de Tecnologia, Setúbal, 2006.
63. MOLD-TECH. *Comprehensive Guide to Mold Texturizing*, 2001. Disponível em: <<http://www.mold-tech.com/texturing/dir.shtml>> acessado em julho de 2006.
64. MORATO, L.; SILVA, F. P.; FREESE, S. H.; KINDLEIN, W. Jr.; RODRIGUES, P.G.; SCHULTZ, C. L.. Potencialidades do uso da digitalização tridimensional a Laser e prototipagem para a Paleontologia de Vertebrados. In: *II Congresso Latino-americano de Paleontologia de Vertebrados*. Rio de Janeiro: II CLPV, 2005.
65. MORATO, L.; SILVA, F. P.; VEGA-DIAS, C.; SCHULTZ, C. L.. Discutindo um mito: comparações biomecânicas entre *Dinodontosaurus* (Synapsida: Dicynodontia) e preguiças terrícolas extintas. In: *II Congresso Latino-americano de Paleontologia de Vertebrados*. Rio de Janeiro: II CLPV, 2005.
66. MORENO, Mariano Eduardo. *Desenvolvimento e implementação de metodologia de otimização da geometria do blank em processos de conformação de chapas metálicas*. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2000.
67. MORTON-JONES, D.H.. *Polymer processing*. London: Chapman and Hall, 1989.
68. MUMMERY, Leigh. *Surface Texture Analysis: The Handbook* Alemanha: Hommelwerke GMBH, 1992
69. MYSHKIN, N. K.; PETROKOVETS, M. I.; CHIZHIK S. A. Simulation of real contact in tribology. *Tribology International*, Vol. 31, Nos 1–3, 1998.

70. NORMAN, D. A. Emotion and design: Attractive things work better. *Interactions Magazine*, ix (4), p. 36-42, 2002.
71. OPTIMET. Introduction. In: OPTIMET, *Optical Metrology*, 2003. Disponível em: <<http://optimet.com/technology.htm>> acessado em março de 2006.
72. PESSOA, Maria Conceição P. Y. et. al. Embrapa Meio Ambiente, 2001. Disponível em <[http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod\\_int/normalizacao.html](http://www.cnpma.embrapa.br/projetos/prod_int/normalizacao.html)> acessado em junho de 2006.
73. POETON INDUSTRIES LIMITED. England, UK, 2005. Disponível em: <<http://www.poeton.co.uk/w1/surface.htm>> acessado em junho de 2006.
74. POLISUL. Moldagem por sopro. Triunfo: Polisul, 1995.
75. PROGRAMA BRASILEIRO DE DESIGN - PBD, Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior - MDIC. Disponível em: <<http://www.designbrasil.org.br/portal/acoes/pbd.jhtml>> acessado em julho de 2006.
76. RABINOWICZ, Ernest. *Friction and Wear of Materials*. New York: John Wiley, 1965.
77. REDE GAÚCHA DE DESIGN - RGD. Disponível em: <[www.rgd.org.br](http://www.rgd.org.br)> acessado em julho de 2006.
78. ROSSETTI, P. Dicionário Quimicamente Falando. Disponível em: <<http://www.rossetti.eti.br/dicuser>> acessado em julho de 2006.
79. ROYO, Santiago. *Topographic measurements of non-rotationally symmetrical concave surfaces using Ronchi deflectometry*. Universitat Politècnica de Catalunya, 1999.
80. RUBINI, C. E.; AGUIAR, G. A aerodinâmica da bola de futebol. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 26, n. 4, 2004.
81. RUIZ, Guillermo González. *Estúdio de Diseño – Sobre la construcción de las ideas y su aplicación a la realidad*. Buenos Aires: Emecé Editores, 1994.
82. RÜTHSCHILLING, A. E. Disponível em: <[http://www.nds.ufrgs.br/usoteorico/ds\\_principio\\_basico.php](http://www.nds.ufrgs.br/usoteorico/ds_principio_basico.php)> acessado em julho de 2006.
83. SANTAELLA, Lucia. *Semiótica Aplicada*. Editora Thomson. São Paulo. 2002.
84. SCOTT, J. Golf ball dimples & drag. *Aerospaceweb*, 2005. Disponível em: <<http://www.aerospaceweb.org/question/aerodynamics/q0215.shtml>> acessado em julho de 2006.
85. SHAMES, I.H. *Mecânica dos Fluidos*. Edgard Blücher, v.1-2, 1995.
86. SHARKOON. Sharkoon Silent Eagle. *CDRInfo*, 2005. Disponível em: <<http://www.cdrinfo.com/Sections/Reviews/Specific.aspx?ArticleId=15798>> acessado em julho de 2006.
87. SILVA, Everton Amaral. *Um sistema informacional e perceptivo de seleção de materiais com enfoque no design de calçados*. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2005.
88. SILVA, F.P.; COLLET, I.B.; DISCHINGER, M.C.T.; KINDLEIN W.Jr.. *Textures applied to tactile perception in Product Design: an approach to visual impairment*. 16th World Congress on Ergonomics - IEA 2006, Maastricht (Holanda), 2006.

