UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

INTEGRAÇÃO METROLOGIA, CAD E CAM:
UMA CONTRIBUIÇÃO
AO ESTUDO DE ENGENHARIA REVERSA

Amauri Bravo Ferneda

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica.

ORIENTADOR: Prof. Tit. João Lirani.

São Carlos, fevereiro de 1999.

À minha família...

*Meu pai, minha mãe,
minha irmã e meu irmão.*

Agradecimentos:

Agradeço honesta e humildemente,

A DEUS pela vida, saúde e proteção de todos os dias que me possibilita estar no ponto em que me encontro hoje;

À minha namorada Bel pelo amor, carinho, tranquilidade, confiança e compreensão de sempre;

Ao meu orientador, Prof. Lirani, pela grande oportunidade, ensinamentos, orientação e amizade;

Ao Prof. Jonas por sua grande e constante ajuda;

Ao Prof. Benê assim como aos seus orientados Wagner, Alessandro e Fabrício, pela atenção e colaboração na utilização da MM3C,.

Ao Prof. Reginaldo, Aldo e Ronaldinho pela ajuda incessante na realização da fase usinagem do meu modelo, assim como ao Prof. João Fernando pela compra das ferramentas utilizadas;

À Máquinas Agrícolas JACTO S/A, ao Sr. Diretor Sérgio Sartori e aos funcionários - Lincoln, Carlos, Alex, Saulo e Mascarim, pela grande colaboração;

Aos colegas do Laboratório de CAD/CAE pela amizade e constante troca de informações;

Aos colegas do Laboratório de Integração pela colaboração e ajuda;

Às moças da secretaria: Ana Paula, Beth e Cristina pela atenção e paciência;

Aos companheiros mestres e mestrandos Zilda, Carlão, Hasegawa, Agnaldo, Bunito, Omokawa, Tita, Godoy, Mariano, João Chagas e Iamasaki por sua ajuda e pela grande amizade;

À CAPES pela bolsa de estudos concedida;

SUMÁRIO

1 - INTRODUÇÃO.....	1
1.1 - Objetivos.....	2
1.2 – Estrutura do Trabalho.....	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.	4
2.1 – ENGENHARIA REVERSA.	4
2.2 – ALGUMAS DEFINIÇÕES EXISTENTES.	6
2.3 - ABORDAGENS UTILIZADAS PARA ENGENHARIA REVERSA	7
2.4 - APLICAÇÕES DE ENGENHARIA REVERSA.	8
2.5 – ER A PARTIR DE TÉCNICAS DE MANUFATURA AVANÇADAS.....	10
2.6 - SUPERFÍCIES ESCULPIDAS	11
2.7 – DIGITALIZAÇÃO DE UMA PEÇA.	12
2.7.1 - <i>Métodos de digitalização por contato</i>	12
2.7.1.1- Métodos de medição manuais	12
2.7.1.2 - Máquinas de medir em 3 coordenadas (MM3C)	13
2.7.1.3 - Digitalização Eletromagnética:.....	13
2.7.1.4 - Digitalização Sônica:.....	14
2.7.2 – <i>Métodos de digitalização sem contato</i> :	14
2.7.2.1 - Iluminação estruturada.....	14
2.7.2.2 - <i>Spot Ranging</i>	15
2.8 – SISTEMAS A SEREM USADOS COM DADOS DIGITALIZADOS.....	15
2.9 - CONSIDERAÇÕES SOBRE CAD.	16
2.9.1 - <i>O ciclo de projeto</i>	18
2.9.2 - Modelamento Sólido.....	23
2.9.3 - <i>Modelamento baseado em Features</i>	24
2.10 - CONSIDERAÇÕES SOBRE CAM.	26
2.10.1 - <i>Considerações sobre CNC</i>	28
2.10.2 - <i>Centros de Usinagem</i>	30
2.11 - CONSIDERAÇÕES SOBRE CIM.	31
2.12 - CONSIDERAÇÕES SOBRE ENGENHARIA SIMULTÂNEA.	33
2.13 - TRANSFERÊNCIA DE DADOS ENTRE SISTEMAS CAD	36
2.13.1 - <i>IGES (Initial Graphics Exchange Specification)</i>	38
2.13.2 - <i>Softwares comerciais usados para transferência de dados</i>	40
2.14 - CONSIDERAÇÕES SOBRE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.....	41
3 – ESTADO DA ARTE.....	43
3.1 - DIGITALIZAÇÃO POR MÁQUINAS DE MEDIR 3 COORDENADAS (MM3C).....	43
3.2 - DIGITALIZAÇÃO ATRAVÉS DE LASER.	46
3.3 - ER ATRAVÉS DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.....	48

3.4 – SOFTWARES VOLTADOS PARA ER.....	50
3.4.1 – Software da MITUTOYO.....	50
3.4.2 – Softwares da RENISHAW.....	51
3.4.3 – Softwares da BROWN-SHARPE.....	52
3.4.4 – Softwares da Laser Design.....	54
3.5 - ALGUNS SOFTWARES ESPECÍFICOS PARA ER.	55
4 - PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ER	56
4.1 - ESTRUTURA DO SISTEMA DE ER PROPOSTO	57
4.1.1 - O Equipamento de digitalização utilizado.....	60
4.1.2 - O CONVERSOR IGES.....	62
4.1.2.1 - Características do CONVERSOR IGES.....	62
4.1.3 - O sistema CAD utilizado.....	64
4.1.4 - O Equipamento de usinagem utilizado.....	64
5 - APLICAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE ER.....	66
5.1 - PJH: PEÇA INDUSTRIAL.....	68
5.2 - BLOCO S: GEOMETRIA ESTIPULADA PARA FINS DE TESTE.....	70
5.3 – ROSTINHO: INTEGRAÇÃO EXPERIMENTAL COMPLETA	72
5.3.1 – Digitalização da peça.....	72
5.3.2 – Conversão de arquivo texto para arquivo IGES.	74
5.3.2.1 - Emprego em ambiente UNIX.	74
5.3.2.2 - Emprego em ambiente WINDOWS.....	75
5.4 - UTILIZAÇÃO DO SISTEMA CAD	77
5.4.1 - Entrada dos dados.....	77
5.4.2 - Criação de curvas.	78
5.4.3 - Criação de superfícies.....	78
5.4.4 - Criação de modelo sólido.....	79
5.4.5 - Criação dos caminhos de ferramenta.	81
5.4.5.1 - Criação dos caminhos para o perfilamento da peça.....	82
5.4.5.2 - Criação dos caminhos para o desbaste da peça.....	83
5.4.5.3 - Criação dos caminhos para acabamento.....	83
5.4.6 - Pós-processamento.....	84
5.4.6.1 - Procedimento de pós-processamento.....	85
5.4.7 - A usinagem da peça.....	86
6 - CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
6.1 - CONCLUSÕES.....	89
6.2 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	90
7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	91
8 - BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR.....	102

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 - Ciclo de projeto tradicional (SHIGLEY, 1977).....	19
FIGURA 2.2 - Aplicação do computador ao processo de projeto descrito.....	
por SHIGLEY (1977) segundo GROOVER & ZIMMERS, (1984).....	21
FIGURA 2.3 - Centro de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica.....	
da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.....	30
FIGURA 2.4 – ER e seu papel em CIM segundo YAU et al. (1993).....	32
FIGURA 2.5 - Comparação entre projeto seqüencial e projeto simultâneo	
segundo ECRC (1996).....	35
FIGURA 3.1 - MM3C tipo Ponte Móvel (FLORES, 1998).....	46
FIGURA 3.2 - Varredura por laser de um modelo feito em resina (clay).....	47
FIGURA 3.3 - Modelo de crânio, em estereolitografia, digitalizado.....	
através de Tomografia Computadorizada.....	50
FIGURA 3.4. - Sistema retrofit RETROSCAN (RENISHAW, 1998).....	51
FIGURA 3.5 - Sistema CYCLONE (RENISHAW, 1998).....	52
FIGURA 3.6 - Sistema DIGISCAN (DIGISCAN, 1998).....	53
FIGURA 3.7 - Sistema PC-DMIS (PC-DMIS, 1998).....	54
FIGURA 4.1 - Sistema de ER implementado no presente trabalho.....	58
FIGURA 4.2 - Outras alternativas cogitadas para o trabalho.....	59
FIGURA 4.3 - MM3C Ponte Móvel, utilizada no trabalho.....	60
FIGURA 4.3. 1 – Exemplo do formato de arquivo texto	
da digitalização	62
FIGURA 4.4 - Algoritmo do CONVERSION IGES.....	63
FIGURA 4.5 - Centro de usinagem CNC VARGA MFH - 40.....	65
FIGURA 5.1 - Modelo em resina do molde do PJH.....	
(Máquinas Agrícolas Jacto S/A).....	66
FIGURA 5.2 - “BLOCO S” : Modelo calculado para fins de teste.....	67
FIGURA 5.3 - “ROSTINHO” : Face de porcelana. Demonstração.....	
da integração completa.....	68
FIGURA 5.4 - PJH: Superfícies executadas para fins de teste.....	70
FIGURA 5.5 - “BLOCO S” : Modelo executado para fins de teste.....	71
FIGURA 5.6 - “ ROSTINHO”: Modelo sendo digitalizado na MM3C.....	73

FIGURA 5.7 - Exemplo do arquivo texto fornecido pelo MAQMED3.....	
na digitalização efetuada na MM3C.....	73
FIGURA 5.8 - CONVERSION IGES em ambiente WINDOWS.....	75
FIGURA 5.9 - Entrada de dados para o CONVERSION IGES.....	76
FIGURA 5.10 - Saída de dados do CONVERSION IGES.....	76
FIGURA 5.11 : Modelo sólido pronto para se trabalhar as.....	
operações de usinagem.....	80
FIGURA 5.12 - Peça sendo usinada na máquina-ferramenta.....	88
FIGURA 5.13 - Peça reproduzida no centro de usinagem.....	88

Lista de siglas e abreviaturas:

CAD:	- Computer-Aided Design.
CAE:	- <i>Computer-Aided Engineering.</i>
CAM:	- <i>Computer-Aided Manufacturing.</i>
CAPP:	- <i>Computer-Aided Process Planning.</i>
CAQ:	- <i>Computer-Aided Quality.</i>
CIM:	- <i>Computer-Integrated Manufacturing.</i>
CNC:	- Controle Numérico Computadorizado.
CPU:	- <i>Central Processing Unit.</i>
CT:	- <i>Computer Tomography.</i>
ER:	- Engenharia Reversa.
ES:	- Engenharia Simultânea.
ICG:	- <i>Interactive Computer Graphics.</i>
IGES:	- <i>Initial Graphics Exchange Specification.</i>
MM3C:	- Máquina de Medir a 3 Coordenadas.
RP:	- <i>Rapid Prototyping.</i>
SET:	- <i>Standard d'Exchange et de Transfert</i>
STEP:	- <i>Standard for the Exchange of Product Model Data.</i>
VDA-FS:	- <i>Verband der Deutschen Automobilindustrie-Flächenschnittstelle</i>

Resumo:

FERNEDA, A. B. (1999). *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

Engenharia reversa é o conceito de se produzir uma peça tomando como base um original ou modelo físico existentes, sem o uso de desenhos de engenharia.

Empresas se voltam para a tecnologia da Engenharia Reversa como um complemento valioso para toda a gama de ferramentas CAD/CAM que elas possuem, devido às dificuldades encontradas quando se necessita trabalhar com superfícies de forma livre. Desta forma, faz-se necessária uma ferramenta que proporcione a inserção das formas deste modelo em um sistema CAD, de forma que se possa usufruir de todas as possibilidades, oferecidas por ele. Neste trabalho, é apresentada uma revisão bibliográfica que aborda a Engenharia Reversa desde sua origem até as técnicas avançadas existentes atualmente, ou seja, apresentando equipamentos e sistemas específicos usados atualmente para a prática de Engenharia Reversa. Mostra-se um sistema de Engenharia Reversa, que foi projetado e implementado realizando a integração desde uma Máquina de Medir 3 Coordenadas até um Centro de Usinagem CNC com o auxílio de um *software* CAD comercial, o qual possui módulo de CAM integrado.

São apresentados também 3 estudos de casos.

Palavras-chave: Engenharia Reversa; Integração Metrologia/CAD/CAM.

Abstract:

FERNEDA, A. B. (1999). *Metrology, CAD e CAM integration: A contribution to Reverse Engineering study*. São Carlos. 102p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo

Reverse engineering is the concept of making a part based on an original or existing physical model, without engineering drawings. Companies are using Reverse Engineering Technology as a valuable complement to many of their CAD/CAM tools, due to their difficulties of working with free-form surfaces. It is necessary a tool which provides the insertion of the model forms in the CAD system, therefore enabling to take advantages of all possibilities offered by the system. The Reverse Engineering has developed beyond the traditional copy milling. It is presented a review of the Reverse Engineering since its origin until recent advanced techniques, where the equipments and specific systems used for Reverse Engineering practice nowadays are showed. In this work a Reverse Engineering system has been designed and implemented, which is accomplished by the integration from the Coordinate Measuring Machine until a CNC Machining Center, by using a commercial CAD software with integrated CAM module. In order to validate the system developed, three case studies are also presented.

Keywords: Reverse Engineering; Metrology/CAD/CAM integration.

1 – INTRODUÇÃO.

A engenharia de projeto nos dias de hoje possui ferramentas computacionais modernas no auxílio ao desenvolvimento de um produto no processo de negócios de uma empresa. Atualmente existem no auxílio às atividades de engenharia avançados sistemas CAD,CAE,CAM,CAPP.

Mesmo com todas as ferramentas disponibilizadas em sistemas CAD, o usuário se depara com uma grande dificuldade quando existe a necessidade de fabricar peças, ou moldes, que possuam superfícies esculpidas, ou forma livre (do inglês *free-form*). Dessa forma, profissionais criativos preferem trabalhar com suas ferramentas naturais, suas próprias mãos (ARONSON, 1996). Preferem fazer modelos em *clay*¹ (resina) ou madeira (CTEK, 1998), quando se necessita trabalhar com tais contornos. Depois mapear os pontos sobre essas superfícies (digitalizá-los) de alguma maneira, a fim de inserir posteriormente as coordenadas no sistema CAD a ser utilizado para o desenvolvimento de projeto.

Desta maneira, a ordem convencional de se manufaturar um produto, que começava com um desenho de engenharia e terminava com a execução de um modelo físico, é revertida (ou invertida) ao que muitos autores chamam de Engenharia Reversa (do inglês *Reverse Engineering*).

Então, quando tal processo se faz necessário, uma boa ferramenta de auxílio para a Engenharia Reversa se torna muito importante, julgando-se a grande competitividade do mercado em tempos de globalização, que exige a diminuição do tempo que se gasta para levar um produto até o mercado (“*time to market*”), a baixo custo e com boa qualidade.

É neste contexto que o presente trabalho irá se desenvolver. A intenção é que o trabalho realizado seja utilizado como um sistema alternativo de auxílio à

¹ CLAY – Apresenta-se o termo em inglês uma vez que o mesmo é utilizado para generalizar materiais que se pode modelar com as mãos. Por exemplo resina ou barro.

Engenharia Reversa utilizando *software* comercial que não disponha de módulo específico para esse fim.

1.1 - Objetivos.

O presente trabalho tem o intuito de atingir os seguintes objetivos:

- Realizar um estudo acerca da Engenharia Reversa e das abordagens que vem sendo utilizadas por outros autores.
- Levantar o estado da arte em Engenharia Reversa.
- Verificar de que forma a Engenharia Reversa pode ajudar no processo de desenvolvimento de produtos apresentando, para isso, estudos de casos mostrando aplicações específicas para cada caso.
- Projetar e implementar sistema de Engenharia Reversa utilizando máquina de medir 3 coordenadas (MM3C), *software* de CAD comercial e Centro de usinagem CN; todos disponíveis no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo (USP).
- Fazer a aplicação prática do sistema desenvolvido a partir de um objeto físico existente. Executar-se uma série de operações com a finalidade de se reproduzir a geometria da peça em questão primeiramente no *software* CAD, o que irá possibilitar o cálculo dos dados de manufatura utilizando-se as ferramentas do *software* e posteriormente executar a peça no centro de usinagem.

1.2 - Estrutura do Trabalho

Este trabalho está dividido da seguinte forma:

Capítulo 01: Introdução - Busca-se situar o problema da Engenharia Reversa em contexto global. São apresentados os objetivos e a estrutura da dissertação.

Capítulo 02: Revisão bibliográfica sobre Engenharia Reversa - Revisão da literatura a respeito de Engenharia Reversa, assim como as tecnologias relacionadas a ela. Faz-se uma introdução sobre MM3C, CAD, CAM, Prototipagem rápida, etc.

Capítulo 03: Estado da Arte - Mostra-se o que se faz atualmente em Engenharia Reversa. Elucida-se as técnicas mais relevantes utilizadas atualmente em Engenharia Reversa, no tocante à digitalização. São apresentados conceitos, soluções e resultados para alguns casos de aplicação.

Capítulo 04: Projeto e implementação do Sistema - Apresenta-se o fluxograma do sistema implantado, módulos do *software* CAD comercial utilizados e outras informações relevantes.

Capítulo 05: Aplicação experimental do sistema - Aplicação experimental do sistema desenvolvido no trabalho. Faz-se o detalhamento de como foi realizada a aplicação.

Capítulo 06: Conclusões e Propostas para trabalhos futuros - Discute-se sobre os objetivos do trabalho, resultados obtidos, limitações e trabalhos futuros.

Capítulo 07: Referências bibliográficas.

Capítulo 8: Bibliografia Complementar.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.

Neste capítulo apresenta-se uma revisão da bibliografia a respeito de Engenharia Reversa desde sua origem em manutenção até o que se possui atualmente para auxiliá-la. Comenta-se sobre Máquinas de Medir 3 Coordenadas, CAD, CAM, CIM, prototipagem rápida e outros assuntos que possuem relacionamento com a Engenharia Reversa. As técnicas mais relevantes utilizadas atualmente em Engenharia Reversa, no tocante à digitalização, serão melhor discernidas no capítulo 3 - Estado da Arte.

2.1 – ORIGENS DA ENGENHARIA REVERSA.

