

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida
Estudos de Casos

Autor: **Cristiane Brasil Lima**

Orientador: **Geraldo Nonato Telles**

02/2003

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida Estudos de Casos

Autor: **Cristiane Brasil Lima**

Orientador: **Geraldo Nonato Telles**

Curso: Engenharia Mecânica

Área de Concentração: Materiais e Processos de Fabricação

Dissertação de mestrado apresentada à comissão de Pós Graduação da Faculdade de Engenharia Mecânica, como requisito para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

Campinas, 2003

S.P. – Brasil

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida Estudos de Casos

Autor: Cristiane Brasil Lima

Orientador: Geraldo Nonato Telles

Prof. Dr. Geraldo Nonato Telles

Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

Prof. Dr. Anselmo Eduardo Diniz

Faculdade de Engenharia Mecânica – UNICAMP

Prof. Dr. Reginaldo Teixeira Coelho

Escola de Engenharia de São Carlos – USP São Carlos

Campinas, 20 de outubro de 2003

Dedicatória:

Aos meus pais, José e Zulmira, como um fruto da educação que me deram.

Agradecimentos:

Este trabalho não poderia existir sem a ajuda e o incentivo de pessoas muito especiais, as quais deixo aqui meu sincero agradecimento:

Ao Prof. Dr. Geraldo Nonato Telles, meu orientador e amigo, pela sua dedicação, orientação e compreensão em permitir que eu conciliasse as motivações profissionais da minha vida: o estudo e o trabalho.

À minha família, José, Zulmira e Kátia, pelo amor e dedicação. Sem eles, não saberia o que é a felicidade e o valor que a educação tem para construir um futuro melhor.

Ao meu marido Flavio Ulbrich, que hoje é minha família, por sempre acreditar que eu seria capaz de conquistar os meus sonhos.

Ao amigo Fernando, pelo companheirismo e dedicação em todos os momentos difíceis.

À nossa equipe de trabalho: Renato, Francisco, José Carlos, Heloi, Thiago, Wilson, Leandro, Saulo e Stéfano. Sem eles, jamais teria o conhecimento necessário para esta dissertação.

À SEACAM, representada pelos amigos Agnaldo, Cláudio e Alexandre que me auxiliaram no meu desenvolvimento pessoal e profissional, disponibilizando tecnologia e tempo para a realização de meus estudos.

A Deus, por me oferecer a oportunidade e a capacidade de realizar este trabalho.

“Se você quer ser bem sucedido na vida, precisa ter dedicação total, buscar seu último limite e dar o melhor de si.”

Ayrton Senna

Resumo

LIMA, Cristiane Brasil, *Engenharia Reversa – Estudo de Casos*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado)

A Engenharia Reversa consiste em produzir novas peças, produtos ou ferramentas a partir de modelos ou componentes existentes. Sua principal aplicação está relacionada à atividade industrial. A busca pelo aumento da competitividade gera a necessidade cada vez maior de se reduzir tempos e custos, sem comprometer a qualidade do produto. Neste contexto, a Engenharia Reversa entra como uma das tecnologias que possibilitam tornar os sistemas produtivos mais ágeis e flexíveis. Duas aplicações destacam-se no meio produtivo: a duplicação de moldes existentes e a criação de novos produtos. Mas, além da área industrial, outras áreas bem distintas como a arte, a educação e a medicina buscam na Engenharia Reversa soluções para antigos problemas. A combinação de tecnologias como CAE e prototipagem rápida é a principal responsável por este intercâmbio de áreas. O estudo de elementos finitos em modelos digitalizados permite a análise de implantes dentários e próteses. No planejamento cirúrgico, a Engenharia Reversa possibilita a captura de geometrias do corpo humano através da tomografia computadorizada e sua forma pode ser restabelecida através da prototipagem rápida. O objetivo deste estudo é descrever as principais aplicações da Engenharia Reversa através de três estudos de caso: duplicação de moldes existentes, criação de produto (estilo de automóvel) e protótipos para planejamento cirúrgico.

Palavras Chave

- Engenharia Reversa, duplicação de moldes, criação de produto, prototipagem rápida, protótipos para planejamento cirúrgico

Abastract

LIMA, Cristiane Brasil, *Reverse Engineering – Cases*, Campinas: Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, 2003. 98 p. Dissertação (Mestrado)

Reverse Engineering is defined as the production of new parts, products or tooling from existing physical models or components. The main application is in the industrial area. Companies are looking for competitiveness, which generates a great necessity that consists in reduce time and costs, without loosing quality. In this context, Reverse Engineering is mentioned as a technology that make productive sectors more efficient and flexible. Two applications have singular importance to industry: creation of new products and duplication of existing moulds. But, not just the industrial area use Reverse Engineering. Art, Education and Medicine try to solve old problems using new technologies as Reverse Engineering. Combining technologies as CAE and Rapid Prototyping is the main responsible for this interchange of areas. Analyses of Finite Elements can be doing by scanning models as teethes implants and proteases. Surgical planning requires Reverse Engineering to know how is the internal body geometry. This process captures the geometry using Computer Tomograph and makes a physical model using Rapid Prototyping. The main goal of this work is concerning in Reverse Engineering applications describing it in three cases: duplication of existing moulds, creation of new products (automotive design) and Rapid Prototyping to surgical planning.

Key Words

- Reverse Engineering, Mould Duplications, New Products, Rapid Prototyping, Prototyping for Surgical planning

Lista de Figuras

2.1	Manufatura convencional e Engenharia Reversa, adaptado de Puntambekar (1994)	08
2.2	O ciclo de trabalho da Engenharia Reversa (Chen Don Fan, 1996)	08
2.3	Etapas da Engenharia Reversa	10
2.4	Aplicações da Engenharia Reversa à indústria	13
2.5	O processo metodológico da Engenharia Reversa aplicada à indústria (Ming Lun, 1997)	14
2.6	Engenharia Reversa aplicada à educação	15
2.7	Modelo virtual auxiliando o planejamento cirúrgico (Oleskowicz/Potel, 2001)	16
2.8	Exemplo de implante criado através da Engenharia Reversa	16
2.9	Exemplo de tomografia computadorizada	17
2.10	Engenharia Reversa aplicada à odontologia	19
2.11	<i>Scanner</i> portátil e Mapeamento da geometria (Cynovad, 2003)	19
2.12	Escultura que representa as tecnologias rápidas como Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida na virada do milênio – Birmingham, Inglaterra (Lawrie, 2001)	20
2.13	Engenharia Reversa aplicada à arte – Davi de Micheangelo com 7 metros de altura (Levoy, 2000)	22
3.1	Exemplos de digitalização	25
3.2	Princípio de operação – <i>Time-of-flight</i> (Boehler, 1999)	26
3.3	Princípio de operação – Triangulação com uma câmera (Boehler, 1999)	27

3.4	Princípio de operação de uma digitalização por faixa de <i>laser</i> (3D Scanners, 2001)	27
3.5	Projeção de padrões por franjas (GOM, 2003)	28
3.6	Princípio de operação – Triangulação com duas câmeras (Boehler, 2001)	28
5.1	Estereolitografia – Diagrama esquemático (Rapid Prototyping Primer, 2003)	39
5.2	LOM – Diagrama esquemático (MSOE, 2003)	40
5.3	SLS – Diagrama esquemático (MSOE, 2003)	41
5.4	FDM – Diagrama esquemático (Manufacturing Engineering Centre,2003)	42
5.5	SGC– Diagrama esquemático (Rapid Prototyping Primer, 2003)	43
5.6	Impressora 3D – Diagrama esquemático (Rapid Prototyping Primer, 2003)	44
5.7	Impressora 3D – Diagrama esquemático (Tecad, 2003)	45
5.8	LENS – Diagrama esquemático (Prometal, 2003)	46
6.1	Model Maker – Equipamento utilizado no estudo de caso	48
6.2	Superfície de revolução	50
6.3	Superfície de extrusão	50
6.4	Superfície de espinha	51
6.5	Superfície de migração	51
6.6	Superfície de malha ou rede	51
6.7	Exemplo ilustrativo de regiões digitalizadas de um molde de estampo para porta de automóvel	55
6.8	Cuidados com a digitalização	56
6.9	Regiões a serem digitalizadas	58
6.10	Preenchimento de “ <i>gaps</i> ”	61
6.11	Suavização de regiões irregulares	61
6.12	Redução da densidade da malha	61
6.13	Montagem de digitalização: 3 pontos são usados como referencias para posicionar a digitalização.	62
6.14	Arquivo de saída da digitalização: Malha triangular (STL) ou cortes (IGES ou DXF)	62
6.15	Reconstrução de superfícies por cortes (migração)	64
6.16	Gráfico de cores: Variação dimensional entre digitalização e modelo CAD 3D	64

6.17	Correção dimensional: Arraste da intersecção para o cruzamento dos cortes	65
6.18	Reconstrução de superfícies por malhas aleatórias	66
6.19	Exemplo de molde com baixa qualidade de superfície (superfícies amassadas)	68
6.20	Exemplo de criação de modelo automotivo	69
6.21	Análise de curvatura por pintura de listas	71
6.22	Análise de curvatura por pintura de variação de cores	71
6.23	Análise de curvatura por pintura metálica	72
6.24	Análise de curvatura por pintura de projeção de imagem (Nuvens do Céu)	72
6.25	Exemplo de tomografia computadorizada e protótipo (3D-Doctor, 2003)	75
6.26	Arquivo STL e protótipos confeccionados em impressora 3D	75
6.27	Seqüência do processo de Planejamento Cirúrgico com o auxílio da Tomografia Computadorizada e a Prototipagem Rápida (Bioparts, 2003)	77
6.28	Seqüência do procedimento cirúrgico com o auxílio da Tomografia Computadorizada e a Prototipagem Rápida (Bioparts, 2003)	78

Nomenclatura

ABS	Acrilonitrila-butadieno-estireno (Terpolímero)
CAD	Computer Aided Design (Computador auxiliando o desenho)
CAE	Computer Aided Engineering (Computador auxiliando a engenharia)
CAM	Computer Aided Manufacture (Computador auxiliando a manufatura)
CCD	Charge Coupled Device (Dispositivo de carga acoplada)
CMM	Coordinate Measuring Machine (Máquina de medição por coordenadas)
CT	Computer Tomography (Tomografia Computadorizada)
DXF	Data eXchange File
FDM	Fused Deposition Modeling (Modelagem por deposição de material fundido)
FEA	Finite Element Analysis (Análise de Elementos Finitos)
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LENS	Laser Engineered Net Shaping (Conformação próxima ao formato final via <i>laser</i>)
LOM	Laminated Object Manufacturing (Manufatura de objetos em lâminas)
MRI	Magnetic Resonance Imaging (Ressonância Magnética)
NC	Numeric Control (Controle numérico)
SGC	Solid Ground Curing (Cura sólida na base)
SLA	Stereolithography Apparatus (Estereolitografia)
SLS	Selective Laser Sintering (Sinterização seletiva a <i>laser</i>)
STL	Standard Template Library ou STereoLithography (Tipo de Formato de arquivo)
VDA	Verband der Deutschen Automobilindustrie-FlächenSchnittstelle

Índice

Capítulo 1	01
Introdução	01
1.1 Panorama da economia mundial e brasileira	01
1.2 Motivação do trabalho	02
1.3 Objetivos da pesquisa	04
1.4 Estrutura deste trabalho	05
Capítulo 2	07
Engenharia Reversa: Conceitos e aplicações	07
2.1 Conceito de Engenharia Reversa	07
2.2 Etapas da Engenharia Reversa	09
2.3 Aplicações da Engenharia Reversa	11
2.3.1 Engenharia Reversa aplicada à indústria	11
2.3.2 Engenharia Reversa aplicada à medicina	15
2.3.2.1 Educação: Reprodução de modelos	15
2.3.2.2 Planejamento cirúrgico	15
2.3.2.3 Digitalização de implantes	17
2.3.2.4 Análise de elementos finitos em implantes dentários	17
2.3.3 Engenharia Reversa aplicada à arte	20
2.3.3.1 Criação de novas obras de arte	20
2.3.3.2 Preservação de patrimônio e artefatos históricos	21
Capítulo 3	23
O processo de digitalização	23

3.1	Conceito de digitalização	23
3.1.1	Métodos de digitalização	24
3.2	Tipo de equipamentos de digitalização	25
3.2.1	Time-of-Flight	26
3.2.2	Digitalização por faixa de <i>laser</i> (Triangulação)	26
3.2.3	Fotogrametria ou <i>Area Based Systems</i> ou triangulação com duas câmeras.....	27
3.3	Etapas da digitalização	29
3.4	Tratamento dos dados digitalizados	30
3.5	Problemas operacionais na digitalização de modelos	30
Capítulo 4		33
O processo de criação do modelo CAD		33
4.1	Conceito do sistema CAD	33
4.2	Fases do modelo CAD na Engenharia Reversa	34
4.3	Técnicas de reconstrução para um modelo CAD	35
4.3.1	Criação de modelo CAD por rede de pontos	36
Capítulo 5		37
Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida		37
5.1	Conceito de Prototipagem Rápida	37
5.2	A Prototipagem Rápida e a Engenharia Reversa	38
5.3	Tipos de Prototipagem Rápida	38
5.3.1	Estereolitografia (SLA)	39
5.3.2	Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)	40
5.3.3	Sinterização Seletiva a Laser (SLS)	41
5.3.4	Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)	42
5.3.5	Cura Sólida na Base (SGC)	43
5.3.6	Impressão 3D	44
5.3.7	Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS)	46
Capítulo 6		47
Estudo de Casos		47
6.1	Metodologia aplicada	47

6.2	Recursos utilizados	48
6.2.1	Equipamento de digitalização utilizado	48
6.2.2	Software de modelo CAD 3D utilizado	49
6.3	Modelo Proposto para a reconstrução do modelo CAD	49
6.3.1	Definição dos padrões	49
6.3.2	Extrair informações dimensionais da digitalização	52
6.3.3	Integrar as superfícies entre si	52
6.3.4	Comparar as superfícies com a referência	52
6.3.5	Corrigir erros dimensionais das superfícies	53
6.3.6	Corrigir superfícies amassadas	53
6.4	Estudo de Caso I: Duplicação de modelo existente – Moldes	54
6.4.1	Digitalização do modelo	55
6.4.1.1	Cuidados e condições de trabalho	55
6.4.1.2	Regiões a serem digitalizadas	57
6.4.1.3	Fixação do molde e do equipamento	58
6.4.1.4	Captura de dados	58
6.4.1.5	Tratamento de dados	59
6.4.1.6	Exportar dados: cortes ou malha triangular	60
6.4.2	Criação do Modelo CAD 3D	63
6.4.2.1	Reconstrução do modelo CAD 3D por cortes	63
6.4.2.2	Correção dimensional	65
6.4.2.3	Correção da qualidade da superfície	67
6.5	Estudo de Caso II: Criação de Produto – Estilo de Automóvel	69
6.5.1	Digitalização a <i>laser</i>	69
6.5.2	Criação do modelo CAD 3D – Superfície Classe A	70
6.5.3	Ferramentas de Análise da superfície	70
6.6	Estudo de Caso III: Protótipos para planejamento cirúrgico	73
6.6.1	Etapas do planejamento cirúrgico	73
6.6.2	Desenvolvimento do estudo de caso	74
6.6.3	Outras informações sobre o estudo de caso	76
	Capítulo 7	79

Conclusões	79
7.1 Conclusões finais	79
7.2 Sugestões para trabalhos futuros	82
Referências Bibliográficas	84
Bibliografia Complementar	91

Capítulo 1

Introdução

1.1 – Panorama da economia mundial e brasileira

A economia mundial sofreu grandes transformações nos últimos anos. Entre elas a tendência mais notória e extremamente necessária para manter a permanência da empresa no mercado é a competitividade. A abertura de mercados e a concorrência acirrada são algumas destas transformações que promoveram nas empresas a necessidade da competitividade, tendo como objetivo uma permanência duradoura no mercado.

O Brasil, no seu papel de país em desenvolvimento, também tem experimentado estas profundas transformações nas organizações, principalmente o setor produtivo. Pode-se destacar a abertura de mercado ocorrida há alguns anos, em que empresas que sempre estiveram protegidas pela política brasileira encontraram concorrentes globais essencialmente enxutos e competitivos.

Dentro deste panorama atual, em que a competitividade é de fundamental importância para as organizações, a Engenharia Reversa encontra seu espaço como uma das tecnologias que possibilitam tornar os sistemas produtivos mais ágeis e flexíveis. Além da indústria, a Engenharia Reversa também beneficia outras áreas como a educação, a arte e a medicina, aliada a outras técnicas como a Tomografia Computadorizada e a Prototipagem Rápida.

1.2 – Motivação do trabalho

A crescente busca pela competitividade visando uma permanência duradoura das empresas no mercado, resulta em produtos e serviços oferecidos com custos e prazos decrescentes e qualidade assegurada.

As pessoas satisfazem necessidades e desejos com produtos. A demanda é o desejo por produtos específicos apoiados por uma possibilidade de se pagar por eles. O mercado exige produtos cada vez mais personalizados e com ciclos de vida menores.

Para que as organizações possam ser competitivas e continuar sobrevivendo no mercado atual é necessário responder aos diversos tipos de pressões ou influências externas, como a absorção de novas tecnologias, a concorrência, a influência do mercado de trabalho, os anseios da sociedade e principalmente do consumidor.

Quando as organizações optam por oferecer novos produtos ao mercado, o enfoque tecnológico primordial está em reduzir tempos e custos da etapa de desenvolvimento. A Engenharia Reversa é uma tecnologia que permite criar produtos em prazos reduzidos, com ganhos de qualidade e custo. Seu conceito consiste em criar modelos virtuais a partir de um modelo existente.

Após o seu desenvolvimento, o produto é lançado no mercado. Inicia-se, então, o ciclo de vida do produto representado por quatro fases: introdução, crescimento, maturidade e declínio.

A **introdução** é um período de baixo crescimento em vendas, uma vez que o produto está sendo introduzido no mercado. O **crescimento** é o período de rápida aceitação do mercado e melhoria substancial dos lucros. A **maturidade** é a fase de baixa no crescimento de vendas, porque o produto já conquistou a aceitação da maioria dos compradores potenciais. Esta fase é caracterizada por lucros estáveis ou em declínio devido à competição acirrada. O último período é o **declínio**, no qual as vendas mostram uma queda vertiginosa e os lucros desaparecem.

Portanto, os períodos que agregam maiores lucros para as organizações são: crescimento e maturidade. Quando o produto atinge estes períodos, as empresas devem estar preparadas tecnologicamente para garantir que a produção seja ágil, eficiente e flexível em função das oscilações do mercado.

Para prolongar o ciclo de vida de produtos com boa aceitação, pode-se acrescentar modificações nos produtos, com o objetivo de alcançar novos mercados. Muitas vezes, alguns produtos superam a expectativa esperada de seu ciclo de vida. Então, o planejamento de manufatura destes produtos tem o seu limite ultrapassado, fazendo com que o aumento da produção seja inevitável. Neste caso, ferramentas como moldes e matrizes precisam ser duplicadas, para que possam continuar atendendo a demanda gerada pelo mercado. Nem sempre a documentação destes moldes está atualizada, devido a possíveis alterações e ajustes manuais. Nestes casos, a Engenharia Reversa é um recurso importante para obtenção destes moldes, assim como na reposição de ferramentas que quebram e precisam de reparos para voltar à produção.

Na medicina, o conceito de reproduzir um modelo virtual com base em um existente, tem outra finalidade: o planejamento cirúrgico e a confecção de próteses e implantes. Ao contrário da indústria que usa a Engenharia Reversa para produzir inúmeros exemplares de um produto, a medicina muitas vezes necessita de apenas um exemplar. A equipe médica precisa gerar o modelo virtual para depois confeccionar um protótipo. Com este modelo em mãos é possível analisar a anomalia de cada indivíduo. Para tanto duas outras tecnologias são necessárias: a Tomografia Computadorizada (para obter o modelo virtual) e a Prototipagem Rápida (para construir o protótipo).

Ainda que com pouquíssimas aplicações no Brasil, a arte também se beneficia da Engenharia Reversa. Países europeus utilizam esta tecnologia para transformar obras de artistas renomeados em modelos virtuais. Um modelo virtual pode ser facilmente transportado ou reproduzido, com o objetivo de divulgar estes patrimônios históricos para a humanidade.

A educação tem sua aplicação em decorrência dos itens anteriores: através do modelo virtual é possível estudar uma anomalia física ou conhecer a história dos dinossauros, por exemplo, sem a necessidade do modelo físico original.

1.3 – Objetivos da Pesquisa

É considerado como finalidade desta pesquisa, o entendimento da Engenharia Reversa como tecnologia que possibilita o alcance da competitividade pelas organizações, seja no ramo da indústria, medicina ou arte. Para alcançar este objetivo procura-se:

- Compreender os principais aspectos referentes à Engenharia Reversa: conceitos, etapas do processo e principais aplicações, através de um levantamento do estado da arte desta tecnologia.
- Compreender o que se entende por *Digitalização*, os tipos de processos existentes, a aplicação de cada um e as diversas necessidades do mercado.
- Compreender o que se entende por *Criação do modelo CAD 3D*, identificando a necessidade de reconstrução de superfícies de um modelo existente.
- Compreender a correlação entre as tecnologias de Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida, assim como suas aplicações.
- Exemplificar as definições aqui apresentadas através de três estudos de caso: Criação de produto, duplicação de moldes e criação de protótipos para planejamento cirúrgico.
- Com o estudo de caso de duplicação de moldes, procura-se apresentar uma metodologia para reconstrução de superfícies de forma lógica e clara, com o objetivo de minimizar erros dimensionais e aumentar a qualidade das superfícies.
- Com o estudo de caso de criação de produto, busca-se descrever quais ferramentas são necessárias para criar um modelo de qualidade na criação de um novo automóvel.
- Com o estudo de caso de protótipos para planejamento cirúrgico, procura-se mostrar quais são as etapas para a confecção de um protótipo a partir de Tomografia Computadorizada.

1.4 – Estrutura deste trabalho

Este trabalho está dividido em sete capítulos, sendo o primeiro de caráter introdutório.

O segundo capítulo tem como título *Engenharia Reversa: Conceitos e aplicações*, e seu propósito é apresentar os diversos desenvolvimentos referentes ao que se entende por Engenharia Reversa, as etapas do processo e as aplicações da Engenharia Reversa na indústria, arte e medicina.

O terceiro capítulo tem como título *O processo de digitalização*, que é a primeira etapa da Engenharia Reversa. Neste capítulo busca-se identificar os diversos processos de digitalização existentes no mercado, seus princípios de funcionamento e suas aplicações específicas.

O quarto capítulo apresenta o título de *O processo de criação do modelo CAD*, e busca conceituar a segunda etapa da Engenharia Reversa, explorando primordialmente as técnicas de reconstrução do modelo CAD 3D.

O quinto capítulo intitulado como *Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida* apresenta as aplicações de duas tecnologias correlatas, assim como os tipos de prototipagem rápida existentes.

O sexto capítulo, *Estudo de Casos*, apresenta uma metodologia proposta para a reconstrução de modelo CAD 3D, seguido por três estudos de caso. Os modelos estudados são baseados em aplicações reais da Engenharia Reversa na indústria e na medicina.

O sétimo capítulo apresenta comentários adicionais e considerações finais sobre o estudo realizado, assim como sugestões para trabalhos futuros. No fim tem-se, as referências bibliográficas utilizadas nesta dissertação.

Capítulo 2

Engenharia Reversa: Conceitos e aplicações

2.1 – Conceito de Engenharia Reversa

A Engenharia Reversa é uma tecnologia que envolve uma vasta gama de atividades apresentando vários conceitos multidisciplinares que se complementam. Apresenta-se a seguir algumas definições assumidas por autores consagrados:

Varady (1997) – “Enquanto a engenharia convencional transforma conceitos e modelos em peças reais, a Engenharia Reversa transforma em engenharia modelos e conceitos.”

Dickin (1996) – “A Engenharia Reversa consiste em produzir novas peças, produtos ou ferramentas a partir de modelos ou componentes existentes.”

Daschbach (1995) – “A Engenharia Reversa é o processo de levantar dimensões, com rapidez e exatidão, determinar padrões geométricos tais como áreas e volumes além de definir as tolerâncias de um modelo existente.”

Puntambekar (1994) – “Apesar do processo de Engenharia Reversa (que começa com um modelo físico e termina com um modelo CAD) aparentar ser o oposto do processo de manufatura convencional (que começa com um modelo CAD e produz uma peça física) na verdade os conceitos globais são muito similares (Figura 2.1). A principal diferença é que o protótipo

existente na Engenharia Reversa incorpora a especificação do produto em manufatura convencional.

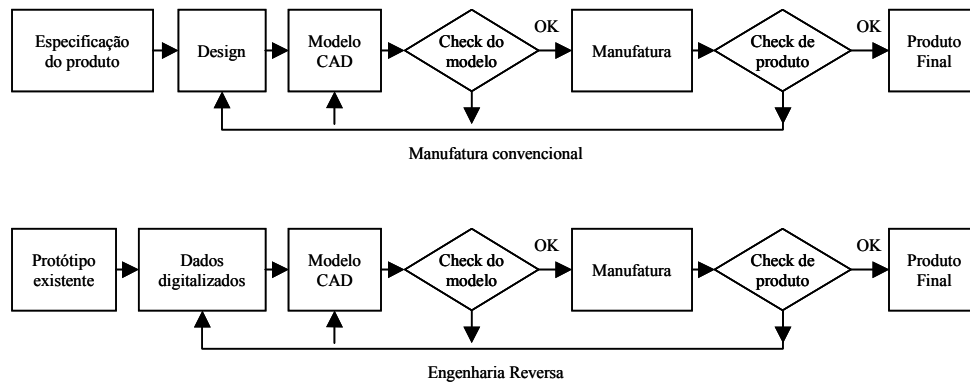


Figura 2.1 – Manufatura convencional e Engenharia Reversa, adaptado de Puntambekar (1994)

Dong-Fan (1996) – “O ciclo completo da Engenharia Reversa até o produto final é composto por cinco estágios: a medição tridimensional, a reconstrução da superfície, a usinagem dos pontos digitalizados, a checagem da qualidade da geometria e a interface para protótipo (Figura 2.2).”