89. SILVA, J.C. Livro I dos elementos de Euclides. Departamento de Matemática, Universidade de Coimbra. Disponível em: <<http://www.mat.uc.pt/~jaimecs/euclid/1parte.html>> acessado em julho de 2006.
90. SILVA, José Reinaldo Moreira da. Relações da usinabilidade e aderência do verniz com as propriedades fundamentais do eucalyptus grandis hill ex. maiden. Tese (Doutorado), Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal - Ciências Agrárias, UFPR, 2002.
91. SOKOVIC, M. RE (reverse engineering) as necessary phase by rapid product development. Journal of Materials Processing Technology, 2005.
92. STOUT, K.J. Engineered Surfaces - a philosophy of manufacture. In press, Paris, 1999.
93. STROHAECKER, T. et al. Fadiga e Análise de Falhas. Porto Alegre: Escola de Engenharia, UFRGS, 2003.
94. SVIRIDENOK, A. I.; CHIZHIKT, A. A.; SVEKLO, I. F. Microtribological problems of physics and mechanics in smooth surface contact. Tribology International, Vol. 29, No. 5, 1996.
95. URSA, Texaco. Chevron Global Lubricants disponível em: <<http://www.texacoursa.com/Portuguese/glossary/>> acessado em julho de 2006.
96. WIKCIONÁRIO, Dicionário Livre. Disponível em: <<http://en.wiktionary.org>> acessado em julho de 2006.
97. WIKIPÉDIA, Enciclopédia Livre. Disponível em: <<http://en.wikipedia.org>> acessado em julho de 2006.
98. WONG, W. Princípios de Forma e Desenho. São Paulo, ed. Martins Fontes, 1998.
99. ZAHOUANI, H.; ASSOUL, M.; VARGIOLU, R.; MATHIA, T. The morphological tree transform of surface motifs. Incidence in tribology. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 41, 2001.

## APÊNDICE A

Tabelas de cálculos estatísticos realizados no software Microsoft Excel utilizando a distribuição t de Student [Barbetta, 2004] com um nível de significância de 95% de certeza.

## Padrão Rz 3,2

Filtro cutoff = 0,25mm; Ra = 0,51 µm; Rz = 3,5µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
2	1	6665	8	48,9	num. 10 med. 7,49 desv. 0,277 conf. 0,20 + / - 2,6%	num. 10 med. 48,45 desv. 4,384 conf. 3,14 + / - 6,5%
	2	6665	7,8	47,4		
	3	6664	7,3	47,2		
	4	6665	7,3	60,3		
	5	6665	7,5	45,2		
	6	6665	7,6	45		
	7	6664	7,5	47		
	8	6665	7,6	48,7		
	9	6665	7,2	46,2		
	10	6665	7,1	48,6		
10	1	6663	8	64,8	num. 10 med. 7,49 desv. 0,296 conf. 0,21 + / - 2,8%	num. 10 med. 48,66 desv. 5,845 conf. 4,18 + / - 8,6%
	2	6665	7,8	47,2		
	3	6665	7,3	46,5		
	4	6665	7,3	45,3		
	5	6664	7,6	46,1		
	6	6665	7,6	44,3		
	7	6665	7,5	48		
	8	6665	7,6	48,5		
	9	6665	7,2	47		
	10	6665	7	48,9		
25	1	6663	8	48,7	num. 10 med. 7,49 desv. 0,288 conf. 0,21 + / - 2,8%	num. 10 med. 47,21 desv. 1,470 conf. 1,05 + / - 2,2%
	2	6665	7,8	46,8		
	3	6665	7,4	47,6		
	4	6665	7,3	45,5		
	5	6665	7,5	45,6		
	6	6665	7,6	44,8		
	7	6665	7,5	48,2		
	8	6665	7,6	48,9		
	9	6665	7,2	47,5		
	10	6665	7	48,5		
50	1	6663	8	49,4	num. 10 med. 7,48 desv. 0,286 conf. 0,20 + / - 2,7%	num. 10 med. 47,06 desv. 1,350 conf. 0,97 + / - 2,1%
	2	6664	7,8	46,2		
	3	6664	7,4	47,3		
	4	6664	7,3	45,7		
	5	6665	7,5	45,5		
	6	6664	7,6	45,4		
	7	6665	7,5	47,7		
	8	6665	7,5	48		
	9	6665	7,2	47		
	10	6663	7	48,4		
65	1	6127	7,9	48,5	num. 10 med. 7,54 desv. 0,280 conf. 0,20 + / - 2,7%	num. 10 med. 46,28 desv. 1,815 conf. 1,30 + / - 2,8%
	2	6425	7,8	46,4		
	3	6488	7,4	47,5		
	4	6595	7,3	45,7		
	5	6571	7,6	45		
	6	6487	7,7	45,1		
	7	6320	7,7	47,5		
	8	5930	7,7	48,3		
	9	5001	7,3	46,3		
	10	4155	7	42,5		
80	1	270	4,6	29	num. 10 med. 4,41 desv. 2,200 conf. 1,57 + / - 35,7%	num. 10 med. 22,30 desv. 9,252 conf. 6,62 + / - 29,7%
	2	420	7,7	30		
	3	279	5,6	29,4		
	4	463	5,8	31,8		
	5	562	6,5	25,6		
	6	337	5,6	29,2		
	7	236	2,4	16		
	8	122	2,9	13,7		
	9	149	1,9	11,1		
	10	101	1,1	7,2		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$

num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;

conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

### Padrão Rz 6,3

Filtro cutoff = 0,8mm; Ra = 1,3µm; Rz = 6,5µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
2	1	6662	3,1	58,9	num. 10 med. 3,64 desv. 0,310 conf. 0,22 + / - 6,1%	num. 10 med. 35,78 desv. 9,076 conf. 6,49 + / - 18,1%
	2	6665	3,4	32,8		
	3	6665	3,8	34,2		
	4	6664	3,6	42,9		
	5	6665	3,4	28,5		
	6	6665	3,5	30,7		
	7	6664	3,6	30,4		
	8	6665	4,1	35,1		
	9	6665	3,9	29,9		
	10	6665	4	34,4		
10	1	6661	3,2	31,6	num. 10 med. 3,65 desv. 0,292 conf. 0,21 + / - 5,7%	num. 10 med. 34,09 desv. 5,589 conf. 4,00 + / - 11,7%
	2	6665	3,4	46		
	3	6665	3,8	34,1		
	4	6665	3,6	42,4		
	5	6665	3,4	28,8		
	6	6665	3,5	30,4		
	7	6665	3,6	31,1		
	8	6665	4,1	32,8		
	9	6665	3,9	30,9		
	10	6665	4	32,8		
25	1	6663	3,1	30,1	num. 10 med. 3,64 desv. 0,310 conf. 0,22 + / - 6,1%	num. 10 med. 32,80 desv. 3,867 conf. 2,77 + / - 8,4%
	2	6665	3,4	32,7		
	3	6664	3,8	34,3		
	4	6665	3,6	42		
	5	6665	3,4	28,5		
	6	6665	3,5	30,8		
	7	6664	3,6	30,8		
	8	6665	4,1	34,6		
	9	6664	3,9	29,9		
	10	6664	4	34,3		
50	1	6635	3,1	30,7	num. 10 med. 3,63 desv. 0,306 conf. 0,22 + / - 6,0%	num. 10 med. 33,13 desv. 5,109 conf. 3,65 + / - 11,0%
	2	6665	3,4	32,8		
	3	6650	3,7	34,4		
	4	6651	3,6	39,1		
	5	6653	3,4	27,2		
	6	6663	3,5	30,2		
	7	6651	3,6	30,5		
	8	6641	4,1	32		
	9	6576	3,9	29,9		
	10	6591	4	44,5		
65	1	6305	3	29,3	num. 10 med. 3,60 desv. 0,323 conf. 0,23 + / - 6,4%	num. 10 med. 31,65 desv. 3,242 conf. 2,32 + / - 7,3%
	2	6582	3,3	31,7		
	3	6379	3,7	33		
	4	6391	3,5	38,4		
	5	6350	3,5	26,7		
	6	6482	3,5	30,9		
	7	6473	3,6	29,7		
	8	6233	4,1	32,6		
	9	6041	3,8	29,7		
	10	5444	4	34,5		
80	1	3037	2,4	19,7	num. 10 med. 2,81 desv. 0,242 conf. 0,17 + / - 6,2%	num. 10 med. 24,12 desv. 2,722 conf. 1,95 + / - 8,1%
	2	4396	2,8	25,6		
	3	3547	2,7	23		
	4	3349	2,9	28,4		
	5	3564	2,6	23		
	6	3985	2,7	24,7		
	7	3588	2,7	20,6		
	8	2618	3,2	26,9		
	9	2466	3	23,4		
	10	1356	3,1	25,9		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$

num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;

conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

## Padrão Rz 10

Filtro cutoff = 0,8mm; Ra = 2,2µm; Rz = 9,8µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
2	1	6662	9	48,7	num. 10 med. 8,94 desv. 0,341 conf. 0,24 + / - 2,7%	num. 10 med. 57,09 desv. 25,559 conf. 18,28 + / - 32,0%
	2	6664	8,9	129,7		
	3	6665	9,3	49,7		
	4	6664	9,2	47,5		
	5	6665	9	47,1		
	6	6665	9,1	46,8		
	7	6665	9,2	50		
	8	6665	9	49,2		
	9	6664	8,5	50,8		
	10	6664	8,2	51,4		
10	1	6662	9	45,6	num. 10 med. 8,94 desv. 0,341 conf. 0,24 + / - 2,7%	num. 10 med. 56,86 desv. 25,334 conf. 18,12 + / - 31,9%
	2	6665	8,9	128,8		
	3	6664	9,3	48,6		
	4	6665	9,2	47,4		
	5	6665	9	48,4		
	6	6664	9	48,3		
	7	6665	9,2	51,3		
	8	6665	9,1	49,3		
	9	6665	8,5	49,7		
	10	6664	8,2	51,2		
25	1	6661	9	44,6	num. 10 med. 8,92 desv. 0,346 conf. 0,25 + / - 2,8%	num. 10 med. 59,19 desv. 24,963 conf. 17,86 + / - 30,2%
	2	6662	8,9	126,5		
	3	6665	9,2	49,6		
	4	6665	9,2	46,6		
	5	6665	9	73,4		
	6	6665	9	48,7		
	7	6665	9,2	50,8		
	8	6665	9,1	48,4		
	9	6664	8,4	50,7		
	10	6664	8,2	52,6		
50	1	6665	9	44,1	num. 10 med. 8,91 desv. 0,341 conf. 0,24 + / - 2,7%	num. 10 med. 53,61 desv. 16,677 conf. 11,93 + / - 22,3%
	2	6647	8,9	100,7		
	3	6664	9,2	49,1		
	4	6665	9,2	47,4		
	5	6665	9	47,3		
	6	6665	9	47,3		
	7	6664	9,2	50,5		
	8	6661	9	48,3		
	9	6657	8,4	49,7		
	10	6663	8,2	51,7		
65	1	6296	9	45,7	num. 10 med. 8,91 desv. 0,311 conf. 0,22 + / - 2,5%	num. 10 med. 52,87 desv. 14,732 conf. 10,54 + / - 19,9%
	2	6349	8,9	94,4		
	3	6353	9,2	48,3		
	4	6410	9,2	47,1		
	5	6437	9	46,3		
	6	6461	9	46,9		
	7	6356	9,1	50,7		
	8	6290	9	51,1		
	9	6251	8,4	47,1		
	10	5837	8,3	51,1		
80	1	2707	9,2	42,8	num. 10 med. 9,38 desv. 0,397 conf. 0,28 + / - 3,0%	num. 10 med. 48,59 desv. 12,052 conf. 8,62 + / - 17,7%
	2	2995	9,4	82,5		
	3	3294	9,3	45,2		
	4	3268	9,8	45,7		
	5	3299	9,5	48		
	6	2847	9,9	45,2		
	7	2467	9,7	44,8		
	8	2115	9,5	45,9		
	9	2039	8,7	44,6		
	10	1402	8,8	41,2		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$