Nenhum fabricante que vise lucro pode se dar ao luxo de deixar um sistema de produção deteriorar-se e intermitentemente deve intervir para dar manutenção e dessa forma manter o sistema num nível de produção satisfatório e proveitoso (INGLE, 1994).

Segundo DASCHBACH et al. (1989) e ABELLA et al. (1994), uma situação que não é nova em engenharia, e acontece freqüentemente, é a seguinte: uma peça de certa máquina falha e a produção em uma linha tem que parar devido à falta do elemento essencial dessa máquina, e não se possui nenhuma peça sobressalente em disponibilidade para reposição imediata. Então, essa peça quebrada é entregue a um operador de máquina-ferramenta para que ele faça uma nova peça, que substituirá aquela que falhou. Para iniciar essa operação de duplicação, o operador terá de efetuar a medição da peça, a fim de fazer um levantamento dimensional da mesma e saber suas características geométricas. Terá que fazer um desenho da peça, ou no mínimo um esboço, no qual ele possa se basear para realizar as operações de usinagem da nova peça.

Tal processo de duplicação de uma peça, funcional e dimensionalmente, através de exame e medição físicos para desenvolver-se dados técnicos da mesma de maneira que se possa copiá-la, é chamado de Engenharia Reversa (ARL, 1996). Para facilidade de notação, será atribuído apenas o termo ER na designação da expressão Engenharia Reversa.

No passado poucos fabricantes consideraram o uso da ER por a julgarem como sendo uma forma de infringência de patente e projeto, entretanto atualmente muitos estão sendo forçados a procurar esta técnica. Segundo MITUTOYO (1998), nos anos 90 ocorreu a massificação da Engenharia Reversa. Existem muitas razões particulares para esta mudança na forma de pensar. Uma razão, é que a ER pode ser a única alternativa quando se perdem fornecedores de peças de reposição para um equipamento.

A perda de uma fonte de fornecimento deixa poucas alternativas quando uma peça de reposição não está imediatamente disponível.

Muitos dos equipamentos que se usa hoje podem ser até de 30 a 50 anos atrás, ou até mais velhos; e devido a isso muitas vezes se torna difícil encontrar uma forma de abastecimento de peças sobressalentes para todo equipamento que se possui (INGLE, 1994). Ainda segundo INGLE (1994), nações em desenvolvimento, emergentes ou até desenvolvidas se deparam com estes tipos de problemas.

É possível notar que a ER teve suas origens relacionadas a propósitos de manutenção. Porém uma data específica desde a qual seja possível afirmar que tenha ocorrido seu início, como se pode perceber, é uma tarefa praticamente impossível de ser realizada.

De acordo com ABELLA et al. (1994), a ER desde então vem mudando através dos anos de processo manual para uma ferramenta de engenharia que utiliza sofisticados *softwares* computacionais e modernos instrumentos de medição. Ela expandiu-se rapidamente desde sua origem em manutenção, para áreas de projeto e produção. Esta expansão é o resultado de uma mudança no processo de projeto básico, e do desenvolvimento de equipamento específico para dar suporte para Engenharia Reversa.

Uma outra razão para sua expansão é devida a projetistas e fabricantes sempre avaliarem seus próprios produtos e os de seus concorrentes antes de lançar

uma nova idéia no mercado, ao que chamamos de *benchmarking*. O *benchmarking* está intimamente relacionado com ER uma vez que este compara produtos e serviços com outros que são melhores na classe (ARONSON, 1996).

Uma outra razão, é a possibilidade de se executar projetos utilizando superfícies de forma livre, ou esculpidas, com o auxílio da ER.

Segundo MA (1994), modelos físicos são aceitos por engenheiros como uma boa referência para o projeto e para a produção de um novo produto. Superfícies de forma livre são um grande auxílio em projetos para propósitos estéticos, para verificação de possibilidade de fabricação, para teste de desempenho e também para a inspeção como um *master model*² para a indústria de carro.

2.2 – ALGUMAS DEFINIÇÕES EXISTENTES.

Existe uma série de descrições usadas para se definir ER, que podem dar uma melhor idéia de sua abrangência. Na sequência será feita menção a estas definições, de maneira que se possa perceber abordagens realizadas por alguns autores acerca do assunto:

- ➔ “Refere-se ao processo de criar dados de projeto em engenharia assim como coordenadas cartesianas, superfícies e desenhos ortográficos a partir de peças existentes” (KWOK & EAGLE, 1991) e (SUHARITDAMRONG & MOTOVALLI, 1995).
- ➔ “É o conceito de se produzir uma peça tomando como base um original ou modelo físico existentes, sem o uso de desenhos técnicos” (ABELLA et al., 1994).
- ➔ “ER é a produção do modelo sólido à partir de uma peça manufaturada” (GURUMOORTHY, 1996).

² *Master model*: É o padrão usado para verificar o contorno das ferramentas de estampo e das partes estampadas. É uma montagem de blocos separados, cada um dos quais relacionados com uma parte do corpo do carro (MA, 1994).

- ➔ “A ER explora metodologias que usam equipamentos para medir objetos, reconstruir ou recuperar a geometria desses objetos e rapidamente fabricar os protótipos dos modelos” (CAI et al., 1996).
- ➔ “ER é o processo de copiar ambos, forma e função de uma peça ou objeto físico existente” REVERSE ENGINEERING (1997).
- ➔ “É a avaliação sistemática de um produto com o propósito de se fazer uma réplica. Tal processo pode envolver a execução de uma cópia exata ou pode se tratar da incorporação de melhoramentos em um projeto” ARONSON (1996).

2.3 - ABORDAGENS UTILIZADAS PARA ENGENHARIA REVERSA

Segundo MA (1994), existem as seguintes abordagens para a transformação de objetos físicos para produtos manufaturados:

- **Fresamento de cópia:** É a forma tradicional de se realizar Engenharia Reversa. A fresa que executará o corte do blanque, delineando a peça final, é conectada rigidamente, ou então através de um sistema servo-controlado, a uma ponta leitora que se mantém em contato com a superfície a ser copiada. Tal processo possui muitas limitações, como por exemplo a necessidade de se repetir o processo de leitura da peça modelo a cada vez que se pretende fazer uma peça nova, apenas pode ser usado para acabamento, os raios das pontas ferramenta de leitura e da fresa devem ser iguais, etc.
- **Fresamento de cópia baseado em CN:** É idêntico ao fresamento de cópia, com a exceção de que o caminho lido pelo aparelho de leitura é armazenado na forma de uma grande quantidade de pontos que são convertidos em comandos CN e posteriormente usados para controlar os movimentos da máquina ferramenta na

operação de usinagem da nova peça. Tal método já permite algum tipo de flexibilidade em relação ao fresamento de cópia.

- **Aproximação indireta por superfície:** Tal método já compreende a digitalização de modelos físicos através de equipamento de medição. Os modelos físicos são medidos de uma forma especial, ou seja, seguindo linhas seccionais e os pontos são armazenados. Posteriormente são criadas curvas através destes pontos e superfícies a partir destas curvas.
- **Aproximação avançada por superfície:** Tal método compreende a criação de superfícies diretamente a partir dos pontos medidos.

2.4 - APLICAÇÕES DE ENGENHARIA REVERSA.

A necessidade de se utilizar ER aparece em muitas situações industriais (OH et al., 1989).

Sob o ponto de vista de ARONSON (1996), a Engenharia Reversa envolve um desses quatro tipos de projetos citados a seguir:

- ➔ Produtos antigos para os quais não existe documentação. Os produtos projetados antes de existir o CAD/CAM são exemplos típicos (KWOK & EAGLE, 1991) e (YOGUI, 1998).
- ➔ Produtos que não tem seus desenhos atualizados de acordo com as mudanças que ocorrem durante seu desenvolvimento. Na indústria de moldes e matrizes, o projeto é normalmente modificado no chão-de-fábrica, devido a limitações de manufatura, por exemplo. Assim, a geometria do projeto muda e tais modificações normalmente não são refletidas no modelo CAD (OH et al., 1989) e (YAU et al., 1993).

- ➔ Reutilização de projeto. Para projetar um novo produto, o fabricante incorpora dados de produto antigo dentro de um projeto novo. Isto possui vantagem de informação sobre peças existentes ou elementos das peças incluindo custos, geometria, cálculos, passos para montagem e códigos CNC para criar uma peça nova em um tempo reduzido.
- ➔ Produtos estrangeiros que são utilizados em um outro país. Esses produtos podem não possuir documentação ou a sua documentação pode encontrar-se de forma inadequada para a sua utilização ou reprodução.

Pode-se acrescentar às já citadas ainda as seguintes possibilidades onde a ER pode ajudar, segundo a ótica de MA (1994):

- ➔ Quando se necessita obter dados de um concorrente (ARL, 1996).
- ➔ Produtos cuja geometria é de difícil construção utilizando ferramentas CAD comuns, e seriam melhor concebidas se fossem esculpidas a mão livre para depois terem seus dados extraídos e inseridos no sistema CAD. Modelos CAD de superfícies que devem ser baseadas em uma aparência agradável (KWOK & EAGLE, 1991).
- ➔ Nas indústrias automobilística, naval e aeronáutica, projetistas podem criar um modelo físico, que pode ser em escala, baseados em necessidades e análises funcionais (CHEN & MING-LUN, 1996).
- ➔ Reprodução de elementos da anatomia humana (DUNCAM & MAIR, 1983), (MOTTA, 1998) e (WOHLERS, 1998).
- ➔ Reprodução de obras de arte, esculturas (DUNCAM & MAIR, 1983).

2.5 – ER A PARTIR DE TÉCNICAS DE MANUFATURA AVANÇADAS.

Segundo MA (1994), a necessidade emergente de técnicas de ER robustas é também resultado dos avanços que ocorreram em técnicas de manufatura e metodologias de projeto, influenciados, por exemplo, pelos seguintes aspectos:

- ➔ Tecnologia CNC altamente desenvolvida: Após sua introdução, no início dos anos 70, o CNC (*Computer Numerical Control*) tornou-se uma tecnologia madura e amplamente empregada na indústria.
- ➔ Várias ferramentas computacionais para projeto e manufatura: Juntamente com o desenvolvimento de *hardware*, vários tipos de *softwares* de auxílio à engenharia foram aparecendo ao longo dos anos. Pode-se citar ferramentas CAE (*Computer-Aided Engineering*) rápidas e precisas, sistemas CAD/CAM avançados, CAPP (*Computer-Aided Process Planning*), CAQ (*Computer-Aided Quality*), entre outros. A integração racional destes sistemas automatizou células de manufatura flexíveis e avançados sistemas de manipulação de material e produto criando um ambiente CIM (*Computer-Integrated Manufacture*) de alto nível.
- ➔ Abordagem sobre engenharia simultânea: Tradicionalmente o desenvolvimento de produto é dividido dentro de uma sequência rígida de fases de projeto, ferramental, manufatura e testes. A Engenharia Simultânea é uma abordagem de projeto que engloba todo o ciclo de vida do produto simultaneamente, fazendo uso de uma equipe de projeto de produto e ferramentas de engenharia e produção automatizadas.
- ➔ Tecnologia de prototipagem rápida: A Prototipagem rápida é uma tecnologia nova utilizada para o desenvolvimento rápido do produto. Tal tecnologia ajuda na obtenção de menores tempos até o lançamento do produto no mercado (*time to market*).

Ainda segundo MA (1994), a integração das tecnologias descritas acima ajuda no desenvolvimento rápido e simultâneo de produtos. Entretanto na execução

de projetos com a presença de superfícies de forma livre encontra-se dificuldades devido a várias lacunas no ciclo de produção.

2.6 - SUPERFÍCIES ESCULPIDAS

Conforme afirmou CHOI (1991), produtos são projetados com superfícies esculpidas para fazer com que eles tenham um aspecto visual melhor e/ou para que eles possam ter uma função melhor. Dessa forma, a utilização de superfícies esculpidas em eletrodomésticos assim como telefones tem o propósito de realçar sua aparência, enquanto que em peças aerodinâmicas, assim como pás de turbinas, são para encontrar exigências funcionais do produto.

Algumas definições de superfície esculpida podem elucidar melhor o significado desse termo. ZEID (1991), por exemplo, define superfície esculpida como sendo uma coleção ou soma de retalhos paramétricos interconectados e amarrados com fórmulas de interpolação e combinação. Já segundo DUNCAM & MAIR (1983), o termo “superfície esculpida” denota aquelas superfícies que não podem ser geradas continuamente e tem caráter arbitrário ou complexo de formas, que são tradicionalmente modeladas por escultores. A infinita variedade de formas e posturas da anatomia humana é um excelente exemplo.

Afirmava-se em 1991, que o projeto de superfícies de forma livre, ou esculpidas, em computador tem um suporte pobre pela maioria dos sistemas CAD contemporâneos (HOSCHEK, 1991) apud (VAN DIJK, 1993). Então quando se precisava usar tais tipos de superfícies em projeto, encontrava-se um problema difícil de contornar com os sistemas CAD que se possuía, e ainda hoje se possui tal dificuldade. DUNCAM & MAIR (1983), já faziam consideração a esse respeito quando diziam que nenhum desenvolvimento técnico pode competir com o talento artístico.

Nesse contexto, percebe-se a importância da ER, que pode ser ainda mais evidenciada levando em conta consideração feita por MA (1994) enfatizando que um ciclo de desenvolvimento de produto normalmente precisa de muitas iterações. Para isso modelos físicos estão freqüentemente envolvidos como meio de modificação de

projeto, otimização de curvatura e muitos outros propósitos. Isto requer contínua interação entre modelo físico e modelo CAD. Sem uma ferramenta de Engenharia Reversa encontraremos dificuldades inevitáveis durante o ciclo de desenvolvimento do produto a partir de peças esculpidas.

2.7 – DIGITALIZAÇÃO DE UMA PEÇA.

Como foi visto, uma boa parte das atividades acerca de ER, enfoca a produção de peças de formato livre, ou esculpidas. Para se viabilizar a utilização de tais elementos em sistemas auxiliados por computador, deve-se extrair de alguma forma os dados de sua geometria, o que pode ser feito através de digitalização, ou seja, obter uma seqüência de pontos no espaço (GONZÁLEZ, 1995).

Com a extração da informação em três dimensões, pode-se então usá-la para desenvolver o desenho ou outras representações da peça para posteriores reprojetos, análise ou fabricação (SUHARITDAMRONG & MOTOVALLI, 1995).

Existem vários métodos com os quais pode-se extrair dados de uma superfície. Esses métodos podem ser classificados em duas grandes categorias: métodos por contato e métodos sem contato (BIDANDA et al., 1991).

2.7.1 - Métodos de digitalização por contato.

Como o próprio nome já diz, existe contato entre peça e aparelho de medição para se realizar a digitalização.

2.7.1.1- Métodos de medição manuais

É um método que, segundo BIDANDA & HOSNI (1994), ainda é usado em pequenas fábricas no mundo, para realização de digitalização. A medição de

pontos em uma superfície é feita manualmente, utilizando-se instrumentos como calibradores, escalas e blocos de medição.

No contexto da ER, pode-se notar que este método vai requerer muito tempo de trabalho de uma pessoa para ser executado, não somente para aquisição de dados como também para o registro dos mesmos.

2.7.1.2 - Máquinas de medir em 3 coordenadas (MM3C)

Uma MM3C é um aparelho de medição tridimensional que usa um sensor de contato para detectar a superfície do objeto. O sensor é geralmente um aparato sensível à pressão que é acionado por qualquer contato com a superfície (BIDANDA & HOSNI, 1994). Tal equipamento é projetada para levantar a posição de uma sonda quando ela é movida ao longo dos seus eixos coordenados.

Quando uma característica está sendo medida normalmente a sonda está localizada em contato tangencial com o componente sob medição (KWOK & EAGLE, 1991).

Informações sobre MM3C serão elucidadas mais detalhadamente no capítulo 3 (Soluções existentes).

2.7.1.3 - Digitalização Eletromagnética:

A digitalização eletromagnética usa transdutores eletromagnéticos para digitalizar objetos 3D. O objeto é colocado numa mesa, a qual possui equipamento eletrônico e uma fonte de campo magnético que cria um campo magnético no volume acima da mesa. Um ponteiro manual é usado para traçar a superfície da peça. Este ponteiro está na carcaça de um sensor de campo magnético e este em conjunção com a unidade eletrônica, detecta a posição e orientação da ponta (POLHERMUS INC., 1991).

2.7.1.4 - Digitalização Sônica:

Um digitalizador sônico usa ondas sonoras para calcular a posição de um ponto, relativo a um ponto de referência, através de quatro microfones sensores montados em quadro retangular e que detectam o som (impulso ultrasônico) de um ponteiro o qual é utilizado para traçar os contornos do objeto em análise (SCIENCE ACCESSORIES CORPORATION, 1989).

2.7.2 – Métodos de digitalização sem contato:

Nestes métodos, como o próprio nome sugere, não há contato entre peça e o aparelho de medição que realiza a digitalização.

Tais métodos podem ser classificados em duas classes amplas: ativo e passivo. Métodos ativos requerem o uso de luz ou fonte de som especializadas enquanto que métodos passivos trabalham com luz ambiente (LEGGE, 1996).

2.7.2.1 - Iluminação estruturada.

Este método pode ser classificado com relação aos padrões de luz que são usados para iluminar a peça. Os vários padrões de luz usados são: raio laser singular, faixa de laser singular, múltiplas faixas de luz e iluminação padronizada tais como iluminação e topografia de *Moire* (LEGGE, 1996).

A metodologia geral para tal técnica é refletir um raio laser único fora de uma peça e detectar a posição do raio refletido usando um sensor, assim como uma câmera.

A digitalização através de raio laser será melhor comentada no capítulo 3 (Estado da Arte).

2.7.2.2 - *Spot Ranging*.

Existem duas classes de métodos de *spot ranging* que podem ser consideradas de acordo com a fonte utilizada. Estas são, o método baseado em ótica e o método ultrasônico. Ambos os métodos envolvem basicamente a projeção de um raio sobre a superfície objeto e logo após inspecionar-se o raio refletido usando um sensor que está posicionado coaxialmente a fonte. A localização da fonte dá as coordenadas x e y do ponto da superfície enquanto que a análise da luz (ou som) refletida dá a distância até o ponto (LEGGE, 1996).

2.8 – SISTEMAS A SEREM USADOS COM DADOS DIGITALIZADOS.