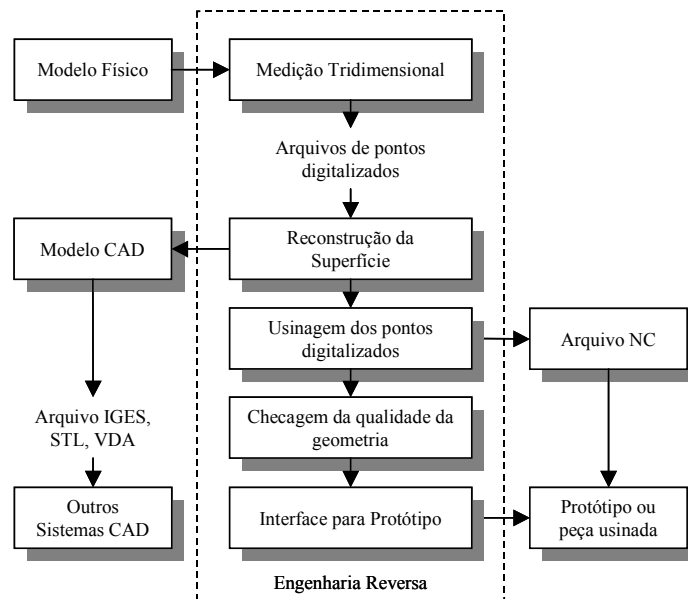


Figura 2.2 – O ciclo de trabalho da Engenharia Reversa (Chen Dong Fan, 1996)

Observa-se que o processo de Engenharia Reversa caracteriza-se pela reprodução de um modelo físico, para que este possa transformar-se em um modelo digital. No processo

convencional de engenharia, cria-se primeiramente o modelo virtual, para que se possa então, confeccionar produtos correspondentes ao modelo físico.

Na Engenharia Reversa, porém, como o próprio nome diz, o processo ocorre de trás para frente, ou seja, o modelo físico já existe e necessita-se do modelo virtual para que as etapas da engenharia possam ser formuladas e pode ser utilizado em diversas aplicações que serão abordadas adiante.

2.2 – Etapas da Engenharia Reversa

O processo de Engenharia Reversa pode ser dividido em duas etapas: a digitalização do produto e a criação do modelo CAD a partir dos dados digitalizados (**Puntambekar**, 1994):

1. *Digitalização do produto:* invariavelmente este é o primeiro passo do processo e existe uma enorme variedade de equipamentos dimensionais para este fim. As duas principais funcionalidades exigidas de um equipamento de digitalização são: evitar estragos no protótipo e velocidade de trabalho. Na digitalização obtém-se uma nuvem de pontos sendo que a distância entre eles é muito importante para obter uma captação satisfatória da superfície, especialmente em regiões onde há uma rápida mudança de curvatura.
2. *Criação do modelo CAD a partir dos dados digitalizados:* este é o passo crucial no processo de Engenharia Reversa, já que os dados são apresentados como um oceano de pontos no espaço. A geometria deve ser assentada sobre estes pontos, sendo uma etapa essencialmente manual, cuja interação e descrição é determinada pelo usuário. Muitos autores não acreditam que o sistema seja capaz de fazer todo o processo automaticamente sem nenhuma intervenção manual para objetos de complexidade razoável.

Alguns autores consideram a existência de uma fase intermediária entre a digitalização e o modelo CAD (Figura 2.3). Esta fase compreenderia a interpretação dos dados da digitalização para posterior alimentação do modelo CAD. Pode-se extrair esta informação através de cortes e

medições feitas diretamente sobre a malha triangular ou nuvem de pontos. Veja abaixo as definições segundo autores que consideram esta etapa intermediária:

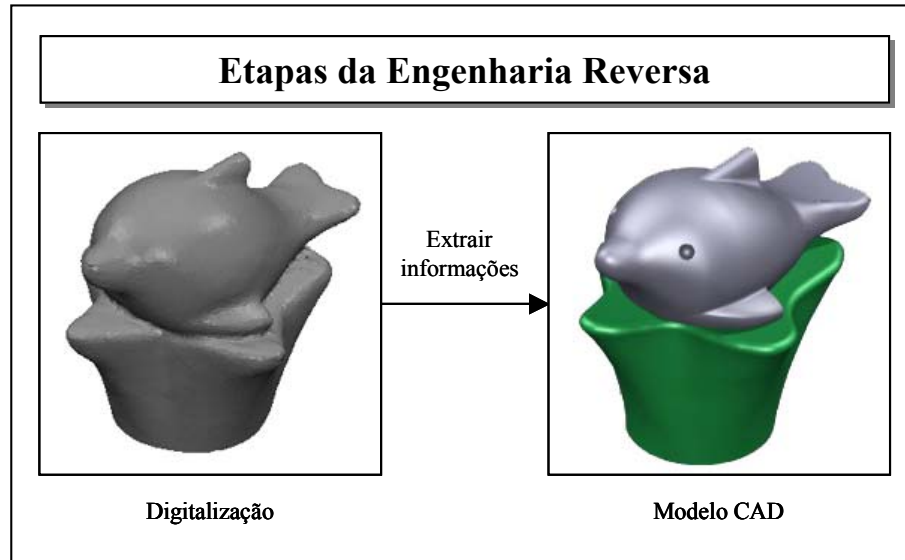


Figura 2.3 – Etapas da Engenharia Reversa

Dong-Fan (1996) – “A Engenharia Reversa é composta por 3 etapas: digitalização da peça, extração das entidades e criação do modelo CAD a partir destas informações. Com a técnica de reconstrução da Engenharia Reversa, superfícies são criadas diretamente sobre um arquivo de pontos, mesmo que ele possua milhares de pontos.”

Tai (2000) – “O processo de Engenharia Reversa pode ser subdividido em três estágios: captura de dados, segmentação dos dados e criação do modelo CAD ou atualização dos dados. Um modelo físico ou protótipo é primeiramente medido por uma máquina CMM ou um *laser*¹ *scanner* (equipamento de digitalização) para assegurar a informação da geometria na forma de pontos tridimensionais. Cada região representa uma característica individual que pode ser matematicamente representada por uma superfície individual no caso da reconstrução do modelo. O modelo CAD reconstrói a superfície de uma região individual e combina estas superfícies em um modelo completo que representa a peça ou protótipo digitalizado.”

¹ *Laser* – Original da sigla em inglês LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) que significa luz amplificada por emissão estimulada de radiação.

2.3 – Aplicações da Engenharia Reversa

Transformar um modelo físico em modelo virtual é uma capacidade muito interessante para diversas aplicações. Para **Christensen** (2000) várias áreas vêm utilizando a Engenharia Reversa em suas aplicações, a saber:

Na **Indústria**, permitindo diminuir significativamente o ciclo de projeto e manufatura do produto que inclui desde a concepção até a manufatura, tornando a empresa mais competitiva, com baixos custos e alta qualidade.

Na **Medicina**, o conceito de Engenharia Reversa tem sido utilizado no planejamento cirúrgico, na criação de próteses e até mesmo em salas de aula, auxiliando o estudo da anatomia.

Os profissionais ligados à **Arte**, também lançaram mão desta tecnologia para a criação de novos trabalhos e principalmente, para a preservação do patrimônio histórico da humanidade. Com um modelo virtual da obra e muita criatividade, pessoas criam museus virtuais e até mesmo réplicas do modelo, difundindo a história da arte, ao mesmo tempo em que preservam os modelos originais intactos e sem ocupar nenhum espaço físico.

A seguir são relatados alguns exemplos de trabalhos realizados com a tecnologia da Engenharia Reversa e suas respectivas ilustrações.

2.3.1 – Engenharia Reversa aplicada à indústria

Sem dúvida, a maior aplicação da Engenharia Reversa está voltada ao mercado industrial. Devido à alta competitividade, as empresas precisam manter os custos baixos e aumentar a qualidade dos produtos e por isso utilizam a Engenharia Reversa. Com ela, pode-se encurtar o ciclo do produto que vai do *design* até a manufatura. Suas aplicações na indústria estão relacionadas com a criação de novos produtos, cópia de modelos existentes, correção e melhoria de modelos, inspeção e documentação de produtos. **Puntambekar** (1994) e **Yuan** (2001) descrevem com maiores detalhes cada uma delas (Figura 2.4):

1. *Criação de um novo produto.* Ocorre quando a criação de um modelo inicia-se a partir de um objeto existente. Na indústria, é comum *designers* criarem modelos físicos baseados em funcionalidades e necessidades que precisam ser implementadas. Criando, então algumas partes complexas, pode-se construir um modelo CAD através do método da Engenharia Reversa.
2. *Cópia de um modelo existente.* Em alguns casos, não existem desenhos ou quaisquer informações sobre um modelo. Por exemplo, na indústria automobilística, alguns modelos de carros tiveram seus ferramentais construídos artesanalmente (sem nenhuma documentação) e continuam produzindo peças até hoje. Um aumento na produção pode exigir um novo ferramental idêntico ao original. A Engenharia Reversa pode copiar todas as características do molde, auxiliando na confecção do novo modelo.
3. *Correção de um modelo danificado.* Se parte de um modelo está danificado, a reconstrução deste não deve conter seus erros. Usando ainda o exemplo dos ferramentais antigos, com o passar do tempo eles sofrem desgastes ou até mesmo quebras. O emprego da Engenharia Reversa facilita sobremaneira a confecção do ferramental substituto.
4. *Melhorias das formas de um modelo.* O *designer* pode finalizar o conceito de um produto baseado em funcionalidades e aspectos estéticos e então utilizar materiais leves como madeira ou resinas para fabricá-los. Neste processo, o designer não precisa desperdiçar tempo em criar o modelo com alta precisão, pois este pode ser melhorado na criação do modelo CAD. Contudo, os sistemas de Engenharia Reversa devem ser capazes de deduzir algumas características como simetria, paralelismo e perpendicularidade.



1. Criação de um novo produto

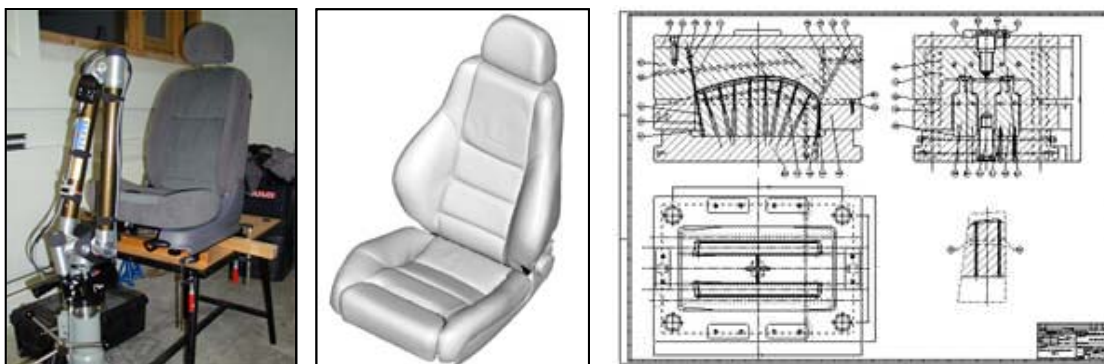


2. Cópia de um modelo existente



3. Correção de um modelo danificado

4. Melhorias das formas de um modelo



5. Inspeção de um produto

6. Documentação através de desenhos de engenharia

Figura 2.4 – Aplicações da Engenharia Reversa à indústria

5. *Inspeção de um produto.* Digitalizar o modelo, possibilita a comparação entre o modelo desejado e o modelo confeccionado. Assim como os sistemas CAD/CAM podem auxiliar tanto no projeto e manufatura de objetos complexos como na inspeção a partir de tolerâncias apertadas (Sobh, 1994). Ainda existem produtos difíceis de inspecionar pelos métodos convencionais. Por exemplo, um banco de espuma não pode ser tocado, pois a espuma deformaria. Então, uma inspeção sem toque se faz necessária, garantindo que as tolerâncias sejam controladas.
6. *Documentação através de desenhos de engenharia.* Muitas vezes um produto passa pela Engenharia Reversa para ser documentado. Isso ocorre porque a informação atual (ou simplesmente necessária) foi perdida, ou está desatualizada, ou ainda imprecisa. Frequentemente, os dados técnicos necessários para manter e reparar equipamentos jamais foram terminados. Este leque de adequação das informações de design é um problema global que atormenta as empresas em todas as partes do mundo. A Engenharia Reversa pode gerar esta documentação (Ingle, 2001)

Muitas aplicações não requerem uma cópia exata do modelo, mas precisam capturar até um certo ponto, as **idéias** do *design* original (Figura 2.5). Por exemplo, um produto quebra durante a sua utilização ou apresenta deformações. O que precisa ser copiado é a sua idéia de aplicação e não seus erros, pois estes precisam ser melhorados. Porém, ao fazer a digitalização deste produto, as informações incorretas também são capturadas. Muitas vezes é importante corrigir estes erros e para isso pode-se usar recursos como simetria, paralelismo e perpendicularismo, mesmo que o modelo original não apresente estas características (Puntambekar, 1994).

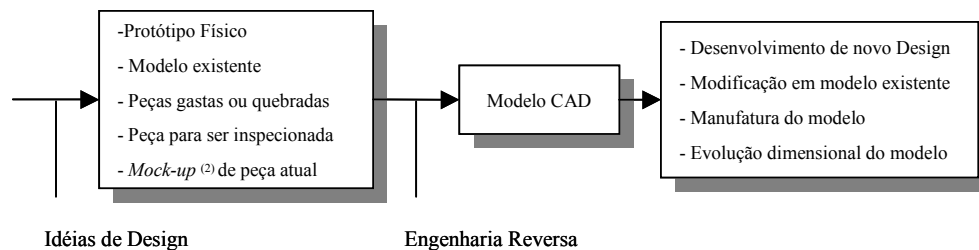


Figura 2.5 – O Processo Metodológico da Engenharia Reversa aplicado à indústria (Ming-Lun, 1997)

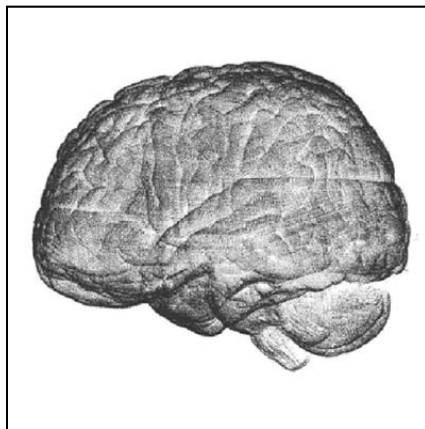
² Mockup = modelo físico. É um modelo físico de um produto seja um produto novo ou existente.

2.3.2 – Engenharia Reversa aplicada à medicina

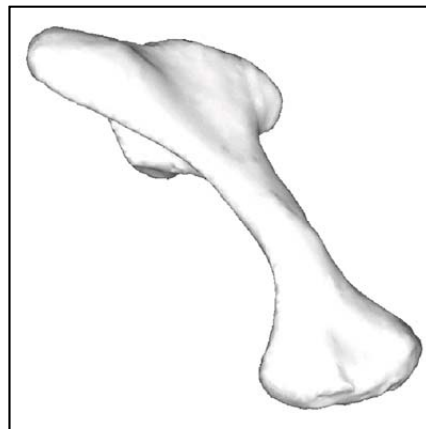
A Engenharia Reversa vem demonstrando seus benefícios nas seguintes aplicações voltadas à área médica: planejamento cirúrgico, implantes, criação de próteses, estudo da anatomia, entre outros. Segue abaixo maiores definições sobre cada uma delas.

2.3.2.1 – Educação: Reprodução de modelos

Em pesquisas que envolvem educação e biomedicina, assim como cuidados com a saúde, a visualização de partes do corpo, órgãos, células e tecidos é essencial (**Rydmark**, 1999). Com a Engenharia Reversa pode-se criar modelos a partir de partes do corpo humano (Figura 2.6), desde de regiões simples e sadias até doenças raras e complexas.



Nuvem de pontos de modelo plástico de cérebro (Rydmark, 1999)



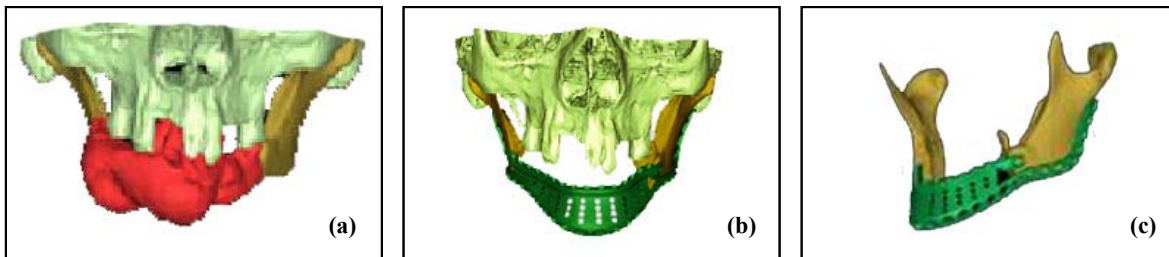
Nuvem de pontos de modelo plástico de fêmur (3D Scanners, 2000)

Figura 2.6 – Engenharia Reversa aplicada à educação

2.3.2.2 – Planejamento cirúrgico

Segundo **Oleskowicz** (In: Potel, 2001) antes de usar a computação gráfica para planejar cirurgias e implantes existiam vários obstáculos significantes. Primeiro: nenhum caso é exatamente igual ao outro; para alguns pacientes, a padronização de peças não melhora o que é preciso em um procedimento de implante com resultado estético. Segundo: a área cirúrgica do

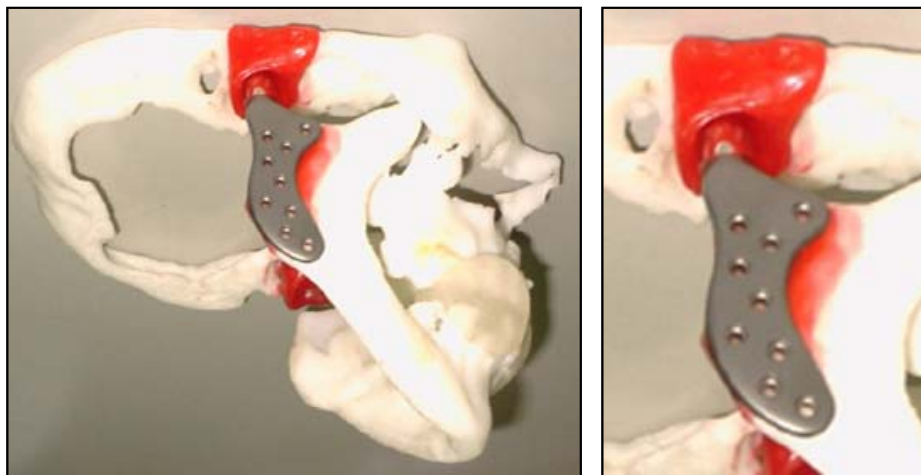
implante, muitas vezes apresenta regiões obscuras que precisavam ser vistas para o planejamento da cirurgia. Por último, não é possível fazer mudanças durante a cirurgia para colocação do implante. Isso significa que em alguns casos o paciente deve fazer uma segunda cirurgia para completar o tratamento (Figura 2.7 e 2.8).



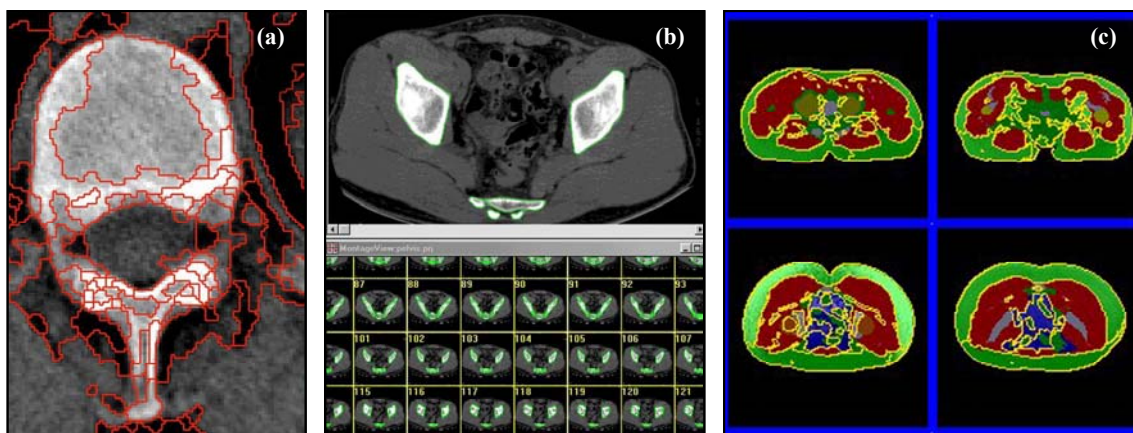
(a) Modelo virtual a partir de tomografia computadorizada. A parte vermelha mostra a região afetada pelo tumor. A região amarela representa a maxila. Em verde tem-se a região superior do crânio.

(b) e (c) Imagem do implante que irá repor a região do maxilar removida.

Figura 2.7 – Modelo virtual auxiliando o Planejamento Cirúrgico (Oleskowicz/Potel, 2001)



Contudo, para criar os modelos virtuais a tomografia computadorizada (CT) assume o papel da digitalização e captura a forma da região a ser criada. Com o auxílio de software apropriado, as várias camadas criadas pela tomografia são sobrepostas, gerando assim uma malha triangular (Figura 2.9).



(a) e (c) Exemplo de tomografia (Tomovision, 2003)

(b) Exemplo de tomografia de pelvis
(3D-Doctor, 2003)

Figura 2.9 – Exemplo de Tomografia Computadorizada

2.3.2.3 – Digitalização de implantes

A Engenharia Reversa é utilizada de diversas maneiras e em diversas etapas do processo de construção de implantes. A figura 2.10 ilustra algumas destas aplicações. É possível digitalizar a forma geométrica de um dente utilizando para isso um *Scanner* portátil (Cynovad, 2003). Este tipo de equipamento permite copiar a forma dos dentes de um paciente no próprio ambiente do consultório. Além da geometria, é possível fazer um mapeamento dos dentes, coletando diversas informações que podem ser utilizadas no processo de construção do implante (Figura 2.11).

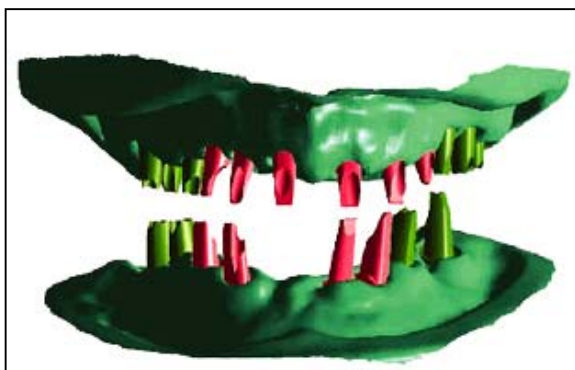
2.3.2.4 – Análise de elementos finitos em implantes dentários

Para Geng (2001), nas duas últimas décadas, a análise por elementos finitos (FEA) tornou-se uma ferramenta muito utilizada para a predição de efeitos de tensão em implantes e nas regiões ósseas. Cargas verticais e transversais da mastigação provocam forças axiais e momentos torçores que resultam em gradientes de tensão no implante e na massa óssea. O fator chave para o sucesso ou falha do implante dentário está na maneira como a carga é transferida para a região óssea. A transferência de carga do implante para o osso depende do tipo de carga, da interface do implante, do comprimento e diâmetro do implante, da forma e características do implante, do tipo de prótese, e da quantidade e qualidade da região óssea. A análise por Elementos Finitos pesquisa

a predição da distribuição da carga na área de contato do implante com o osso cortical e sobre o apex do implante em ossos trabeculares.

Para problemas que envolvem geometrias complicadas, é muito difícil de alcançar uma solução analítica. Contudo, o uso de métodos numéricos como o FEA é obrigatório. A análise por elementos finitos é uma técnica para obter uma solução de problema mecânico complexo. Isto se faz pela divisão em problemas menores em uma coletânea de pequenos e simples domínios (elementos) cujo campo de variáveis pode ser interpolado com o uso de funções de forma. Uma solução geral aproximada do problema original é determinada com base em princípios variacionais. Em outras palavras, FEA é um método segundo o qual, em vez de procurar por uma solução funcional para o domínio inteiro, uma formulação de soluções são encontradas para cada elemento finito e combinadas entre si para obter a solução do problema como um todo. Porque os componentes de um implante dentário por sistemas ósseos são extremamente complexos em termos de geometria, a análise por elementos finitos é tida como a ferramenta mais adequada para sua análise. Uma malha é necessária no FEA para dividir o domínio interno em elementos. O processo de criação da malha, elementos, suas respectivas ligações, e as condições e definições de fronteiras são referidas como “discretização” do domínio do problema.

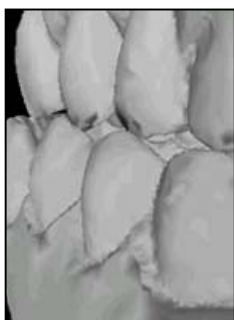
O primeiro passo para o modelamento em FEA é representar a geometria de interesse no computador. Em alguns estudos bidimensionais, a geometria correspondente ao implante foi simplificada para uma configuração retangular. Alguns modelos tridimensionais tratam a mandíbula como um arco como uma secção retangular. Recentemente, como o desenvolvimento de técnicas de imagens digitais, métodos mais eficientes estão disponíveis para o desenvolvimento de modelos automaticamente e com qualidade. Isto inclui a aplicação de softwares especialistas em transformar informações 2D ou 3D a partir de tomografias computadorizadas (CT) ou ressonância magnética (MRI) em malhas triangulares. A inclusão de propriedades de material a partir de medições da densidade do osso, também é possível. Isto possibilita maior precisão para o modelo da geometria do sistema de implante. No futuro, a criação de modelos para pacientes individualmente, baseada nos avanços da tecnologia digital, será possível até nos lugares mais humildes.