num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;

conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

## Padrão Rz 20

Filtro cutoff = 0,8mm; Ra = 5,4 µm; Rz = 20µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
2	1	6663	6,2	46,4	num. 10 med. 6,22 desv. 0,162 conf. 0,12 + / - 1,9%	num. 10 med. 51,45 desv. 11,386 conf. 8,14 + / - 15,8%
	2	6664	6	42,1		
	3	6664	6,4	53,5		
	4	6665	6,3	52,1		
	5	6665	6,1	44,9		
	6	6664	6,5	43,5		
	7	6665	6,2	45,5		
	8	6665	6,3	81,5		
	9	6665	6,2	53,6		
	10	6665	6	51,4		
10	1	6661	6,2	46,4	num. 10 med. 6,22 desv. 0,162 conf. 0,12 + / - 1,9%	num. 10 med. 52,12 desv. 11,310 conf. 8,09 + / - 15,5%
	2	6665	6	42,7		
	3	6665	6,4	54,5		
	4	6665	6,3	52,6		
	5	6665	6,1	46,2		
	6	6664	6,5	45,2		
	7	6665	6,2	45,4		
	8	6664	6,3	82		
	9	6664	6,2	52,4		
	10	6665	6	53,8		
25	1	6657	6,2	74,5	num. 10 med. 6,21 desv. 0,145 conf. 0,10 + / - 1,7%	num. 10 med. 56,71 desv. 12,606 conf. 9,02 + / - 15,9%
	2	6665	6	43,2		
	3	6665	6,4	52,9		
	4	6664	6,3	53,1		
	5	6665	6,1	73,3		
	6	6664	6,4	43,8		
	7	6665	6,2	45,6		
	8	6662	6,3	74,4		
	9	6665	6,2	53,1		
	10	6665	6	53,2		
50	1	6664	6,2	45,2	num. 10 med. 6,18 desv. 0,132 conf. 0,09 + / - 1,5%	num. 10 med. 49,37 desv. 4,660 conf. 3,33 + / - 6,8%
	2	6665	6	44		
	3	6665	6,3	49,1		
	4	6664	6,3	54,7		
	5	6664	6,1	45,2		
	6	6665	6,4	46,4		
	7	6662	6,2	45,7		
	8	6657	6,2	55,9		
	9	6630	6,1	53,7		
	10	6582	6	53,8		
65	1	6338	6	43	num. 10 med. 5,94 desv. 0,178 conf. 0,13 + / - 2,1%	num. 10 med. 47,22 desv. 4,703 conf. 3,36 + / - 7,1%
	2	6365	5,9	42,5		
	3	6199	6	44,8		
	4	6328	6,1	53,4		
	5	6222	5,9	43,9		
	6	6128	6,2	46,4		
	7	5924	6	42,6		
	8	5605	6	55		
	9	5096	5,7	49,2		
	10	4184	5,6	51,4		
80	1	975	4,2	25,9	num. 10 med. 3,54 desv. 0,401 conf. 0,29 + / - 8,1%	num. 10 med. 22,88 desv. 2,798 conf. 2,00 + / - 8,7%
	2	842	3,3	23,9		
	3	861	3,6	23,4		
	4	894	4,2	28,6		
	5	706	3,4	22,5		
	6	735	3,2	19,4		
	7	600	3	21,3		
	8	587	3,3	19,5		
	9	579	3,5	22		
	10	596	3,7	22,3		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$

num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;

conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

## Padrão Rz 40

Filtro cutoff = 2,5mm; Ra = 10µm; Rz = 41µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
2	1	6661	10	53,4	num. 10 med. 10,11 desv. 0,260 conf. 0,19 + / - 1,8%	num. 10 med. 79,13 desv. 23,498 conf. 16,81 + / - 21,2%
	2	6665	9,8	56,6		
	3	6665	9,9	59,3		
	4	6664	9,8	63,4		
	5	6665	10,2	74,3		
	6	6665	10,5	97		
	7	6665	9,9	79,7		
	8	6665	10,3	86,6		
	9	6665	10,3	90,6		
	10	6664	10,4	130,4		
10	1	6663	10	54,1	num. 10 med. 10,10 desv. 0,245 conf. 0,18 + / - 1,7%	num. 10 med. 78,89 desv. 23,040 conf. 16,48 + / - 20,9%
	2	6665	9,8	55,8		
	3	6664	9,9	60,3		
	4	6665	9,8	64,4		
	5	6664	10,2	75,3		
	6	6664	10,4	90,6		
	7	6665	9,9	78,4		
	8	6665	10,3	87,6		
	9	6664	10,3	91,7		
	10	6664	10,4	130,7		
25	1	6661	10	144,5	num. 10 med. 10,09 desv. 0,260 conf. 0,19 + / - 1,8%	num. 10 med. 85,33 desv. 26,858 conf. 19,21 + / - 22,5%
	2	6665	9,8	55,1		
	3	6665	9,9	58,5		
	4	6665	9,7	66,4		
	5	6665	10,2	73,9		
	6	6659	10,4	87,6		
	7	6665	9,9	77,4		
	8	6661	10,3	85,7		
	9	6663	10,3	91,2		
	10	6656	10,4	113		
50	1	6665	10	53,8	num. 10 med. 9,89 desv. 0,173 conf. 0,12 + / - 1,3%	num. 10 med. 64,59 desv. 6,881 conf. 4,92 + / - 7,6%
	2	6664	9,8	55,6		
	3	6657	9,9	58,9		
	4	6644	9,7	64,2		
	5	6633	10,2	70		
	6	6559	10,1	73,1		
	7	6555	9,7	70,8		
	8	6536	9,9	71,2		
	9	6365	9,9	66,6		
	10	6192	9,7	61,7		
65	1	6624	10	54,1	num. 10 med. 9,81 desv. 0,137 conf. 0,10 + / - 1,0%	num. 10 med. 56,90 desv. 2,626 conf. 1,88 + / - 3,3%
	2	6573	9,8	56,9		
	3	6493	9,9	57,7		
	4	6349	9,7	60,4		
	5	6310	10	55,2		
	6	6118	9,9	61,2		
	7	5987	9,6	56,8		
	8	5934	9,8	58,3		
	9	5639	9,7	52,9		
	10	5215	9,7	55,5		
80	1	4395	10,3	52	num. 10 med. 11,08 desv. 0,607 conf. 0,43 + / - 3,9%	num. 10 med. 54,53 desv. 3,821 conf. 2,73 + / - 5,0%
	2	3974	10,4	53,4		
	3	3746	10,7	54,8		
	4	3329	10,6	53,8		
	5	3583	11	55		
	6	3071	10,9	56,7		
	7	2742	11,4	53,4		
	8	2687	11,7	63,8		
	9	2396	11,9	49,1		
	10	2444	11,9	53,3		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$