De acordo com BROACHA & YOUNG (1995), várias áreas de funcionalidade deveriam ser consideradas quando se avalia sistemas para serem usados com dados digitalizados.

O sistema de escolha de seu ambiente de engenharia pode depender de um certo número de fatores (BROACHA & YOUNG, 1995):

- o produto final desejado,
- o sistema de digitalização atual (utilizado),
- o sistema CAD/CAM residente (utilizado),
- a plataforma de hardware ,
- e quanto se pode gastar (ou se está disposto a gastar).

Ainda segundo BROACHA & YOUNG (1995), existem alguns pontos que se deve considerar em tal avaliação:

➔ Importação e exportação de dados, que é um fator chave.

Com relação a esse fator, será elucidado um pouco mais no item 2.13 desta dissertação, devido a sua abrangência ser de interesse relevante ao escopo da mesma.

➔ Fundamentação matemática do modelamento de superfície. Alguns sistemas de ER que produzem curvas e superfícies são baseados na matemática de *Bezier* enquanto outros usam representação “*nonuniform rational B-spline (NURBS)*”. Existem vantagens a favor das NURBS quando se manipula superfícies. NURBS permite manipulação localizada de geometria de curvas e superfícies ao passo que *Bezier* requer o cálculo de um retalho (*patch*) de curva ou superfície inteiro quando se modifica a geometria. Também, a geometria NURBS permite que contornos complexos e de forma livre sejam representados com um menor número de retalhos individuais de superfície.

Segundo ARONSON (1996), produtores podem, e costumam fazer ER no mesmo equipamento utilizado para realizar outros projetos e processos de engenharia. O que também era salientado por ABELLA et al. (1994), que informaram que as empresas muitas vezes adaptam conceitos básicos e os seus equipamentos disponíveis para realizar ER de acordo com suas necessidades.

A causa disto é que existem empresas que possuem um bom *software* de CAD, ou seja, de alto nível. Porém, tais empresas necessitam da ER devido a um ou a alguns dos motivos já citados no item 2.3, e cujo volume de trabalho que necessitem de ER, não justifica a aquisição de um módulo ou equipamento específico para tal propósito. Pode acontecer também o fato de a empresa que necessita realizar ER não possuir um bom *software* de CAD. Desse modo, se tal empresa não possuir volume de trabalho que justifique a aquisição de um *software* especializado especificamente para o propósito de ER, um bom *software* de CAD será um investimento muito mais justificável.

2.9 - CONSIDERAÇÕES SOBRE CAD.

A Engenharia Reversa tem a capacidade de auxiliar no ciclo de projeto, tanto no que diz respeito a atualização da documentação do projeto, quanto no desenvolvimento de modelos CAD para projetos que necessitam de superfícies de

forma livre, por isso algumas considerações sobre CAD se fazem úteis, e serão colocadas aqui.

“Com a disponibilidade de recursos computacionais a um preço baixo, sistemas auxiliados por computador para ER mostraram (provaram) encurtar ciclo projeto e manufatura de produtos em cerca de 40%” (VASILASH, 1989).

Segundo FERREIRA (1990) apud AGUIAR (1995), o CAD (sigla proveniente do inglês – *Computer-Aided Design*), Projeto Auxiliado por Computador, envolve qualquer tipo de atividade de projeto em engenharia, sobre o qual se faz uso interativo do computador, a fim de desenvolvê-lo, analisá-lo, otimizá-lo ou modificá-lo.

Desde o início dos tempos, o homem tem usado, basicamente, duas maneiras para representar suas idéias acerca de um objeto de forma que sejam compreendidas por outras pessoas: através de esculturas (fabricando modelos físicos em três dimensões) ou através de desenhos (representando em perspectiva ou vistas ortogonais); sendo que o processo de codificação e decodificação de desenhos 2D é passível de erros, tanto por parte de quem gera o código quanto por parte de quem o interpreta (SOLINHO, 1998).

Durante a década passada, a tecnologia CAD/CAM (*Computer-Aided Design/ Computer-Aided Manufacturing*) sofreu um crescimento rápido. Muitos fabricantes de moldes existentes adotaram esta tecnologia nos seus processos de produção, os quais mudaram da prancheta de desenho para o CAD 2D (SOLINHO, 1998).

Segundo SOLINHO (1998) até cerca de 30 anos atrás quase todos os desenhos mecânicos produzidos no mundo eram feitos através de processo manual, que apresentava os seguintes problemas:

- ♦ baixa produtividade devido à produção de desenhos estar diretamente ligada à habilidade do desenhista;
- ♦ erros de representação geométrica e erros de cotas que seriam detectados durante a montagem dos equipamentos;

- ♦ alterações no desenho muitas vezes poderiam significar refazê-lo totalmente;

2.9.1 - O ciclo de projeto.

Como a ER tem a capacidade de auxiliar no ciclo de desenvolvimento de projeto, conforme ABELLA *et al.* (1994), julgou-se conveniente fazer algumas colocações a respeito do processo de projeto convencional, e do ciclo de projeto com a utilização do computador como elemento de auxílio.

O processo de se projetar alguma coisa é caracterizado por SHIGLEY (1977) apud GROOVER & ZIMMERS (1984) como um processo iterativo, pois, segundo SCHÜTZER (1988), os resultados de uma fase subsequente realimentam as fases anteriores com o objetivo de otimizar o produto a ser desenvolvido. Consiste de seis passos, ou fases:

- ♦ Fase 1 - Reconhecimento de uma necessidade: Significa alguém perceber que um problema (uma necessidade) existe e precisa-se tomar alguma ação corretiva. Tal problema poderia ser um defeito no projeto de uma máquina, idealizar-se um novo produto para o mercado ou uma necessidade de um cliente.
- ♦ Fase 2 - Definição do problema: Envolve uma especificação completa do item a ser projetado, que inclui características funcionais e físicas, custo, qualidade e desempenho operacional.
- ♦ Fase 3 – Síntese,
- ♦ Fase 4 - Análise e otimização: A síntese e a análise estão intimamente relacionadas e envolvem iterações no processo de projeto. Nessa fase existe a concepção de um componente, que é sujeito a análise (que pode envolver sofisticados cálculos de engenharia), e pode ser melhorado através deste procedimento de análise e reprojeto (revisto). E assim o processo é repetido até que o projeto seja otimizado e se enquadre dentro das restrições impostas pelo

projetista. As partes do projeto são refinadas (síntese) dentro do sistema global final de maneira iterativa.

- ♦ Fase 5 - Avaliação: Avaliação interessa-se com quanto o projeto final reflete as especificações iniciais estabelecidas na fase de definição do problema. Normalmente requer a fabricação e teste de um protótipo para avaliar desempenho operacional, qualidade, e outros.
- ♦ Fase 6 - Apresentação: É a fase final do processo de projeto. Inclui a documentação do projeto por meio de desenhos, especificações de materiais, listas de montagens e assim por diante. Ou seja, requer a criação da base de dados do projeto.

Na figura 2.1 a seguir, é apresentada uma ilustração dos passos do processo de projeto convencional descrito por SHIGLEY (1977).

FIGURA 2.1 - Ciclo de projeto tradicional (SHIGLEY, 1977).

No entanto, GROOVER & ZIMMERS (1984) salientam que o problema com este processo iterativo é que ele é muito demorado (*time consuming*).

Com a introdução dos sistemas CAD, o que ocorre segundo CARVALHO (1989) é a automatização das atividades de rotina pelo computador, otimizando assim o trabalho do projetista e possibilitando que ele utilize maior parte de seu tempo em trabalho criativo, testando rapidamente, por exemplo, várias opções construtivas.

Segundo GROOVER & ZIMMERS (1984) existem várias razões fundamentais devido às quais se deve implementar um sistema CAD:

- ◆ Aumentar a produtividade do projetista.
- ◆ Melhorar a qualidade do projeto.
- ◆ Melhorar as comunicações durante o desenvolvimento e execução de um projeto.
- ◆ Criar uma base de dados para manufatura.

Conforme GROOVER & ZIMMERS (1984), com a aplicação do computador no processo de projeto convencional, pode-se estabelecer uma correspondência entre algumas tarefas do processo de projeto convencional com 4 funções realizáveis por sistemas CAD, sendo estas funções as seguintes:

- 1] MODELAMENTO GEOMÉTRICO.
- 2] ANÁLISE DE ENGENHARIA.
- 3] REVISÃO DO PROJETO E AVALIAÇÃO.
- 4] GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE DESENHOS.

Tais funções realizáveis por sistemas CAD se relacionam com as fases finais do processo geral de projeto descrito por SHIGLEY (1977) conforme descrito a seguir e na figura 2.2: O modelamento geométrico corresponde à fase de síntese do

projeto, na qual o projeto físico toma forma no sistema ICG³ (Computação Gráfica Interativa), que é uma ferramenta que pode ser usada pelo projetista para resolver um problema. A análise de engenharia corresponde à fase de análise e otimização. A revisão e avaliação do projeto corresponde à avaliação no processo tradicional. O desenho automatizado envolve o procedimento de se converter os dados de imagem do projeto em impressões em papel que corresponde à apresentação do projeto.

Nesse ponto é possível situar a Engenharia Reversa, de acordo com a abordagem do presente trabalho, que pode fazer com que se insira o modelo geométrico, na fase de modelagem geométrica, obtido a partir de uma peça física existente, possivelmente modelada à mão.

FIGURA 2.2 - Aplicação do computador ao processo de projeto descrito por SHIGLEY (1977) segundo GROOVER & ZIMMERS, (1984).

³ICG (*Interactive Computer Graphics*): denota o sistema orientado ao usuário no qual o computador é empregado para criar, transformar e exibir dados na forma de figuras e símbolos.

Na sequência serão descritas cada uma das funções realizáveis por sistemas CAD.

(1) MODELAMENTO GEOMÉTRICO.

No contexto da tecnologia CAD, modelamento geométrico refere-se à descrição matemática da geometria do objeto que é compatível com o computador. O modelamento geométrico permite que a imagem do objeto seja exibida e manipulada em um terminal gráfico através de sinais oriundos da CPU (*Central Processing Unit*) do sistema CAD. Quanto ao software que dá a capacidade de modelamento geométrico, este deve ser projetado para uso eficiente tanto pelo computador quanto pelo projetista (GROOVER & ZIMMERS, 1984).

Geralmente os modelos geométricos são classificados em modelos bidimensionais (modelo 2D) e modelos tridimensionais (modelo 3D).

(2) ANÁLISE DE ENGENHARIA.

O computador pode ser usado em trabalho de análise, que pode envolver cálculos de tensão-deformação, transferência de calor ou o uso de equações diferenciais para descrever o comportamento dinâmico de sistemas que estão sendo projetados (GROOVER & ZIMMERS, 1984).

(3) REVISÃO E AVALIAÇÃO DO PROJETO.

Entre outros, pode-se efetuar a verificação da acuracidade do projeto em terminais gráficos.

(4) GERAÇÃO AUTOMÁTICA DE DESENHOS.

Geração automatizada de desenhos envolve a criação de desenhos de engenharia (desenhos técnicos), diretamente da base de dados. Vamos fazer uma observação a esse respeito que é a seguinte: Para alguns departamentos de projeto antigos, a automação do processo de desenho representava a principal justificativa para o investimento num sistema CAD, muitos até tinham em mente que a denominação CAD (*Computer Aided-Design*) fosse proveniente de *Computer Aided-Drafting*, ou seja, Desenho Auxiliado por Computador.

Conforme descrito por ABELLA et al. (1994), com a utilização de sistemas CAD, tornou-se uma tendência em muitas empresas usar modelos físicos customizados em seus processos de projeto. Estes modelos são feitos no início da fase de projeto do produto e modificados para incorporar melhorias funcionais de acordo com solicitações e exigências, que podem advir de reuniões com o cliente. Prototipagem rápida e outros avanços na área de processamento de modelos foram desenvolvidos para dar suporte a essas atividades. Geralmente, quando o projeto final (aprovado) é obtido, as especificações customizadas da peça são refletidas no modelo e não nos desenhos iniciais, se eles já existirem. Assim, conceitos de projeto desenvolvidos durante a evolução do modelo vão sendo capturados fisicamente, mas não são incorporados de volta no processo de engenharia (processo de desenvolvimento do produto). Através da Engenharia Reversa, a geometria otimizada e as dimensões da peça podem ter o meio para completar-se a integração da atualização do projeto e “polimento” (melhoramento) da manufatura com os desenhos necessários e inclusive (se for o caso) gravações que podem mostrar o histórico da evolução.

2.9.2 - Modelamento Sólido

Segundo MENON (1993), o modelamento sólido emergiu no final dos anos 70 como uma tecnologia crucial em CAD/CAM mecânico (dentro da área de engenharia mecânica), devido ao fato de proporcionar representações de peças de forma “geometricamente completa” e permitir que importantes processos de manufatura sejam modelados.

De acordo com DIEHL (1998) um modelo sólido consiste de um modelo de superfície com dados de topologia adicionados. Dessa forma, então, pode-se recuperar um modelo de superfície subscrita (inserido) a partir de um modelo sólido.

O modelamento sólido permite criar, segundo WOHLERS (1998), uma réplica exata (um *mockup* digital) de um projeto proposto dentro do computador.

Acredita-se que o modelamento sólido não é necessariamente mais rápido do que os métodos de projeto alternativos, segundo WOHLERS (1998), porém ele oferece o benefício da utilização da prototipagem rápida (RP - do inglês

Rapid Prototyping). Essa combinação entre prototipagem rápida e modelamento sólido permite que se efetue modificações na peça que seriam possíveis de se fazer apenas mais adiante no processo, quando mudar se torna mais caro.

Os primeiros sistemas industriais de modelamento sólido apareceram em 1980-81 e na década de 90 substituíram entre 10 e 15% do modelamento e esboço, das aplicações mecânicas de CAD/CAM, segundo MENON (1993). Atualmente nos deparamos com a migração gradual dos projetos em 2D para 3D.

Com o modelamento 3D, o CAE e o CAM podem ser implementados mais eficientemente (TSENG & LAI, 1994).

Segundo relatos de ABELLA et al. (1994), avançados sistemas CAM, que também utilizam estes modelos computacionais, são incorporados na fase de desenvolvimento do produto.

Segundo WOHLERS (1998), no Japão por exemplo, sistemas 3D custam o dobro do preço dos softwares 2D. Isso faz com que o crescimento da utilização do modelamento tridimensional seja inibido. Então muitas empresas projetam em 2D, e para utilizar os recursos de RP, um especialista recria os dados em 3D usando modelamento sólido, que permite obter os arquivos STL, que são usados para a prototipagem rápida. Apenas adiantando, o Japão é o país que concentra a maior quantidade de atividades em prototipagem rápida em todo o mundo.

2.9.3 - Modelamento baseado em *Features*.

É uma proposta relativamente recente para promover a integração entre os vários elos de um sistema de manufatura CARVALHO (1997). É um conceito muito utilizado atualmente, sendo também utilizado para se trabalhar com o Pro/ENGINEER (*software* da PTC - PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION, utilizado para se desenvolver esta dissertação).

Segundo CARVALHO (1997), *features* podem ser definidos da seguinte forma:

- Alguma entidade nomeada com atributos de forma e função;

- Qualquer elemento geométrico ou funcional, ou propriedade de um objeto, útil no entendimento da função, comportamento ou performance daquele objeto.

As entidades geométricas básicas de um modelo, num sistema CAD, assim como uma superfície, aresta ou vértice, ou um atributo de geometria básica de uma parte assim como linha de centro, são freqüentemente referidos como *features* primitivos. Dentro da geometria componente, áreas específicas podem ser identificadas, as quais realizam funções particulares e são freqüentemente conhecidas como *feature* de forma. Exemplos de alguns *features* de forma são *slots*³, furos, chanfros, etc (LEGGE, 1996).

Alguns sistemas CAD permitem que a geometria seja criada usando *features* de forma definidos pelo usuário ou permitem que *features* primitivos ou superfícies sejam identificados e tenham parâmetros adicionais associados a eles para uso em atividades subseqüentes relacionadas a eles, assim como planejamento de processo ou programação CN de peças. Estes sistemas são conhecidos como sistemas baseados em *features* (LEGGE, 1996).

Segundo MERAT & RADACK (1992) apud SUHARITDAMRONG & MOTOVALLI (1995), a separação tradicional das atividades de projeto e manufatura na indústria moderna é reconhecida como o principal contribuinte para o desenvolvimento dos custos do produto. O modelamento baseado em *features* já provou ser uma ferramenta efetiva e econômica para projeto de produto. *Features* propiciam uma maneira para deixar (regularizar) o projeto num nível mais elevado de descrição do que desenhos técnicos ou descrições CAD tradicionais as quais caracterizam um objeto em termos de superfícies matemáticas ou volumes.

³ Slot : Abertura ovalada, rasgo, fenda, ranhura (Exemplo: rasgo de chaveta).

2.10 - CONSIDERAÇÕES SOBRE CAM.

KOCHAN (1986) afirma que pode ser dito que o CAM (*Computer-Aided Manufacturing*) começou realmente em meados dos anos 50 com o desenvolvimento de máquinas ferramentas numericamente controladas. No começo, estas máquinas eram programadas através de perfuração manual de cartões de papel, sendo interpretável diretamente por aparelhos de controle eletromecânicos das máquinas CN (Comando Numérico), que consistia principalmente de coordenadas binárias e uns poucos comandos (por exemplo, as velocidades do eixo e de avanço).

Sistemas operacionais dos anos 60 foram projetados principalmente para “processamento *batch*”⁴. O desenvolvimento de sistemas CAD (*Computer-Aided Design*) evidenciou a necessidade de comunicação entre diferentes programas independentes, que possibilitasse uma ligação flexível entre eles, e para a possibilidade de compartilhamento e transmissão de dados. Simultaneamente, o uso de programas gráficos e interativos cresceu rapidamente. Sistemas operacionais ofereciam ou somente uma ajuda pobre, ou normalmente nenhuma ajuda para projetistas de CAD/CAM com relação a estes pontos. Eles tinham ou que adaptar o sistema operacional, ou que desenvolvê-lo, ou ainda implementar diretamente em seus programas as facilidades necessárias. Tudo isso era feito em linguagem de máquina, não deixando nenhuma esperança de portabilidade. Como isto não é um trabalho normal do projetista de CAD/CAM, o resultado era bastante ruim (KOCHAN, 1986).