Modelo virtual de implante (Potel, 2001)



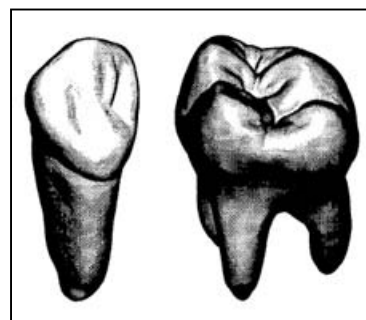
Modelo Físico de Implante



Articulação virtual
(Bisler, 2002)



Malha triangular a partir de
Tomografia (Potel, 2001)



Dente virtual para catálogo
(Karbacher, 2001)

Figura 2.10 – Exemplos de Engenharia Reversa aplicada à odontologia

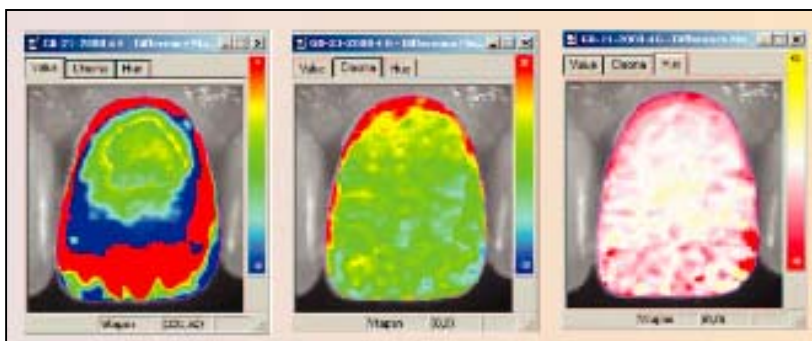


Figura 2.11 – Scanner Portátil e Mapeamento da geometria (Cynovad, 2003)

2.3.3 – Engenharia Reversa aplicada à arte

As técnicas de Engenharia Reversa também são empregadas em áreas completamente distintas da indústria. Colocar a tecnologia a serviço da arte, por exemplo, parece ser algo inaceitável. A arte lembra esculturas feitas a mão, enquanto que a tecnologia traz a mente imagens como robôs e ausência de sentimentos. Mas na prática, essa parceria tem contribuído muito para a preservação de patrimônio histórico e criação de novas obras de arte. Segue abaixo, alguns relatos sobre trabalhos realizados nestes parâmetros.

2.3.3.1 – Criação de novas obras de arte

Devido à sua natureza, as coleções de museus possuem uma vasta gama de tamanhos, materiais e formatos complexos. Segundo **Lawrie** (2001), a Engenharia Reversa e a Prototipagem Rápida têm demonstrado suas vantagens durante anos para o setor de *design* e engenharia das empresas. Recentemente, outros profissionais, como escultores e artistas, também têm procurado oportunidades de usufruir desta tecnologia. Tradicionalmente, a engenharia é associada à criação de modelos prismáticos, construídos para o processo de manufatura. No passado, raramente departamentos de engenharia trabalhariam com profissionais do mundo da arte. Contudo, novas tecnologias de digitalização combinadas com as vantagens dos recursos de softwares aplicados à Engenharia Reversa oferecem novas oportunidades para ambos, engenheiros e artistas, mesmo para as geometrias mais complexas. Tem-se como exemplo a *Escultura a partir de Prototipagem Rápida e Engenharia Reversa* (Figura 2.12), construída com a finalidade de representar as tecnologias relacionadas à mecânica na virada do milênio.



Figura 2.12 – Escultura que representa as tecnologias rápidas como Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida na virada do milênio – Birmingham, Inglaterra (Lawrie, 2001)

2.3.3.2 – Preservação de patrimônio e artefatos históricos

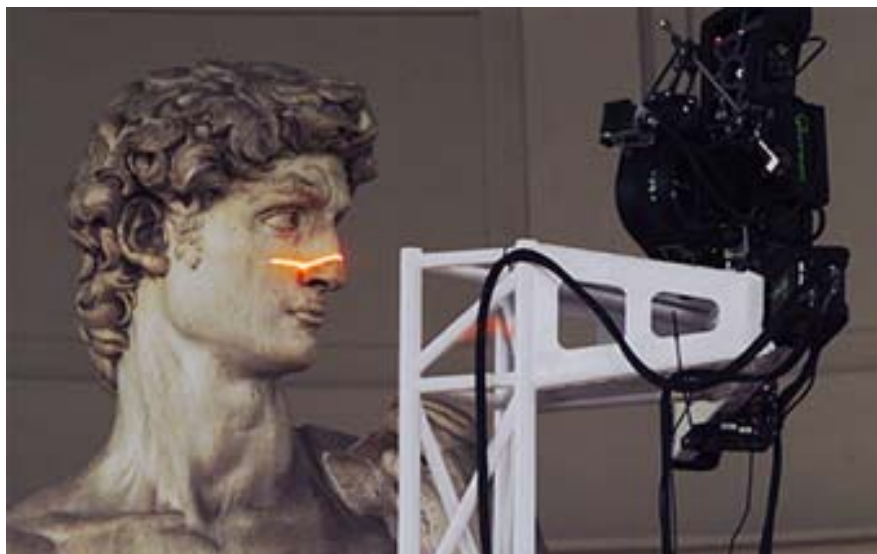
Segundo **Godin** (2002), muitos trabalhos de Engenharia Reversa focam seus objetivos na manufatura, em robôs espaciais, etc., enquanto que muitas áreas deixam cada vez mais evidente a necessidade pela conservação de patrimônio e documentação. Aplicações relativas ao patrimônio histórico, especialmente aquelas objetivando tarefas analíticas, exigem digitalizações de alta qualidade e boa visualização de resultados.

Para **Christensen** (2000) com a Engenharia Reversa, é possível criar uma cópia virtual do objeto. O resultado é uma réplica que não ocupa espaço físico, sendo que inúmeras peças podem ser armazenadas e acessadas por qualquer pessoa sem o risco de danificar o objeto original.

Levoy (2000) descreve a aplicação da Engenharia Reversa durante o trabalho de digitalização das obras de Michelangelo que envolveu uma equipe de 30 pessoas durante dois anos de trabalho (Figura 2.13).

Entre as missões do projeto estavam a captura da forma e cor dos objetos. Estátuas antigas como a de Davi são cobertas com um complexo de mármore, veias, sujeiras, cera e outros materiais usados em favor de restaurações que dificultam a captura de dados.

O principal componente de *hardware* deste sistema foi um *scanner* por triangulação a *laser*, motorizado e customizado para digitalizar estátuas de grandes dimensões. A digitalização utilizou uma combinação de tecnologias sem contato incluindo fotogrametria, *time-of-flight* e triangulação por faixa de *laser*, sendo que esta última ofereceu a melhor combinação entre precisão, volume de trabalho, robustez e portabilidade.



Scanner por triangulação a laser, motorizado e customizado para digitalizar estátuas de grandes dimensões



Equipamento de digitalização a laser em campo



Fotografia



Modelo Virtual

Figura 2.13 – Engenharia Reversa aplicada à arte – Davi de Micheangelo com 7 metros de altura (Levoy, 2000)

Capítulo 3

O processo de Digitalização

3.1 – Conceito de digitalização

O conceito de digitalização abrange principalmente o aspecto de capturar informações com base em pontos em um espaço 3D. O espaço onde o modelo físico encontra-se é referenciado a um sistema de coordenadas cartesianas. A seguir tem-se a conceituação sob o ponto de vista dos principais autores:

Dong-Fan (1996) – “A digitalização é o processo de captura de coordenadas de pontos das superfícies da peça. O resultado do processo de digitalização é uma nuvem de pontos 2D ou 3D, armazenados como uma imagem.”

Champ (1994) – “A digitalização a *laser* é um método rápido e eficiente para a engenharia reversa de superfícies complexas. A técnica é muito utilizada em modelos como *clay* (argila) e espuma. Imagens por alcance, ou *range images* como são conhecidas, são capturadas usando esta técnica e podem criar cópias em escala ou auxiliarem na construção do modelo CAD 3D.”

Boehler (2001) – “Um *scanner* 3D ou equipamento de digitalização registra coordenadas 3D de números pontos sobre a superfície de um objeto em um período de tempo relativamente curto.”

3.1.1 – Métodos de digitalização

Existem duas maneiras de capturar pontos de um modelo: a primeira é por contato físico (um componente físico conhecido como “*probe*” toca o produto e copia seu perfil); a segunda, sem contato físico (recursos ópticos e/ou sensores de luz projetam feixes de luz sobre o produto).

Uma vez determinada à maneira como os pontos serão capturados, o segundo passo é escolher o método de digitalização de pontos. Os dois principais métodos para esta captura de pontos são: ponto-a-ponto e nuvem de pontos (Figura 3.1). Apresenta-se a seguir a definição de cada um deles:

1. *Digitalização ponto-a-ponto (Vinarub, 1992)*. É definida por uma varredura de dados coordenados e armazenados em um arquivo de pontos. Contudo, modelos complexos exigem uma reprodução exata e para este método o tempo requerido é significativamente alto. Estão disponíveis no mercado equipamentos manuais e automáticos, com apalpador ou sensores ópticos de luz. Cada um desses métodos é limitado por um ou outro destes itens: custo, confiabilidade, precisão ou tempo de trabalho. Em adição, os métodos ópticos requerem correções constantes para as profundidades e distâncias no eixo Z variando ao longo da digitalização.
2. *Digitalização por nuvem de pontos (Boehler, 2001)*. Neste método, vários pontos são capturados simultaneamente, o que torna o processo mais rápido do que a digitalização ponto-a-ponto. O método mais comum de digitalização por nuvem de pontos parte do princípio de projetar uma faixa de *laser* sobre o objeto. A digitalização, ou seja, a varredura de pontos, é feita usando-se um ou dois espelhos que permitem mudanças do ângulo de deflexão em pequenos incrementos. Com isso, o objeto e/ou o instrumento podem ser rotacionados para alcançar a varredura completa dos pontos tridimensionais. Alta precisão na configuração dos ângulos é um fator muito importante, uma vez que os ângulos juntos com a medição de distâncias determinam a posição do ponto de reflexão.



Digitalização ponto-a-ponto (Renishaw, 2003)



Digitalização por nuvem de pontos (3D Scanners, 2003)

Figura 3.1 – Exemplos de métodos de digitalização

3.2 – Tipos de equipamentos de digitalização

Existem vários tipos de equipamentos de digitalização que podem atender desde peças muito pequenas até dimensões gigantescas. Existem equipamentos que trabalham com princípios de operação diferentes, como luz, foto-sensores e etc. O objetivo deste capítulo é abordar as diferenças de um equipamento de digitalização, principalmente relacionadas ao seu princípio de operação.

Para **Boehler** (1999) existem dois princípios diferentes para medir distâncias: os equipamentos de digitalização a *laser* por alcance (*ranging laser*) utilizam o princípio conhecido como *time-of-flight*. Instrumentos que utilizam câmeras CCD são baseados no princípio de **triangulação**. O equipamento de digitalização por **fotogrametria ou área based systems**³ também será abordado neste capítulo. Apesar de classificado por **Boehler** como um equipamento de triangulação, sua estrutura trabalha com projeção por franjas e por isso, será avaliado separadamente.

³ No Brasil esta tecnologia é conhecida como fotogrametria. Contudo, muitas definições de fotogrametria estão relacionadas com imagens por satélite para mapeamento geográfico. A definição aqui apresentada leva em consideração o termo *área based systems* descrita por **Descam** (2003).

3.2.1 – Time-of-Flight

Um curto impulso elétrico dispara um diodo semiconductor de *laser* para emitir um pulso de luz. A luz emitida passa por uma lente, que produz um finíssimo raio de *laser*. O raio *laser* é devolvido pelo objeto, espalhando alguns raios pela lente receptiva por um fotodiodo, que cria um pulso elétrico (Figura 3.2). O intervalo de tempo entre os dois pulsos elétricos (transmissor e receptor) é usado para calcular a distância do objeto, usando a velocidade da luz como uma constante (**Banner Engineering**, 2003).

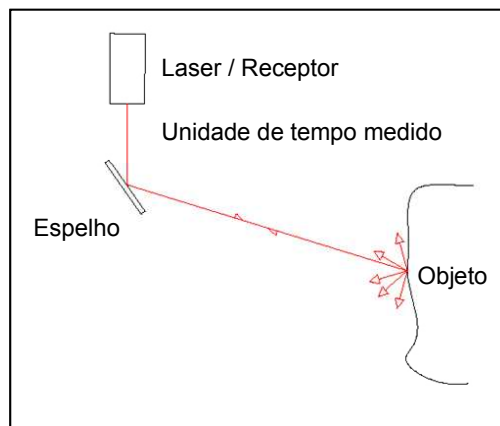


Figura 3.2 – Princípio de Operação – Time-of-flight (Boehler, 1999)

Pulsos múltiplos são avaliados por um microprocessador do sensor, que calcula o valor de saída aproximado. A saída analógica promove um sinal variável que é proporcional à posição do objeto dentro do limite da janela analógica programável. Uma saída discreta permite a passagem da energia em qualquer lugar onde o objeto esteja dentro da janela. A janela para saída analógica e discreta pode ser a mesma, ou elas podem ser programadas independentemente. Este é o tipo de equipamento utilizado na digitalização de obras de arte de grande dimensão, como a estátua de Davi de Michelangelo descrita no capítulo 2, figura 2.12.

3.2.2 – Digitalização por faixa de *laser* (Triangulação)

Este grupo de equipamentos de digitalização é baseado no princípio da triangulação simples. Um ponto ou faixa de *laser* é projetado sobre a superfície do objeto (Figura 3.3) e é registrado por uma ou mais câmeras CCDs. O ângulo de raio de luz a partir do *scanner* é

registrado internamente. O comprimento da base entre a origem do *laser* e a base é fixo e conhecido a partir da calibração. A distância entre o objeto e o equipamento é geometricamente determinada pelo ângulo registrado e o comprimento da base (Figura 3.4). Este tipo de *scanner* alcança pontos 3D com um desvio padrão menor do que um milímetro para distâncias muito próximas (menores do que dois metros). A precisão depende tanto do comprimento da base do *scanner* quanto da distância do objeto. Com o comprimento da base fixo, o desvio padrão de distância medida pode incrementar proporcionalmente ao quadrado da distância (Boehler, 1999).

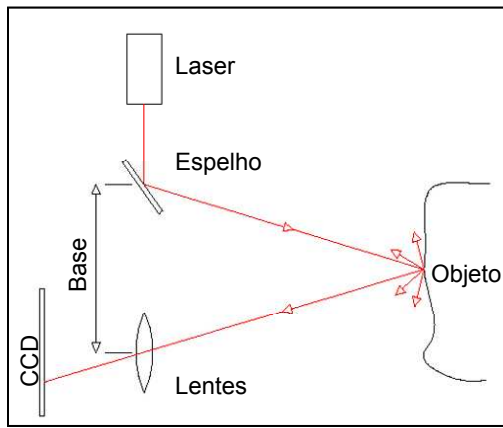


Figura 3.3 – Princípio de Operação:
Triangulação com uma câmera
(Boehler, 1999)

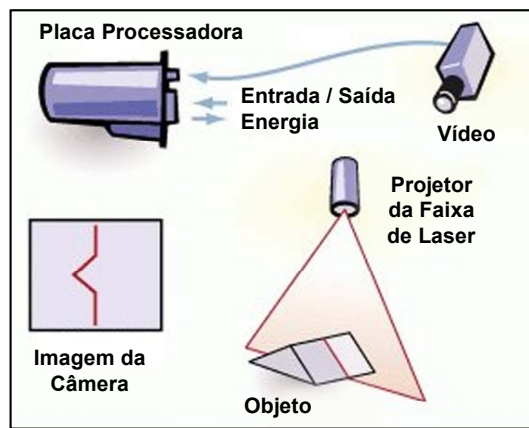


Figura 3.4 – Princípio de operação de uma
digitalização por faixa de laser
(3D Scanners, 2001)

3.2.3 – Fotogrametria ou *Area Based Systems* ou triangulação com duas câmeras

O objetivo desta análise é apresentar a tecnologia de digitalização por projeção de franjas. Durante a pesquisa foram encontrados três nomes correspondentes a esta tecnologia: fotogrametria, *Area Based Systems* e triangulação com duas câmeras. Como a literatura encontrada não apresentou uma correlação explícita entre as três tecnologias, decidiu-se apresentar aqui a definição de cada uma delas.

A **fotogrametria** como o próprio nome diz, é uma técnica de medição de coordenadas 3D que usa fotografias como base para a metrologia (Medição). A fotografia descreve os princípios fotográficos envolvidos na fotogrametria, enquanto que a metrologia descreve as técnicas para produzir coordenadas tridimensionais a partir de fotografias bidimensionais (Leica, 2003).

O processo fotogramétrico consiste na projeção de vários padrões de franjas sobre a superfície do objeto a ser digitalizado e captado por duas câmeras posicionadas em ângulo de visão diferentes (Figura 3.5). Com o auxílio do processamento digital de imagens e baseado no princípio de triangulação, as coordenadas 3D são computadas independentemente e as imagens podem ser calibradas simultaneamente durante a medição (Gom, 2003).

A variação do princípio de **triangulação** é a utilização **de duas câmeras**. O ponto ou padrão projetado é gerado por projetores de luz separados, sem nenhuma função de medição. Uma larga variedade de soluções pode ser encontrada. A projeção consiste no movimento da luz ou linha, no movimento das franjas ou padrões, ou em um padrão estático arbitrário (Figura 3.6). A solução geométrica é a mesma do princípio de uma única câmera, assim os resultados têm as mesmas características. Nem todos os equipamentos utilizam duas câmeras em alta velocidade de captura e nem todos produzem coordenadas 3D em tempo real (Boehler, 2001).

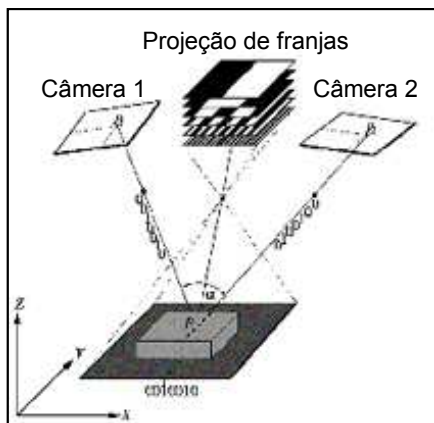


Figura 3.5 – Projeção de padrões de franjas (GOM, 2003)

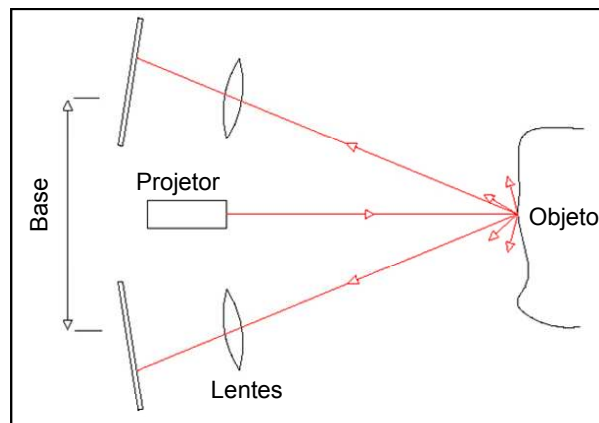


Figura 3.6 – Princípio de Operação – Triangulação com duas câmeras (Boehler, 2001)

Area Based Systems tem como princípio de operação a digitalização de objetos a partir de uma série de *patches* (remendos ou retalhos), que são capturados por uma espécie de máquina fotográfica. A maioria dos sistemas trabalha por projeção de um padrão sobre a superfície que é capturado por uma ou mais câmeras. As imagens resultantes são então comparadas e uma malha triangular tridimensional é calculada. O resultado é uma grade retangular de pontos que tem a forma da superfície. A digitalização total é formada retalho por retalho, pela movimentação da câmera em torno do objeto e isso gera uma série de sobreposições. Os retalhos são então adicionados em uma única nuvem de pontos. (Descam, 2003).

3.3 – Etapas da Digitalização

Karbacher (2001) descreve as etapas do processo de digitalização de uma maneira mais ampla, seguindo sua experiência prática ao longo de alguns anos:

1. *Aquisição de dados:* Várias imagens de alcance (*range images*) ou fotos (dependendo do tipo de digitalização) são extraídas de diferentes vistas do objeto para garantir a cobertura total do mesmo. Estas imagens consistem em milhares de coordenadas 3D (x,y,z).
2. *Registro da superfície:* Estas vistas são transformadas em um sistema de coordenadas comum e são alinhadas umas com as outras. Primeiro, elas são alinhadas em pares interativa e grosseiramente. Então, um segundo cálculo minimiza os desvios restantes em todas as vistas.
3. *Reconstrução da malha:* As vistas são unidas em um modelo simples do objeto. A descrição da superfície é criada usando uma malha de triângulos. A ordem original dos dados é perdida, resultando em dados dispersos.
4. *Nova malha suavizada:* Uma nova representação da nuvem de pontos é criada a partir dos vértices de triângulos e das orientações de direção. Erros dimensionais, como ruídos (falhas), erros de calibração e registro, podem ser eliminados sem destruir a geometria do objeto. Para isso, a malha deve passar pela etapa de suavização. A suavização consiste em reconstruir a malha considerando um desvio médio entre os pontos que fazem parte de uma determinada região.
5. *Reconstrução de cores:* Em alguns sistemas é possível reconstruir as cores do objeto digitalizado. Nestes sistemas, para cada imagem de alcance capturada existe um mapa de textura e cores.

3.4 – Tratamento dos dados digitalizados

Segundo **Karbacher** (2001), a superfície do objeto é reconstruída pelo registro de vistas múltiplas de imagens de alcance. Se o sensor é calibrado, as imagens consistem em uma matriz de coordenadas triplas. A superfície do objeto pode ser incompleta, mas deve ter o máximo de informações possíveis. Além do que, o objeto tem forma arbitrária, e o campo de vista pode conter vários objetos. Os seguintes passos são realizados para transformar estas coordenadas em uma malha simples de curvas ou planos:

- Criação da malha;
- Primeira suavização;
- Primeiro afinamento da malha;
- Adição/união;
- Suavização final;
- Afinamento final da malha;
- Fechar furos e *lacunas* (buracos);
- Otimização geométrica da malha;
- Otimização topológica da malha;

3.5 – Problemas operacionais na digitalização de modelos

Segundo **Varady** (1997), existem vários tipos de problemas operacionais relativos a especificação dos dados. Os principais são: calibração, precisão, acessibilidade, oclusão, fixação, vistas múltiplas, ruídos (falhas) ou dados incorretos, distribuição estatística do modelo e superfície de acabamento. Apresenta-se abaixo cada um deles em detalhes:

1. *Calibração*. É uma parte essencial para a configuração e operação de um sistema de medidas. Erros sistemáticos dos sensores podem ocorrer devido a distorções nas lentes, desalinhamento eletrônico nas câmeras e situações similares. Todo sensor deve ser calibrado para determinados parâmetros de precisão com pontos da câmera e orientações, e para modelar e conceder os dados dentro dos limites de erros sistemáticos

possíveis. Muitos artigos discutem a precisão do alcance dos vários tipos de digitalizadores, mas todos os métodos de captura de pontos requisitam a calibração do equipamento. Os digitalizadores ópticos típicos dependem da extensão (largura) da resolução do sistema de vídeo em uso. As distâncias a serem medidas e as partes móveis do equipamento contribuem para o acúmulo de erros.

2. *Acessibilidade.* É uma limitação operacional da digitalização que não é facilmente alcançada devido tanto a configuração quanto à topologia do modelo. Usualmente requer diferentes vistas, mas pode haver algumas regiões onde é impossível garantir a digitalização em certos métodos. Um típico exemplo é dentro de furos, onde é impossível acessar sua região interna.
3. *Oclusão.* É o bloqueio da digitalização por sombra ou obstrução. Este é primariamente um problema que ocorre com digitalizadores ópticos. Contudo, digitalizadores acústicos ou magnéticos também podem apresentar este problema. Mecanismos de digitalização múltiplas não costumam ter este problema.
4. *Fixação.* A geometria dos dispositivos de fixação também passa a fazer parte do modelo. A eliminação destas áreas é difícil e freqüentemente requer digitalizações múltiplas. As digitalizações múltiplas introduzem erros no processo porque tem problemas com o registro de dados (ver mais detalhes a frente).
5. *Ruídos (falhas) ou dados incorretos.* A eliminação de ruídos na amostragem de dados é uma questão difícil. Os ruídos podem ser introduzidos por diversos motivos, vibrações fortes, reflexões, etc. Existem diversos tipos de filtros que podem ser usados nestas situações. Uma importante questão é quando eliminar o ruído, antes, durante ou depois do modelo ser construído. Existem momentos nos quais o ruído não deve ser eliminado por completo. Filtrar ruídos contudo, é um passo inevitável na ER, mas note que, isso sempre destrói os cantos-vivos do modelo. Para filtrar ruídos usa-se a suavização e os cantos desaparecem quando suavizados. Em alguns casos isto é desejável, mas em outros, isto pode trazer grandes problemas.

6. *Restaurações.* Um problema semelhante ocorre na restauração de dados perdidos. Isto é em parte necessário quando ocorrerem problemas de inacessibilidade ou oclusões (omissões). Mais que isso, por causa da natureza dos sistemas ópticos, os dados próximos ao contorno são justamente ilusórios. Finalmente existem situações onde apenas partes de uma certa superfície podem ser mensuradas, existem regiões que foram perdidas ou obstruídas por outros elementos, mas elas são necessárias para reconstruir a superfície toda tendo apenas as partes visíveis. Outras maneiras de se restaurar os dados perdidos podem ser por extensão de superfícies, intersecção e preenchimento de furos.
7. *Distribuição estatística.* Aqui lida-se com o fato de que qualquer parte que é digitalizada representa apenas uma amostragem da população. Quando os métodos de Engenharia Reversa são utilizados para reproduzir uma forma, a tolerância da distribuição da parte digitalizada deve ser considerada. Isto dá razão para que várias partes sejam digitalizadas e um resultado médio seja escolhido. Contudo, isto se torna impraticável, pois muitas vezes só existe uma única peça.
8. *Superfície de acabamento.* O tipo de superfície do modelo também é uma questão importante. Maciez e determinadas pinturas podem afetar dramaticamente o processo de captura. Métodos ópticos ou por toque irão produzir mais ruídos (falhas) em uma superfície grosseira do que em uma lisa. A reflexão do material também pode afetar nos métodos ópticos. Quando se digitaliza uma face humana, falhas são introduzidas quando a luz reflete nos olhos. O cabelo é um exemplo de superfície grosseira e apresenta dificuldades para a digitalização.

Varady (1997) idealiza a digitalização perfeita: um objeto flutuando no espaço 3D, onde seria possível acessar todas as direções. Os dados podem ser capturados por um único sistema de coordenadas com alta precisão, sem necessidade de filtrar ruídos e registros. Mas, apesar dos problemas práticos discutidos, é possível obter uma vasta gama de digitalizações de qualidade em um curto período de tempo usando os métodos descritos.

Capítulo 4

O processo de criação do modelo CAD

4.1 – Conceito do sistema CAD

Voisinnet (1988) – “Elaborar um projeto com o auxílio do computador. É um método conhecido como desenho auxiliado por computador.”

Kochan (1985) – “Inicialmente os sistemas CAD foram desenvolvidos, para sanar as deficiências dos sistemas operacionais de formação. Eles foram substituídos por sistemas operacionais mais poderosos em conjunto com bons ambientes de programação.”