num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;

conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

## Padrão Rz 80

Filtro cutoff = 2,5mm; Ra = 20µm; Rz = 78µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
2	1	6661	19,4	248,5	num. 10 med. 18,80 desv. 0,529 conf. 0,38 + / - 2,0%	num. 10 med. 135,57 desv. 73,605 conf. 52,65 + / - 38,8%
	2	6665	19,2	105,5		
	3	6665	19,2	297,7		
	4	6665	19,4	103,8		
	5	6665	18,6	99,3		
	6	6665	17,7	103,2		
	7	6665	18,5	112,2		
	8	6664	18,5	95,2		
	9	6665	18,6	95,2		
	10	6665	18,9	95,1		
10	1	6662	19,3	103,3	num. 10 med. 18,82 desv. 0,535 conf. 0,38 + / - 2,0%	num. 10 med. 120,86 desv. 62,068 conf. 44,40 + / - 36,7%
	2	6664	19,2	105,6		
	3	6656	19,4	297,1		
	4	6664	19,4	103,5		
	5	6665	18,7	99,7		
	6	6663	17,7	99,8		
	7	6665	18,5	109,2		
	8	6664	18,5	95		
	9	6665	18,6	97,5		
	10	6664	18,9	97,9		
25	1	6662	19,3	105,7	num. 10 med. 18,80 desv. 0,514 conf. 0,37 + / - 2,0%	num. 10 med. 102,53 desv. 6,638 conf. 4,75 + / - 4,6%
	2	6665	19,2	106,2		
	3	6644	19,2	114,3		
	4	6665	19,4	102,9		
	5	6665	18,7	99,9		
	6	6664	17,7	100,8		
	7	6665	18,5	110,2		
	8	6664	18,5	95,2		
	9	6664	18,6	95,2		
	10	6661	18,9	94,9		
50	1	6130	19,5	101,2	num. 10 med. 19,11 desv. 0,468 conf. 0,33 + / - 1,8%	num. 10 med. 95,29 desv. 5,986 conf. 4,28 + / - 4,5%
	2	6185	19,2	93,8		
	3	6260	19	96,7		
	4	6312	19,2	88,7		
	5	6264	18,6	92,3		
	6	6188	18,3	93,8		
	7	6061	18,8	109,5		
	8	5922	19,1	92,4		
	9	5783	19,5	92,2		
	10	5727	19,9	92,3		
65	1	3939	22	101,9	num. 10 med. 21,10 desv. 0,829 conf. 0,59 + / - 2,8%	num. 10 med. 94,05 desv. 3,180 conf. 2,27 + / - 2,4%
	2	3758	21,6	93,3		
	3	4101	20,5	94,6		
	4	4215	20,9	91,1		
	5	4007	20,8	91,5		
	6	3968	20,8	93,2		
	7	4075	19,4	95,6		
	8	3900	21	93,5		
	9	3620	21,9	91		
	10	3431	22,1	94,8		
80	1	1193	19,4	92,8	num. 10 med. 17,79 desv. 2,731 conf. 1,95 + / - 11,0%	num. 10 med. 83,52 desv. 6,318 conf. 4,52 + / - 5,4%
	2	922	19,5	89,3		
	3	799	15,9	77,8		
	4	891	19	79,4		
	5	743	11,9	73,2		
	6	900	18,3	89,6		
	7	928	21,6	87,7		
	8	928	16,8	82,6		
	9	928	19,5	84,5		
	10	964	16	78,3		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$

num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;

conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

## Padrão Rz 20

Filtro cutoff = 0,8mm; Ra = 5,4µm; Rz = 20µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
65	1	5190	6,5	50,8	num. 10 med. 6,48 desv. 1,050 conf. 0,75 + / - 11,6%	num. 10 med. 48,72 desv. 2,655 conf. 1,90 + / - 3,9%
	2	5074	7,2	48,6		
	3	4785	7,3	51,1		
	4	4574	7,6	50,1		
	5	4603	7,2	51,9		
	6	4173	6,9	49,6		
	7	3277	6,9	49,5		
	8	3044	5,7	44		
	9	3401	4,7	46,4		
	10	3489	4,8	45,2		
70	1	4305	6,2	47,3	num. 10 med. 6,31 desv. 1,066 conf. 0,76 + / - 12,1%	num. 10 med. 46,34 desv. 2,924 conf. 2,09 + / - 4,5%
	2	4139	7	48,6		
	3	3895	7,3	44,6		
	4	3628	7,4	49		
	5	3670	7	50		
	6	3072	6,8	48,5		
	7	2441	6,7	47,3		
	8	2423	5,6	42,9		
	9	2882	4,5	41,6		
	10	2959	4,6	43,6		
75	1	2029	5,4	38,4	num. 10 med. 5,35 desv. 0,871 conf. 0,62 + / - 11,6%	num. 10 med. 37,13 desv. 4,224 conf. 3,02 + / - 8,1%
	2	1830	6,2	43,5		
	3	1636	6,6	38		
	4	1544	6,4	41,4		
	5	1577	5,6	38,9		
	6	1180	5,2	39,3		
	7	1061	5	35,8		
	8	1199	4,8	31,6		
	9	1694	4	29,9		
	10	1922	4,3	34,5		
80	1	791	3,8	23,1	num. 10 med. 3,84 desv. 0,435 conf. 0,31 + / - 8,1%	num. 10 med. 24,21 desv. 1,921 conf. 1,37 + / - 5,7%
	2	819	4,4	24,5		
	3	589	3,8	24,5		
	4	719	4,7	26,3		
	5	760	4	25,6		
	6	587	3,3	23,3		
	7	583	3,7	24,9		
	8	669	3,4	21,2		
	9	1036	3,5	21,6		
	10	1086	3,8	27,1		
85	1	433	2,4	12,9	num. 10 med. 2,71 desv. 0,438 conf. 0,31 + / - 11,6%	num. 10 med. 15,70 desv. 1,881 conf. 1,35 + / - 8,6%
	2	382	2,7	15,5		
	3	288	2,4	12,1		
	4	413	3,7	16,9		
	5	444	2,4	18		
	6	356	2,2	16,4		
	7	373	2,7	15,5		
	8	447	2,6	16,4		
	9	660	2,9	15,8		
	10	801	3,1	17,5		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$   
 num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;  
 conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

## Padrão Rz 40

Filtro cutoff = 2,5mm; Ra = 10µm; Rz = 41µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
65	1	6046	10,3	57	num. 10 med. 10,42 desv. 0,561 conf. 0,40 + / - 3,9%	num. 10 med. 55,59 desv. 4,412 conf. 3,16 + / - 5,7%
	2	5970	10,1	62,6		
	3	5723	10,2	49,8		
	4	5765	9,9	52,4		
	5	5629	9,9	52,1		
	6	5341	9,9	52,8		
	7	4876	10,5	61,1		
	8	4707	10,7	51,6		
	9	4330	11,5	58,3		
	10	4252	11,2	58,2		
70	1	5728	10,3	54,9	num. 10 med. 10,60 desv. 0,688 conf. 0,49 + / - 4,6%	num. 10 med. 54,55 desv. 3,763 conf. 2,69 + / - 4,9%
	2	5643	10,1	63,1		
	3	5408	10,3	51,1		
	4	5411	10	53,6		
	5	5276	10	52,8		
	6	4925	10	52,1		
	7	4345	10,9	51,2		
	8	4218	11	52,1		
	9	3936	11,9	57,3		
	10	3884	11,5	57,3		
75	1	4744	10,3	88	num. 10 med. 11,04 desv. 0,825 conf. 0,59 + / - 5,3%	num. 10 med. 52,15 desv. 18,183 conf. 13,01 + / - 24,9%
	2	4642	10,2	57,8		
	3	4400	10,6	51		
	4	4260	10,5	52,6		
	5	4235	10,3	51,3		
	6	3844	10,7	50,2		
	7	3286	11,8	51,2		
	8	3291	11,7	50,8		
	9	3240	12,5	56,8		
	10	3185	11,8	11,8		
80	1	3118	10,8	51,7	num. 10 med. 11,85 desv. 0,709 conf. 0,51 + / - 4,3%	num. 10 med. 51,38 desv. 2,683 conf. 1,92 + / - 3,7%
	2	2969	11,1	55,5		
	3	2708	12,3	49,1		
	4	2730	11,4	54		
	5	2860	11,4	48,6		
	6	2576	12	49,3		
	7	2215	12,8	49,8		
	8	2408	11,9	50		
	9	2457	13	55,6		
	10	2552	11,8	50,2		
85	1	1717	11,3	49,7	num. 10 med. 11,65 desv. 0,674 conf. 0,48 + / - 4,1%	num. 10 med. 47,25 desv. 2,579 conf. 1,84 + / - 3,9%
	2	1476	11,2	49,5		
	3	1408	11,9	45,6		
	4	1493	10,9	51,4		
	5	1685	11,9	45,6		
	6	1576	12,3	44,8		
	7	1453	12,6	46,1		
	8	1577	10,8	43,5		
	9	1567	12,5	49,4		
	10	1560	11,1	46,9		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$   
 num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;  
 conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

## Padrão Rz 80

Filtro cutoff = 2,5mm; Ra = 20µm; Rz = 78µm.