Então, no início dos anos 70 é que veio a idéia de construir-se sistemas específicos para CAD/CAM, oferecendo facilidades de programação para manipulação de dados, comunicação homem-máquina e inter-relação entre programas.

As técnicas CAD/CAM foram utilizadas inicialmente durante muitos anos na engenharia mecânica em indústrias especializadas, como a aviação (BESANT, 1985).

Segundo KOCHAN (1986), o aplicativo (CAM) consiste de um processador e um pós-processador os quais dão ao computador de uma forma geral, o

⁴Processamento *batch*: Processamento em lotes.

“cérebro” que ele precisa para entender e executar as instruções. O aplicativo (processador) recebe as instruções da peça e calcula o caminho de corte. Também aceita instruções de controle de avanço, rotação da máquina, fluido refrigerante, etc, e passa estes parâmetros no pós-processador, para a saída.

Devido a cada máquina ferramenta poder diferir, necessita-se de um meio de se comunicar estas diferenças ao computador. Esta tarefa é realizada por um programa de computador suplementar chamado *pós-processador*. Estas instruções são processadas pelo computador após o caminho de corte ter sido determinado pelo *processador*, daí então deve-se o nome *pós-processador*. É nesta fase que os pontos coordenados do caminho de corte, mais as instruções de programa de peça para avanço, rotação da máquina e outros comandos auxiliares são postos no formato que a máquina ferramenta necessita que eles estejam para interpretá-los.

A saída final do computador contém todos os comandos requeridos para produzir (reproduzir) a peça.

A vantagem da programação assistida por computador é que um programador de peça pode dar à máquina ferramenta as instruções necessárias em linguagem inteligível e ele (o programador) está livre da necessidade de fazer cálculos, o que resulta em um programa produzido numa fração do tempo que seria requerido normalmente e ainda livre de erro humano (KOCHAN, 1986).

Segundo REMBOLD et al. (1994), o *processador* gera os dados de interface independentemente de máquina, conhecidos como CLDATA (dados de “*cutter location*”, ou seja, das posições da ferramenta durante seu trajeto na transposição da peça durante o processo de usinagem).

O *pós processador* é um programa (*software*) que descreve a conversão de textos CLDATA para dados de controle específicos para a máquina controlada numericamente. Então ele tem acesso aos dados da máquina operatriz em questão, isto é, tem a informação sobre a estrutura de dados da máquina, e adapta o CLDATA ao controlador particular (dedicado) que a máquina possui.

Então, pode-se dizer que os componentes do sistema de programação são:

- ♦ programa da peça, escrito em uma linguagem de aplicação;

- ◆ programas de processamento, para traduzir o programa da peça;
- ◆ arquivos, para armazenar um ou vários programas da peça.

Conforme apresentado por DIEHL (1998), um sistema integrado CAD/CAM permite que se caminhe do modelamento conceitual até o ferramental de produção com suavidade e rapidez. Um projetista de produto trabalhando em conjunto com o produtor de ferramental pode direcionar o contorno (a curvatura) de um produto de maneira interativa. Considerações a respeito de forma, ajuste e função podem requerer testes ergonômicos de modelos tridimensionais.

No contexto da Engenharia Reversa, podemos citar como exemplo a produção de um *mouse* de computador, que após ser esculpido e estar na forma desejada, considerada confortável, é digitalizado e os dados dos pontos são exportados para um sistema CAD/CAM. Com *software* pode-se combinar os dados digitalizados dentro de superfícies e gerar os caminhos de ferramenta necessários. Um “positivo” do “*mouse*” pode ser usinado em material apropriado, para se testar conforto e desempenho de função. Quando o cliente aprova um protótipo, o conjunto de pontos de dados usados para usiná-lo é originado do mesmo modelo computacional que gera a cavidade do molde, ou o eletrodo de Eletro erosão. Levando o arquivo de projeto diretamente para a produção de ferramental acelera-se a comercialização do produto e elimina-se a demora com a documentação em papel.

2.10.1 - Considerações sobre CNC.

O termo CN (Controle Numérico) significa que uma máquina é controlada por números obtidos a partir da descrição da peça. Instruções geométricas e tecnológicas para a usinagem (manufatura) de uma peça são codificados em termos de números e contidos numa base de dados (um local que os armazena) (REMBOLD et al., 1994).

A geração dos dados para a usinagem automática de uma peça é chamada de programa CN. O programa possui uma série de informações de CN para uma

peça. Toda informação de CN contém instruções geométricas e tecnológicas, em outras palavras, dados dimensionais para a geração de uma peça (G, X, Y, Z, ...) e informação de acionamentos para operar a máquina ferramenta (F, S T, M) (REMBOLD et al., 1994).

Os dados dimensionais contém as posições alvo para a geração do contorno da peça. A geometria é gerada usando controles ponto a ponto, por linhas retas ou por trajetória contínua, descritos a seguir:

- ◆ O controle ponto a ponto permite movimentos de um ponto até um outro ponto com posicionamento rápido. O caminho da movimentação entre os pontos é determinado pelo controlador.
- ◆ O controle por linhas retas permite o movimento ao longo de um eixo a uma velocidade definida. Este controle é encontrado atualmente apenas em casos excepcionais.
- ◆ O controle por caminho contínuo pode ser usado para passar-se através de um número de caminhos selecionados (principalmente linhas e círculos) em velocidades definidas. Contornos arbitrários podem ser compostos a partir dos elementos de movimentação disponíveis (linhas e círculos).

O controle tecnológico influencia vários parâmetros sobre a tecnologia de usinagem, assim como, acionamento da velocidade do eixo árvore principal, avanços, equipamentos de troca de ferramentas, fornecimento de líquido refrigerante, etc.

Normalmente, a sequência de passos que executam uma tarefa é especificada em arquivos, cuja estrutura corresponde às normas ISO 6983 ou DIN 66025 (REMBOLD et al., 1994).

Apenas para explicar o termo CNC, segundo REMBOLD et al. (1994), o nível de processamento CN foi implementado originalmente em um circuito “*hard-wired*”. Mais tarde, componentes aritméticos na forma de algoritmos de processamento “*soft-wired*” foram introduzidos no controle numérico. Este tipo de

implementação é chamado controle numérico computadorizado, conhecido sob a sigla CNC. Atualmente, sistemas controle numérico (CN) são manufaturados como sistemas CNC.

DNC (*Direct Numerical Control*), é um sistema de organização de dados de CN, relacionando-se com o gerenciamento e distribuição de programas CN, através de um computador, para vários equipamentos numericamente controlados, como por exemplo para os Centros de Usinagem

2.10.2 - Centros de Usinagem.

Segundo REMBOLD et al. (1994), Centros de Usinagem são máquinas operatrizes, controladas numericamente, capazes de realizar várias operações de usinagem e realizar trocas de ferramentas automáticas a partir de uma magazine, ou outro aparelho de armazenagem de ferramentas, de acordo com a solicitação do programa de usinagem.

Existem, basicamente, dois tipos de Centros de Usinagem: Para peças rotacionais e para peças prismáticas.

A figura 2.3 ilustra um centro de usinagem.

FIGURA 2.3 - Centro de Usinagem do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo.

Os centros de usinagem para peças rotacionais são chamados de centros de torneamento ou simplesmente tornos.

2.11 - CONSIDERAÇÕES SOBRE CIM.

Segundo REMBOLD et al. (1985), CIM (*Computer-Integrated Manufacturing*) compreende projeto de produto, planejamento de produção, controle de produção, processo de produção, controle de qualidade, equipamento de produção e facilidades de planta.

AGOSTINHO (1993) apud AGUIAR (1995) afirmou que, simplificadamente, CIM pode ser definido como uma estratégia de manufatura que utiliza várias tecnologias auxiliadas por computador, para realizar a automação do sistema de manufatura como um todo; tal definição também pode se encontrar em (GROOVER & ZIMMERS, 1984).

Sistemas CIM incorporam muitos conceitos e tecnologias individuais de CAD/CAM, tipo (GROOVER & ZIMMERS, 1984):

- ◆ CNC;
- ◆ DNC;
- ◆ Controle de processo por computador;
- ◆ Gerenciamento da produção integrado por computador;
- ◆ Métodos de inspeção automáticos;
- ◆ Robôs industriais.

E consiste dos seguintes componentes básicos (GROOVER & ZIMMERS, 1984):

- ◆ Máquinas-ferramenta e equipamentos relacionados;
- ◆ Sistema de manipulação de materiais;
- ◆ Sistema computacional;
- ◆ Trabalho humano.

Segundo REMBOLD et al. (1994), o coração de um sistema CIM é um sistema gerenciador de informação, que processa, manipula e controla os dados compartilhados necessários para a administração, projeto, planejamento, programação e controle. A eficiência de operação de uma planta CIM depende da qualidade e integridade de um sistema de informação bem projetado. Há um relacionamento estreito entre os dados que estão sendo processados e usados nas várias atividades de manufatura, como por exemplo, as informações sobre o projeto são necessárias para planejamento, programação, programação de máquina, controle de qualidade e assim por diante.

Por esta razão existe também a necessidade de se manter os dados sobre o produto atualizados.

A figura 2.4, abaixo, mostra um diagrama proposto em 1993 por YAU et al. (1993) que descreve a função de RE e seu papel em CIM.

FIGURA 2.4 – ER e seu papel em CIM segundo YAU et al. (1993).

Para nós do Laboratório de CAD/CAE da Escola de Engenharia de São Carlos, a Engenharia Reversa não abrange apenas as funções delimitadas pelo quadro tracejado na figura 2.4. Tomando como base o conceito utilizado por outros autores, a abrangência sugerida engloba também o CAD/CAM, assim como a inspeção por MM3C e a usinagem CN.

2.12 - CONSIDERAÇÕES SOBRE ENGENHARIA SIMULTÂNEA.

Segundo GU & KUSIAK (1997), o aumento da competição global na indústria, tem feito as empresas produtoras (de manufatura) melhorarem sempre desde as características gerais (por exemplo, o aspecto) de seus produtos, assim como sua funcionalidade e qualidade, juntamente com implementação de redução nos custos do produto e do tempo até fazê-lo chegar ao mercado (*time to market*).

A fim de reduzir o ciclo de tempo da seqüência de produção inteira, esforço substancial tem sido focado na integração de sistemas de manufatura (CAI et al., 1996).

Neste competitivo mercado mundial dos dias de hoje, a engenharia industrial usa novos conceitos, assim como engenharia simultânea, em resposta à necessidade de aumento da flexibilidade e tempos de resposta menores (BIDANDA & HOSNI, 1994).

Segundo TSENG & LAI (1994), a ferramenta convencional de projeto e manufatura é um processo seqüencial e este tipo de processo de manufatura é de difícil sobrevivência na competição global que vivemos hoje. Como mencionam GU & KUSIAK (1997), a abordagem tradicional para desenvolvimento de produto precisa de uma boa quantidade de tempo para expandir o projeto do produto desde sua configuração inicial até produto final. Desde que 70% (REMBOLD, 1985) ou mais do custo do produto final é determinado nos estágios de projeto, pode-se realizar (alcançar) economias potenciais melhorando as práticas de projeto tradicionais. Com relação ao percentual de custo determinado nos estágios de projeto, segundo SYAN (1994) *apud* OMOKAWA (1998) no início do desenvolvimento de produtos existe um elevado grau de incerteza e é justamente nessa fase que se seleciona a maior quantidade de soluções construtivas, e as

escolhas ocorridas nessa fase são responsáveis por 60 a 95% do custo do produto final.

Segundo NUPES⁶ (1998) a utilização de modernas ferramentas não é suficiente para atingir os objetivos de melhoria da qualidade que o mercado atual exige. Uma das alternativas para enfrentar esta realidade é a prática da Engenharia Simultânea que é segundo o NOECRC⁷ (1998) uma abordagem integrada para projeto, manufatura e suporte de produto, dá ênfase ao projeto simultâneo do produto por um grupo de pessoas, especialistas em várias áreas de uma organização, com uma ênfase especial em atender as necessidades do cliente e usuário final

Segundo o NUPES (1998), o conceito de Engenharia Simultânea pressupõe que várias atividades possam ser desenvolvidas em paralelo, em oposição ao sequenciamento de etapas. Dessa forma é possível realimentar as outras atividades, mesmo que isso implique em retrabalhos parciais. Isso é vantajoso se comparado com desperdícios de tempo e recursos causados pelo não envolvimento completo dos vários setores de desenvolvimento em etapas anteriores ao ciclo. O tempo e recursos gastos para executar tarefas que posteriormente precisam ser refeitas jamais poderá ser recuperado. A utilização de ferramentas de simulação computacional para testar os projetos antes mesmo de se construir qualquer protótipo pode se mostrar de grande valia para a detecção de falhas do projeto. O resultado das simulações realimenta os setores envolvidos no desenvolvimento mecânico e eletrônico, provocando alterações que deverão ser repassadas aos demais setores, através do compartilhamento de arquivos.

ECRC⁸ (1996) menciona que quanto maior for o tempo de concepção menor será o “*time to market*” do produto e faz a seguinte comparação entre os ciclos de projeto tradicional e o de projeto simultâneo, comparação que é mostrada na figura 2.5.

No contexto da Engenharia Simultânea, a Engenharia Reversa é uma ferramenta efetiva para ajudar a engenharia industrial implementar conceitos modernos (BIDANDA & HOSNI, 1994).

⁶ NuPES = Núcleo de Pesquisa em Engenharia Simultânea (Centro Federal de Educação Tecnológica do Paraná).

⁷ NOECRC = New Orleans Electronic Commerce Resource Center.

⁸ ECRC = *Electronic Commerce Resource Center*. University of Scranton. Pennsylvania. USA.

FIGURA 2.5 - Comparação entre projeto sequencial e projeto simultâneo segundo ECRC (1996).

Para DHANDE & KARUNAKARAN (1993) projeto, análise e manufatura constituem os três componentes básicos de qualquer (alguns) ciclo de desenvolvimento de produto. O processo de projeto em geral, e o projeto de engenharia em particular, requerem considerações simultâneas de análise de engenharia assim como considerações de manufatura.

Segundo GU & KUSIAK (1997), o processo de projeto interdisciplinar inclui especialistas em: projeto de produto, projeto de sistemas de controle, projeto de partes eletrônicas, manufatura, planejamento da produção, controle de qualidade, serviços, marketing, etc. Acrescendo conhecimento no desenvolvimento de novos produtos e modificações sobre produtos existentes, enquanto se considera simultaneamente: funções, características, capacidade de manufatura, capacidade de montagem, confiabilidade e capacidade de venda do produto. Consequentemente facilitando o desenvolvimento rápido e a um custo baixo dos projetos iniciais chegando-se assim próximo ao ideal.

2.13 - TRANSFERÊNCIA DE DADOS ENTRE SISTEMAS CAD.

“De maneira simplificada, pode-se dizer que a busca desses padrões de transferência de informações gráficas entre sistemas CAD diferentes objetiva que os diferentes sistemas conversem entre si” (AGUIAR, 1995).

Segundo MÓDULO (1991), a solução para a troca de informações gráficas entre diferentes sistemas pode ser realizada de duas formas:

- ◆ Através de uma interface específica, onde a troca de informações entre dois sistemas necessita de dois programas específicos. Um que interprete os dados de um sistema A para um sistema B (por exemplo) e outro que faça o sentido inverso.
- ◆ Ou através de uma interface normalizada (formato padrão), que serve de arquivo neutro para a troca de informações. Com o auxílio dessa interface normalizada, todos os sistemas CAD podem montar seus arquivos neste formato através de programas que traduzem os dados de um determinado sistema para o arquivo neutro (que seria um pré-processador).

Então, como apresentado por AGUIAR (1995), a alternativa para as empresas sem esses padrões, seria a compra de diferentes sistemas para poder fornecer a informação com o sistema de seu cliente. Isto acarretaria altos custos de aquisição, treinamento e manutenção dos diferentes sistemas, ou ainda, propiciaria a utilização de conversores exclusivos.

Segundo LA ROSA (1992) apud AGUIAR (1995), desde o surgimento de diversos sistemas CAD, tornou-se necessário o desenvolvimento de um formato de arquivo capaz de ser lido por todos esses sistemas. Desta forma, procurou-se consolidar a troca de dados entre diferentes sistemas CAD e permitir que as informações se mantivessem estáveis ao longo do tempo.

Durante os anos 80 foram desenvolvidos vários padrões para a troca de dados de produto na busca da utilização de uma interface normalizada, tais como: IGES (“*Initial Graphics Exchange Specification*” – EUA), SET (“*Standard*

d'Exchange et de Transfert” – França) e VDA-FS (“*Verband der Deutschen Automobilindustrie-Flächenschnittstelle*” – Alemanha). Porém, várias deficiências foram identificadas através do uso destes padrões, podendo-se destacar, segundo MÓDULO (1991):

- ◆ ambigüidades de suas definições;
- ◆ restrições no que se refere ao escopo de dados de produtos representados;
- ◆ inflexibilidade no que concerne à formas de implementação;
- ◆ falta de procedimentos para a verificação de conformidade;
- ◆ ineficiência e impressão das implementações.

Segundo TSENG & LAI (1994), o que se possuía no referido ano era o seguinte; o CAD, um sistema; o CAE, um outro sistema e o CAM, um outro sistema diferente. Apesar de arquivos de dados poderem ser transferidos com os mais diferentes pacotes (padrões) de troca de dados, obtém-se muitos resultados incompletos e confusos em muitos casos ainda. E se os sistemas de CAD, CAE e CAM são incompatíveis, torna-se necessário, então, recriar o modelo geométrico em cada estágio de sistema. A troca de dados incompleta transforma-se dessa forma em morosidade e diminuição de eficiência (lucro).

Segundo ROZENFELD⁹ (1998) existem hoje no Brasil, *Bureaus* de serviços que executam o trabalho de transferência de um sistema para outro, tamanha é a dificuldade encontrada para realizar essa operação. Segundo ele essas empresas possuem vários sistemas CAD e fazem a ponte entre um fornecedor e seu cliente, pegando o projeto (arquivo) do fornecedor no formato que seu sistema possui e transformando para o formato do sistema do cliente.