Desde o seu desenvolvimento nos anos 80, os sistemas CAD/CAM têm se tornado uma importante ferramenta no desenvolvimento de produtos. Em um ambiente moderno de manufatura, a seqüência de operações inicia-se com um modelo criado em um sistema CAD e termina na geração de instruções de usinagem que convertem um material bruto em um modelo geométrico idêntico ao projetado (**Sacchi**, 2000).

Pacotes de sistemas com computadores auxiliando o desenho (CAD) permitem que os engenheiros projetem objetos para computadores auxiliando a manufatura (CAM). Subseqüentes manipulações e modificações do modelo podem ser feitas com relativa facilidade, porque mesmo uma peça complexa, pode ser imaginada como um conjunto de partes geométricas simples, como planos, esferas, cilindros, cones, etc. Muitos tipos de protótipos físicos são produzidos e então

modificados diretamente ou o design inicial consiste em um objeto físico para cópia. Em alguns casos um processo de Engenharia Reversa é necessário para que se possa criar a representação digital do modelo (Sacchi, 2001).

Para transformar em realidade as vantagens da tecnologia moderna em desenvolvimento de produtos e processos de manufatura, a geometria do modelo criada em CAD se faz necessária. Contudo, existem situações em que o desenvolvimento do produto é criado fisicamente antes do modelo em CAD. Na indústria automobilística, por exemplo, este é um processo bastante comum. Um modelo em *clay* é confeccionado com base nos *sketchs* propostos pelos designers. Após a aprovação do modelo, a forma do mesmo deve ser copiada para um sistema CAD (Tai, 2000).

4.2 – Fases do modelo CAD na Engenharia Reversa

Segundo Yuan (2001) o modelo CAD para a Engenharia Reversa passa pelas seguintes fases: adequação de superfícies e análise de erros.

1. *Adequação de Superfícies*: Pontos capturados são usualmente adequados em superfícies de duas maneiras, superfície algébrica ou superfície paramétrica. A primeira forma é flexível para assentar pontos aleatórios, enquanto o outro é bom para captura de pontos regulares. Na prática, a escolha do método de assentar superfícies leva em conta o alcance da aplicação e o método de captura de pontos.
2. *Análise de erros*: A função deste modelo é calcular os erros entre a superfície assentada e os pontos capturados pelo método de mínimo quadrado, o método do menor desvio absoluto ou o método da média dos mínimos quadrados. O valor de erro encontrado pode servir de *feedback* para o modelo de superfícies para estimar números de cálculos. Quando a condição de erro é satisfatória, a superfície reconstruída sai do modelo de característica. O método do mínimo desvio quadrático é usado com frequência, porque ele pode satisfazer varias requisições na reconstrução do modelo.

Segundo **Dickin** (1996), a primeira razão para a nova popularidade da Engenharia Reversa é a descoberta de que o CAD não pode substituir sempre as técnicas da modelação tradicional. Mesmo as companhias que utilizam o CAD com sucesso na maioria de suas aplicações de modelamento, ainda possuem *designers* que trabalham com formas complexas que preferem fazer os modelos manualmente. O tempo e esforço preciso para retreinar estas pessoas em novas técnicas de *design* computadorizado pode tornar-se impraticável, especialmente se eles estiverem relutantes em abandonar suas habilidades originais. O segundo problema é que muitos sistemas CAD não conseguem modificar formas complexas com flexibilidade suficiente para representar as idéias dos *designers* de forma fiel. Esta é uma verdade particularmente para alguns sistemas de modelamento em sólido, que são mais adequados para modelar montagens grandes de peças relativamente simples ao invés de componentes complexos isolados. É claro que é sempre possível restringir os *designers* dentro das capacidades do sistema CAD da empresa. Porém, trabalhar com limitações de um sistema CAD inadequado gasta tempo e pode custar bilhões de dólares à empresa.

4.3 – Técnicas de reconstrução para um modelo CAD

Reconstrução de objetos por dados de amostragem é uma forma importante de obtenção de parâmetros geométricos para modelos existentes. Modelos gráficos, assim como modelos de engenharia, devem ser fielmente reconstruídos, isto é, algumas formas de representação requerem que as definições de um objeto não se desviem dos pontos mais do que o erro de medição fornecido. A representação pode ser discreta, por exemplo um conjunto de triângulos, ou contínua, por exemplo um modelo que se ajusta em uma superfície através de subconjuntos de pontos (**Piegl**, 2001).

Ajustar superfícies para uma distribuição aleatória de dados tem sido um assunto de interesse significativo. Usando determinado tipo de superfície, uma questão crítica no processo de ajuste é a computação de parâmetros de vetores dos nós.

4.3.1 – Criação de modelo CAD por rede de pontos

Segundo **Piegl** (2001) um método eficaz para obtenção de superfícies, deve observar os seguintes pontos:

1. *Quantos pontos devem ser selecionados?* A experiência prática demonstra que o número de pontos necessários para formar uma superfície deve acompanhar os dados de forma razoável e fiel, sendo que a densidade depende dos dados capturados. Dados simples não precisam mais do que 10% dos pontos originais, enquanto que modelos mais complexos podem exigir até 70% dos pontos.
2. *Quais pontos devem ser selecionados?* Desde que o método considere as variações, deve parecer que os pontos próximos aos contornos são melhores que os de seu interior. Mais uma vez, a experiência prática demonstra que este nem sempre é o caso. Para efeito de implementação, foi escolhida a forma aleatória da distribuição de pontos.
3. *Quantos pontos de controle devem ser utilizados?* Novamente, depende dos dados capturados. Primeiramente, pode-se ser uma boa idéia selecionar os pontos do contorno do modelo (suas fronteiras). Se a superfície não for adequada, este número pode ser aumentado (e algumas vezes reduzido).
4. *De onde os parâmetros vêm?* O caminho mais fácil para defini-lo é selecionar a fronteira do modelo e projetar uma malha bilinear sobre a peça.
5. *Como escolher os nós?* A melhor forma de selecionar os nós é usando os nós da fronteira do modelo. Isto assegura que nenhuma informação adicional será gerada quando os dados forem processados.

Capítulo 5

Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida

5.1 – Conceito de Prototipagem Rápida

Segundo **Carvalho** (2003) a Prototipagem Rápida é uma tecnologia que possibilita produzir modelos e protótipos diretamente a partir do modelo 3D (obtido por um sistema CAD, por digitalização ou por Tomografia Computadorizada). Ao contrário dos processos de usinagem, que subtraem material da peça em bruto para se obter a peça desejada, os sistemas de prototipagem rápida geram a peça a partir da união gradativa de líquidos, pós ou folhas de papel. Camada por camada, a partir de seções transversais da peça obtidas a partir do modelo 3D, as máquinas de prototipagem rápida produzem peças em plásticos, madeira, cerâmica ou metais. Os dados para as máquinas de prototipagem são gerados no sistema CAD no formato STL⁴, que aproxima o modelo sólido por pequenos triângulos ou facetas. Quanto menor forem estes triângulos, melhor a aproximação da superfície, ao custo naturalmente de maior tamanho do arquivo STL e tempo de processamento. Um vez que o arquivo STL é gerado, as demais operações são executadas pelo próprio software que acompanha as máquinas de prototipagem rápida. Basicamente estes softwares irão, além de operações básicas de visualização, gerar as seções transversais do modelo que será construído. Tais dados são então descarregados para a máquina que irá depositar as camadas sucessivamente até que a peça seja gerada.

⁴ Um arquivo STL consiste em uma lista de dados de faces triangulares. Cada face é identificada unicamente por uma unidade normal e por três vértices. A normal vértice são especificadas por três coordenadas cada, portanto há um total de doze números armazenados para cada face (**Chen**, 1997).

5.2 – A Prototipagem Rápida e a Engenharia Reversa

Segundo **Lee** (1998) o modelo em protótipo de um novo produto pode ser feito a partir do modelo CAD desenvolvido em Engenharia Reversa utilizando a técnica de Prototipagem Rápida. Genericamente, na Prototipagem Rápida os modelos físicos são fabricados camada por camada. Este sistema aceita um arquivo de malha triangular no formato STL. Este formato tem vantagens devido à sua estrutura simples e de uso fácil mas têm sérios inconvenientes. Ele precisa de um alto índice de memória dependendo da precisão do modelo. Algumas vezes, gasta-se muito tempo com reparos, quando o modelo apresenta *lacunas* (buracos), sobreposições e vetores com problemas.

A integração da digitalização 3D com a Prototipagem Rápida pode acelerar o processo de design e manufatura de um produto. Um objeto físico pode ser copiado com um sistema a *laser* que captura dados por coordenadas 3D. O software de Engenharia Reversa pode converter estes pontos em uma malha triangular. (**Luo**, 2000)

Os avanços tecnológicos, freqüentemente direcionados pelo mercado, também criaram novas possibilidades para o planejamento cirúrgico. Imagens de tomografia computadorizada (CT) e ressonância magnética (MRI) podem ter seus dados transformados em imagens tridimensionais proporcionando inúmeras aplicabilidades na área biomédica.

5.3 – Tipos de Prototipagem Rápida

Para **Chen** (1997) nos últimos anos, máquinas de prototipagem rápida vêm sendo utilizadas vastamente na indústria. Uma variedade de tecnologias de prototipagem vem emergindo. Elas incluem Estereolitografia (SLA), Sinterização Seletiva a Laser (SLS), Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM), Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM) e impressora tridimensional (3D Printing). Estas tecnologias são capazes de construir diretamente um objeto físico a partir de informações do modelo CAD. Eles tem uma importante característica em comum: os modelos são construídos pela adição de material camada por camada. Este processo é exatamente o oposto da usinagem convencional cuja produção ocorre pela remoção de material. Os principais sistemas de Prototipagem Rápida estão descritos a seguir. As vantagens e desvantagens de cada processo foram abordadas por **Carter** (2001):

5.3.1 – Estereolitografia (SLA)

Do termo inglês *Stereolithography*. Segundo **Cheung** (2001), este processo constrói modelos tridimensionais a partir de polímeros líquidos sensíveis à luz, que se solidificam quando expostos à radiação ultravioleta (Figura 5.1). O modelo é construído sobre uma plataforma situada imediatamente abaixo da superfície de um banho líquido de resina epóxi ou acrílica. Uma fonte de raio *laser* ultravioleta, com alta precisão de foco, traça a primeira camada, solidificando a seção transversal do modelo e deixando as demais áreas líquidas. A seguir, um elevador mergulha levemente a plataforma no banho de polímero líquido e o raio *laser* cria a segunda camada de polímero sólido acima da primeira camada. O processo é repetido sucessivas vezes até o protótipo estar completo. Uma vez pronto, o modelo sólido é removido do banho de polímero líquido e lavado. Os suportes são retirados e o modelo é introduzido num forno de radiação ultravioleta para ser submetido a uma cura completa. **Vantagens:** Os modelos em SLA são muito precisos e apresentam boa qualidade de superfície. Modelos transparentes podem ser construídos, assim como modelos com certa elasticidade. **Desvantagens:** Tanto o equipamento como os seus materiais têm custos elevados e os materiais têm vida útil inferior a um ano. Todos os materiais disponíveis são polímeros. Metais e cerâmicas não podem ser usados diretamente para a construção do modelo. É necessária a pós-cura do protótipo. Modelos coloridos não podem ser criados diretamente.

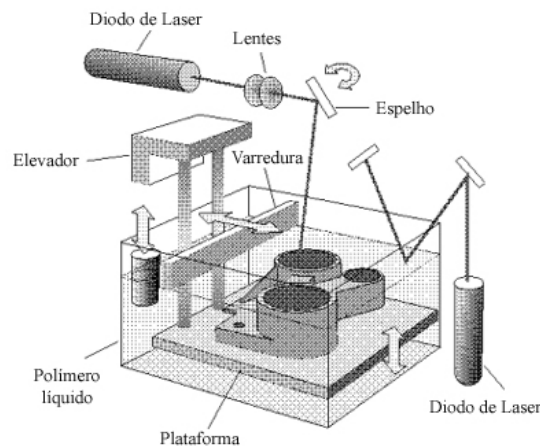


Figura 5.1 – Estereolitografia – Diagrama esquemático
(Rapid Prototyping Primer, 2003)

5.3.2 – Manufatura de Objetos em Lâminas (LOM)

Do termo inglês *Laminated Object Manufacturing*. Segundo **Silva** (1999), nesta técnica camadas de material, na forma de tiras revestidas de adesivo, são coladas umas nas outras formando o protótipo. Este processo usa uma deposição sucessiva de folhas de materiais como filmes plásticos, papel, tecido, ou folhas metálicas para construir a peça camada por camada. O modelo virtual do produto é seccionado para gerar as fatias correspondentes às camadas. Uma fonte de raio *laser* com alta precisão de foco corta o contorno da primeira camada sobre o papel. Usando um rolo aquecido, a camada é unida à anterior e o processo continua até que a peça seja finalizada (Figura 5.2). **Vantagens:** Apesar do processo mais simples de LOM ser confeccionado com papel, alguns materiais como plásticos, compostos de fibras de vidro, cerâmicas e até metais estão sendo utilizados com sucesso. Os modelos de papel em LOM podem ser maiores do que os produzidos por outros processos e o papel provavelmente é o material de menor custo. **Desvantagens:** A remoção do suporte do protótipo requer habilidade e paciência para evitar estragos no modelo. Modelos de papel devem ser selados com tinta ou outro material para conferir estabilidade dimensional ao protótipo.

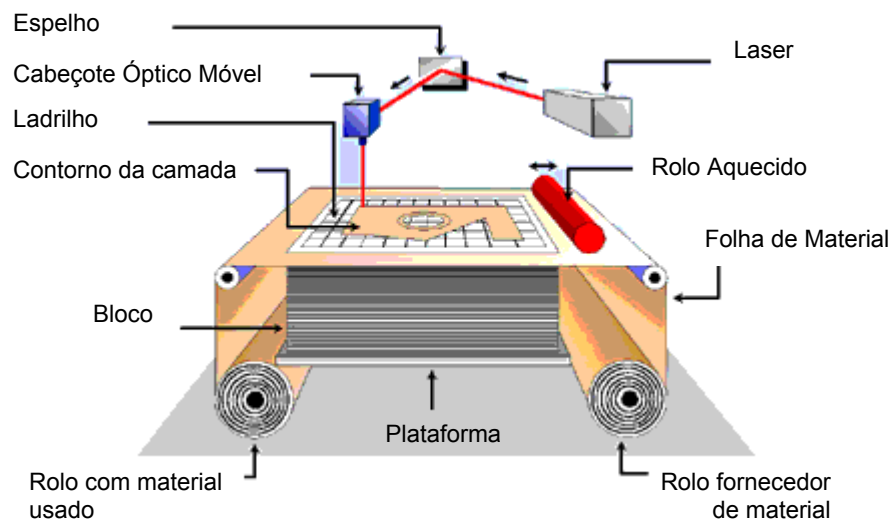


Figura 5.2 – LOM – Diagrama esquemático (MSOE, 2003)

5.3.3 – Sinterização Seletiva a Laser (SLS)

Do termo em inglês *Selective Laser Sintering*, **Silva** (1999) relata que neste processo uma fina camada de pó termofundível é depositado sobre uma superfície com a ajuda de um rolo. Um feixe de *laser* de CO₂ sinteriza as áreas selecionadas causando a aderência do pó nas áreas que constituem a peça naquela camada em particular (Figura 5.3). Deposições sucessivas de camadas são feitas até que a peça esteja completa. O pó não sinterizado (fundido) pelo *laser* é removido quando a peça estiver completa. Este serve como uma estrutura de suporte para partes salientes e desconectadas. **Vantagens:** Devido à fusão, não é preciso construir suporte para o protótipo. Assim o suporte não precisa ser quebrado e reduz-se o desperdício de material. Uma larga variedade de materiais como polímeros, cerâmicas e metais podem ser usados como matéria-prima para construir o modelo. **Desvantagens:** Equipamentos e materiais são caros. Metal e cerâmica devem ser pós-sinterizados para ganhar rigidez.

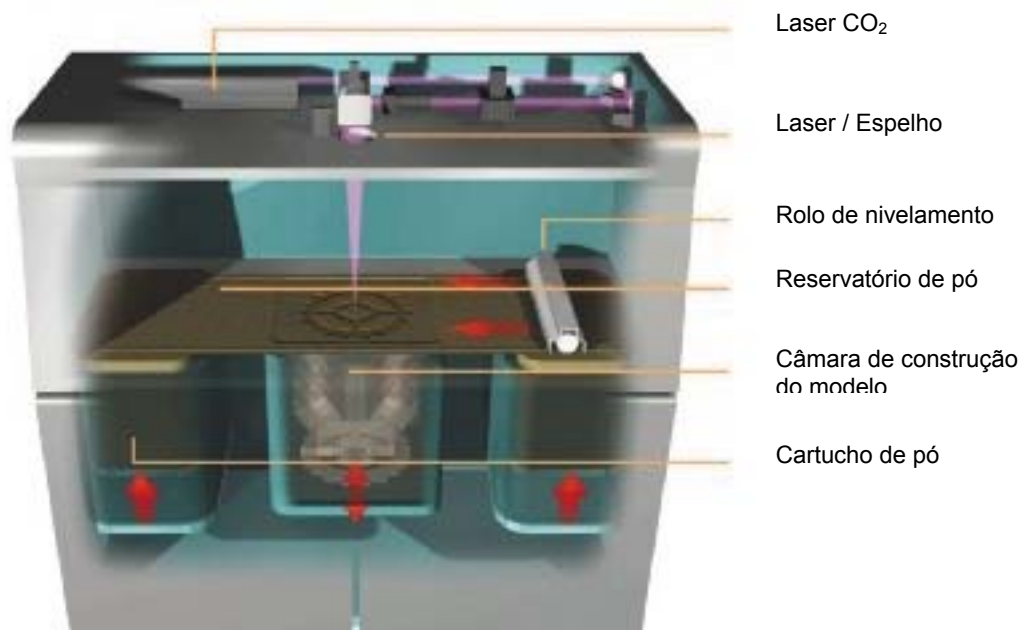


Figura 5.3 – SLS – Diagrama esquemático (MSOE, 2003)

5.3.4 – Modelagem por Deposição de Material Fundido (FDM)

Do termo em inglês *Fused Deposition Modeling*. **Gorni** (2003) relata que no processo FDM os filamentos de resina termoplástica aquecida são extrudadas a partir de uma matriz em forma de ponta que se move num plano X-Y (Figura 5.4). Da mesma maneira que um confeitiro enfeita um bolo usando um saco de confeitaria, a matriz de extrusão controlada deposita filetes de material muito finos sobre a plataforma de construção, formando a primeira camada do componente. A plataforma é mantida sob uma temperatura inferior à do material, de forma que a resina termoplástica endurece rapidamente. Após esse endurecimento a plataforma se abaixa ligeiramente e a matriz de extrusão deposita uma segunda camada sobre a primeira. **Vantagens:** O processo de FDM pode construir modelos a partir de plásticos como ABS que são leves e fortes, mas relativamente quebradiços. Filamentos coloridos podem ser aplicados. Estão disponíveis materiais como elastômeros e policarbonatos. Geralmente, não precisa de uma segunda operação. **Desvantagens:** Muitas formas requerem a construção de superfícies que precisam ser quebrados causando estragos ao modelo. O processo é limitado a polímeros termoplásticos.

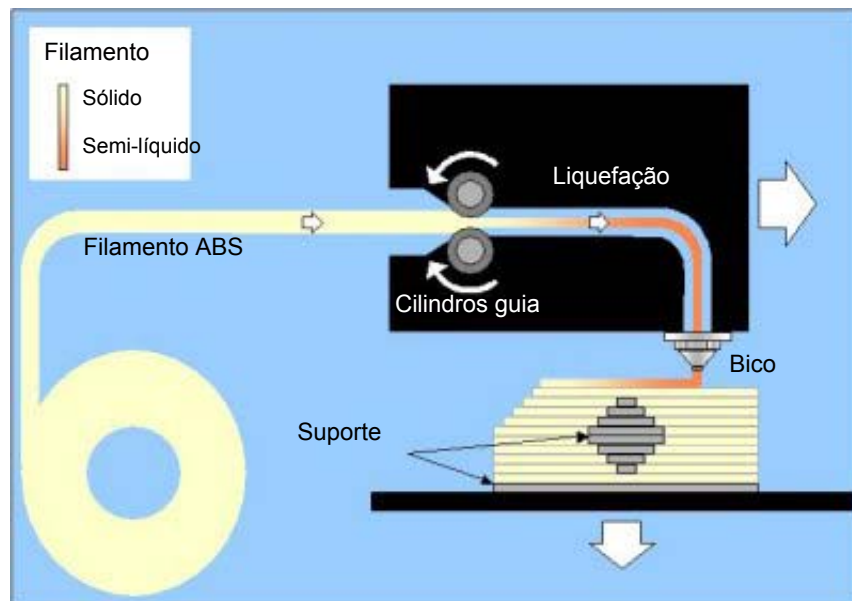


Figura. 5.4 – FDM – Diagrama esquemático (Manufacturing Engineering Centre, 2003)

5.3.5 – Cura Sólida na Base (SGC)

Do termo em inglês, *Solid Ground Curing*. Para **Gorni** (2003) este processo é bastante similar a estereolitografia, pois ambos usam radiação ultravioleta para endurecer, de forma seletiva, polímeros fotossensíveis. Contudo, este processo cura uma camada inteira de uma vez (Figura 5.5). A resina foto-sensível é borrifada sobre a plataforma de construção. A seguir, a máquina gera uma foto-máscara correspondente à camada a ser gerada. Esta foto-máscara é impressa sobre uma placa de vidro. A seguir a máscara é exposta à radiação ultravioleta, a qual passa apenas através das porções transparentes da máscara, endurecendo seletivamente as porções desejadas de polímero correspondentes à camada atual. Após a cura da camada, a máquina succiona por vácuo o excesso da resina líquida e borrifa cera em seu lugar para dar suporte ao modelo durante sua construção. **Vantagens:** O processo SGC produz modelos precisos e com bom acabamento superficial. Outro benefício do uso de uma lâmpada ultravioleta é que a resina não requer pós-cura. O processo não precisa de suportes para construir o protótipo. **Desvantagens:** A máquina e os materiais têm custos elevados. Só existe um tipo de polímero disponível.

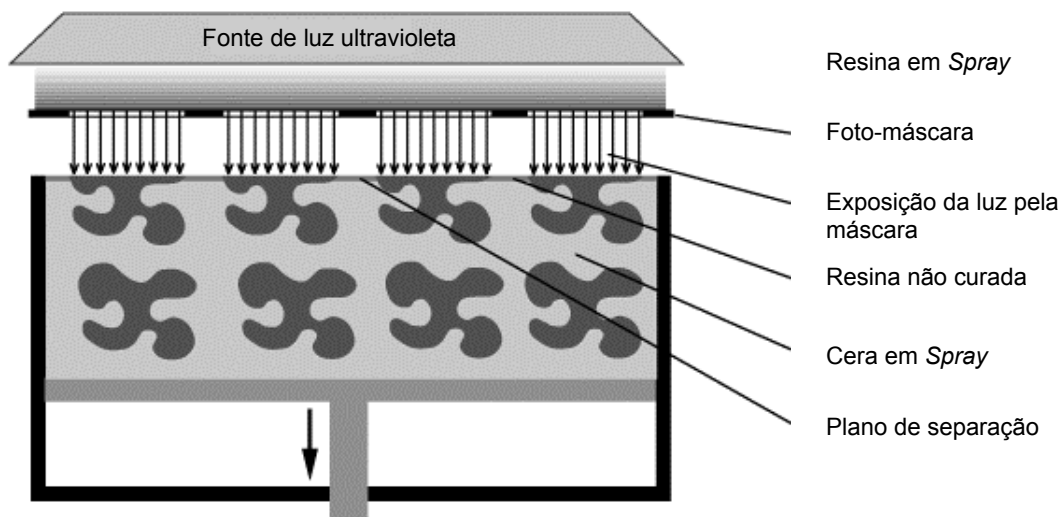


Figura 5.5 – SGC– Diagrama esquemático (Rapid Prototyping Primer, 2003)

5.3.6 – Impressão 3D

Do termo inglês *3D Printing*. Segundo **Cheung** (2001), ao contrário das técnicas expostas anteriormente, esta aqui se refere a uma classe inteira de equipamentos que usam a tecnologia de jato de tinta. Os protótipos são construídos sobre uma plataforma situada num recipiente preenchido com pó a base de gesso ou amido. Um cabeçote de impressão por jato de tinta imprime seletivamente um líquido aglomerante que liga o pó nas áreas desejadas (Figura 5.6). O pó que continua solto permanece na plataforma para dar suporte ao protótipo que vai sendo formado. A plataforma é ligeiramente abaixada, adiciona-se uma nova camada de pó e o processo é repetido (Figura 5.7). **Vantagens:** Alta velocidade de construção do protótipo. O custo do equipamento e de seus materiais é relativamente baixo. Como o processo parte do princípio de uma impressora é possível criar modelos coloridos, como por exemplo protótipos com o rótulo do produto ou uma análise de CAE. Também é possível criar modelos flexíveis com o uso de elastômero. **Desvantagens:** Pequenas peças não apresentam uma boa definição devido às tolerâncias grosseiras do processo. Os protótipos oferecem baixa resistência.