Qualidade	N	Pontos	Ra	Rz	Estat. Ra *	Estat. Rz *
65	1	3907	21,1	92	num. 10 med. 21,52 desv. 0,410 conf. 0,29 + / - 1,4%	num. 10 med. 94,56 desv. 2,193 conf. 1,57 + / - 1,7%
	2	3641	21,4	94,8		
	3	3938	20,9	92,2		
	4	3666	21	93,2		
	5	3599	21,9	92,1		
	6	3535	21,7	95,5		
	7	3635	22,1	96,6		
	8	3525	21,8	98,6		
	9	3046	21,5	94,7		
	10	3659	21,8	95,9		
70	1	2647	22,6	92,3	num. 10 med. 22,54 desv. 0,771 conf. 0,55 + / - 2,4%	num. 10 med. 93,11 desv. 2,352 conf. 1,68 + / - 1,8%
	2	2400	23,2	95,7		
	3	2623	22,2	91,2		
	4	2364	22,6	91		
	5	2279	22,8	90,7		
	6	2488	23	96,6		
	7	2574	22,2	92,9		
	8	2623	23,1	95,7		
	9	2187	20,6	90,4		
	10	2803	23,1	94,6		
75	1	1543	22,4	93,1	num. 10 med. 22,24 desv. 1,550 conf. 1,11 + / - 5,0%	num. 10 med. 90,92 desv. 1,859 conf. 1,33 + / - 1,5%
	2	1251	22	91		
	3	1494	21,5	87,4		
	4	1415	23,6	91,4		
	5	1333	20,6	92,5		
	6	1636	24,1	92		
	7	1693	21,1	88,8		
	8	1670	24,4	91,7		
	9	1483	19,7	92,2		
	10	2184	23	89,1		
80	1	912	19,3	91,7	num. 10 med. 18,63 desv. 3,532 conf. 2,53 + / - 13,6%	num. 10 med. 86,19 desv. 7,382 conf. 5,28 + / - 6,1%
	2	702	12,4	88,1		
	3	849	17,6	78,5		
	4	822	19,9	87,8		
	5	852	13,6	70,1		
	6	1026	20,9	95,3		
	7	1013	18,5	82		
	8	1132	23,5	90,9		
	9	959	18	88,6		
	10	1507	22,6	88,9		
85	1	719	19,1	89,1	num. 10 med. 14,89 desv. 5,052 conf. 3,61 + / - 24,3%	num. 10 med. 77,11 desv. 11,320 conf. 8,10 + / - 10,5%
	2	536	5,8	53,4		
	3	596	12,1	75		
	4	556	13,8	77		
	5	672	9,9	63,7		
	6	758	15,6	82,6		
	7	711	13,5	73,6		
	8	878	22,3	85,6		
	9	703	15,8	87,3		
	10	992	21	83,8		

\* Estatísticas dos parâmetros Ra e Rz:  $Ra(z) = med.Ra(z) \pm conf.Ra(z)$   
 num.=número de amostras; med.=média da amostra; desv.=desvio padrão da amostra;  
 conf.=nível de confiança (calculado pela distribuição t de student com 95% de certeza).

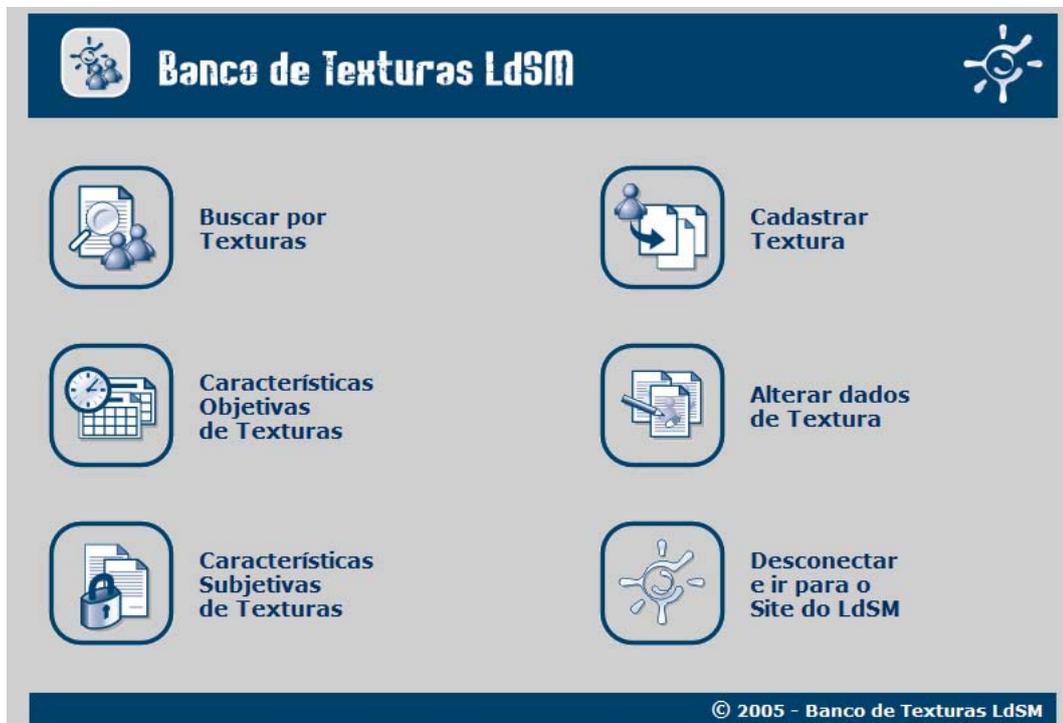
## APÊNDICE B

Imagens do banco de Texturas



A tela de login do sistema, intitulada "Banco de Texturas LdSM". No topo, há um cabeçalho azul escuro com um ícone de rede à esquerda e um ícone de engrenagem à direita. Abaixo, há dois campos de entrada: "usuário" e "senha", ambos com botões de seta para a direita. Na base da tela, há dois botões: "Entrar" e "Limpar".

Tela de *login* no sistema.



A página inicial do sistema, intitulada "Banco de Texturas LdSM". No topo, há um cabeçalho azul escuro com um ícone de rede à esquerda e um ícone de engrenagem à direita. Abaixo, há seis ícones em um grid de 3x2, cada um com um texto descritivo:

- Ícone de lupa e documentos: **Buscar por Texturas**
- Ícone de engrenagem e documento: **Cadastrar Textura**
- Ícone de relógio e calendário: **Características Objetivas de Texturas**
- Ícone de documento e lápis: **Alterar dados de Textura**
- Ícone de documento e cadeado: **Características Subjetivas de Texturas**
- Ícone de engrenagem: **Desconectar e ir para o Site do LdSM**

Na base da tela, há um rodapé azul escuro com o texto: © 2005 - Banco de Texturas LdSM

Página inicial do sistema.