WOHLERS (1998) relata que empresas utilizam o formato .STL, que é um padrão para arquivos de estereolitografia (prototipagem rápida) para efetuar a

⁹ ROZENFELD, H. (1998). Prof. Tit. USP - Escola de Engenharia de São Carlos. /Comunicação pessoal/.

transferência de dados gráficos entre sistemas CAD, devido à falta de confiança nos padrões existentes.

Entretanto padrões de transferência de dados, assim como o IGES, simplificaram a transferência de informação para sistemas CAD, fazendo da RE uma ferramenta muito mais aplicável para a maioria dos sistemas de equipamentos (ABELLA et al., 1994).

Ainda se espera que o STEP (*Standard for the Exchange of Product Model Data*) venha solucionar as lacunas relacionadas à troca de dados gráficos. Enquanto isso não ocorre, fabricantes de moldes e matrizes nos EUA por exemplo, apesar das restrições do padrão IGES, utilizam-no com sucesso, satisfazendo suas necessidades de transferência de dados através da utilização do IGES (KOELSH, 1997).

Será elucidado um pouco mais sobre o padrão IGES, por este ser o padrão utilizado na execução do sistema proposto nesta dissertação (Vide capítulo 4).

2.13.1 - IGES (Initial Graphics Exchange Specification).

Um intercâmbio eficiente e preciso de desenhos criados em diversos sistemas CAD necessita de um padrão de intercâmbio de dados digitais.

IGES é uma especificação de dados que é de domínio público e que foi pretendido como um padrão internacional para o intercâmbio de informações entre sistemas CAD (AUTODESK, 1990).

O padrão IGES foi adotado pelo governo dos USA e outras corporações de grande porte assim como por seus parceiros mundiais (AUTODESK IGES TRANSLATOR, 1997).

Versões de entrada e saída de IGES podem não ser simétricas e se estivermos interessados na manutenção de desenhos (informações) que devem ser trocados entre sistemas por um período de tempo, deveríamos estar familiarizados com os detalhes dos formatos dos padrões de troca (AUTODESK, 1990).

Falando um pouco mais detalhadamente sobre o padrão, há cinco seções

num arquivo de extensão fixada, como segue abaixo. Todos devem estar presentes e devem sempre estar na mesma ordem (AUTODESK, 1990) e (SMITH et al., 1988):

- 1] Start section (S) - Um comentário que é colocado de forma legível pelo homem e que pode ser usado para identificar a fonte do desenho, comentar seu formato e assim por diante.
- 2] Global section (G) - Esta seção é uma série de itens que descrevem características globais do arquivo IGES. Ela está no formato livre: cada item é separado por uma vírgula e a seção termina com um ponto e vírgula (estes são limitadores padrão).
- 3] Directory entry (D) - Proporciona um índice para o arquivo; suas entradas individuais também proporcionam informação (geralmente não geométrica) sobre as entidades que elas descrevem. Há uma entrada para cada entidade no arquivo. Cada entidade consiste de duas linhas organizadas dentro de 20 campos de oito caracteres. Um campo pode conter uma constante inteira, justificada à direita ou valor ponteiro (inteiro); um campo vazio implica um valor padrão. Os campos mais importantes para este documento são o campo 1 que é o número do tipo de entidade e campo 15 que é o número de forma: Entidades são identificadas pelos seus números de tipos e muitas entidades tem uma variedade de formas que também são numeradas.
- 4] Parameter data section (P) - Esta seção contém os dados paramétricos que descrevem cada entidade, assim como os pontos inicial e final de uma linha, ou o centro e raio de um círculo. Ela contém no mínimo uma gravação de cada entidade no arquivo. As gravações nesta seção estão em formato livre, muito parecido com a seção global: os parâmetros dentro de cada gravação são separadas por vírgulas e os finais das gravações com um ponto e vírgula. Um comentário pode aparecer entre o ponto e vírgula e a coluna 72 (inclusive) da linha sobre a qual ele está.

- 5] Terminate section (T) - Esta é uma linha singular (única) que está organizada em 10 campos de 8 caracteres. Os primeiros quatro campos contém o número da última linha em cada uma das 4 seções precedentes (S, G, D e P, nesta ordem). Os próximos 5 campos não são usados e o último campo é o número sequencial da “Terminate section”: este deve ser sempre igual T0000001.

A coluna 73 contém uma letra que identifica a seção (S, G, D, P ou T). As colunas 74 a 80 contém um número sequencial: cada seção é numerada a partir de 0000001 (um valor de ponteiro IGES, é simplesmente um número sequencial para a seção relevante) (ENCARNAÇÃO, 1986) (SMITH et al., 1988) (AUTODESK, 1990).

Para o IGES, a convenção *end-of-line* (EOL) depende das convenções do “*file system*” de operação que se está enviando. Por exemplo, as linhas de um arquivo IGES geradas num sistema MS-DOS terminam com um “*carriage return/linefeed pair*”, enquanto que as linhas num arquivo IGES geradas num sistema UNIX termina com um caracter singular (simples) de nova linha. O arquivo IGES gerado em outros sistemas operacionais podem não conter informações de final de linha (AUTODESK, 1990) (SMITH et al., 1988).

2.13.2 - Softwares comerciais usados para transferência de dados.

Existem *softwares* desenvolvidos para a tarefa de transferir dados, por exemplo, um *software* da MITUTOYO©, que tem a capacidade de fazer a conversão do padrão utilizado pelas suas MM3C (então para dados digitalizados por elas mesmas) e os transforma (transfere) para diversos padrões. O referido *software* é comercializado pelo nome de SCANPAK® e segundo o fabricante, tem uma abrangência de saída para 75 outros padrões de transferência. Algumas de suas características são (MITUTOYO, 1998):

- ◆ Permite a comunicação do SCANPAK com sistemas externos nos dois sentidos;
- ◆ Possibilita a migração de arquivos em 75 formatos (IGES, DXF, VDA, Deckel, Fanuc, Maho, Sinumerik, etc.);
- ◆ Transferência via arquivos ASCII, via RS232, fita, etc.

Segundo WOHLERS (1998), o software chamado *Rhino*, da autoria de *Robert McNeel & Associates* (Seattle, WA), é um modelador de curvas, superfícies e sólidos *NURBS* de baixo custo (US\$795,00) que suporta vários formatos de padrões de troca de dados assim como STL, DWG, IGES, DXF, JPG, BMP sendo que ele é muito forte com IGES, e desta forma várias empresas estão usando-o como tradutor IGES. Uma versão beta pode ser conseguida em <http://www.rhino3d.com>.

2.14 - CONSIDERAÇÕES SOBRE PROTOTIPAGEM RÁPIDA.

“O processo de ER acelera a produção de protótipos na indústria mecânica, eletromecânica, eletrônica, calçadista, etc.” (LATERZA & SANTOS, 1993).

A prototipagem rápida (RP, do inglês *Rapid Prototyping*), segundo ARONSON (1996), tem se tornado um elemento chave em ER. Utilizando a ER em um produto simples, pode-se ir diretamente ao caminho de ferramentas para a confecção de um molde ou matriz. Porém, a execução de um protótipo rápido é um passo intermediário confortável e freqüentemente usado.

Para PROCAST (1998), alguns pontos devem ser observados para a consolidação final do projeto: estilo, *design*, ergonomia, função, montagem e viabilidade técnica. E segundo YOGUI (1998), a materialização dos dados geométricos de um modelo CAD é fundamental para o sucesso de um projeto. E é nesse ponto que a tecnologia da prototipagem rápida apresenta-se como necessária.

O princípio da RP baseia-se em gerar um modelo tridimensional, com material próximo ao material definitivo do produto acabado, a partir do modelo

CAD. Desse modo, pode ser tratada como sendo a conversão direta de um modelo CAD em um objeto físico sólido (HINZMANN, 1998). Esta tecnologia permite que as empresas tenham um protótipo funcional sem a construção de ferramental definitivo para o produto em desenvolvimento. Desta forma as empresas podem simular as várias condições de trabalho às quais o produto será submetido. Quando concluídos tais testes, pode-se partir para a execução do ferramental definitivo, com base, então, no protótipo desenvolvido (HINZMANN, 1998). MTIAC (1998) reforça que este modelo físico, de prototipagem rápida, possibilita a observação de uma maior quantidade de informações sobre o produto mais antecipadamente, em seu ciclo de desenvolvimento, do que construir-se ferramental para fazer um protótipo.

Ainda segundo MTIAC (1998), o tempo para se fazer um modelo utilizando prototipagem rápida é de poucos dias, enquanto que para se fazer um protótipo da maneira tradicional pode levar desde semanas até meses, dependendo do método utilizado.

A prototipagem rápida foi comercialmente introduzida em 1987 com a apresentação do processo de estereolitografia (MTIAC, 1998), criada pela empresa norte americana 3D Systems. O material empregado para a geração dos protótipos era composto de diferentes resinas, fruto de um trabalho de parceria da mesma com a Ciba-Geigy (CIERE, 1997). A estereo litografia, é atualmente um dos métodos mais comuns de prototipagem rápida juntamente com o LOM (*Laminated Object Modelling*) e o SLS (*Selective Laser Sintering*) (PROCAST, 1998). Além destas duas, existem várias tecnologias de prototipagem rápida disponíveis no mercado (COMMERCIAL SYSTEMS, 1998).

A agilidade de criar, modificar rapidamente, e analisar um modelo geométrico de alta qualidade é central para o desenvolvimento de protótipos funcionais, indiferente do processo de prototipagem rápida em questão (ANOM, 1997a).

De acordo com WOHLERS (1998), produtores de sistemas de prototipagem rápida e agências (*bureaus*) de serviços relatam 2 anos de crescimento contínuo, guiado em muitos casos pela expansão nas aplicações fora da indústria pesada. Somente uma porção dessa expansão está relacionada à ER.

3 – ESTADO DA ARTE DA ENGENHARIA REVERSA

No capítulo 2, apresentou-se a ER de forma generalizada. Neste capítulo pretende-se mostrar um pouco mais detalhadamente as principais técnicas que são utilizadas em Engenharia Reversa, que são: A ER através de MM3C (que é a mais expandida), ER através da tecnologia do *laser* (que é indicada de maneira geral) e ER utilizando a tecnologia de Tomografia Computadorizada.

3.1 - DIGITALIZAÇÃO POR MÁQUINAS DE MEDIR 3 COORDENADAS (MM3C)

Conhecidas como MM3C, ou CMM (do inglês *Coordinate Measuring Machine*), tais equipamentos surgiram no início dos anos 60, com a primeira MM3C industrial da marca FERRANTI (MITUTOYO, 1998). Desde sua introdução, vêm passando por diversos avanços ao longo dos anos com relação à acuracidade e velocidade de medição. São equipamentos que possuem grande aceitação em metrologia dimensional e estão em constante comercialização (BIDANDA & HOSNI, 1994).

BOTTURA & FUOCO (1992), em pesquisa realizada junto a empresas fabricantes e usuárias de MM3C em 1992, mostraram que tais equipamentos chegam a ser até uma exigência, no meio industrial. Constataram que num mundo competitivo, já naquele ano, e mais ainda nos dias de hoje, considerava-se que uma empresa não poderia alcançar *status* de empresa detentora de autocontrole e qualidade total se não se possuisse tal equipamento. Então ter uma MM3C, em certos segmentos da indústria, era, e é ainda, um fator de sobrevivência. E isso demonstra a importância deste tipo equipamento para o setor industrial.

Como se pode notar, o uso das MM3C é muito difundido, e devido a isso são os equipamentos mais populares utilizados para a implementação de técnicas de Engenharia Reversa (BIDANDA & HOSNI, 1994).

Quando comparados com técnicas de inspeção manuais tradicionais, o benefício do uso das MM3C é óbvio, e notadamente os tempos de inspeção são significativamente mais baixos, podendo-se observar normalmente reduções de 90%. Tais equipamentos podem ser usados para inspecionar peças incomuns bem como para a inspeção de componentes antes, durante e depois dos processos de produção individuais (LEGGE, 1996).

Hoje em dia qualquer peça ou componente mecânico pode ter suas dimensões medidas em uma MM3C de maneira rápida e precisa (KWOK & EAGLE, 1991) e (CARDOZA, 1995).

Sua capacidade de medição é muito ampla. Podem controlar dimensões lineares em uma ou duas direções, posições em três direções, alturas, rebaixos, superfícies cônicas e inclinadas, contornos ou perfis, desvios geométricos, posicionamento de furos e inter-relacionamento geométrico (GONZÁLEZ, 1995) e (MIGUEL & KING, 1996).

Hoje em dia, as máquinas de medir são altamente automatizadas e freqüentemente incorporam trocadores de sensor, cabeças de sensor articuladas, manipulação de peças paletizado (por meio de *pallet*), identificação automática de peças, *software* controlado “amigavelmente” por usuário, análise estatística automática e *software* de gerenciamento de dados (LEGGE, 1996).

Para BOTTURA & FUOCO (1992), os benefícios trazidos pelas MM3C isoladamente já são compensadores, e quando estão interligadas a sistemas CAD/CAM, aplicações importantes podem ser alcançadas, como por exemplo o controle de inspeção e identificação de peças de maneira automática e a possibilidade de realização de Engenharia Reversa.

Segundo KWOK & EAGLE (1991) as MM3C podem diferir quanto ao tipo de controle utilizado, tamanho, configuração geométrica e precisão alcançada.

A precisão de uma MM3C é da ordem de + ou - 0.005 milímetros (+ ou - 0.0002 polegadas).

Quanto ao tipo de controle e acionamento, as MM3Cs podem ser acionadas manualmente, motorizadas, assistidas por computador ou CNC.

Segundo a Norma Americana ASME B89.4.1 (1995) são onze os tipos de MM3C's :

- ➔ Tipo Braço Horizontal com Mesa Fixa,
- ➔ Tipo Cantílever (braço em balanço) com Mesa Móvel,
- ➔ Tipo Braço Horizontal com Mesa Móvel;
- ➔ Tipo Ponte “L”;
- ➔ Tipo Cantilever (braço em balanço) com Mesa Fixa.
- ➔ Tipo Ponte Fixa.
- ➔ Tipo Coluna.
- ➔ Tipo Ponte Móvel.
- ➔ Tipo Braço Horizontal
- ➔ Tipo “*Gantry*” (ou Pórtico).
- ➔ Tipo Modo Duplex.

O tipo de MM3C que é inerente ao escopo deste trabalho é o Tipo Ponte Móvel, mostrado na figura 3.1. Este tipo de MM3C possui apalpador fixo ao braço vertical que se movimenta na direção do eixo Z, que é sustentado pelo carro horizontal que translada na direção de Y que por sua vez é sustentado pelo carro que translada na direção X. Estas máquinas são recomendadas para medições de peças de tamanhos variados, de pequenas a médias, e são as mais utilizadas no meio industrial.

Para dar uma idéia da evolução destas máquinas, melhorias em seu projeto, materiais de construção e técnicas de isolamento, possibilitam que as MM3C estejam localizadas atualmente também no chão de fábrica, uma vez que no passado sua localização natural é em uma sala com ambiente controlado (LEGGE, 1996).

FIGURA 3.1 - MM3C tipo Ponte Móvel (FLORES, 1998)

3.2 - DIGITALIZAÇÃO ATRAVÉS DE LASER.

Segundo YOGUI (1998) o sistema de digitalização a laser é uma tecnologia de Engenharia Reversa que permite a geração de um modelo tridimensional CAD a partir de uma nuvem de pontos, obtida pela varredura de um feixe de laser sobre um objeto. A precisão chega a 0,01mm e a velocidade de digitalização atinge cerca de 2000 pontos por segundo. WOHLERS (1998) afirma que a velocidade de coleta de pontos pode chegar à faixa de 20 a 25.000 pontos por segundo no entanto com uma resolução de 0.025 a 0,5 mm.

Para SURFACE RECONSTRUCTION (1998) varrer em 3D é o inverso do CAM, ou seja, dado um objeto físico, assim como um modelo de carro feito em resina (vide figura 3.2), uma pá de turbina ou uma cadeira, pode-se criar uma representação digital, capturando seu contorno. Ainda segundo SURFACE RECONSTRUCTION (1998) o varrimento 3D é parecido com tecnologias como fotocópia ou vídeo. Tais tecnologias permitem que rapidamente, precisamente e economicamente se faça a aquisição de aspectos úteis de um modelo físico, produzindo, desta forma, representações eletrônicas, que por sua vez podem ser usadas de uma maneira que os objetos físicos não podem ser. Representações eletrônicas podem ser visualizadas em uma tela, editados, armazenados em uma base

de dados, transmitidos via rede, analisados por simulações computacionais e usados como padrão para se fazer cópias.

FIGURA 3.2 - Varredura por laser de um modelo feito em resina (*clay*).

Segundo WERNER (1993) a digitalização por *laser* cria liberdade e economiza tempo. Tal economia pode ser notada pois pode-se utilizar a mesma geometria traçada para acabamento de uma peça, também para o desbaste da mesma.

Um outro aspecto que pode ser notado é que até então uma definição completa da superfície requeria que um certo número de varreduras de vários pontos de vista e orientações fossem feitos pelo operador, ao qual cabia a responsabilidade de posicionar o cabeçote de leitura (*laser-scanner*). Para solucionar esta situação, MILROY et al. (1996a) e MILROY et al. (1996b) apresentaram um sistema de automatização do varrimento por *laser*.

3.3 - ER ATRAVÉS DE TOMOGRAFIA COMPUTADORIZADA.

Segundo ARONSON (1996) visualizar internamente as peças é um problema em Engenharia Reversa devido à característica de sondas ópticas ou mecânicas que somente podem medir a superfície dos objetos. Para a solução de tal problema pode-se aplicar a Tomografia Computadorizada para a digitalização de um objeto.

Segundo STANLEY et al. (1995) e DUSAUSOY et al. (1995), a Tomografia Computadorizada, CT para facilidade de notação (do inglês – *Computer Tomography*), é um método de inspeção radiográfica que usa o computador para reconstruir uma imagem das seções transversais de um objeto a partir da transmissão de raios X através dele. A CT foi introduzida no início dos anos 70 como técnica para se realizar exames neurológicos e posteriormente estendeu-se para aplicações industriais.