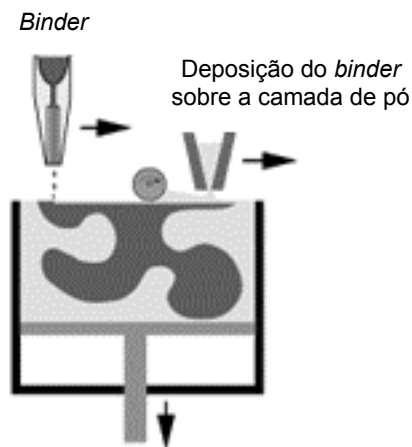
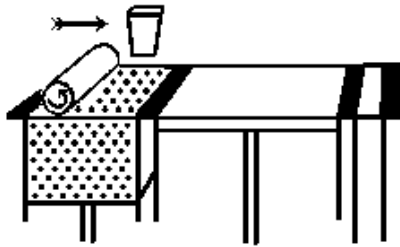
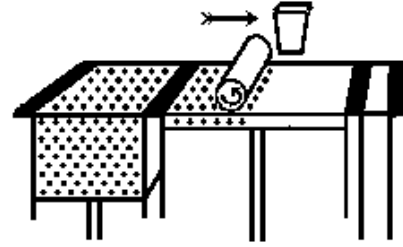


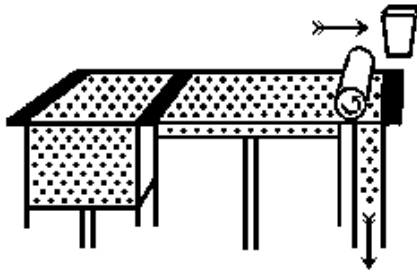
Figura 5.6 – Impressora 3D – Diagrama esquemático (*Rapid Prototyping Primer*, 2003)



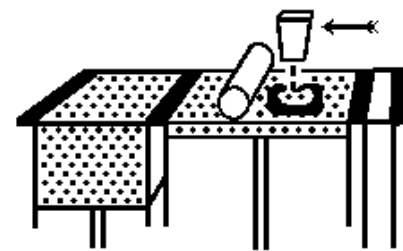
Passo 1: Retirar material em pó da caixa de alimentação



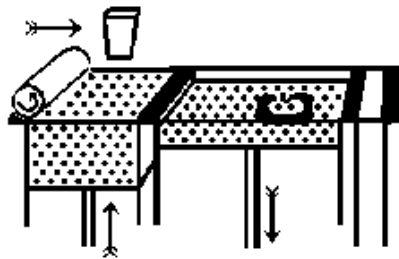
Passo 2: Espalhar material em pó na plataforma de construção



Passo 3: Remover material em excesso



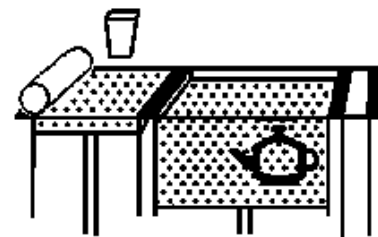
Passo 4: Aplicação de adesivo pela cabeça de impressão



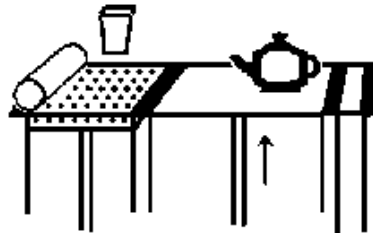
Passo 5: Plataforma de alimentação sobe;
Plataforma de construção desce



Repetição de passos 1 a
5 até final da construção



Passo 6: Construção completa



Passo 7: Remoção de pó em excesso - final do processo

Figura 5.7 – Impressora 3D – Diagrama esquemático (Tecad, 2003)

5.3.7 – Conformação Próxima ao Formato Final via Laser (LENS)

Do termo em inglês *Laser Engineered Net Shaping*. Segundo **Gorni** (2003) este processo apresenta a vantagem de produzir protótipos de metal plenamente densos, com boas propriedades metalúrgicas e sob velocidades razoáveis de construção. Aqui um gerador de raio *laser* de alta potência é usado para fundir pó metálico fornecido coaxialmente ao foco do raio *laser*, através de um cabeçote de deposição (Figura 5.8). O raio *laser* passa através do centro do cabeçote e é focado para um pequeno ponto através de uma lente ou conjunto e lentes. Uma mesa X-Y é movida por varredura de forma a gerar cada camada do objeto. O raio *laser* pode ser conduzido até a área de trabalho através de espelhos ou fibra ótica. **Vantagens:** É o único processo comercial disponível que produz protótipos de metal 100% densos sem a necessidade de pós-sinterização. Diversas ligas metálicas podem ser utilizadas neste processo, tais como aço inoxidável, inconel, cobre, alumínio e titânio. **Desvantagens:** O acabamento superficial não é muito bom quando comparado aos outros processos. Frequentemente, uma posterior operação de usinagem é necessária.

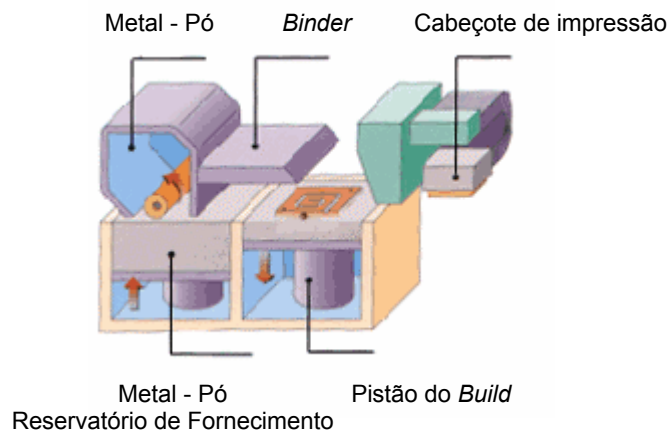


Figura 5.8 – LENS – Diagrama esquemático (Prometal, 2003)

Capítulo 6

Estudos de Casos

6.1 – Metodologia aplicada

O método proposto neste estudo visa a reconstrução de modelos físicos a partir de digitalizações. O enfoque é estabelecer procedimentos bem definidos para que o resultado final do modelo CAD seja de fácil manipulação e no menor espaço de tempo possível.

A digitalização gera uma malha triangular que é utilizada na reconstrução do modelo CAD 3D de superfícies.

Basicamente, o **método aqui proposto resume-se em criar superfícies que possam ser facilmente modificadas e corrigidas**. Este processo de criação do modelo CAD abrange as etapas descritas a seguir:

- dividir o modelo em superfícies conhecidas (padrões);
- extrair informações dimensionais da referência (digitalização);
- integrar as superfícies entre si;
- comparar as superfícies modeladas (CAD) com a informação obtida do modelo físico (digitalização);
- corrigir erros dimensionais das superfícies;
- corrigir superfícies amassadas.

A seqüência de trabalho será desenvolver primeiramente a malha triangular (através de digitalização por faixa de *laser*) e em seguida a reconstrução do modelo CAD (através de cortes e comparações com a digitalização).

6.2 – Recursos utilizados

6.2.1 – Equipamento de digitalização utilizado

O equipamento de digitalização escolhido (Figura 6.1) para os estudos de caso é o sistema de digitalização a *laser* **Model Maker** ⁵.



Figura 6.1 – Model Maker - Equipamento utilizado no estudo de caso

Este equipamento tem como princípio de operação a triangulação. É composto de um braço articulado (Cimcore) e três diferentes tipos de sensores a *laser*, dependendo do tamanho da peça a ser digitalizada.

Também é possível digitalizar peças de grandes dimensões com alta precisão. Isto porque a digitalização pode ser executada até um certo ponto e, com base em referências, o equipamento pode ser deslocado para continuar a digitalização a partir de uma nova posição.

⁵ O sistema Model Maker é desenvolvido pela empresa britânica 3D Scanners e comercializado no Brasil pela SEACAM Comércio e Serviços Ltda.

Alguns tipos de imperfeições do modelo físico como *lacunas* e descontinuidades, podem ser eliminadas já na etapa da digitalização. O software do Model Maker possui ferramentas para suavização dos dados, preenchimento de *lacunas* e alívio da quantidade de pontos.

6.2.2 – Software de modelo CAD 3D utilizado

Para a **reconstrução do modelo CAD 3D**, optou-se por uma combinação entre o software CopyCAD e o software PowerSHAPE da empresa britânica Delcam.

O CopyCAD foi escolhido para extrair informações da digitalização e para executar a comparação entre o modelo reconstruído e o modelo digitalizado. A variação dimensional é representada por um gráfico de cores de fácil identificação.

O PowerSHAPE foi escolhido para a construção das superfícies. Aqui, é possível criar superfícies com base nos cortes da digitalização, desamassar superfícies e fazer modificações de maneira simples.

Para a **construção de superfície Classe A** ⁶ o software utilizado é o Alias. Com diversos recursos de aperfeiçoamento de curvas, ele pode construir superfícies lisas e suaves. Também possui diversas ferramentas para a análise da suavidade da superfície. Ideal para criação de modelos automobilísticos.

6.3 – Modelo Proposto para a reconstrução do modelo CAD

6.3.1 – Definição dos padrões

Dividir o modelo físico em superfícies conhecidas ou padrões significa **planejar a sua reconstrução**. Isto é, analisar cada forma do modelo e comparar com padrões bem definidos. Para cada padrão tem-se uma maneira de construção pré-definida, incluindo curvas e informações necessárias para criar a superfície.

⁶ Superfície Classe A é um termo utilizado para designar superfícies de alta qualidade, vide página 70.

As entidades que formam uma superfície serão definidas como: laterais, longitudinais, espinha e pontos. As **laterais** são as curvas principais de uma superfície e as **longitudinais** as curvas que fazem a união entre laterais. A **espinha** é o caminho guia e pode ou não existir. Qualquer uma das curvas descrita acima é formada por **pontos** unidos entre si.

Os padrões de superfície definidos para este estudo são: revolução, extrusão, espinha, migração, malha e formas básicas.

1. *Superfície de revolução*: A superfície por revolução (Figura 6.2) consiste em uma curva que revoluciona em torno de um eixo determinado. A varredura desta superfície pode chegar até 360 graus. Para a criação desta entidade são necessárias as seguintes informações: curva de revolução, eixo de rotação e ângulo de varredura.

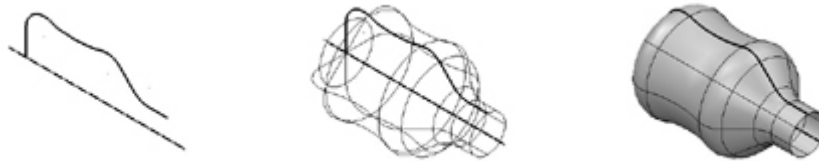


Figura 6.2 – Superfície de revolução

2. *Superfície de extrusão*: É uma superfície determinada por paredes a partir de uma curva (Figura 6.3). Esta superfície necessita de definição de altura e inclinação para as paredes, além da curva inicialmente proposta.

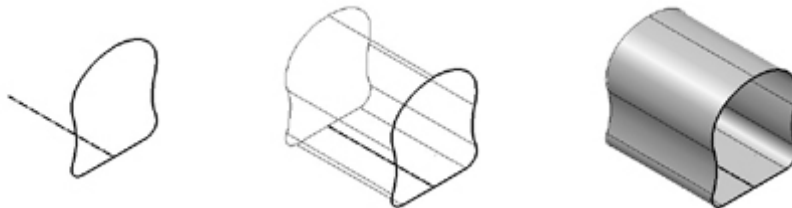


Figura 6.3 – Superfície de extrusão

3. *Superfície de espinha*: A superfície por espinha (Figura 6.4) consiste em um ou mais perfis que percorrem um caminho definido. Para a criação desta entidade são necessárias as seguintes informações: curva(s) do(s) perfil(is) e curva do caminho definido.

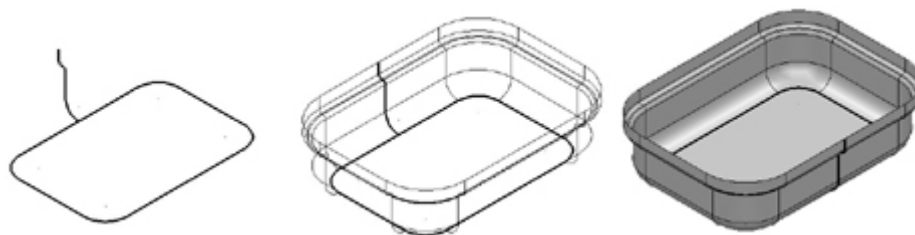


Figura 6.4 – Superfície de espinha

4. *Superfície de migração*: Esta superfície consiste na união de várias curvas espaçadas entre si em um único sentido (Figura 6.5), ou seja, no sentido das laterais (curvas principais da superfície). Estas curvas podem ser abertas ou fechadas, porém recomenda-se que todas tenham a mesma quantidade de pontos.



Figura 6.5 – Superfície de migração

5. *Superfície de malha ou rede*: Para esta superfície são necessárias quatro curvas (no mínimo) que se fechem formando uma malha (Figura 6.6). Quatro curvas (no mínimo) significa duas curvas para o sentido das laterais e duas para as longitudinais. Ou seja, forma-se uma rede com as curvas propostas. Este é o principal tipo de superfície utilizada na Engenharia Reversa.

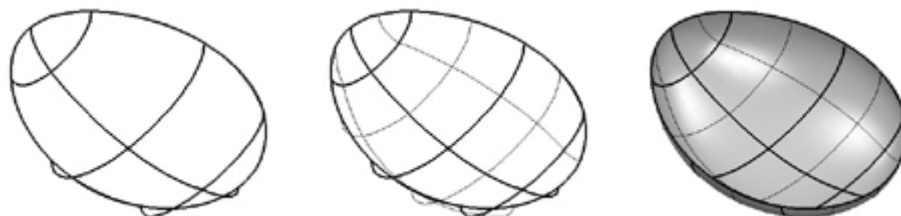


Figura 6.6 – Superfície de malha ou rede

6. *Superfície de formas básicas*: São as superfícies de formas geométricas básicas como esfera, plano, cubo, cilindro, cone, toróide, etc. Estas são entidades simples e sua

utilização agiliza a criação do modelo CAD 3D. O tipo de informação necessária aqui varia entre raio, altura, largura e etc.

6.3.2 – Extrair informações dimensionais da digitalização

Uma vez planejada a criação das superfícies, é necessário extrair informações dimensionais da referência (digitalização) para a confecção do modelo CAD 3D. Como foi dito, para cada tipo de superfície são exigidas determinadas informações como curvas de base, alturas, ângulos, etc. Estas informações podem ser extraídas da digitalização através de cortes. Os cortes podem ser utilizados diretamente ou servir apenas de referência para a construção de uma nova curva com menos imperfeições.

6.3.3 – Integrar as superfícies entre si

Um modelo CAD 3D é um composto de várias superfícies que são limitadas umas com as outras para formar o modelo total. Limitar é o mesmo que recortar uma entidade. O resultado do recorte pode ser um canto-vivo ou um acabamento com raio de concordância. A informação das dimensões dos raios de acabamento também pode ser obtidas através de cortes.

6.3.4 – Comparar as superfícies com a referência

Uma vez que a superfície é criada em um software de CAD pode-se comparar o modelo 3D com a digitalização. A digitalização é a referência dimensional do objeto físico. Comparar o modelo significa identificar as regiões que não estão de acordo com a digitalização identificando-as por um mapa de cores.

A variação da cor indica se o modelo está acima da dimensão ou abaixo dela e a localização exata do erro. Com este diagnóstico é possível decidir por outro tipo de superfície ou simplesmente corrigir a existente.

6.3.5 – Corrigir erros dimensionais das superfícies

Para corrigir uma região com erro dimensional pode-se optar por dois caminhos: ou constrói-se um outro tipo de superfície ou corrige-se a superfície atual. Corrigir o modelo atual é a opção mais comum e para isso normalmente acrescentar-se curvas internas na superfície (laterais ou longitudinais). Estas novas curvas podem ser ajustadas, ou seja, ter seus pontos arrastados para a dimensão conforme cortes extraídos da digitalização.

Deve-se lembrar que no processo de Engenharia Reversa raramente uma superfície é criada com as dimensões corretas na primeira tentativa. Portanto, **criar superfícies que possam ser corrigidas facilmente é o primeiro passo crucial para uma reconstrução de superfícies eficientes.**

Isso ocorre porque os modelos físicos muitas vezes são irregulares. Ao criar uma superfície padrão, esta não possui as imperfeições do modelo. É conveniente acrescentar as irregularidades aos poucos, pois existem situações em que elas não são desejadas.

6.3.6 – Corrigir superfícies amassadas

Esta é a última etapa do método proposto e consiste em eliminar deformações de superfícies criadas durante a reconstrução das superfícies. Ao planejar a reconstrução de superfícies deve-se levar em conta que o modelo criado pode apresentar defeitos que não existem no modelo físico original. Por exemplo, ao criar uma superfície, se as curvas forem incoerentes (curvas vizinhas com uma maior do que a outra) o resultado será uma superfície defeituosa.

Regiões amassadas representam um problema muito comum na Engenharia Reversa. Ele ocorre principalmente em regiões complexas. Para corrigir esta anormalidade a principal estratégia é construir curvas com o dobro de pontos necessários ⁷. Após a conclusão da superfície **deve-se eliminar as curvas intermediárias e deixar as tangências da superfície livres** (ou seja, deixá-las o mais suave possível).

⁷ A quantidade de pontos necessária em uma curva é definida de acordo com a tolerância de trabalho proposta.

6.4 – Estudo de Caso I: Duplicação de modelo existente – Moldes

A Engenharia Reversa é muito utilizada na duplicação de modelos existentes. Este estudo de caso visa ilustrar a aplicação na indústria mecânica na área produtiva. Esta é uma necessidade típica para moldes que devido a sua utilização apresentam desgastes crescentes que inviabilizam seu uso e devem ser substituídos, ou moldes que já existem e que para produzir mais peças, necessitam ter seus moldes duplicados.

Na duplicação de um molde o principal objetivo da Engenharia Reversa é **manter fidelidade dimensional**. Muitos ajustes manuais são executados durante a vida de um molde. Essas modificações podem ser ajustes simples visando melhorias no processo produtivo. Porém, na maioria dos casos dependem de tentativas e erros para ajustar o processo e serem aprovadas. Por essa razão, a atualização do desenho do molde, seja em papel ou em CAD 3D, é um processo difícil de se manter atualizado.

Quando a ferramenta precisa ser substituída, seja por estar danificada ou pela necessidade de duplicá-la para aumentar a produção, a única informação confiável sobre seu conteúdo dimensional é o próprio molde.

Nesta aplicação, o processo de reconstrução das superfícies não exige curvaturas perfeitas, lisas e suaves. O motivo é que nem sempre o produto como foi concebido é a melhor geometria para sua fabricação. É muito importante evitar que os ajustes feitos no molde durante sua vida para auxiliar sua manufatura sejam refeitos mais uma vez. Por isso, a necessidade primordial de copiá-lo exatamente como ele é. Apesar do modelo nem sempre ser liso, não se deve acrescentar imperfeições geométricas, como por exemplo, reconstruir superfícies com formas amassadas em regiões que são originalmente lisas.

O modelo escolhido para este estudo de caso é um molde ilustrativo para fabricação de componentes estampados para uma porta de automóvel.

6.4.1 – Digitalização do modelo

Na etapa de **digitalização a laser**, tem-se como objetivo a captura de uma nuvem de pontos e posterior criação da malha triangular. A figura 6.7 mostra o resultado final de uma digitalização de regiões de um molde para porta automotiva.

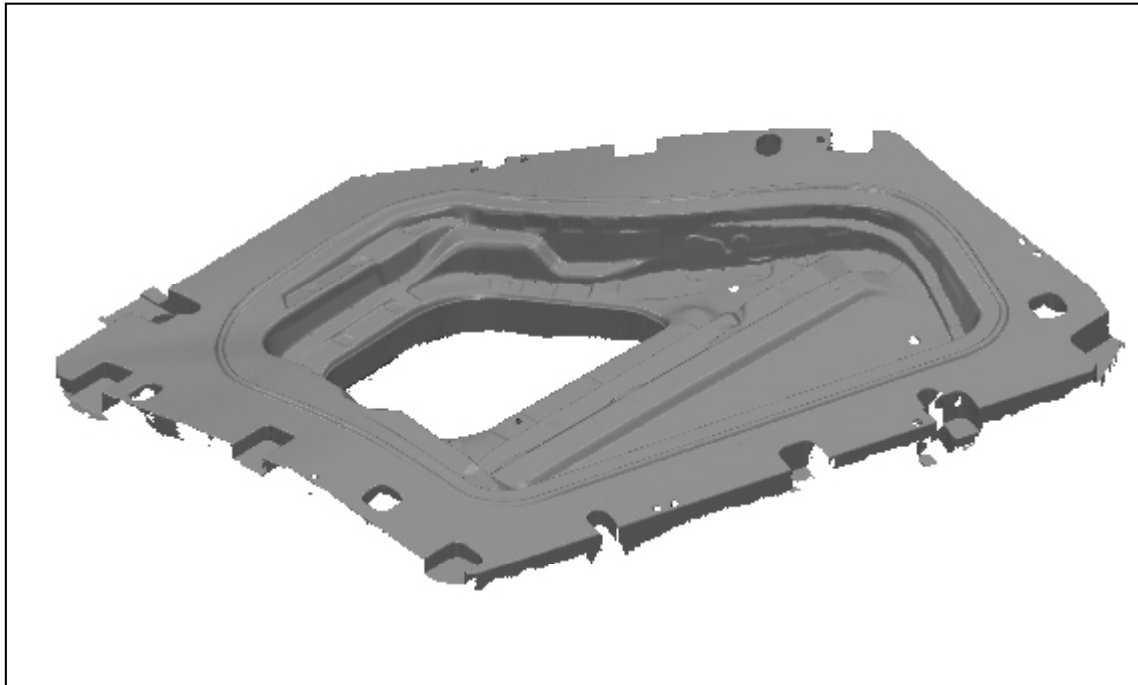


Figura 6.7 – Exemplo ilustrativo de regiões digitalizadas de um molde de estampo para porta de automóvel

O processo completo de digitalização será dividido nos seguintes tópicos: cuidados e condições de trabalho, o que deve ser digitalizado, fixação da peça e do equipamento, captura de dados, tratamento dos dados e exportação de arquivos. Cada um destes tópicos será abordado a seguir:

6.4.1.1 – Cuidados e condições de trabalho

Para digitalizar um molde, alguns cuidados especiais são necessários. Este procedimento visa minimizar erros, como por exemplo, a movimentação da peça e a introdução de geometrias inexistentes no modelo. Segue abaixo alguns cuidados a serem observados (Figura 6.8) :

- **Desempeno:** O molde deve ser colocado sobre um desempeno. A preocupação aqui é com a movimentação da peça. O modelo físico não pode ser movimentado durante uma captura de pontos. Isto porque, a digitalização captura uma nuvem de pontos. Se a peça mexe, a nuvem não mudou de lugar e o resultado passa a ser uma peça maior ou menor do que a original. O desempeno é o lugar com menor possibilidade de movimentação, devido a sua própria concepção.



Apoiar molde sobre desempeno



Aplicar pó para evitar a reflexão da luz



Excesso de óleo deve ser removido

Figura 6.8 – Cuidados com a digitalização

- **Reflexão da peça:** Na digitalização a *laser*, uma luz incide sobre a peça, definindo a partir daí uma informação tridimensional referente à geometria do modelo. Contudo, o metal polido pode criar reflexos indesejados, mascarando a informação correta. Por isso, costuma-se “pintar” a peça com um pó branco, deixando a superfície fosca. Este pó é o mesmo utilizado em ensaios não-destrutivos para verificação de trincas. Como o pó é muito fino, ele é o ideal, pois assim não irá interferir na forma dimensional do modelo.

- **Limpeza da peça:** O molde deve estar limpo, sem óleo e isento de cavacos ou qualquer outro tipo de irregularidade. O motivo é bastante simples, se existir qualquer tipo de sujeira sobre a peça, esta será digitalizada. O óleo também não é favorável à digitalização. Como foi visto, em uma peça metálica é preciso “pintar” o modelo com pó e o óleo absorve este pó, causando problemas de reflexão.

6.4.1.2 – Regiões a serem digitalizadas

A digitalização do molde não deve limitar-se apenas ao produto. Para a reprodução do molde também se deve ter referências (Figura 6.9) que facilitem o seu posicionamento durante o processo de usinagem. O desempenho também é uma referência importante que pode auxiliar em verificações futuras. Portanto, resumidamente, os itens a serem digitalizados são:

- **Produto:** É a região do molde que forma o produto. A digitalização desta região pode ser total ou parcial. Uma digitalização total normalmente ocorre quando o modelo será copiado por inteiro. Já as digitalizações parciais ocorrem quando uma alteração de produto será implementada. Nestes casos aconselha-se digitalizar além das regiões envolvidas na alteração para que existam regiões digitalizadas que possam auxiliar em um posicionamento futuro.
- **Referências:** As referências são regiões planas ou furos. Placas-guia, planos de fechamento e paredes laterais são alguns exemplos de referências que devem ser capturadas durante a digitalização. Se o objetivo da duplicação é refazer a geometria sobre o próprio molde, essas referências podem ser utilizadas para posicionar o modelo CAD 3D no mesmo modelo físico.
- **Desempeno:** Também é interessante capturar a informação da mesa do desempenho. Estes dados servem para posicionar o modelo no eixo Z, assim como conferir se o modelo está empenado. Para isso, basta comparar planos verticais e horizontais do molde com o plano do desempenho e verificar o paralelismo e a perpendicularidade.

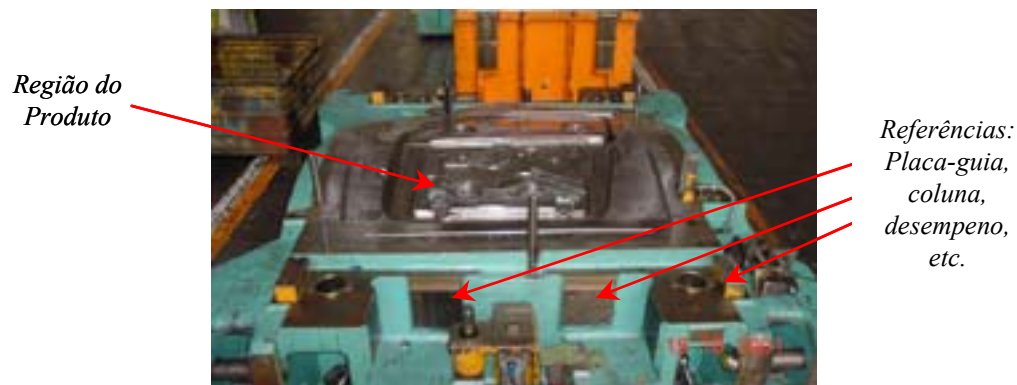


Figura 6.9 – Regiões a serem digitalizadas

6.4.1.3 – Fixação do molde e do equipamento

O **molde** normalmente é apenas apoiado no desempeno, sem necessidade de fixação devido ao seu peso próprio. Caso haja movimentação da peça pode-se utilizar bases magnéticas ou grampos para fixá-la sobre a mesa.

O **equipamento** pode ser fixado de duas maneiras: através de base magnética ou sobre um tripé. O tripé é utilizado para peças muito grandes ou quando não possuem locais para fixação no próprio molde ou no desempeno.

6.4.1.4 – Captura de dados

O processo de digitalização consiste em capturar pontos como se estivesse “pintando” a peça. Isso significa que se alguma região não for “pintada” a sua informação não existirá na nuvem de pontos.

Assim como na pintura, também existirão regiões “pintadas” mais de uma vez. Na digitalização não há problema do modelo possuir dados redundantes pois estes serão eliminados na etapa de tratamento da digitalização.