**Cadastro de Textura**

Título	<input type="text"/>	<input type="checkbox"/> Variação: <input type="text"/> (número)
Tipo	Natural <input type="button" value="v"/>	
Nome Científico	<input type="text"/>	
Autor	<input type="text"/>	
Procedência	<input type="text"/>	
Largura (x em mm)	<input checked="" type="radio"/> Padrão (30mm) <input type="radio"/> Outro: <input type="text"/> (apenas números)	
Comprimento (y em mm)	<input checked="" type="radio"/> Padrão (48.54) <input type="radio"/> Outro: <input type="text"/> (ponto para casas decimais)	
Altura máxima (z em mm)	<input type="text"/> (apenas números, ponto para casas decimais)	
Origem	Parametrização 2D <input type="button" value="v"/>	
Foto visão geral	<input type="text"/>	<input type="button" value="Procurar..."/>
Foto detalhe(s)	<input type="text"/>	<input type="button" value="Procurar..."/>
Foto Digit./Param.	<input type="text"/>	<input type="button" value="Procurar..."/>
Foto Textura Frontal Final	<input type="text"/>	<input type="button" value="Procurar..."/>
Foto Textura 3D Final	<input type="text"/>	<input type="button" value="Procurar..."/>

Página de cadastro de texturas.

	Altura máxima (z)	<input type="text" value="0.7"/> (apenas números, ponto para casas decimais)
	Origem	Digitalização 3D <input type="button" value="v"/>
Detalhe(s)	Foto visão geral	<input type="text"/> <input type="button" value="Procurar..."/> OK
	Foto detalhe(s)	<input type="text"/> <input type="button" value="Procurar..."/>
	Foto Digit./Param.	<input type="text"/> <input type="button" value="Procurar..."/> OK
Digitalização	Foto Textura Frontal Final	<input type="text"/> <input type="button" value="Procurar..."/> OK
	Foto Textura 3D Final	<input type="text"/> <input type="button" value="Procurar..."/> OK
	Arquivo 2D (CDR)	<input type="text"/> <input type="button" value="Procurar..."/>
Imagem Frontal final	Arquivo 3D (STL)	<input type="text"/> <input type="button" value="Procurar..."/> OK
	Arquivo CAM (ART)	<input type="text"/> <input type="button" value="Procurar..."/> OK
	Observações	<input type="text"/>
Imagem 3D final	Status	<input checked="" type="radio"/> Disponível <input type="radio"/> Exclusiva
	Data de Criação	<input type="text" value="02/04/2004"/> (formato dd/mm/aaaa)

Página de alteração de dados de textura.

**Palha do milho**

Imagem Frontal final

Imagem 3D final

Edição das características objetivas da textura:

<b>Aspecto</b> <input type="radio"/> Tramada <input type="radio"/> Reticulada <input type="radio"/> Ramificada <input checked="" type="radio"/> Nervurada <input type="radio"/> Outras	<div style="border: 1px solid gray; padding: 5px;"> <p>Informações sobre a característica - Windows Internet Explorer</p> <p><b>Característica: Nervurada</b></p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="margin-left: 10px;"> <p>Que contém saliência corrida, de pouca projeção, em qualquer superfície sólida; com nervos.</p> </div> </div> </div>
<b>Compositivas</b> <input type="radio"/> Sem repetição <input checked="" type="radio"/> Com repetição	<b>Disposição</b> <input checked="" type="radio"/> Justaposta <input type="radio"/> Sobreposta

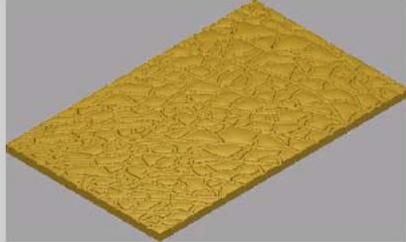
Página de características da textura.



## Busca por Texturas



### Resultado da busca



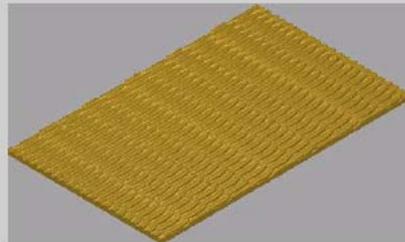
[Orquidea seca](#)



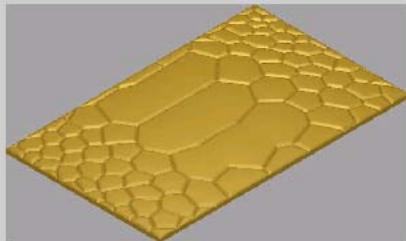
[Palha da palmeira](#)



[Palha do milho](#)



[Palmeira](#)



[Pata de avestruz](#)



[Piava](#)

Busca de texturas por imagens.

128 - <a href="#">Rosa clara</a>
129 - <a href="#">Rotavirus</a>
130 - <a href="#">Semente Myrtaceae</a>
131 - <a href="#">Solado losango</a>
132 - <a href="#">Solado ondas</a>
133 - <a href="#">Solado ponto cruz</a>
134 - <a href="#">Solado tela</a>
135 - <a href="#">Tatu bola</a>
136 - <a href="#">Telhas</a>
137 - <a href="#">Terra seca</a>
138 - <a href="#">Trama</a>
139 - <a href="#">Trama de tecido 1</a>
140 - <a href="#">Trama de tecido 2</a>
141 - <a href="#">Tubarao martelo</a>

Figuras    Principal

Busca de texturas por lista.