DUSAUSOY et al. (1995) relata que devido à capacidade de penetração dos raios X, a CT permite análise das características físicas e, para certos materiais, químicas dos objetos. Sendo baseado em raios X, o método se aplica a peças metálicas e não metálicas, materiais sólidos ou fibrosos e peças com superfícies suaves ou irregulares. A capacidade de obtenção de dados internos e externos das peças sem ter que destruí-las, é, então, a principal vantagem da tomografia computadorizada.

Segundo STANLEY et al. (1995), a Tomografia Computadorizada proporciona o exame de uma peça inteira, independentemente de sua complexidade, e em pouco tempo (poucas horas). Afirma ainda que a CT pode fornecer medições dimensionais de uma peça com precisão comparada as máquinas de medir em 3 coordenadas. Uma outra característica dos sistemas de Tomografia Computadorizada é que os mesmos podem obter, também, centenas de pontos simultaneamente, sem a necessidade de programação especial para a exploração de superfícies, internas e externas, detectando também fendas e defeitos.

Na ótica de STANLEY et al. (1995), a complexidade do processo de se extrair informações geométricas por CT aumenta quando o objeto é composto de mais de um material, e especialmente quando o contraste entre as características dos materiais que o compoem é pequeno. Complexidade que é ainda maior se essas

características se relacionam com a textura do material, como por exemplo o alinhamento da direção de fibras.

O método de ER através de CT é de grande utilidade para aplicações em medicina, utilizando-se da integração entre CT, *softwares* de CAD e prototipagem rápida (para a qual será usada a notação “RP” – do inglês *Rapid Prototyping*).

Segundo WOHLERS (1998), na Europa, US e Japão já foram documentados muitos casos nos quais cirurgiões usaram modelos de RP como auxílio ao planejamento de cirurgias complicadas. Como por exemplo, a que ocorreu em fevereiro de 1997 para reconstrução de defeitos faciais de um garoto de 14 anos, que possuía tais defeitos desde o seu nascimento. O procedimento foi o seguinte: Com o auxílio da Tomografia Computadorizada foi realizada a digitalização do crânio do garoto, essa digitalização foi transformada em arquivo STL para então ser utilizado na construção de um modelo estereolitográfico. Os cirurgiões, então, utilizaram-se deste modelo para um melhor entendimento das condições do paciente e como auxílio no planejamento da cirurgia, contribuindo sobremaneira para seu sucesso e para a diminuição drástica do tempo de execução.

Um outro exemplo de aplicação de ER com o auxílio da Tomografia Computadorizada em medicina é o de KANKANAHLI et al. (1993). Este apresentou o projeto um sistema que combina computação gráfica e processamento de imagens para extrair a geometria, em 3D, do osso do joelho de pacientes. Tal sistema faz a utilização da CT e também possui uma interface para um *software* de CAD, CATIA, no qual a prótese é projetada. Este projeto, então, abastece uma fresadora CNC que produziria a prótese, particularizada para um paciente em especial.

O fator que, por enquanto, limita o método descrito acima é seu custo elevado.

A figura 3.3 ilustra o modelo de um crânio confeccionado através de Prototipagem Rápida (esterolitografia), digitalizado através da Tomografia Computadorizada.

FIGURA 3.3 - Modelo de crânio, em estereolitografia, digitalizado através de Tomografia Computadorizada.

3.4 – SOFTWARES VOLTADOS PARA ER.

Segundo BROACHA & YOUNG (1995), devido ao fato de que maioria dos projetos em ER começa com dados digitalizados, uma boa funcionalidade na compreensão para exibição e manipulação de dados de pontos é muito importante.

Existem empresas fabricantes que oferecem uma série de *softwares* de medição, com interface voltada especificamente para execução de Engenharia Reversa.

3.4.1 – Software da MITUTOYO.

A MITUTOYO© comercializa o SCANPAK3® que é um *software* de inspeção, que possui as seguintes características (MITUTOYO, 1998):

- Medição e análise de perfis;
- Comparação gráfica e matemática;
- Cotação de perfis medidos;
- Digitalização de superfícies;
- Geração matemática de perfis;

- Funções de contração e dilatação de perfis;
- Função para cálculo de melhor posição;
- Funções para alinhamento de perfis.

3.4.2 – *Softwares* da RENISHAW

A RENISHAW®, por sua vez comercializa os seguintes *softwares* (RENISHAW, 1998) :

- ➔ TRACEOUT: Pacote da RENISHAW® para PC que permite o rastreamento e digitalização de modelos originais em MM3C, máquinas-ferramenta CNC e no sistema chamado “*CYCLONE*” (vide item *CYCLONE* e figura 3.5 na página seguinte), produzindo automaticamente programas CN para execução da peça (RENISHAW, 1998).
- ➔ RETROSCAN: É um sistema de rastreamento “*retrofit*”¹⁰ para máquinas ferramentas, que possibilita terem função de medição, é mostrado na figura 3.4 (SCANNING SYSTEMS, 1998a).

FIGURA 3.4. - Sistema *retrofit* RETROSCAN® (RENISHAW, 1998)

¹⁰ RETROFIT : ajustar um programa ou sistema em vigor, com o fim de acomodar uma parte nova ou modificada e feturar todas as outras mudanças necessárias aos programas e sistemas envolvidos.

- ➔ RENSCAN200: É um sistema de rastreamento para máquinas CNC que possui todas as características do RETROSCAN, porém tem melhoras em relação a ele, dentre as quais velocidade mais alta e controle com nível superior ao RETROSCAN (SCANNING SYSTEMS, 1998b).
- ➔ RENSCAN350: É um sistema semelhante ao RENSCAN200 (SCANNING SYSTEMS, 1998c).
- ➔ CYCLONE: É um sistema digitalizador completo que segundo o fabricante é projetado para usuários que necessitam de rastreamento de altas qualidade e velocidade assim como detalhamento fino. É mostrado na figura 3.5 (SCANNING SYSTEMS, 1998d).

FIGURA 3.5 - Sistema CYCLONE (RENISHAW, 1998)

3.4.3 – *Softwares* da BROWN-SHARPE.

A BROWN-SHARPE comercializa diversos *softwares* voltados para a manipulação de dados digitalizados:

- ➔ CHORUS: É um *software* de medição e sistema de controle, baseado em mini-computador, para usuários que necessitem de um ambiente multi-tarefa e multi-

usuário em operações de inspeção. Possui aplicação para metrologia dimensional incluindo geração e análise de superfície (CHORUS, 1998).

➔ DIGISCAN: É um controle para varrimento contínuo e digitalização de superfícies de forma livre para MM3C DEA (modelo da máquina de medir) e sensores de leitura contínua. Possui pacote CAM com variação de estratégias de usinagem (DIGISCAN, 1998). Pode-se visualizar um exemplo de tal sistema através da figura 3.6.

FIGURA 3.6 - Sistema DIGISCAN (DIGISCAN, 1998)

➔ PC-DMIS: Oferece funcionalidade para ER estabelecendo modelos CAD precisos quando dados matemáticos não estão disponíveis (PC-DMIS, 1998). A seguir pode-se visualizar um exemplo de tal sistema através da figura 3.7.

FIGURA 3.7 - Sistema PC-DMIS (PC-DMIS, 1998)

3.4.4 - Softwares da Laser Design.

- ➔ SURVEYOR : Sistema de digitalização de alta velocidade, da empresa, Laser Design Inc., utilizando a técnica de varrimento por laser (3D DIGITIZING SYSTEM, 1998).
- ➔ SURVEYOR 1200: Sistema de digitalização que segundo o fabricante pode coletar rapidamente dados 3D dos objetos que estiverem sendo trabalhados e fazer uma reconstrução de seções transversais planas. O DataSculpt®, *software* descrito no item 3.5, identifica superfícies e linhas limites, e então faz desses dados a saída para um sistema CAD 3D para modelamento de superfície e sólido (3D DIGITIZING SYSTEM, 1998).

3.5 - ALGUNS SOFTWARES ESPECÍFICOS PARA ER.

Em 1995, BROACHA & YOUNG (1995) apresentaram uma relação que pode fornecer uma boa orientação a respeito de *softwares* específicos para ER em disponibilidade no mercado da época. Apresentada na tabela abaixo:

✓ - Em pacote próprio (“*stand-alone*”)

● - Função vinculada a uma extensão (módulo) do aplicativo

Fabricante	Sistema	Filtragem de dados	Criação de curvas	Criação de superfícies	Criação de caminho de ferramenta	Criação de arquivo STL ¹¹
Laser Design	DataSculpt	✓	✓	✓	✓	✓
Computer Design Inc. (CDI)	Design Concept	✓	✓	✓		●
Delcam Int'l	DigiCAM	✓	✓	✓	✓	✓
Carl Zeiss	Holos	✓	✓	✓	✓	
Control Data Corp. (CDC)	ICEMSurf	✓	✓	✓	✓	
Parametric Technology Corp.	Pro/Scan-tools	✓	✓	✓	●	✓
Design Automation	RevEng	✓	✓	✓	✓	●
Matra Datavision (Cisigraph)	Surface Reconstr	✓	✓	✓	●	●
Imageware	Surfacer	✓	✓	✓		●
DEA/Brown & Sharpe	Surfer	✓		✓		
Electronic Data Systems	SurfSeg	✓	✓	✓	✓	✓

¹¹ STL: formato de arquivo necessário para utilização de técnicas de Protoipagem Rápida.

4 - PROJETO E IMPLEMENTAÇÃO DO SISTEMA DE ER

Como já apresentado anteriormente o presente trabalho tem como um de seus objetivos projetar e implementar um sistema de Engenharia Reversa utilizando um sistema CAD comercial, e realizar a integração (ligação) desde a máquina de medir 3 coordenadas até o equipamento de usinagem CNC.

Essa integração, então, tornará possível a duplicação de um objeto físico existente utilizando tais equipamentos, o que deverá proporcionar rapidez, boa precisão e fidelidade assim como flexibilidade à cópia realizada.

No presente trabalho, já foi mostrado que a rapidez obtida com o processo apresentado é relativa, uma vez que existem outros métodos, ainda utilizados, com os quais se faz Engenharia Reversa, que são o fresamento de cópia e o fresamento de cópia baseado em CN. Estes métodos exigem muito tempo de pessoal e possuem uma série de restrições em todo o trabalho de cópia. Foi mostrado também que existem equipamentos específicos, baseados no método da abordagem avançada por superfície. Estes equipamentos específicos são capazes de efetuar o processo em menor tempo do que o processo proposto neste trabalho, uma vez que este se baseia no método da abordagem indireta por superfície, entretanto como já foi dito, são específicos para Engenharia Reversa.

O sistema de Engenharia Reversa a ser apresentado se utiliza de um equipamento de digitalização, a MM3C, que não é tão veloz quanto aparelhos específicos para a leitura de dados de superfícies, como por exemplo digitalizadores *laser* ou tomógrafos computadorizados. Contudo, a MM3C também possui vantagens em relação a estes dois citados, como por exemplo um custo menor do que aparelhos específicos e o fato de ser amplamente utilizado pela indústria no controle dimensional de peças manufaturadas, moldes, matrizes, etc., já há algum tempo. Por isso, como já evidenciado nesta dissertação, a MM3C é o método de digitalização mais utilizado em Engenharia Reversa.

4.1 - ESTRUTURA DO SISTEMA DE ER PROPOSTO

O sistema de Engenharia Reversa proposto no presente trabalho faz utilização dos seguintes equipamentos: MM3C, *software* CAD comercial e centro de usinagem CNC, todos disponíveis no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos (EESC) da Universidade de São Paulo.

A figura 4.1 ilustra o referido sistema no qual é possível visualizar o processo de “cópia” de uma peça existente, efetuado da seguinte forma: A peça existente é submetida à MM3C que fornecerá um arquivo texto contendo as informações das coordenadas X Y Z de cada ponto lido. Esse arquivo será lido pelo CONVERSOR IGES que irá transformá-lo em arquivo IGES, de pontos, o qual poderá, então, ser reconhecido pelo *software* de CAD comercial, Pro/ENGINEER. No Pro/ENGINEER serão efetuadas as operações necessárias para a obtenção do modelo sólido da peça assim como a obtenção do arquivo Comando Numérico (CN) necessário para se dar entrada para o Centro de Usinagem. Com o arquivo de CN no Centro de Usinagem pode-se proceder a execução de uma nova peça.

Pensou-se em utilizar outras alternativas que também poderiam tornar efetiva a integração desejada, fazendo utilização de outros equipamentos disponíveis no Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo. Poderia utilizar-se um outro *software* de CAD, por exemplo o AutoCAD, ou então um diferente *software* de CAM, como por exemplo o SMARTCAM ou o UNICAM, para a geração dos caminhos de ferramentas. Tais alternativas poderiam ter sido seguidas com o intuito de transpor qualquer limitação de equipamentos que fosse encontrada.

A figura 4.2 apresenta as outras alternativas cogitadas que poderiam Ter sido seguidas devido a dificuldades que foram encontradas, tais como falta do *software* de CAD ou falta de capacidade de digitalização por parte da MM3C, ou seja de capturar a informação da MM3C utilizada.

A seguir serão descritas as alternativas cogitadas, as quais se referem à figura 4.2 da página 60:

FIGURA 4.1 - Sistema de RE implementado no presente trabalho.

❶ Uma possibilidade levantada era a busca de uma MM3C mais moderna, possivelmente junto à indústria, que nos fornecesse arquivo em formato que pudesse ser lido pelo Pro/ENGINEER. Nessa tentativa foi possível ter contato com a empresa Máquinas Agrícolas Jacto S.A. e obter o arquivo digitalizado do molde do PJH, que pôde ser modelado no Pro/ENGINEER pelo autor (vide item 5.1). ❷ Uma outra opção era usar o CONVERSOR IGES para fazer a tradução de um formato de arquivo ASCII, transformando-o em padrão IGES, para que pudesse ser inserido num *software* de CAD para a obtenção do modelo sólido e posteriormente do código CN. Tal alternativa foi a utilizada para o sistema mostrado na figura 4.1. ❸ E uma última opção era inserir o arquivo obtido pela MM3C em formato adequado, através da ação de um outro tipo de tradutor, diretamente num *software* de CAM, pois com a ocorrência de problemas para utilização do Pro/ENGINEER, a partir deste *software* de CAM tentaria-se gerar o código CN necessário para a usinagem da peça.

FIGURA 4.2 - Outras alternativas cogitadas

4.1.1 - O Equipamento de digitalização utilizado.

Conforme visto anteriormente, existem vários equipamentos que podem ser utilizados para a digitalização de uma peça em Engenharia Reversa (vide item 2.6).

Para a realização do presente trabalho dispõe-se de uma MM3C marca BROWN & SHARPE, localizada no Laboratório de Metrologia da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, mostrada na figura 4.3, que possui as seguintes características:

- tipo: Ponte móvel (*Moving Bridge*).
- Ano de fabricação/país de origem: 1988/USA.
- Incerteza linear: $\pm 0,003\text{mm}$.
- Repetibilidade: $\pm 0,002\text{mm}$.
- Capacidade de trabalho: X=457mm, Y=610mm e Z=381mm.
- Faixa de operação: X=356mm, Y=406mm e Z=305mm.

É importante salientar que tal equipamento não possuía capacidade de digitalização de pontos, que não é uma função original do equipamento utilizado. Dessa maneira, esta MM3C possuía capacidade de realizar apenas operações de metrologia normais assim como análise de circularidade, planicidade, distância entre dois pontos, etc. A capacidade de capturar as coordenadas de pontos para utilizá-los na execução deste dissertação deu-se em decorrência do trabalho realizado por FLORES (1998), durante a realização de sua dissertação de mestrado. FLORES (1998) implementou a possibilidade de “roubar” da MM3C em questão os valores das coordenadas de pontos. Desta forma os pontos medidos pela MM3C puderam ser gravados em um arquivo, em formato ASCII. Com isso, foi possível implementar um *software* de conversão, o qual foi batizado de CONVERSOR IGES, durante a realização da presente dissertação. Então, dessa forma, o CONVERSOR IGES realiz

FIGURA 4.3 - MM3C Ponte Móvel, Brown & Sharpe, utilizada no trabalho.

para um arquivo no padrão IGES, o qual poderá ser lido pelo *software* de CAD.

Cabe ressaltar que sem a capacidade de captura das coordenadas dos pontos da MM3C automaticamente, ocorre a necessidade de anotar ponto a ponto, com auxílio de lápis e papel. Posteriormente digitar-se esses pontos em um editor de texto, ou então anotá-los já diretamente em editor de texto, de um computador qualquer. A partir daí seria possível a inserção de tal arquivo no CONVERSOR IGES a fim de proceder a sua transformação para o formato IGES, de pontos. Na ausência do referido conversor, o operador teria fazer a inserção dos pontos no sistema CAD em questão também através da digitação unitária dos mesmos.

Faz-se aqui a observação de que existem empresas que se encontravam, e se encontram, em situação igual a descrita até aqui. Tais empresas possuíam equipamento de metrologia semelhante ao citado e utilizado nesta dissertação, portanto sem a capacidade de registro dos pontos lidos diretamente em arquivo. Assim quando na realização de ER, procediam como descrito acima, tanto para a captura dos pontos como para a inserção de suas coordenadas num sistema CAD. Este fato pôde ser verificado na prática, pessoalmente, pelo autor.

4.1.2 - O CONVERSOR IGES.

Uma vez concluída a digitalização, o resultado obtido é um arquivo ASCII. O formato desse arquivo fornece o valor das coordenadas dos pontos lidos pela MM3C, mostrado na figura 4.3.1. Deste modo deve-se prover meios para que o arquivo obtido seja lido pelo *software* CAD comercial.

X	Y	Z
33.006	-20.146	22.488
31.494	-20.146	10.492
30.946	-20.146	0.468
28.196	-20.146	-9.658
23.718	-20.146	-18.630
18.624	-20.146	-27.082
14.830	-20.146	-32.838

FIGURA 4.3.1 - Exemplo do formato do arquivo texto obtido após a digitalização efetuada na MM3C.

Devido a isto, torna-se crucial a existência deste conversor para realizar a transformação do arquivo que possui os dados das coordenadas dos pontos para um formato legível pelo sistema CAD. Uma vez que o sistema CAD utilizado, o Pro/ENGINEER, não possui capacidade de ler e interpretar os pontos na forma de arquivo texto com esta estruturação. Existem sistemas CAD, como é o caso do sistema CATIA¹², que tem capacidade de interpretar arquivos nesse tipo de formato de acordo com LIRANI (1998)¹³.