Peças de grandes dimensões necessitam do procedimento de **montagem**. Isso significa que o equipamento pode digitalizar a peça até um determinado ponto. Para completar a

digitalização, o modelo deve ser referenciado e assim o equipamento pode mudar de posição e continuar a captura de dados.

A montagem mais comum utiliza três pontos como referência. Os mesmos três pontos são assumidos antes e depois da movimentação do equipamento, possibilitando com estas informações fazer a montagem final.

6.4.1.5 – Tratamento de dados

A digitalização até aqui consistiu apenas na captura de dados. O **tratamento** consiste em deixar os dados disponíveis para o modelo CAD 3D na melhor condição possível. Isto significa eliminar pontos redundantes, preencher lacunas, minimizar a densidade da malha, etc. Segue abaixo os principais tipos de recursos utilizados durante o tratamento de uma digitalização:

- ***Eliminar pontos redundantes:*** Com a captura de pontos os dados coletados formam uma nuvem de pontos sendo, muitos deles redundantes. Isso ocorre porque o *laser* pode passar mais de uma vez no mesmo lugar. Uma das primeiras etapas do tratamento da digitalização é calcular uma malha única que elimine estes pontos. Esta malha normalmente é bastante densa e pode apresentar *lacunas* ou outros tipos de falhas que serão corrigidos nas etapas seguintes.
- ***Preencher lacunas:*** na digitalização podem existir regiões onde o *laser* não conseguiu atingir: por exemplo furos (Figura 6.10). Na reconstrução do modelo CAD 3D, muitas vezes estes furos não são necessários. Por isso, estes furos devem ser eliminados para facilitar a criação do modelo CAD. Para preencher os lacunas basta selecionar pontos da periferia dos furos e executar uma interpolação⁸ entre eles. Outra situação em que os pontos não são pegos: quando existe óleo no modelo físico e a reflexão do *laser* não foi possível. Outro caso ainda é quando a região a ser digitalizada é muito funda e o *laser* não foi projetado.

⁸ Dependendo do software utilizado a estratégia de interpolação pode variar.

- ***Alisar regiões irregulares:*** Este processo consiste em suavizar regiões com pequenas variações. Normalmente as regiões planas de grande extensão apresentam pequenas variações na sua planicidade. Elas podem ocorrer devido a pequenos desgastes, batidas, etc., contudo, sabe-se que são regiões bem comportadas (na maioria das vezes planas). Para evitar que essas regiões formem arquivos muito pesados, ou que essa variação gere dúvidas, pode-se optar por alisar as regiões irregulares. O resultado é uma malha com uma variação mais suave entre os pontos (Figura 6.11).
- ***Reduzir a densidade da malha:*** A malha gerada na primeira fase tem como objetivo uma nuvem de pontos única, porém com a maior quantidade de informação possível. Isso porque para tampar lacunas ou suavizar regiões é preciso ter informações suficientes para preencher as áreas ou fazer uma melhor média na suavização. Depois que estes tratamentos foram executados, pode-se gerar uma malha mais leve e de fácil manipulação. Para isso, gera-se uma nova malha com uma tolerância um pouco mais aberta (Figura 6.12).
- ***Montagem da digitalização:*** O equipamento de digitalização pode fazer a captura dos pontos até o limite de sua extensão (em torno de 1,2 m). Em modelos muito grandes é necessário a tomada de pontos a partir de várias posições. Cada região é assumida até atingir seu limite e então alguns pontos são reservados como referências. O equipamento é movimentado para uma nova posição e esses mesmos pontos são novamente capturados. Assim, cada região digitalizada terá suas referências que servirão como base para a montagem final da malha (Figura 6.13).

6.4.1.6 – Exportar dados: cortes ou malha triangular

O resultado final da digitalização pode ser uma malha triangular ou cortes (Figura 6.14). A malha triangular pode ser exportada como um arquivo do tipo STL. Os cortes da digitalização podem ser em x,y ou z ou radial e podem ser exportados em IGES ou DXF.

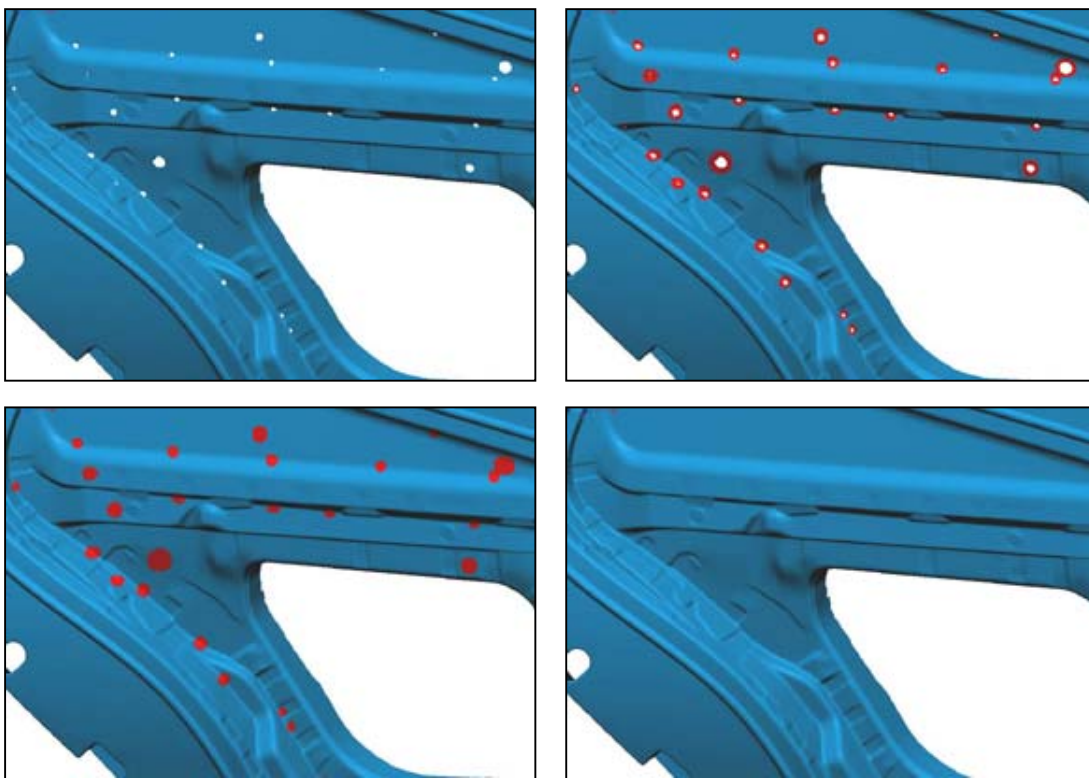


Figura 6.10 – Preenchimento de “gaps”

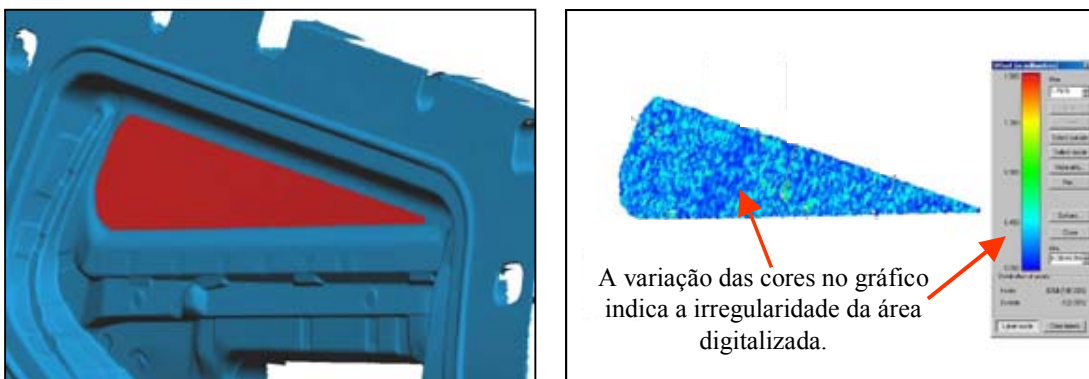


Figura 6.11 – Suavização de regiões irregulares

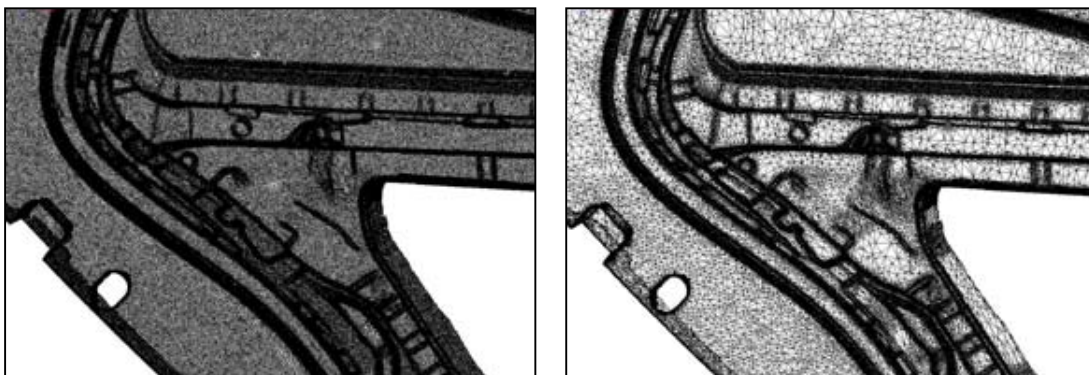


Figura 6.12 – Redução da densidade da malha

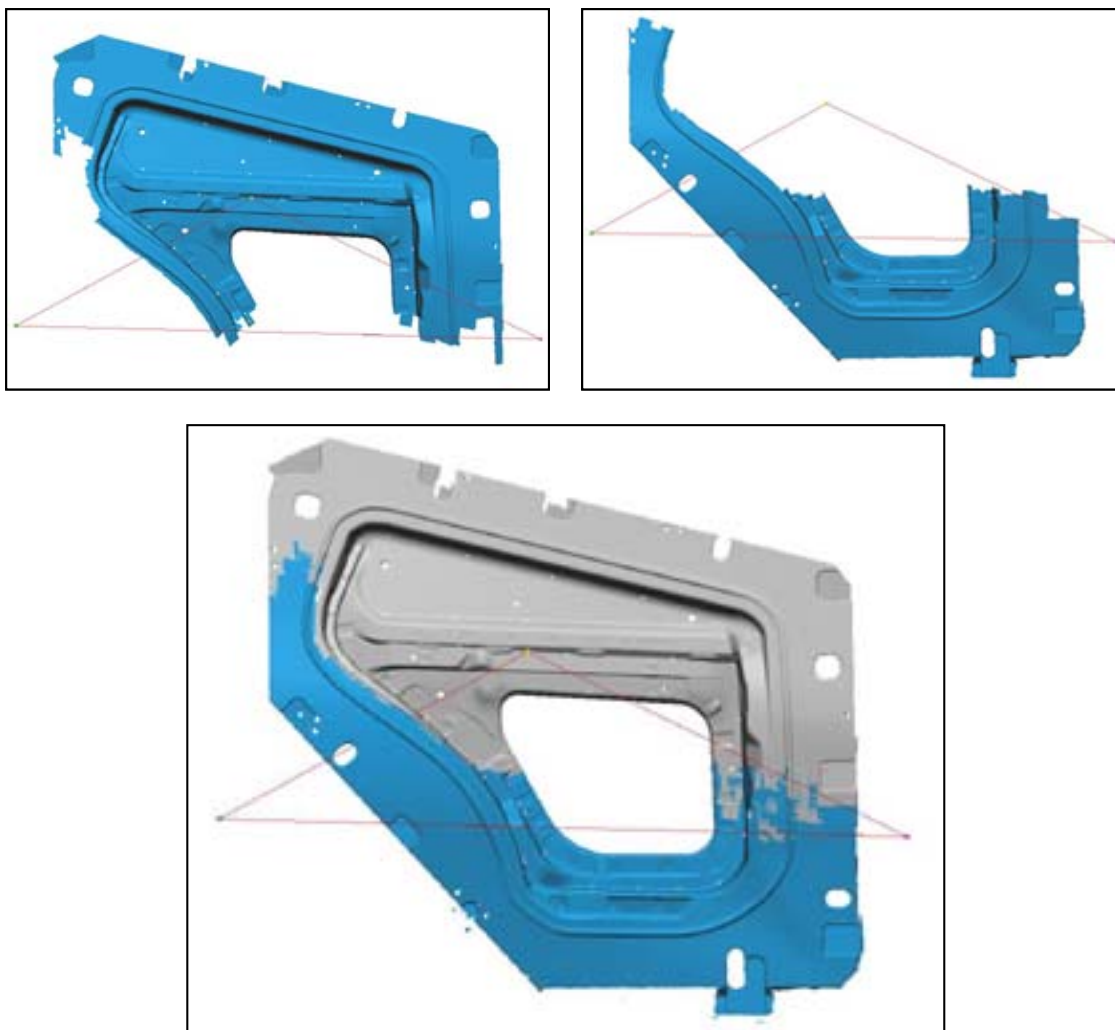


Figura 6.13– Montagem de digitalização: 3 pontos são usados como referências para posicionar a digitalização

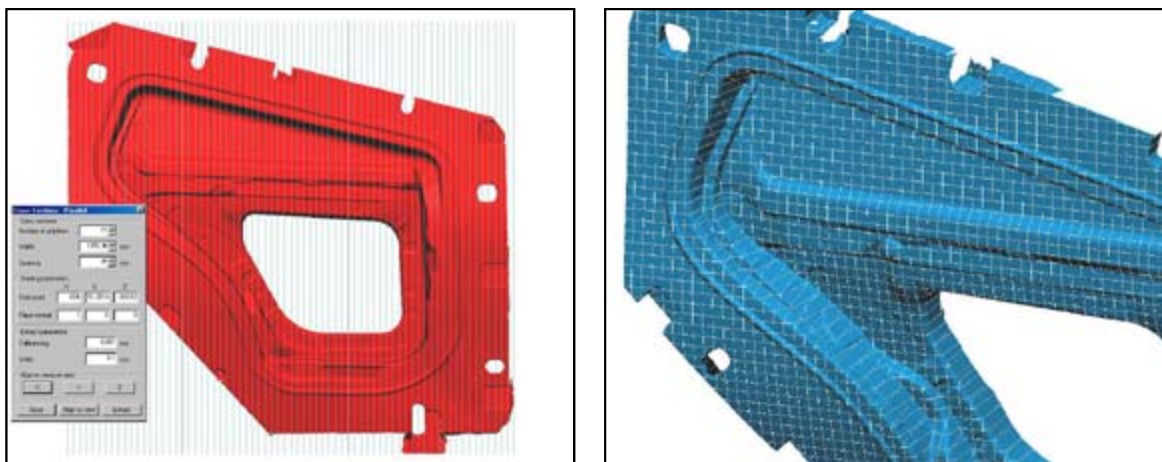


Figura 6.14 – Arquivo de saída da digitalização: Malha triangular (STL) ou cortes (IGES ou DXF)

6.4.2 – Criação do modelo CAD 3D

Na etapa de **criação do modelo CAD 3D**, tem-se como objetivo a reconstrução das superfícies que formam o modelo físico.

Como a maior parte dos moldes para duplicação apresenta regiões irregulares que devem ser mantidas (fidelidade dimensional), a técnica proposta para estes casos é a reconstrução por cortes. Aqui, serão gerados cortes no modelo digitalizado e esses cortes serão utilizados como referência para a criação da nova superfície.

6.4.2.1 – Reconstrução do modelo CAD 3D por cortes

Na reconstrução de modelo CAD 3D por cortes são aplicadas algumas particularidades:

- *Os cortes devem ser homogêneos:* Ao escolher os cortes para uma determinada região eles devem ter aproximadamente o mesmo tamanho, ou seja, começar e terminar nos mesmos limites. Este é um cuidado necessário para evitar o aparecimento de regiões amassadas na superfície.
- *Os cortes devem ter o mesmo número de pontos:* Para construir superfícies complexas fiéis e evitar regiões amassadas, cada corte deve ter o mesmo número de pontos. Além disso, os pontos devem ser equidistantes. Isso evita que as curvas de uma superfície sejam unidas de qualquer maneira.
- *Os cortes devem ter o dobro de pontos necessários:* A quantidade mínima de pontos de uma curva é determinada pela tolerância de trabalho pré-estabelecida. O excesso de pontos garante uma maior fidelidade à geometria do modelo, contudo, gera modelos pesados e algumas vezes, amassados. Ao utilizar mais pontos do que o necessário, cria-se uma superfície fiel, porém que apresenta defeitos. Se ao final do processo os pontos intermediários forem eliminados, tem-se uma superfície mais lisa e menos pesada.

Na duplicação de um molde existente é muito importante manter a forma da geometria como ela é. Assim, cada raio de concordância não é exatamente um raio, pois durante sua existência sofreu deformações e alívios de acordo com a necessidade da manufatura ou simplesmente pelo desgaste sofrido com o tempo.

Para gerar um raio assim, fiel à digitalização, utiliza-se a técnica de criar superfície por cortes. Primeiro, isola-se a região que será reconstruída (cortar a malha triangular no tamanho da região a ser modelada). Segundo, cria-se cortes com o mesmo número de pontos. E por último, cria-se a superfície de migração (Figura 6.15).

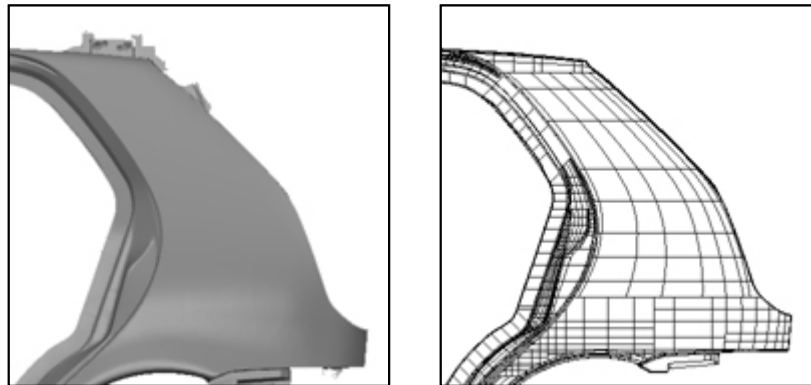


Figura 6.15 – Reconstrução de superfícies por cortes (migração)

Agora, compara-se a superfície construída com o modelo digitalizado. Se o gráfico de cores apresentar a superfície na cor verde, ela está fiel ao modelo da digitalização. Se apresentar manchas vermelhas ou azuis, é porque o modelo apresenta variações dimensionais. O valor do erro dimensional é dado pelo gráfico segundo a escala de cores (Figura 6.16).

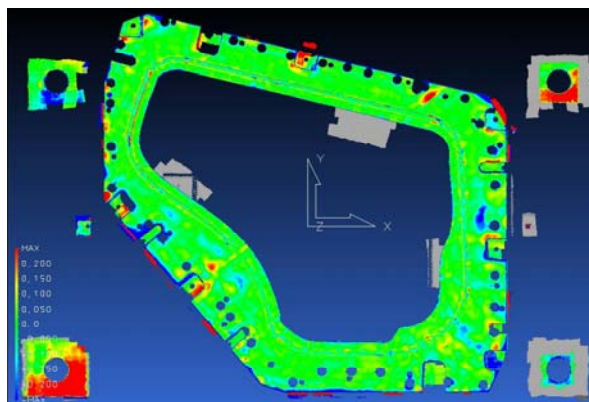


Figura 6.16 – Gráfico de cores: Variação dimensional entre digitalização e modelo CAD 3D

Quando a superfície a ser reconstruída tem a necessidade de ser definida por duas direções de cortes, pode-se utilizar a técnica de reconstrução por superfície de malha perpendicular. O conceito é o mesmo utilizado anteriormente: os cortes devem ser homogêneos e com o mesmo número de pontos. Porém, o modelo é definido por cortes em dois sentidos, perpendiculares entre si (exemplo: cortes paralelos a X e a Y).

A grande vantagem está em criar uma superfície de fácil manipulação. Este fator é muito importante. O grande problema na reconstrução de superfícies é o que fazer quando ela não fica boa. E na maioria dos casos, a superfície não fica boa. Existem dois tipos de correções que podem ser feitas para melhorar o modelo: correção dimensional e correção de qualidade da superfície.

6.4.2.2 – Correção dimensional

A idéia de construir superfícies com cortes perpendiculares é ter um modelo de fácil identificação de erros. Para verificar se a superfície está de acordo, basta verificar se o cruzamento dos cortes confere com o cruzamento das laterais da superfície. Se eles não estiverem na mesma posição basta arrastar a intersecção para o cruzamento dos cortes (Figura 6.17). Este tipo de correção é uma correção dimensional.

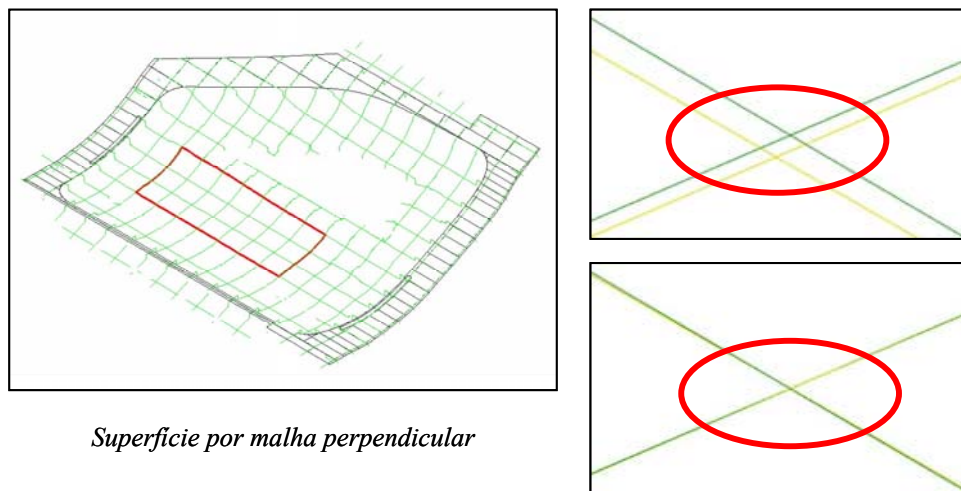


Figura 6.17– Correção dimensional: Arraste da intersecção para o cruzamento dos cortes

Esta é uma correção de fácil execução, basta arrastar os pontos. O que acontece em muitos casos é a falta de planejamento do modelo CAD 3D. Assim, quando as imperfeições aparecem é difícil saber o que fazer para corrigir o modelo. Não há exatamente uma decisão que possa ser tomada e, na maioria dos casos, necessita-se reconstruir totalmente o item errado.

A figura 6.18 mostra uma reconstrução de superfícies por malhas aleatórias. Várias superfícies foram criadas como retalhos para definir com precisão o modelo digitalizado. Este exemplo, mostra um modelo que obteve um resultado satisfatório de Engenharia Reversa. Contudo, quando uma superfície apresenta divergências, seja dimensional ou de qualidade, é necessário a reconstrução completa do item.

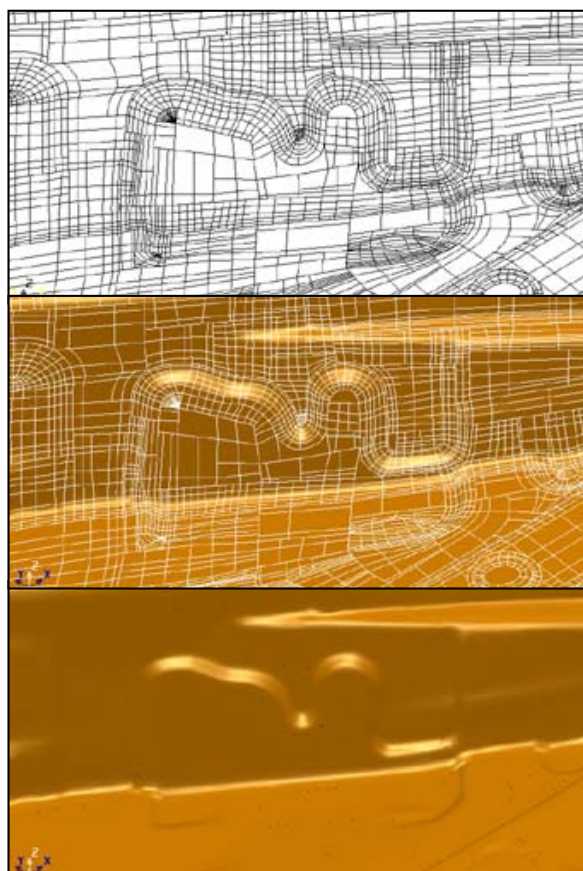


Figura 6.18 – Reconstrução de superfícies por malhas aleatórias

O que se procura neste estudo de caso não é uma solução automática para todos os tipos de modelo. É a criação de um modelo CAD planejado, que pode ser modificado facilmente quando constatado a existência de imperfeições.

6.4.2.3 – Correção da qualidade da superfície

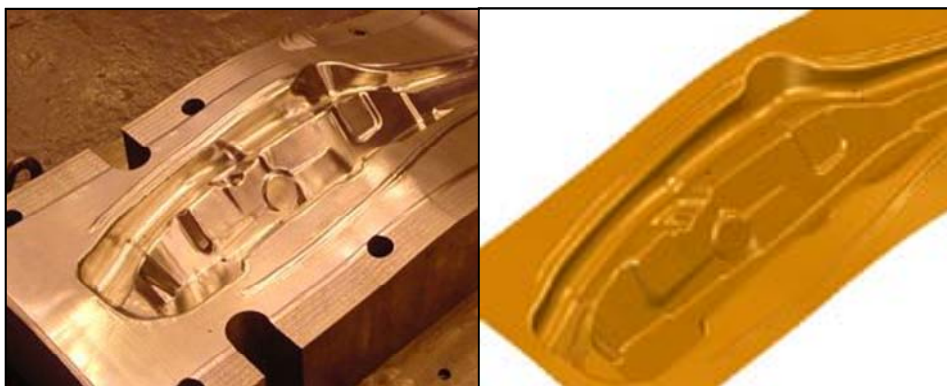
O segundo tipo de irregularidade com a reconstrução de modelo CAD 3D está relacionado com superfícies amassadas. Esta irregularidade depende dos cortes escolhidos para a construção da superfície. Se os cortes não são homogêneos (começam e terminam mantendo um padrão de regularidade) existe uma chance muito grande de que a superfície fique amassada.