4.1.2.1 - Características do CONVERSOR IGES.

¹² CATIA: sistema CAD da IBM.

¹³ LIRANI, J. (1998). Prof. Tit. - USP - Escola de Engenharia de São Carlos. /Comunicação pessoal/.

Vários são os padrões de transferência de dados gráficos entre sistemas CAD, como já visto anteriormente, porém era necessário escolher apenas um.

Julgou-se então ser o padrão IGES o mais apropriado devido a uma série de fatores como por exemplo por ser este o padrão mais utilizado dentre aqueles aceitos como entrada pelo sistema CAD, assim como por sua característica de padrão muito bem aceito internacionalmente em várias instituições e empresas (vide características do padrão IGES no capítulo 02). Sendo portanto o padrão escolhido.

Necessitava-se também escolher uma linguagem de programação com a qual o CONVERSOR IGES seria escrito. Para isto foi utilizada a linguagem C devido também à alguns fatores peculiares. Dentre estes fatores, pode-se citar suas características de linguagem estruturada, portabilidade e ampla abrangência das funções de programação.

Então, sendo escrito em linguagem de programação C e utilizando o formato padrão IGES como arquivo desejado de saída, o CONVERSOR IGES possui as seguintes características funcionais: O programa faz a leitura dos dados de entrada, ou seja, do arquivo texto, armazena os dados de entrada, referentes às coordenadas X Y Z de cada ponto, numa tabela, recupera os dados da tabela realizando sua conversão para o padrão de transferência de dados gráficos e grava o arquivo de saída no formato adequado no diretório corrente.

A figura 4.4 ilustra o algoritmo que acabou de ser descrito.

FIGURA 4.4 - Algoritmo do CONVERSOR IGES.

4.1.3 - O sistema CAD utilizado.

O sistema CAD utilizado na integração proposta nesta dissertação foi o Pro/ENGINEER, *software* da *PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION* (PTC), versão 18.0. O mesmo encontra-se instalado em estações tipo IBM RISC 6000, no Laboratório de CAD/CAE do Departamento de Engenharia Mecânica da EESC - USP. Este sistema foi adquirido devido as suas características particulares que lhe permitem ampla funcionalidade para a prática da engenharia., como por exemplo, segundo a PTC:

- Ser paramétrico;
- Ser baseado em *features*;
- Ser totalmente associativo;
- Base de dados integrada única;
- Dá suporte ao ambiente de engenharia simultânea.

No Pro/ENGINEER, podem ser encontrado módulos como por exemplo o Pro/SURFACE, que é específico para modelamento de superfície e possui ampla variedade de funções.

Quanto à geração dos caminhos de ferramenta para a usinagem da peça, também existe módulo específico, chamado de Pro/MANUFACTURING. Este módulo pode efetuar o cálculo de caminhos de ferramentas de forma automatizada e desenvolver processos CN utilizando parâmetros de manufatura. Neste módulo, também é possível realizar otimização dos caminhos de ferramenta visando usinagem de produção.

4.1.4 - O Equipamento de usinagem utilizado

O último componente do sistema de Engenharia Reversa implementado é o responsável pela usinagem da nova peça.

Para este trabalho foi utilizado um Centro de Usinagem, marca VARGA, mostrado na figura 4.5, disponível no Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação do Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, que possui as seguintes características:

- Fabricante: VARGA Tecnologia Industrial.
- Ano de fabricação: 1990.
- Modelo: MFH - 40.
- Comando Numérico: SIEMENS Sinumerik 3M.
- Faixa de rotação: 50 a 5000 rpm.
- Potência do motor do eixo árvore: 10,5 kw.

FIGURA 4.5 - Centro de usinagem CNC VARGA MFH - 40, utilizado neste trabalho.

5 - APLICAÇÃO EXPERIMENTAL DO SISTEMA DE ER

Durante o desenvolvimento deste trabalho, foi possível a realização de algumas aplicações experimentais na busca da melhor compreensão da metodologia utilizada.

Primeiramente foi possível efetuar operações para reconstrução de superfícies utilizando o arquivo da digitalização, já em formato IGES, de um molde para peças plásticas sopradas chamado de PJH. Tal arquivo foi obtido junto a uma empresa nacional fabricante de produtos agrícolas, que, na época, necessitava fazer uma cópia do referido molde.

A peça que foi digitalizada pode ser vista na figura 5.1.

FIGURA 5.1 - Modelo em resina do molde do PJH (Máquinas Agrícolas Jacto S/A).

Uma outra peça, possuindo uma geometria de superfície relativamente simples, que recebeu a denominação de “BLOCO S”, mostrada na figura 5.2, foi trabalhada posteriormente ao molde do PJH.

Nesta aplicação já foi utilizado o CONVERSOR IGES, implementado neste trabalho, para a obtenção do arquivo de entrada do sistema CAD através da conversão do arquivo texto.

FIGURA 5.2 - “BLOCO S” : Modelo calculado para fins de teste.

Como demonstração da completa integração do Sistema de Engenharia Reversa proposto, empregou-se uma peça com nível mais elevado de complexidade em relação aos contornos que a descrevem. Trata-se de um rosto humano em porcelana, confeccionado em porcelana, que recebeu a denominação de “ROSTINHO”, mostrado na figura 5.3.

Na sequência deste capítulo, tais casos serão mostrados mais detalhadamente.

FIGURA 5.3 - “ROSTINHO” : Face de porcelana. Demonstração da integração completa.

5.1 - PJH: Peça industrial

Foi possível tomar conhecimento da necessidade e funcionalidade da Engenharia Reversa bem de perto, através do contato com uma empresa fabricante de equipamentos agrícolas. A referida empresa, cordialmente colaborou com o presente trabalho permitindo o acompanhamento das atividades relacionadas à duplicação de um de seus moldes de sopro, responsável pela fabricação do tanque do pulverizador costal denominado PJH.

A empresa, Máquinas Agrícolas Jacto S/A, na época, final de 1997, estava tendo seu primeiro contato com um novo equipamento de medir 3 coordenadas, de marca DEA modelo MISTRAL, equipamento esse que contava com *software* voltado para Engenharia Reversa (PPSCAN). A referida empresa, encontrava-se na seguinte situação: Possuía três moldes de sopro que deveriam estar todos em produção em período de elevada demanda a fim de atender seus prazos e clientes. Um desses moldes não possuía as mesmas características dimensionais dos outros

dois. Devido ao PJH existir desde antes da época da empresa possuir sistema CAD/CAM a empresa não possuía arquivos CAD referentes a essa peça.

Existe uma peça metálica que é montada, e deve encaixar perfeitamente na base nos tanques soprados. Para as peças produzidas no molde com diferenças dimensionais em relação aos outros, o encaixe da peça não estava nos padrões de conformidade da empresa.

A solução encontrada, então, foi recorrer a ER para efetuar a cópia de um dos moldes que fabricavam tanques perfeitos. O novo molde substituiria, então, o molde responsável pela produção de peças fora dos padrões. Assim se poderia assegurar a qualidade de todos os tanques produzidos para este produto.

A Engenharia Reversa foi solicitada uma vez que o molde defeituoso já se tratava de uma cópia dos outros, feita utilizando outro método de cópia¹⁴, assim sendo buscou-se uma solução confiável.

A digitalização da peça foi feita com o auxílio do *software* já citado e seguiu o método da abordagem indireta por superfícies (MA, 1994). A partir dos dados obtidos por esta digitalização foi possível executar o modelamento da superfície e posteriormente gerar os arquivos CN para a usinagem de um novo molde.

O arquivo digitalizado pela MM3C, foi gentilmente cedido pela empresa para que pudesse ser utilizado no presente trabalho.

Cabe ressaltar que essa possibilidade veio a ajudar sobremaneira no enriquecimento do aprendizado acerca de Engenharia Reversa e consequentemente para a realização deste trabalho.

A superfície reconstruída é apresentada na figura 5.4.

¹⁴ Não foi possível obter informações de qual foi o método utilizado anteriormente.

FIGURA 5.4 - PJH: Superfícies executadas para fins de teste.

5.2 - Bloco S: Geometria estipulada para fins de teste

Para efeito de verificação do CONVERSOR IGES, implementado neste trabalho, assim como de todo o sistema de Engenharia Reversa projetado, efetuou-se a Engenharia Reversa da peça denominada *BLOCO S* como um primeiro teste.

As dimensões da superfície da peça foram estipuladas e os pontos relativos ao delineamento do seu contorno foram inseridos em um arquivo texto, no formato adequado para a leitura e interpretação pelo CONVERSOR IGES. O formato do arquivo que foi utilizado, que possuía a informação da posição dos pontos, era exatamente o mesmo daquele que seria fornecido pelo *MAQMED3*, como se eles tivessem sido digitalizados na *MM3C*.

Decidiu-se proceder de tal forma, pois essa operação não poderia esperar para ser efetuada, e a interface projetada para o congelamento das coordenadas ainda não estava funcionando. Porém o procedimento adotado, de simular a geometria de

uma superfície funcional e seus respectivos pontos, em nada prejudicaram as verificações que eram necessárias.

Posteriormente o arquivo texto foi processado pelo referido programa de conversão e dessa forma foi obtido o arquivo IGES relativo aos pontos digitalizados. De posse deste arquivo foi possível então “inserir” as coordenadas dos pontos que delimitam essa superfície no sistema CAD e realizar as operações necessárias a sua reconstrução.

Os arquivos CN necessários para que o Centro de usinagem executasse uma nova peça, foram obtidos diretamente no Pro/ENGINEER®. Assim pôde-se efetuar as operações de usinagem e construir a peça.

Neste item, não foram elucidados maiores detalhes sobre as operações realizadas, porque isso será feito mais adiante, nos próximos itens.

A peça executada é mostrada na figura 5.5.

FIGURA 5.5 - “BLOCO S” : Modelo executado para fins de teste.

5.3 – ROSTINHO: Integração experimental completa .

Como aplicação efetiva para a demonstração da integração proposta, procurou-se uma peça com uma maior complexidade de contornos e que pudesse representar com maior realismo as denominadas superfícies esculpidas. Tal peça trata-se então de uma face humana, confeccionada em porcelana, utilizada em artesanato, podendo então ser considerada como representante típica das superfícies de forma livre.

O processo de cópia da peça foi efetuado de acordo com a aproximação indireta por superfície, conforme MA (1994) (vide item 2.2 desta dissertação).

5.3.1 – Digitalização da peça.

Para dar início ao processo, a peça a ser copiada precisa ser digitalizada. Assim sendo ela é submetida à máquina de medir 3 coordenadas. A digitalização efetuada contou com a ajuda de pessoal especializado na utilização do referido equipamento.

A estratégia de digitalização utilizada foi a de se seguir linhas paralelas, acompanhando a direção dos eixos X e Y, ou seja, travando-se uma posição no eixo X, faz-se as medições seguindo a direção de Y e assim sucessivamente para cada posição desejada tanto em X quanto em Y.

A figura 5.6 mostra a peça utilizada sendo digitalizada na máquina de medir 3 coordenadas.

Com o auxílio do *software MAQMED3*, obtém-se o arquivo texto referente aos pontos digitalizados.

A figura 5.7 exemplifica a porção inicial de um arquivo texto gerado pelo *software MAQMED3*.

FIGURA 5.6 - “ROSTINHO”: Modelo sendo digitalizado na MM3C.

X	Y	Z
0.088	-0.572	-0.004
33.006	22.488	-20.146
31.494	10.492	-20.146
30.946	0.468	-20.146
28.196	-9.658	-20.146
23.718	-18.630	-20.146
18.624	-27.082	-20.146
14.830	-32.838	-20.146
9.860	-37.794	-20.146
5.030	-40.304	-20.146
-0.726	-41.186	-20.146
-7.210	-39.872	-20.146
.	.	.
.	.	.

FIGURA 5.7 - Exemplo do arquivo texto fornecido pelo MAQMED3 na digitalização efetuada na MM3C.

5.3.2 – Conversão de arquivo texto para arquivo IGES.

Para se trabalhar com os pontos digitalizados no *software* de CAD utilizado, o Pro/ENGINEER, deve-se proceder a conversão do arquivo texto para o padrão gráfico IGES.

Dessa forma, utiliza-se do CONVERSION IGES para tal tarefa. A transformação do arquivo texto para arquivo IGES de duas formas: Em ambiente UNIX, nas estações gráficas (*workstations*), ou em ambiente WINDOWS.

5.3.2.1 - Emprego em ambiente UNIX.

O CONVERSION IGES pode ser utilizado diretamente nas estações gráficas, porém o seu arquivo executável deve estar localizado no mesmo diretório que estará localizado o arquivo a ser convertido e onde também será alocado o arquivo IGES gerado. O procedimento para a conversão é o seguinte:

- ❑ Digitar ./ e logo a seguir digitar o nome do executável, que foi batizado de CONV5000. Neste caso teremos o seguinte: ./CONV5000;
- ❑ O programa será executado e pedirá para o usuário digitar o nome do arquivo de entrada, ou seja, o arquivo de pontos fornecido pela MM3C, que deve ser digitado com extensão;
- ❑ Após feito isso, será pedido o nome do arquivo de saída, então o usuário pode digitar o nome de arquivo de saída que desejar sem extensão, pois o programa se encarrega de empregar a extensão característica do arquivo IGES.

Assim procedendo, o arquivo estará pronto e disponível no diretório corrente ao final desta sequência. Se algo de errado ocorrer, o programa indicará o erro ocorrido.

5.3.2.2 - Emprego em ambiente WINDOWS.

Para se executar a conversão de arquivo texto para arquivo IGES em ambiente WINDOWS, também deve-se possuir o arquivo executável no diretório onde estará localizado o arquivo de entrada, e também será neste diretório que o programa alocará o arquivo de saída em padrão IGES.

Pode-se executar o *software*, deixando-o por exemplo como ícone na tela principal e ativando-o quando desejado, vide figura 5.8 abaixo.

O procedimento de conversão de dados é o mesmo que no ambiente UNIX, descrito anteriormente. Pode-se ver exemplo da execução em ambiente WINDOWS nas figuras 5.9 e 5.10. Da mesma forma, o arquivo estará pronto e disponível no diretório corrente ao final desta sequência.

FIGURA 5.8 - CONVERSOR IGES em ambiente WINDOWS.

5.4 - Utilização do sistema CAD

Com o arquivo de pontos convertido para o padrão IGES, pode-se efetuar sua leitura dentro do sistema CAD utilizado, o Pro/ENGINEER no caso. Assim a reconstrução da geometria da peça pode ser realizada. Até que seja possível obter o arquivo CN para se usar a peça, um conjunto de operações deve ser feito.

Nos itens a seguir serão descritas as operações para trabalhar-se no *software* CAD, Pro/ENGINEER, de forma que se torne possível atingir a meta desejada.

É suposto pelo autor, que o interessado em executar o modelamento no *software* CAD, tenha conhecimento básico das técnicas que podem ser utilizadas no mesmo no processo de reconstrução.

O processo de reconstrução será descrito a seguir.

5.4.1 - Entrada dos dados.

Primeiramente é necessário que o *software* leia o arquivo IGES que contém a informação sobre a digitalização. Para que isso seja possível, é necessário criar-se uma peça, um trabalho novo, em seguida os *features* para referenciar a exportação do arquivo IGES, ou seja, deve-se criar os planos de referência, chamados de *DATUM PLANES*. O próximo passo é a criação de um sistema de coordenadas na interseção dos três planos, usando as ferramentas disponibilizadas pelo *software*.

A seguir deve-se importar o arquivo IGES usando a opção *interface* que é disponibilizada no menu principal.

Assim que forem efetuadas essas operações, os pontos digitalizados podem ser visualizados na tela de trabalho, e dessa forma passamos a poder utilizá-los.

5.4.2 - Criação de curvas.

Segundo a abordagem a ser utilizada, isto é, abordagem indireta por superfície, o próximo passo seria então a construção de curvas através dos pontos digitalizados, pois a partir das curvas é que iremos fazer a reconstrução das superfícies.

Para esse fim o Pro/ENGINEER disponibiliza a construção de “*features* de curvas” chamadas de “*DATUM CURVES*”. O procedimento para tal é iniciado no menu “*FEATURE*”, utilizando a sequência de criação de curvas através de pontos. Deve-se manipular a criação de curvas de maneira apropriada, como por exemplo a escolha de um bom ponto de vista para a visualização das mesmas, etc. Efetua-se tal procedimento para todas as curvas do modelo. Deve-se ter atenção redobrada tanto para a estratégia de digitalização escolhida, quanto para a criação das curvas que irão limitar essa superfície, isto é, perceber-se as curvas que limitam essa superfície. Isso é necessário principalmente se essa superfície tiver sido dividida em pedaços, que são chamados de retalhos¹⁵, uma vez que podem ocorrer problemas de continuidade com as junções das superfícies.

Por isso é um requisito essencial saber o básico das operações que foram citadas anteriormente.

5.4.3 - Criação de superfícies.

Após a criação das curvas, o próximo passo será a criação das superfícies. O Pro/ENGINEER também disponibiliza uma série de recursos para a criação de superfícies.

Salienta-se novamente que, se a digitalização for feita dividindo a superfície em “*patches*” (vide nota no rodapé), deve-se ter atenção especial na junção desses pedaços para se formar a superfície final.

O procedimento de criação de superfícies utilizado, inicia-se no menu “*PART*” fazendo-se a escolha de criação de um “*feature* de superfície” que deverá ser

¹⁵ O termo usual utilizado para denominar esses retalhos é “*patches*”.

do tipo “*advanced*”, no menu “*SRF OPTS*”. Continuando, agora já no menu *ADV FEAT OPT*, usa-se a opção “*boundaries*” para se trabalhar com as curvas que limitam a superfície. Logo após, no menu *BNDRS OPTS* pode-se utilizar duas opções que são “*Approx Blend*” ou “*Blended Surf*”, que proporcionarão a opção de executar uma superfície aproximada pelas curvas limitantes que irão formá-la ou uma superfície que acompanha as curvas que a delimitam com bastante fidelidade, respectivamente.

A partir daí trabalha-se dentro deste menu escolhendo as opções de direção, que serão “*First Direction*” ou “*Second direction*”. Tal escolha deve ser feita em função das direções das curvas que se possui. Esse passo concretizará a construção da superfície.