Na reconstrução de superfícies é comum aparecerem superfícies amassadas, quando não existe um planejamento adequado. Este problema ocorre porque a decisão de como a superfície será criada é uma decisão a ser tomada e não uma função de software. Antes de criar o modelo, é preciso planejar como fazê-lo.

A figura 6.19 mostra o resultado de um modelo com superfícies amassadas após o processo de Engenharia Reversa. Apesar do molde a ser duplicado apresentar imperfeições, a reconstrução das superfícies gerou mais imperfeições do que as apresentadas pelo modelo original.

Para garantir a **qualidade da superfície** e evitar modelos amassados, a superfície deve apresentar cortes homogêneos. Ou seja, apresentar regularidade entre o início e o fim de todos os cortes. Além disso, as curvas devem apresentar o mesmo número de pontos e, de preferência, equidistantes entre si. Isso evita que as linhas que unem os pontos sejam criadas de qualquer maneira: todas elas passam a ter o mesmo espaçamento entre si. Por último, a curva deve apresentar o dobro de pontos necessários (e ser um número ímpar). Assim, os pontos que causam o “amassado” podem ser eliminados e como a superfície tem mais pontos do que precisa, ao eliminá-los o dimensional do modelo não fica comprometido.

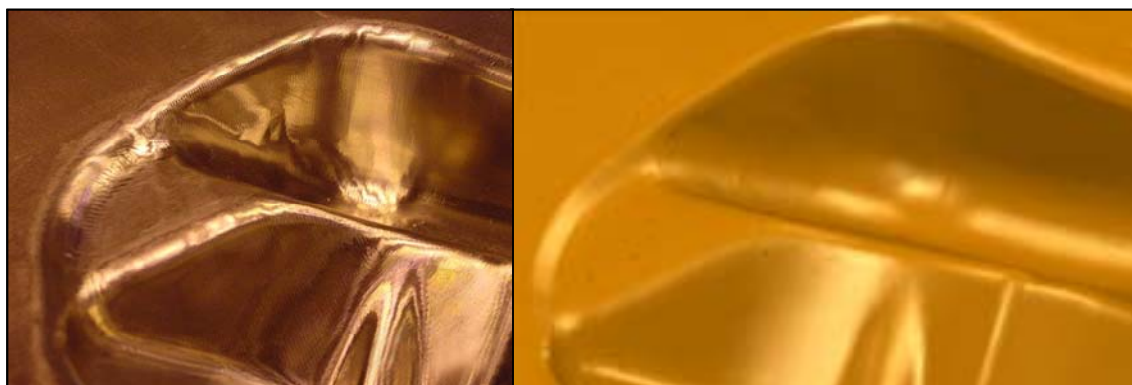
Possuir número de pontos ímpar significa garantir um equilíbrio dentro da superfície. Assim, ao apagar um ponto da esquerda, pode-se fazer o mesmo com o da direita e manter o modelo equilibrado. Apagar um ponto sim e outro não, faz o modelo ser reduzido pela metade sem perder o início e o fim da superfície.



Região do fechamento do molde com imperfeições de qualidade de superfície



Reconstrução de superfície por malha com regiões amassadas



Raios de concordância torcidos

Figura 6.19 – Exemplo de molde com baixa qualidade de superfície (superfícies amassadas)

6.5 – Estudo de Caso II: Criação de Produto –Estilo de Automóvel

A Engenharia Reversa é utilizada como um dos passos iniciais na criação de um novo produto. Nesta aplicação o objetivo principal é dar forma e volume ao produto através de superfícies de altíssima qualidade. Este é um processo bastante comum na criação de novos modelos de automóveis (Figura 6.20). O modelo inicial é criado a partir de um *sketch* que é um desenho preliminar do automóvel. A partir daí, cria-se um modelo físico com as características idealizadas. O modelo físico é digitalizado e então cria-se o modelo CAD 3D do produto.

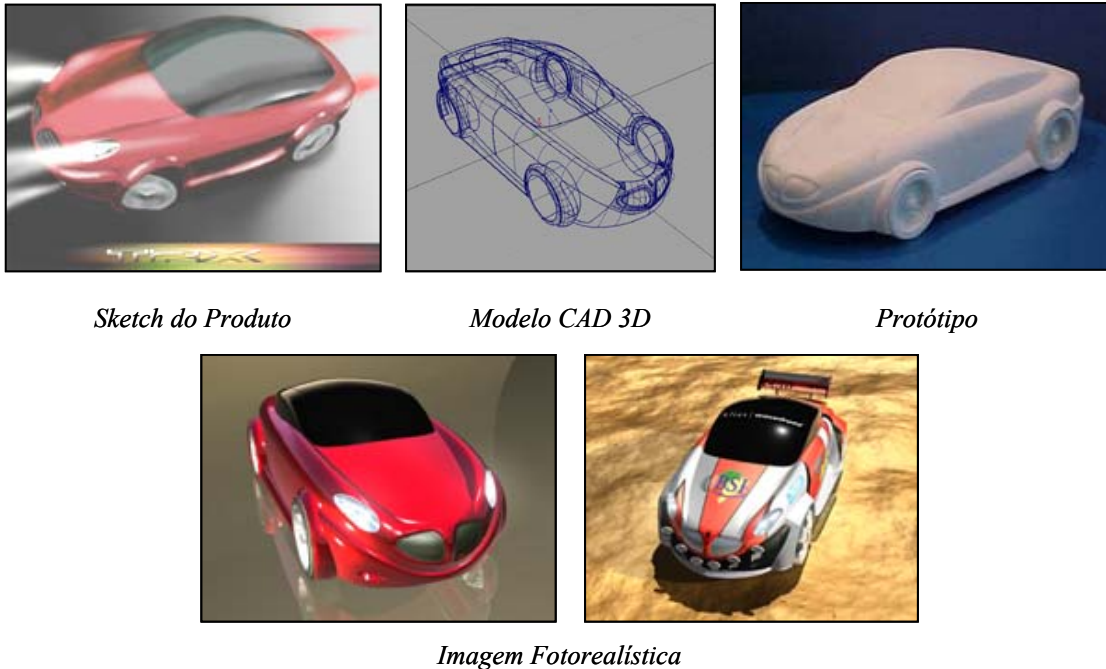


Figura 6.20 – Exemplo de criação de modelo automotivo

6.5.1 – Digitalização a *laser*

O processo de digitalização a *laser* é o mesmo visto no estudo de caso anterior. A única diferença está na finalidade da digitalização. Em uma duplicação de molde existente a dimensão é o fator mais importante. Todas as deformações devem ser copiadas na íntegra. Na criação de um automóvel a finalidade da digitalização é dar volume ao modelo. As curvas serão criadas com alta qualidade e suavidade, e o fator dimensional passa a ter caráter secundário.

Duas particularidades podem ser evidenciadas num processo de digitalização de um automóvel: a referência de origem e a comparação entre as regiões modificadas.

Na maioria dos casos, a digitalização de um automóvel deverá obedecer a uma origem pré-definida (também conhecida como origem 0,0,0 do carro). As referências assumidas durante a digitalização devem então ser suficientes para garantir o seu posicionamento nesta origem.

A segunda particularidade diz respeito às alterações do veículo. Durante o processo de criação, várias alterações são executadas para chegar ao modelo desejado. Essas modificações só podem ser executadas em um veículo existente ou em um protótipo criado para este fim. Muitas vezes, apenas um dos lados do carro (esquerdo ou direito) recebe esta alteração. A outra região não muda e servirá como referência para um melhor posicionamento da digitalização.

6.5.2 – Criação do modelo CAD 3D – Superfície Classe A

Os modelos CAD 3D devem ter superfícies de altíssima qualidade pois geralmente são superfícies externas (como por exemplo, a parte externa de um carro) e qualquer imperfeição fica visível muito facilmente (ressalta-se devido ao brilho da pintura exposta pela luminosidade do dia). Essas superfícies são conhecidas como Classe A. As concordâncias devem ser perfeitas entre si obedecendo a critérios de tangência e curvatura. Em uma passagem de uma curva para outra não deve haver picos ou vales, mesmo que estes sejam muito pequenos. A fidelidade ao dimensional do produto deixa de ser o fator mais importante (desde que conserve a forma e o volume originais).

6.5.3 – Ferramentas de Análise da superfície

Um modelo de reconstrução criado com superfícies Classe A é avaliado conforme sua suavidade de curvas. Uma ferramenta para esta atividade é a análise de curvatura por pintura. Vários tipos de imagens podem ser projetados sobre a superfície para avaliar sua curvatura.

A análise mais comum é a pintura com listas projetadas (Figura 6.21). Faixas pretas mescladas com faixas brancas indicam a irregularidade de curvatura quando estas faixas aparecem descontínuas sobre a superfície.

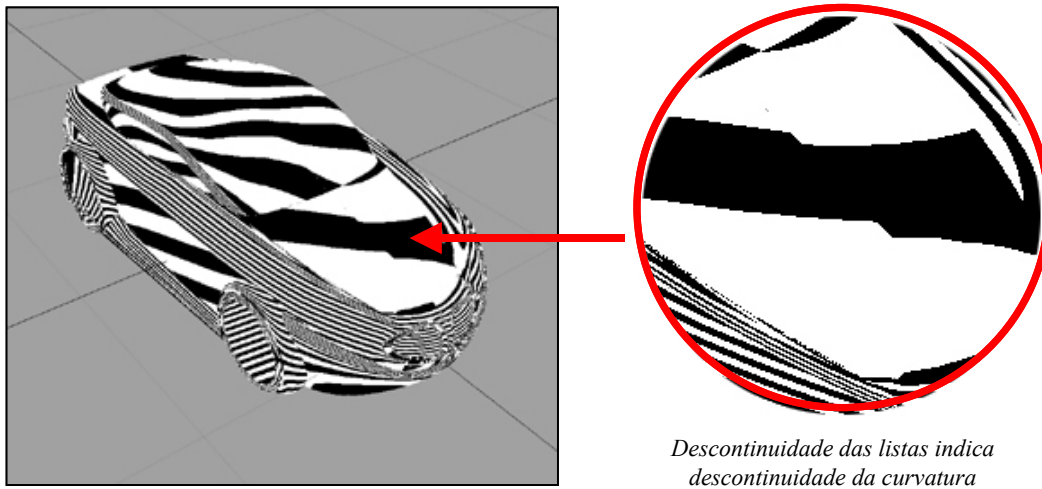


Figura 6.21 – Análise de curvatura por pintura de listas

Outro tipo de análise de curvatura é a pintura por variação de cores (Figura 6.22). Cada cor identifica um valor de curvatura que pode ser positiva ou negativa. Se a região apresenta uma curvatura bem comportada, a mesma será representada por um gráfico de cores uniforme. Havendo irregularidades na curvatura, este gráfico muda bruscamente de cor nestas regiões.

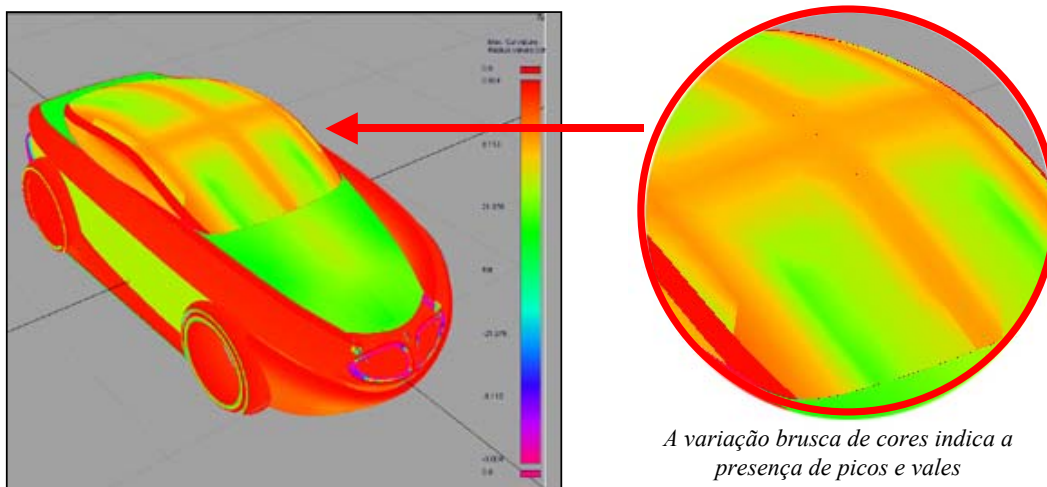


Figura 6.22 – Análise de curvatura por pintura de variação de cores

Também é possível projetar cores metálicas ou imagens específicas sobre o modelo. Este tipo de análise permite identificar descontinuidades, picos ou vales. A pintura metálica analisa as curvaturas pela mudança brusca de cor (do tom preto para o tom roxo) na mudança de curvas. Assim, é possível avaliar a forma da curva da superfície com muita facilidade (Figura 6.23).

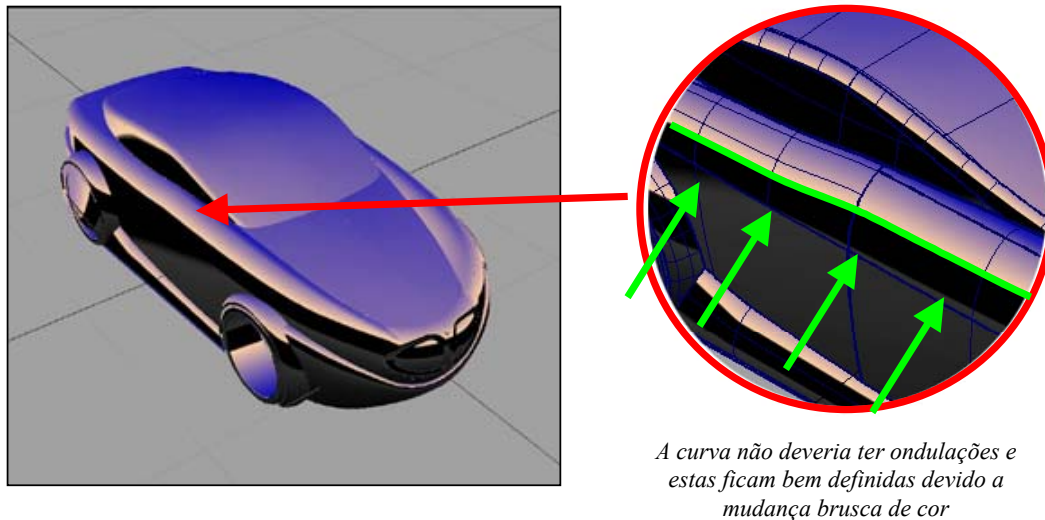


Figura 6.23 – Análise de curvatura por pintura metálica

A pintura por projeção de imagem indica pontos sobressaltados, buracos e a forma da curva. A figura 6.24 mostra a projeção de uma imagem de céu com nuvens sobre a superfície.

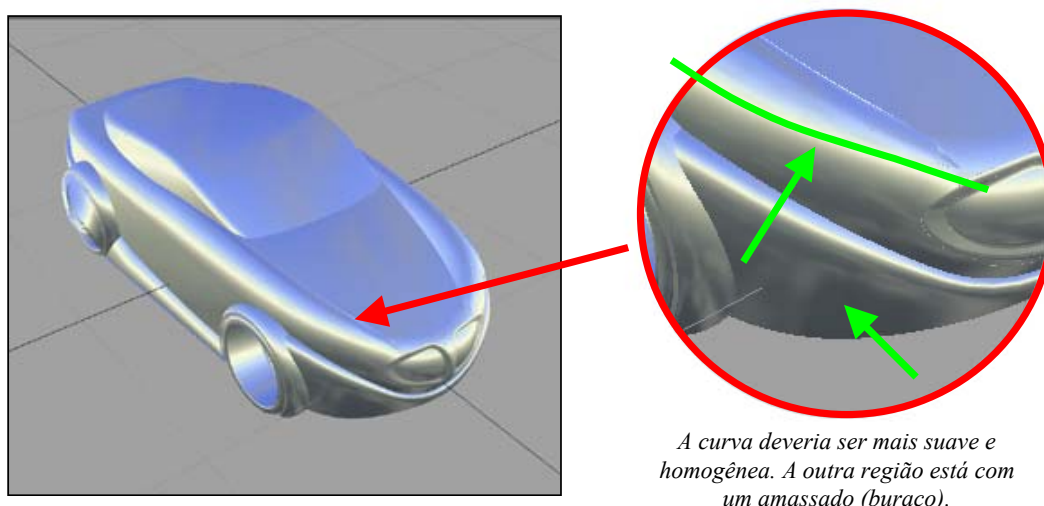


Figura 6.24 – Análise de curvatura por pintura de projeção de imagem (Nuvens do Céu)

6.6 – Estudo de Caso III: Protótipos para planejamento cirúrgico

Para **Stanley** (1995), a tomografia computadorizada é um método de inspeção radiográfica que usa o computador para reconstruir uma imagem das secções transversais de um objeto a partir da transmissão de raios X através dele.

O método de Engenharia Reversa através da tomografia computadorizada é de grande utilidade para aplicações em medicina, utilizando-se da integração entre a tomografia, a Engenharia Reversa e a prototipagem rápida (**Ferneda**, 1999). Como exemplo pode-se observar as figuras 6.25 e 6.26.

O objetivo deste estudo de caso é apresentar uma forma economicamente viável desta aplicação tecnológica para a medicina.

Este estudo de caso visa apresentar as etapas do planejamento cirúrgico para a restauração de forma de um maxilar inferior.

6.6.1 – Etapas do planejamento cirúrgico

A primeira etapa do planejamento cirúrgico consiste na obtenção tridimensional da geometria do maxilar danificado. O diagnóstico de uma Tomografia Computadorizada pode ser apresentado em um formato virtual, ou seja, os resultados obtidos podem ser codificados como uma malha triangular. Esta malha é convertida em um arquivo do tipo STL.

A próxima etapa é converter este arquivo virtual em um modelo físico para análise do problema. O arquivo STL é utilizado para a confecção do protótipo. Neste estudo de caso o modelo físico será obtido através de um equipamento de impressão tridimensional.

A Engenharia Reversa é a tecnologia que fornecerá as informações geométricas do modelo (através da Tomografia Computadorizada) e a Prototipagem Rápida fornecerá um modelo

físico com a finalidade exclusiva de estudo (o protótipo obtido não é utilizado como implante na cirurgia).

O protótipo pode ser analisado e de acordo com as informações obtidas pela Tomografia pode-se confeccionar a geometria mais conveniente para a prótese. Essa geometria pode ser criada em um sistema CAD e a partir dela pode-se gerar uma a prótese definitiva (com material mais resistente e na forma ideal para a reposição).

Com o modelo definitivo da prótese e os protótipos em mãos, a cirurgia pode ser planejada passo-a-passo. Pode-se analisar a região que precisa ser removida, simular cortes e até mesmo fixações da prótese.

6.6.2 – Desenvolvimento do estudo de caso

Neste estudo de caso, o desenvolvimento da malha foi realizado por uma equipe médica especializada. As alterações geométricas posteriores são definidas em conjunto pela equipe médica e de engenharia.

A partir do arquivo STL fornecido, inicia-se a etapa de criação do protótipo, através de uma impressora tridimensional. O modelo é fatiado em várias camadas. O material utilizado para a confecção deste protótipo é uma mistura a base de gesso. Cada camada é impressa por um cabeçote que contém uma espécie de aglomerante (*binder*). Após a impressão, o protótipo é retirado da impressora e, depois de seco, receberá uma camada externa de resina para auxiliar na resistência do mesmo.

O modelo virtual e o protótipo são analisados cuidadosamente. No estudo aqui apresentado, a região com irregularidades é o maxilar inferior direito. Durante o planejamento cirúrgico os médicos decidiram reconstruir esta região com base na geometria do lado esquerdo, ou seja, espelhar o lado esquerdo do maxilar para com esta informação criar o lado direito.

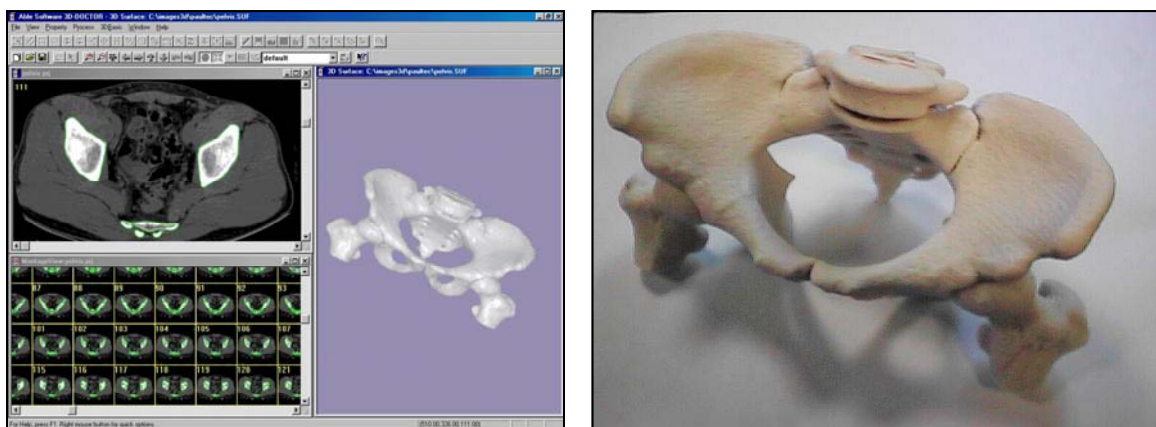


Figura. 6.25 – Exemplo de tomografia computadorizada e protótipo (3D-Doctor, 2003)

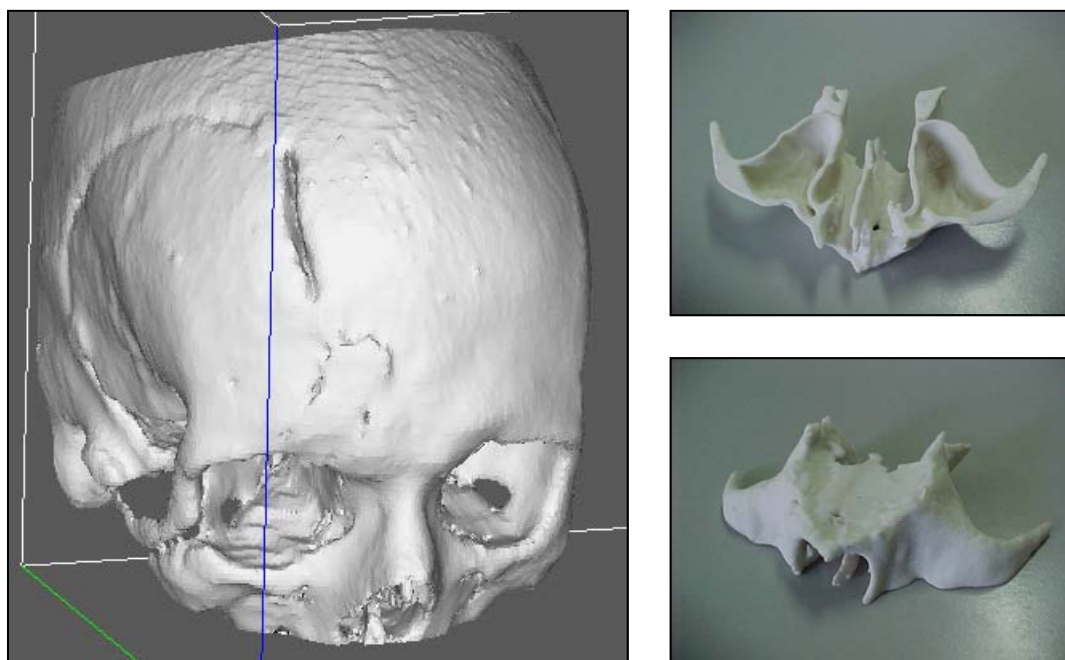


Figura 6.26 – Arquivo STL e protótipos confeccionados em impressora 3D

Uma vez definida a geometria ideal da prótese, este novo modelo virtual é encaminhado para uma empresa especializada que possa desenvolver a prótese definitiva. Estes modelos são confeccionados com materiais resistentes e que possam ser utilizados dentro do corpo humano.

A figura 6.27 mostra a malha triangular obtida através da Tomografia. Uma análise virtual é realizada nesta malha. Com isso, define-se que o lado esquerdo será a geometria base para a confecção da prótese. Um novo modelo virtual é gerado contendo a geometria da prótese. A

partir deste modelo, confecciona-se a prótese definitiva. Também são previstas as fixações entre a prótese e a massa óssea nesta etapa.

A figura 6.28 mostra a seqüência da cirurgia. As fotos ilustram a região retirada, a colocação da prótese e a fixação da mesma.

6.6.3 – Outras informações sobre o estudo de caso

O protótipo criado a partir de impressora 3D é bastante interessante para o planejamento cirúrgico devido à sua relação custo x benefício. A estereolitografia também é um processo bastante utilizado, mas, devido aos seus custos elevados, procurou-se um método mais barato para sua substituição. O protótipo em gesso (impressora 3D) oferece custos de matéria-prima muito atraentes apesar de apresentar variações dimensionais elevadas.

O equipamento utilizado é a impressora 3D desenvolvida pela empresa Z Corp. O protótipo é confeccionado em um pó a base de gesso e a impressora é do tipo monocromático.

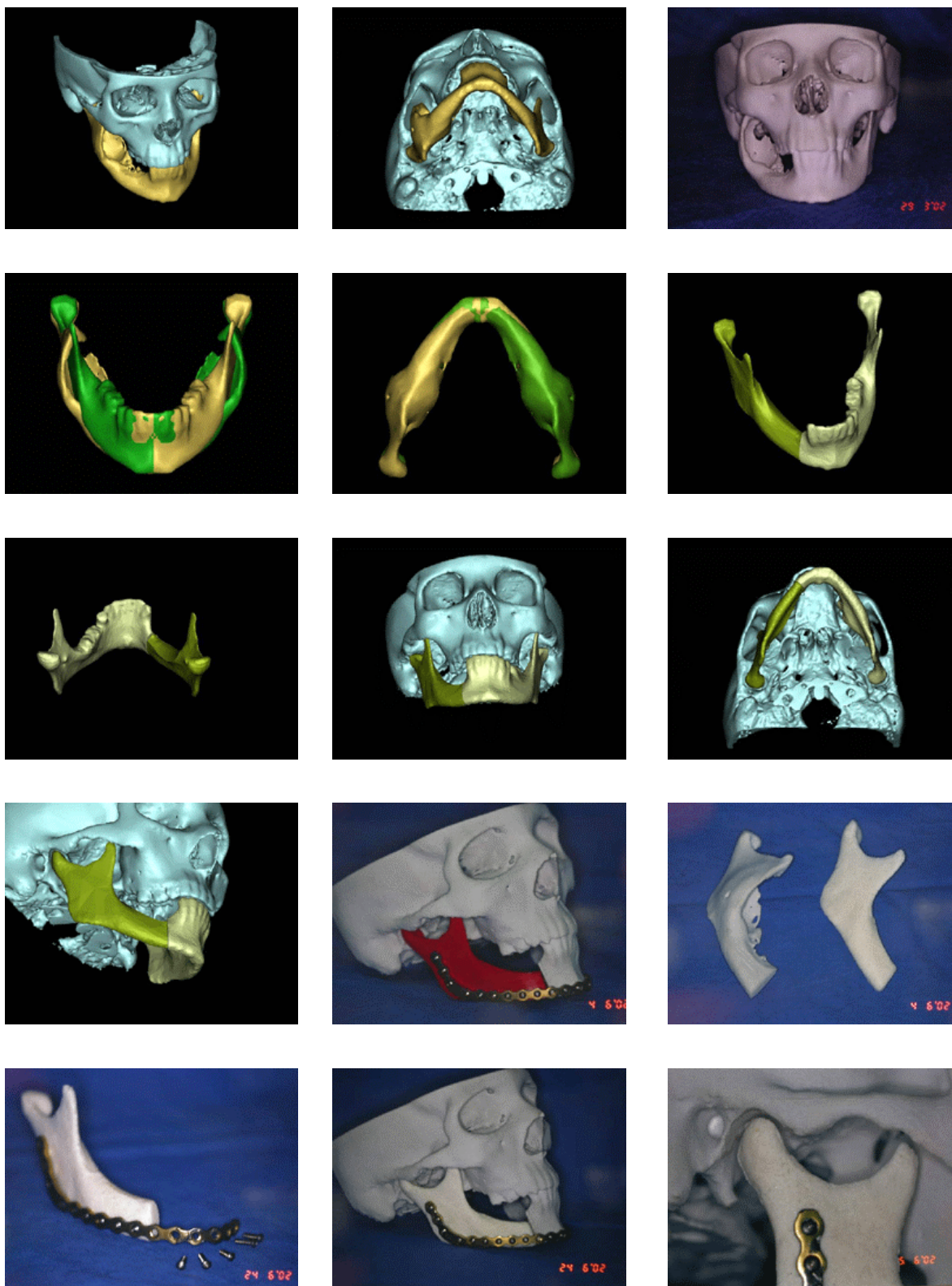


Figura 6.27– Sequência do processo de Planejamento Cirúrgico com o auxílio da Tomografia Computadorizada e a Prototipagem Rápida (Bioparts, 2003)

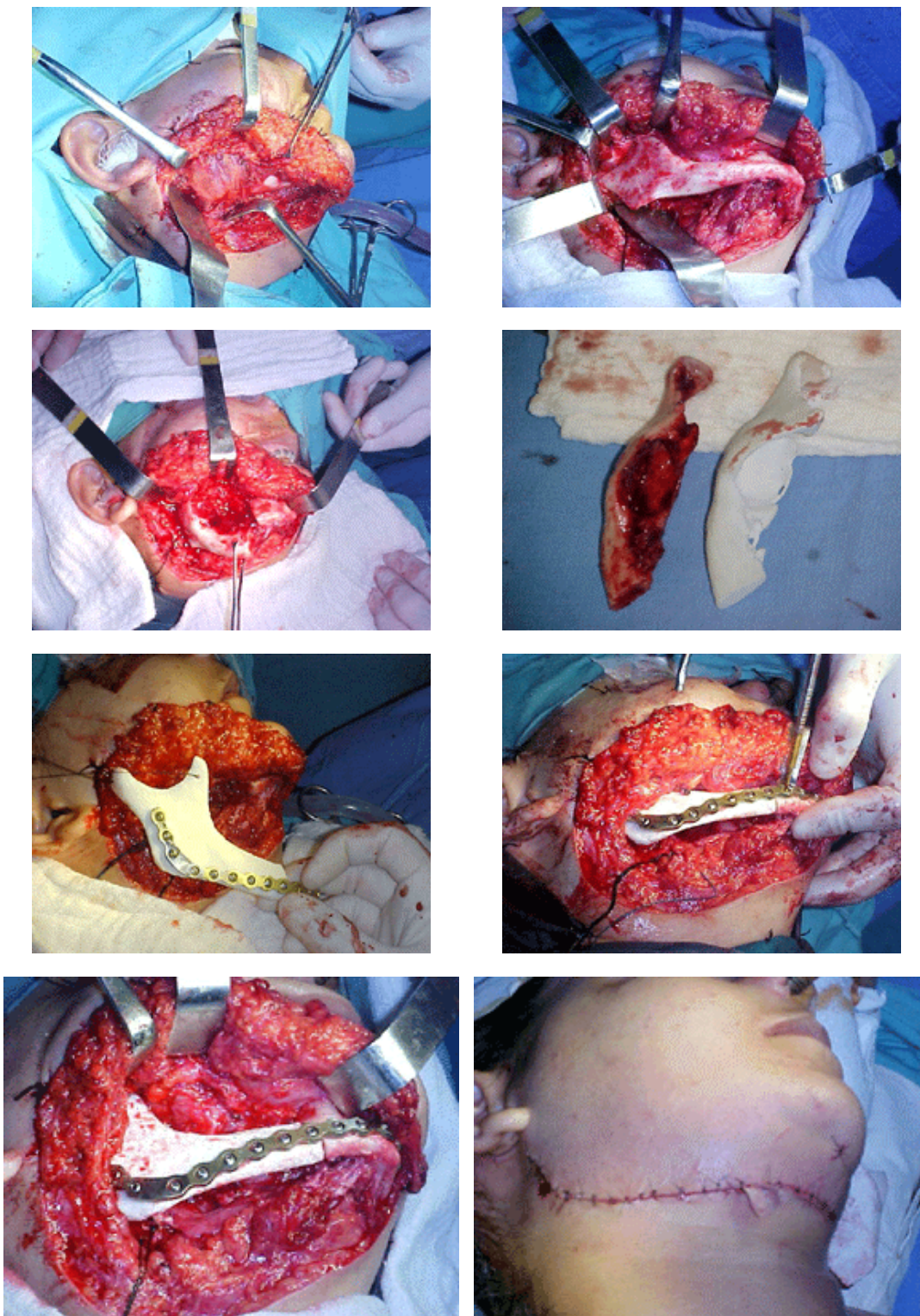


Figura 6.28– Seqüência do procedimento Cirúrgico com o auxílio da Tomografia Computadorizada e a Prototipagem Rápida (Bioparts, 2003)

Capítulo 7

Conclusões

7.1 – Conclusões

A Engenharia Reversa é uma tecnologia desenvolvida recentemente e que contribui para que as organizações sejam cada vez mais competitivas, possibilitando uma permanência duradoura das empresas no mercado, isto porque é possível oferecer produtos e serviços com custos e prazos decrescentes e qualidade assegurada.

O advento da Tomografia Computadorizada (na medicina) aliada a técnicas de Prototipagem Rápida possibilitou soluções para problemas ortopédicos, ampliando razoavelmente o leque de opções para o desenvolvimento rápido e preciso de implantes.

O resultado deste trabalho descreve como a Engenharia Reversa contribui para o alcance da competitividade, através da apresentação de conceitos e aplicações. A tecnologia da Prototipagem Rápida complementa este objetivo e o tema foi abordado em um dos estudos de casos. A seguir apresenta-se uma síntese dos resultados alcançados:

- A **Engenharia Reversa** é a tecnologia que consiste em criar modelos virtuais a partir de peças reais. Assim é possível produzir novas peças, produtos ou ferramentas a partir de modelos ou componentes existentes;

- Na **indústria**, suas aplicações estão relacionadas com a criação de novos produtos, cópia de modelos existentes, correção e melhoria de modelos, inspeção e documentação de produtos, tornando o setor produtivo mais ágil e flexível. Dois estudos de casos foram apresentados: duplicação de moldes e criação de produto (automóvel) com o objetivo de exemplificar situações reais da Engenharia Reversa aplicada à área industrial;
- Na **medicina**, o conceito de reproduzir um modelo virtual com base em um existente tem outra finalidade: o planejamento cirúrgico. Esta aplicação também foi apresentada através de um estudo de caso. Neste exemplo, a Tomografia Computadorizada substitui a digitalização a *laser* e é capaz de gerar um modelo virtual de regiões internas do corpo humano. A Prototipagem Rápida foi utilizada para confeccionar um modelo físico a partir dos dados da Tomografia. Verificou-se assim, a eficácia da Engenharia Reversa aliada com a Prototipagem Rápida no planejamento cirúrgico através de fotos ilustrativas de um caso real;
- A **Prototipagem Rápida** é a tecnologia que possibilita produzir modelos e protótipos diretamente a partir de um modelo virtual. Os dados virtuais podem ser obtidos através dos seguintes processos: digitalização a *laser*, Tomografia Computadorizada ou sistema CAD 3D;
- No estudo de caso nº1 – **duplicação de moldes**, algumas considerações importantes foram levantadas: a) os moldes sujeitos a Engenharia Reversa tem como característica muitos anos de uso e normalmente apresentam grandes desgastes com o tempo, daí a necessidade de substituição; b) muitas vezes não existem desenhos destes moldes, pois muitos foram construídos artesanalmente; c) o principal enfoque na duplicação de moldes é a fidelidade dimensional, uma vez que vários ajustes foram feitos durante sua vida para permitir um bom funcionamento geométrico do mesmo;
- Para o estudo de caso nº 1 – **duplicação de moldes** e nº 2 – **criação de produto**, a digitalização escolhida foi a digitalização a *laser* com braço articulado por apresentar as seguintes características: possibilitar a captura de dados sem contato físico com o modelo;

apresentar alta precisão e possibilitar a reprodução de modelos de diversos tamanhos (desde pequenos até grandes itens com o auxílio de montagens);

- A **digitalização** é o processo de captura de coordenadas de pontos das superfícies da peça. O resultado do processo de digitalização é uma nuvem de pontos 2D ou 3D, armazenados como uma imagem. Um *scanner* 3D ou equipamento de digitalização registra coordenadas 3D de pontos sobre a superfície de um objeto;
- Na Engenharia Reversa a etapa seguinte a digitalização é a **reconstrução do modelo em CAD 3D**. Esta etapa consiste em extrair informações dos dados capturados pela digitalização e a partir deles, reconstruir o modelo geométrico seja por superfícies ou sólidos;
- Concluiu-se que a **reconstrução do modelo CAD 3D** requer antes de tudo um bom planejamento por parte do operador de software. Os softwares de CAD apresentam excelentes ferramentas de trabalho, contudo, grande parte do processo baseia-se em tentativas e erros. Por isso, a metodologia proposta neste trabalho é a criação de modelos que sejam fáceis de se alterar;
- A **metodologia proposta** para a reconstrução (modelos de fácil alteração) tem como princípio definir um processo lógico para a tomada de decisão. Assim, se o resultado obtido com a primeira tentativa não é satisfatório, o modelo pode ser facilmente alterado para chegar nas medidas originais. Dois aspectos são levados em consideração para avaliar o modelo: a fidelidade dimensional e a qualidade superficial;
- Na duplicação de moldes, o enfoque do processo é manter a **fidelidade dimensional**. O estudo de caso propõe a reconstrução do modelo por superfícies básicas (esferas, planos, cones, etc) e superfícies padrões (revolução, extrusão, malha, etc). A partir destas superfícies pode-se fazer uma **comparação através de gráfico de cores** com o modelo digitalizado e verificar se existem divergências entre eles;

- Na criação de produtos, os modelos requerem **qualidade superficial**, ou seja, eles devem apresentar superfícies lisas e suaves, sem descontinuidades. Este estudo de caso apresentou as diversas ferramentas de software necessárias para visualizar os defeitos de superfícies, sendo elas: análise de curvatura, análise de suavidade, projeção de cores sobre o modelo;
- No terceiro estudo de caso apresenta a Engenharia Reversa e a Prototipagem Rápida aplicadas ao **planejamento cirúrgico**. Com um protótipo em mãos, a equipe médica pode verificar as anomalias do paciente, planejar a cirurgia e prever a geometria ideal da prótese para corrigir estas imperfeições;
- Durante todo este trabalho, procurou-se ilustrar as aplicações com imagens e fotos, uma vez que os processos de Engenharia Reversa e Prototipagem Rápida são essencialmente gráficos. As fotos mostram situações reais nas condições de trabalho vivenciadas no dia-a-dia de cada estudo de caso;
- Espera-se com este trabalho científico apresentar de uma maneira simples e objetiva as aplicações da Engenharia Reversa e da Prototipagem Rápida em situações reais vivenciadas no mercado de trabalho brasileiro, possibilitando ao leitor compartilhar com a autora o desenvolvimento dessa fascinante tecnologia.

7.2 – Sugestões para trabalhos futuros

Em função dos resultados obtidos neste trabalho, a complementação do tema pode se estender através da sugestão dos seguintes assuntos:

- Engenharia Reversa aplicada a implantes dentários com possível avaliação de tensões através da tecnologia de análise de Elementos Finitos – CAE;

- Engenharia Reversa aplicada a próteses visando a reconstrução de partes do corpo humano (membros superiores e inferiores: pernas, braços, mãos, etc). O estudo poderá incluir inclusive a captura de cores e texturas da pele;
- Engenharia Reversa aplicada à indústria visando a otimização de software CAD para atingir a excelência em qualidade superficial e fidelidade dimensional. O estudo poderá abranger otimizações que facilitem o planejamento da reconstrução de modelos;
- Comparação de sistemas diversos de digitalização citando como exemplo: fotogrametria, *time-of-flight*, digitalização a *laser*, etc;
- Comparação de sistemas diversos de software CAD voltados para a reconstrução de modelos citando como exemplo: software por sólidos, software por superfícies, assim como software híbrido.

Referências Bibliográficas

1. 3D-DOCTOR. www.ablesw.com/3d-doctor. Acesso em 13 de março de 2003.
2. 3D SCANNERS. **Apostila de Engenharia Reversa do Software ModelMaker**. Tradução: Seacam Com. Serv. Ltda. www.3dscanners.com. Acesso em 17 de fevereiro de 2001.
3. BALTSAVIAS, Emmanuel P. A comparison between photogrammetry and laser scanning. **Photogrammetry & Remote Sensing. Elsevier Science Ltd**. Vol. 54. pp.83-94. 1999.
4. BIOPARTS. www.bioparts.com.br. Acesso em 23 de setembro de 2003.
5. BISLER, A.; BOCKHOLT, U.; VOSS, G. The Virtual Articulator - applying VR technologies to dentistry. Information Visualisation, 2002. **Proceedings**. Sixth International Conference on, pp. 600-602. Julho 2002.
6. BOEHLER, W.; MARBS A. 3D Scanning Instruments. www.i3mainz.fh-mainz.de. Acesso em 19 de setembro de 2003.

7. BOEHLER, W.; HEINZ, G. Documentation, Surveying, Photogrametry. XVII CIPA Symposium, Recife, Brazil, **Proceeding**. www.i3mainz.fh-mainz.de. Acesso em 19 de setembro de 2003.

8. BOEHLER, W.; HEINZ, G.; MARBZ, A. The potencial of non-contact close range laser scanners for cultural heritage recording. **CIPA Working Group VI**. 8 p. 2001.

9. BANNER ENGINEERING. www.bannerengineering.com. Acesso em 02 de abril de 2003.

10. CARVALHO, Jonas.
www.numa.org.br/conhecimentos/conhecimentos_port/pag_conhec/prototipagem. Acesso em 19 de setembro de 2003.

11. CARTER, P. W. Advances in Rapid Prototyping and Rapid Manufacturing. Electrical Insulation Conference and Electrical Manufacturing & Coil Winding Conference, **Proceedings**. pp.107-114. Outubro 2001.

12. CHAMP, Peter. Reverse Engineering in Industrial Application using laser Stripe Triangulation. 3D Imaging and Analysis of Depth/Range Images. **IEE Colloquium on**. pp. 4/1 – 4/4. Março 1994.

13. CHEN, Y.H. NG, C.T. Integrated Reverse Engineering and Rapid Prototyping. **Computer ind. Engng. Elsevier Science Ltd**. Vol. 33, Nos. 3-4, pp.481-484. 1997.

14. CHEUNG, L.K.; WONG, M.C.M.; WONG, L.L.S. The applications of stereolithography in facial reconstructive surgery. Medical Imaging and Augmented Reality. **Proceedings**. International Workshop on. pp.10-15. Junho 2001.

15. CHRISTENSEN, Jon; BANDYOPADHYAY, Amit. Reverse engineering of clear solids using refractive index matching. **Rapid Prototyping Journal**. Vol. 6, No. 2, pp.87-96. 2000.
16. CYNOVAD. Cybernetic Innovations for Dentistry. www.cynovad.com. Acesso em 23 de setembro de 2003.
17. DASCHBACH, Abella; McNichols. Reverse Engineering: A Tool for process planning. **17th Internacional Conference on Computers and Industrial Engineering. Elsevier Science Ltd**. Vol. 29, No. 1-4, pp. 637-640. Setembro 1995.
18. DESCAM. Comparison between Area Based Systems and ModelMaker. www.descam.de. Acesso em 17 de abril de 2003.
19. DICKIN, Peter. Reverse Engineering regains popularity. **IEE Review**. Vol. 42, Issue: 5, pp. 213 –S1-S4. Setembro 1996.
20. DONG-FAN, Chen; MING-LUN, Fan. Reconstruction Technique in Reverse Engineering. **Proceedings of The IEEE International Conference on Industrial Technology**. pp. 37-41. 1996.
21. FERNEDA, Amauri Bravo. Integração Metrologia, CAD e CAM: Uma contribuição ao estudo de Engenharia Reversa. São Carlos. 102p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, 1999.
22. GENG, Jian-Ping; TAN, Keson B. C.; LIU, Gui-Rong. Application of finite element analysis in implant dentistry: A review of the literature. **The Journal of Prosthetic Dentistry**. Vol. 85, No. 6, pp. 585-598. Junho 2001.
23. GODIN, Guy et al. Active Optical 3D Imaging for heritage applications. Computer Graphics in Art History and Archaeology. **IEEE**. Vol. 22, No. 5, pp. 24-36. Set/Out 2002.

24. GOM. www.gom.com. Acesso em 02 de abril de 2003.
25. GORNI. www.gorni.hpg.ig.com.br/protrap.htm. Acesso em 19 de setembro de 2003
26. INGLE, Kathryn A. **Reverse Engineering**. McGraw-Hill. New York. 240p.1994.
27. KARBACHER, S. et al. Processing range data for Reverse Engineering and Virtual Reality. 3-D Digital Imaging and Modeling. Proceedings. **Third International Conference on. IEEE**. pp. 314 -321. Maio 2001.
28. KOCHAN, D. **CAM: developments in computer-integrated manufacturing**. Springer-Verlag. Germany. pp. 237-239. 1985.
29. LAWRIE, Chris. Creating Art with Reverse Engineering & Rapid Prototyping. p. 4.
30. LEE, Kwan H.; WOO, H. Use of Reverse Engineering Method for Rapid Product Development. **Computer Computers & Industrial Engineering**. Elsevier Science Ltd. Vol. 35, Nos. 1-2, pp.21-24. Outubro 1998.
31. LEVOY, Marc. The digital Michelangelo Project: 3D Scanning of Large Statues. 3-D Digital Imaging and Modeling. **Proceedings**. Second International Conference on . Outubro 1999.
32. LUO, Ren C.; TZOU, J.H. CHANG, Y.C. The integration of 3D Digitizing and LCD Panel Display Based Rapid Prototyping System for Manufacturing Automation. IECON 2000. **26th Annual Conference of the IEEE**. Vol. 2. pp. 1255-1260. Outubro 2000.
33. Manufacturing Engineering Centre. www.ontoweb.aifb.uni-karlsruhe.de. Acesso em 23 de setembro de 2003.

34. MING-LUN, Fang; DONG-FAN, Chen; BEI-YING, Zhu. Model Reconstruction of Existing Products Using Neural Networks for Reverse Engineering. **IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems**. China. pp. 396-400. 1997.
35. MSOE. www.rpc.msoe.edu/machines_lom.php. Acesso em 19 de setembro de 2003.
36. PIEGL, L.A.; TILLER, W. Reducing control points in surface interpolation. **Computer Graphics and Applications**. IEEE. Vol. 20, No. 5, pp. 70-75. Set/Out 2000.
37. PIEGL, L.A.; TILLER, W. Parametrization for surface fitting in reverse engineering. **Computer-Aided Design**. Elsevier Science Ltd. Vol. 33, pp.593-603. 2001.
38. POTEL, Michael J. Something to Smile About: 3D Graphics are Revolutionizing Oral Health Care. **IEEE**. pp. 14-20. 2001.
39. PROMETAL. www.prometal-rt.com/process.htm. Acesso em 23 de setembro de 2003.
40. PUNTAMBEKAR, Nirant V.; JABLOKOW, Andrei G.; SOMMER III, H. Joseph. Unified review of 3D model generation for Reverse Engineering. **Computer Integrated Manufacturing Systems**. Vol. 7, No. 4, pp. 259-268. Novembro 1994.
41. Rapid Prototyping Primer. www.me.psu.edu/lamancusa/rapidpro/primer/chapter2.htm. Acesso em 19 de setembro de 2003.
42. RENISHAW. www.renishaw.com.br. Acesso em 30 de julho de 2003.
43. RYDMARK, Martin et al. Laser 3-D Scanning for surface rendering in Biomedical Research and Education. **Medicine Meets Virtual Reality**. 6p. 1999.

44. SACCHI, R.; Poliakoff J. F.; HÄFELE K.-H. Curvature Estimation for Segmentation of Triangulated Surfaces. **IEEE**. Department of Computing The Nottingham Trent University. Burton Street, Nottingham. England. 2001.
45. SACCHI, R.; Poliakoff J. F.; HÄFELE K.-H. Improved Extraction of Planar Segments for Scanned Surfaces. **IEEE**. Department of Computing The Nottingham Trent University. Burton Street, Nottingham. England. 2000.
46. SILVA, J. V. L. et al. Prototipagem Rápida: Conceitos e Aplicações. **Instituto Nacional de Tecnologia da Informação**. 1999.
47. SOBH, Tarek M. et al. Industrial Inspection and Reverse Engineering. CAD-Based Vision Workshop. **Proceedings of the 1994 Second. IEEE**. pp. 228-235. Fevereiro 1994.
48. STANLEY, J.H. et al. Image processing for CT-assisted reverse engineering and part characterization. Image Processing, 1995. **Proceedings**. International Conference on. Vol.3, pp.33-36. Outubro 1995.
49. TAI, Ching-Chih; HUANG, Ming-Chih. The processing of data points basing on design intent in Reverse Engineering. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**. Vol. 40, No. 13, pp. 1913-1927. Outubro 2000.
50. TECAD. www.tecad.pt. Acesso em 23 de setembro de 2003.
51. TOMOVISION. www.tomovision.com. Acesso em 13 de março de 2003.
52. VÁRADY, Tamás; MARTIN Ralph R.; COXT Jordan. Reverse Engineering of geometric models – an introduction. **Computer-Aided Design. Elsevier Science Ltd**. Vol. 29, No. 4, pp. 255-268. Abril 1997.

53. VINARUB, Edmond; KAPPOR, Naval. Reverse Engineering “A New Definition for the Nineties”. Aerospace and Electronics Conference. NAECON 1992. **Proceedings of the IEEE 1992 National**. Vol. 3, pp. 1213-1219. Maio 1992.
54. VOISINET, Donald D. **CADD, projeto e desenho auxiliados por computador: introdução, conceitos e aplicações**. McGraw-Hill. São Paulo. pp.1-5. 1988.
55. YUAN, Xing; ZHENRONG, Xing; HAIBIN, Wang. Research on integrated reverse engineering technology for forming sheet metal with a freeform surface. **Journal of Materials Processing Technology**. Vol. 112, pp. 153-156. 2001.

Bibliografia Complementar

1. CHEN L. –C. Reverse engineering in the design of turbine blades – a case study in applying the MAMDP. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing. Elsevier Science Ltd.** pp 161-167. 2000.
2. CHIKOFSKY, E. J.; CROSS II J. Reverse Engineering and Design Recovery: A Taxonomy. **IEEE.** pp.13-17. Janeiro 1990.
3. DAVIS K. H.; AIKEN P. H. Data Reverse Engineering: A Historical Survey. **IEEE.** pp 70-78. 2000.
4. DRUCKER, Peter. **Management: tasks, responsibilities, practices.** Nova York: Harper & Row, 1973, p.64-65.
5. KOTLER, Philip. **Administração de marketing: análise, planejamento e controle.** São Paulo. Editora Atlas, 1998. 5ª. edição. pp. 307-319.
6. KOTLER, Philip. **Administração de marketing: a edição do novo milênio.** São Paulo. Prentice Hall, 2000.10a. edição. pp. 29-34 e 326-337.

7. KOTLER, Philip. **Marketing para o século XXI**. São Paulo. Editora Futura, 1999. pp. 21-73.
8. LONGENECKER, Justin G.; MOORE, Carlos W. e PETTY, J. Willian. **Administração de Pequenas Empresas: ênfase na gerência empresarial**. Ed. Makron Books Ltda. São Paulo, 1997, 1a. edição. Pp. 188-212 e 304-329.
9. MANCORIDIS S. et al. A Web-based Portal Site for Reverse Engineering. **IEEE**. pp 221-230. 2001.
10. MANZO, José Maria Campos. **Marketing uma ferramenta para o desenvolvimento**. Rio de Janeiro. Zahar Editores. 1969. pp.24-31.
11. MOTAVALLI, Saeid. Review of Reverse Engineering Approaches. Department of Industrial Engineering. Northern Illinois University. **Pergamon – Computers Ind. Engng. Elsevier Science Ltd**. Vol. 35, Nos. 1-2, pp.25-28, 1998.
12. RICHES, Raimar. **O que é marketing?** São Paulo. Editora Brasiliense. 15^a. edição, 1994. pp. 16-62.
13. SELFRIGDE, P. G.; WATERS R. C.; CHIKOFSKY, E. J. Challenges to the Field of Reverse Engineering. **IEEE**. pp. 144-150. 1993.
14. SIMÕES, Roberto. **Marketing Básico**. São Paulo. Editora Saraiva. 1976. pp.139-169.
15. THOMKE, Stefan e Hippel, Eric. **HSM Managment. Informação e conhecimento para gestão empresarial**. Clientes como parceiros de P&D. HSM do Brasil, São Paulo. número 35, ano 6, novembro-dezembro 2002. pp. 92-100.