5.4.4 - Criação de modelo sólido.

Após ter-se reproduzido a superfície, existe a necessidade de transformá-la em sólido pois somente como modelo sólido poderemos trabalhar os caminhos de ferramenta para as operações de usinagem.

Esse procedimento será apresentado mais detalhadamente, pois várias podem ser as maneiras de se obter o modelo sólido desejado e a solução pode se tornar difícil de encontrar.

O procedimento adotado foi o seguinte:

- No menu *PART* ➤ escolhe-se *Feature*;
- No menu *FEAT* ➤ escolhe-se *Create*;
- No menu *FEAT CLASS* ➤ escolhe-se *Solid*;
- No menu *SOLID* ➤ escolhe-se *Protrusion*;
- No menu *SOLID OPTS* ➤ escolhe-se *Extrude e Thin*;
- No menu *ATTRIBUTES* ➤ escolhe-se *One side*;
- No menu *SETUP PLANE* ➤ escolhe-se *Plane* e logo após, o plano mais adequado para a visualização do modelo na tela, que servirá também para os próximos passos;

- No menu *SKETCHER* ➤ escolhe-se *Geom Tools*;
- No menu *GEOM TOOLS* ➤ escolhe-se *Use edge*;
- No menu *USE EDGE* ➤ escolhe-se *Sel Edge* e então escolhe-se as arestas externas da superfície de maneira que o contorno seja fechado (no nosso caso as arestas escolhidas foram as do “*feature*” “*surface*” e não as curvas que limitam o modelo);
- No menu *THIN OPT* ➤ escolhe-se a seta indicando a porção externa do modelo e a seguir entra-se com o valor desejado para o comprimento do “*feature*” criado.

A partir desse ponto o modelo estará pronto (vide figura 5.11) para que se realize os caminhos de ferramenta necessários à manufatura da peça.

FIGURA 5.11 : Modelo sólido pronto para se trabalhar as operações de usinagem.

5.4.5 - Criação dos caminhos de ferramenta.

Após a produção do modelo sólido, adequado aos interesses daquilo que se deseja usinar, um molde ou um protótipo, pode-se passar à realização dos caminhos de ferramenta visando a usinagem do modelo. Para isso o Pro/ENGINEER possui um módulo específico, o qual deixou uma boa impressão.

Trata-se do Pro/MANUFACTURING com o qual é possível criar os dados necessários para dirigir uma máquina ferramenta CN para que esta faça a usinagem da peça modelada no Pro/ENGINEER. O módulo fornece ferramentas que permitem a execução dos passos necessários para se progredir desde o modelo sólido até os arquivos com os dados de “*cutter location*”. Tais dados podem posteriormente ser pós-processados para o formato de dados específico da máquina CN.

O módulo especificado acima possui apoio abrangente de manuais, como por exemplo PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997a) e (1997b). Com os referidos manuais pode-se fazer a cobertura de uma ampla variedade de possibilidades de usinagem quanto ao fresamento de uma peça.

Na sequência faz-se uma explanação do procedimento realizado. Salienta-se que o procedimento adotado baseou-se em PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997b) (vide Bibliografia complementar).

Antes de iniciar qualquer caminho de ferramenta é necessário que se faça, primeiramente, as operações abaixo, pois estas serão válidas para todas as operações que serão criadas.

Deve-se efetuar:

- O modelo sólido do mecanismo de fixação, igual ao que será usado para a montagem da peça na máquina-ferramenta;
- O modelo sólido do blanque que será usinado para dar origem a peça;
- A montagem¹⁶ do blanque com a peça final desejada;
- A montagem da *workpiece*¹⁷ no mecanismo de fixação;

¹⁶ Operação cujo termo normalmente utilizado em modelamento é *ASSEMBLY*.

¹⁷ Denomina-se *WORKPIECE* ao conjunto “Blanque+peça final desejada”.

- A inserção de informações acerca da máquina-ferramenta utilizada;
- A inserção de informações acerca das ferramentas a serem utilizadas nas operações;

Todos os procedimentos descritos acima foram baseados em PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997b), onde os mesmos estão descritos detalhadamente entre as páginas 5-1 e 5-13.

5.4.5.1 - Criação dos caminhos para o perfilamento da peça.

Inicialmente uma operação de perfilamento do modelo será efetuada, com a finalidade de retirar o material ao redor do modelo facilitando a operação posterior.

Antes de começar a seqüência de perfil, deve-se construir a superfície a qual servirá como referência para criação do caminho de ferramenta. Tal superfície recebe o nome de superfície para usinagem ou “*mill surface*”. Esse “*feature*” poderia também ser criado mais adiante, no momento em que o mesmo fosse solicitado para a concretização do cálculo do caminho de ferramenta.

Um procedimento detalhado, que pode servir como base para se efetuar a tarefa acima, pode ser encontrado em PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997b), mais precisamente nas páginas 6-4 a 6-6.

Quanto à operação de perfil propriamente dita, antes de qualquer coisa devemos iniciar com a escolha da operação desejada no menu *MACHINING*, no presente caso trata-se da opção *Profile*. Em seguida deve-se escolher os itens que serão ajustados para a operação, que neste caso são as opções “*Tool/Parameters/Retract/Surfaces*”, e logo após ajustá-los para a referida operação.

Pode-se tomar como base para a execução dos procedimento as páginas 7-2 e 7-3 em PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997b).

5.4.5.2 - Criação dos caminhos para o desbaste da peça.

Com a operação de perfil efetuada, uma operação de desbaste se faz necessária para a retirada do excesso de material sobre a geometria final que se pretende obter.

Antes de começar a sequência de desbaste, deve-se fazer a construção de um volume de desbaste o qual servirá como referência para criação do caminho da ferramenta. Tal volume recebe o nome de volume para usinagem ou “*mill volume*”. Esse “*feature*” poderia ser criado mais adiante, no momento em que o mesmo fosse solicitado para a concretização do cálculo do caminho da ferramenta.

O procedimento detalhado, que pode servir como base para se efetuar a tarefa acima, pode ser encontrado em PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997b), mais precisamente nas páginas 6-6 a 6-9.

Quanto à operação de desbaste propriamente dita, antes de qualquer coisa deve-se iniciar com a escolha da operação desejada no menu *MACHINING*, no presente caso a opção “*Volume*”. Em seguida deve-se escolher os itens a serem ajustados para a operação, que neste caso são as opções “*Name/Tool/Parameters/Retract/Volume*”, e na sequência ajustá-los para a referida operação.

Pode-se tomar como base para a execução dos procedimento a página 8-11 e as páginas 8-2 a 8-4 em PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997b).

Faz-se a observação de que a ferramenta não violará qualquer superfície do volume.

5.4.5.3 - Criação dos caminhos para acabamento.

Após efetuadas as operações de perfil e de desbaste, o próximo passo a ser executado será a usinagem de acabamento, que proporcionará a geometria final do modelo.

Antes de iniciar a seqüência de acabamento, deve-se fazer a construção da superfície a qual servirá como referência para criação do caminho da ferramenta.

Tal superfície recebe o nome de superfície para usinagem ou “*mill surface*”. Esse “*feature*” poderia ser criado mais adiante, no momento em que o mesmo fosse solicitado para a concretização do cálculo do caminho da ferramenta.

Um procedimento detalhado, que pode servir como base para se efetuar a tarefa acima, pode ser encontrado em PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997b), mais precisamente nas páginas 6-9 a 6-11.

Quanto a operação de acabamento propriamente dita, antes de qualquer coisa devemos iniciar com a escolha da operação desejada no menu *MACHINING*, no presente caso é a opção *Conventl Srf*¹⁸. Em seguida deve-se escolher os itens que serão ajustados para a operação, que neste caso são “*Tool/Parameters/Surface*”, e logo após ajustá-los de acordo com a referida operação.

Pode-se tomar como base para a execução dos procedimento páginas 9-2 a 9-3 em PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997b).

5.4.6 - Pós-processamento.

Efetuada o constante no item 5.4.5, mais precisamente em seus sub-itens 5.4.5.1, 5.4.5.2 e 5.4.5.3, arquivos de dados de “*cutter location*”, em formato ASCII, são gerados a partir dos caminhos de usinagem especificados.

Para que uma máquina-ferramenta reconheça esses dados existe a necessidade de “traduzí-los” para um formato adequado, ou seja, é necessário transformá-los em código CN para o controlador específico da máquina. Em outras palavras, existe a necessidade de se fazer o pós-processamento dos dados de “*cutter location*”. Para isso o Pro/ENGINEER possui um módulo chamado Pro/NCPOST, com o qual é possível fazer-se a criação de um pós-processador específico para uma máquina-ferramenta em particular.

¹⁸ Seqüência convencional: Uma seqüência convencional é aquela que é usada para se fazer a usinagem de semi-acabamento ou de acabamento de uma superfície.

Durante a realização desta dissertação, o Laboratório de CAD/CAE da Escola de Engenharia de São Carlos - USP não possuía a licença de utilização de tal módulo. Porém, pôde-se verificar que a versão 18.0 do Pro/ENGINEER do referido laboratório possui alguns exemplos de pós-processadores *defaults*¹⁹, sendo um deles específico para controladores Comando Numérico idênticos ao do Centro de Usinagem utilizado.

Fez-se, então, a verificação do mesmo, ou seja, foi notado que havia capacidade de interpretação dos códigos pós-processados. Constatou-se que o entendimento pelo controlador SIEMENS, do Centro de Usinagem, do código CN gerado pelo pós-processador era perfeito. Havia apenas a necessidade de se verificar a exatidão dos dados iniciais do programa gerado, assim como avanço e rotação da ferramenta. Tais dados, no entanto, poderiam ser inseridos manualmente, localmente, sem dificuldade nem perda de nenhum tipo, dessa forma sem detrimento para a integração realizado.

5.4.6.1 - Procedimento de pós-processamento.

Então, pode-se pós-processar os arquivos de “*cutter location*” através do pós-processador “*default*” fornecido pelo Pro/ENGINEER. Este pós-processador recebe o nome de MILL301 e é específico para sistema CN SIEMENS.

O procedimento para o pós-processamento será descrito abaixo, devido ao mesmo não constar no manual utilizado:

- Escolher *CL Data* no menu *MACHINING*;
- *OUTPUT* no menu *CL Data*;
- *Select one/NC sequence* e a sequência a ser pós-processada;
- *File* no menu *OUTPUT* e deixar selecionado *CL File* e *MCD File*;
- Dar nome ao arquivo;
- Com *Verbose* e *Trace* selecionados dar *done*;

¹⁹ *DEFAULT*: Termo usado para indicar que algo é padronizado. Padrão.

- Escolher MILL301. Tal opção possui o perfil de uma fresadora de 3 eixos com controlador comando numérico SIEMENS.

Após esses passos o arquivo CN estará pronto para ser inserido na máquina-ferramenta, sendo possível executar o último passo da reprodução, a usinagem da peça.

5.4.7 - A usinagem da peça.

Obtidos os códigos CN através do pós-processamento, podemos utilizá-los para a usinagem da peça a ser reproduzida.

Foram executados todos os seguintes preparativos para que se pudesse rodar o programa na máquina-ferramenta: Iniciou-se com a transmissão dos arquivos CN para o computador que abastece a mesma com os referidos programas, fez-se o posicionamento da peça no dispositivo de fixação assim como o referenciamento (zero) da máquina com relação à peça.

Assim procedendo, a máquina encontra-se apta a efetuar todas operações de usinagem referentes a reprodução do modelo.

Devido a limitação de capacidade de memória do Comando Numérico da máquina, o arquivo CN de cada operação tinha de ser inserido individualmente e ao término de cada operação, este deveria ser apagado para que o arquivo da próxima operação encontrasse espaço para ser inserido.

Considera-se importante relatar que o processo de usinagem do presente trabalho contou com o auxílio crucial de pessoal do Laboratório de Otimização de Processos de Fabricação da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, o que contribuiu sobremaneira para a realização desta etapa da dissertação.

Durante a realização da usinagem foram encontradas dificuldades que considera-se como importante fonte de experiência. A de maior importância em se relatar é a de que a máquina-ferramenta utilizada não conseguia interpretar as interpolações circulares presentes no código CN de determinadas operações. Suspeitou-se então, que a máquina não era capaz de interpretar as interpolações ou as

mesmas não estavam corretas. As maiores dificuldades em se transpor tal obstáculo residiram na falta de manuais acompanhando o equipamento de usinagem. Devido a esta falta de fontes de consulta, pois não se tinha bibliografia para recorrer, a situação tornou-se um impasse. Segundo especialistas da área de usinagem da EESC – USP, as causas de tal problema poderiam ser inúmeras, conforme evidenciado por COELHO (1998)²⁰ e OLIVEIRA (1998)²¹.

Por isso, buscou-se informações acerca da situação também em ambiente industrial, procurando alguma experiência anterior semelhante a enfrentada. Foi sugerido, por pessoal da SIEMENS LTDA e de MÁQUINAS AGRÍCOLAS S/A, com vivência em Comando Numérico, que a causa de tal ocorrência seria a correção de ferramenta, “*OFFSET*”. Assim, as operações foram retomadas, porém concentrando-se os esforços sobre tal atividade, e então constatou-se que esta realmente era a causa do referido problema.

Após encontrada a solução, esta parece não justificar todo o percalço causado. Porém, como foi frisado por especialistas na área de usinagem, as causas para tal problema poderiam ser inúmeras e portanto abordar uma ampla gama de possíveis causas não parece tarefa tão simples a se realizar, principalmente em tempo restrito.

Findo o processo de acabamento, obteve-se a duplicação do modelo desejado.

As figuras 5.12 e 5.13 mostram a peça sendo usinada na máquina-ferramenta e a peça já pronta, respectivamente.

O modelo final obtido apresentou uma resolução um pouco prejudicada, acarretado pela falta de capacidade da máquina-ferramenta em suportar programas de usinagem com grande número de caracteres. Para se conseguir obter uma superfície com qualidade razoável, necessitar-se-á que a máquina seja capaz de processar programas com número de caracteres bem maiores do que sua capacidade atual.

Não obstante, a reprodução obtida foi considerada um sucesso, uma vez que a completa integração entre os equipamentos utilizados foi obtida e conseguiu-se realizar ER.

²⁰ COELHO, R. T. (1998). Prof. Dr. USP - Escola de Engenharia de São Carlos. /Comunicação pessoal/.

²¹ OLIVEIRA, J. F. G. (1998). Prof. Tit. USP - Escola de Engenharia de São Carlos. /Comunicação pessoal/.

FIGURA 5.12 - Peça sendo usinada na máquina-ferramenta.

FIGURA 5.13 - Peça reproduzida no centro de usinagem

6 - CONCLUSÕES E PROPOSTA PARA TRABALHOS FUTUROS.

6.1 - Conclusões

Com este trabalho, obteve-se muitas informações sobre o estado da arte em Engenharia Reversa, relatou-se como são cobertos a maioria dos casos e o que existe em emprego com esta finalidade no contexto mundial. A seguir serão apresentados os resultados obtidos:

- A integração experimental proposta foi concluída com sucesso, e pode contribuir para aqueles que possuam ambiente operacional similar ao utilizado e que tenham necessidade de utilizar tal técnica, tanto eventualmente quanto freqüentemente;
- Implementou-se também a construção de um CONVERSOR IGES que efetua a conversão de arquivo de pontos no formato ASCII, em arquivo de transferência de dados gráficos no formato IGES, de pontos, de forma plenamente satisfatória;
- O *software* CAD utilizado apresentou bom desempenho em todas as operações realizadas, destacando-se na realização dos caminhos de usinagem. Mostrou-se uma ferramenta valiosa tanto para a execução da estrutura proposta assim como para toda a engenharia de projeto e;
- A prática da Engenharia Reversa utilizando-se a abordagem proposta possui a vantagem de se poder utilizar o equipamento disponível na empresa, ou seja, o mesmo equipamento utilizado para realizar outros projetos pode ser empregado para este propósito.

6.2 - Sugestões para trabalhos futuros

A partir do trabalho realizado, pode-se ir um pouco mais além e fazer a verificação de outras possibilidades, assim como:

- Fazer a mesma integração utilizando a técnica da aproximação avançada por superfícies;
- Incluir no contexto da integração realizada a tecnologia da prototipagem rápida;
- Efetuar as outras possibilidades cogitadas, apresentadas na figura 4.1.2, no capítulo 4, ou seja:
 - ❶ Buscar uma MM3C mais moderna, possivelmente junto à indústria, que nos fornecesse arquivo em formato que pudesse ser lido pelo Pro/ENGINEER;
 - ❷ Usar o CONVERTOR IGES para fazer a tradução do formato do arquivo ASCII, transformando-o em padrão IGES, para que pudesse ser inserido já num *software* de CAM para a obtenção do código CN;
 - ❸ Inserir o arquivo da MM3C já em formato adequado, através da ação de um outro tradutor, diretamente num *software* de CAM e a partir dele tentar gerar o código CN para a usinagem da peça;
- Realizar a integração proposta utilizando *softwares* e/ou equipamentos específicos (por exemplo: *laser scan*) e mais avançados (como por ex. um equipamento de usinagem que permita a realização de um programa CN com mais detalhes, ou seja, com maiores números de linhas), e a partir disto realizar comparações de tempos e resultados obtidos;
- Desenvolver uma metodologia (procedimentos) para análise de resultados obtidos em confronto com os dados iniciais do modelo físico.

7 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

- ABELLA, R. J.; DASCHBACH, J.; McNICHOLS, R. J. (1994). Reverse engineering industrial applications. *Computers and Industrial Engineering*. v26. n2. p381-385.
- AGOSTINHO, O.L. (1993). *Material de aula do curso de pós graduação: Manufatura Integrada por Computador (CIM)* - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. /Apostila/
- AGUIAR, A. F. S.(1995). *Sistemática de Seleção de Sistemas Computacionais para Auxílio às Atividades de Engenharia*. São Carlos, 139p. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ALMEIDA, F. J. (1992). *Projeto e implementação de pré/pós processador gráfico para exibir tensões calculadas pelo método dos elementos finitos*. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- ANOM (1997). CAD is crucial. *Manufacturing Engineering*. v119. n4. October.
- ARL (1998). *Reverse Engineering Library*. <http://linc.arl.psu.edu/RE/RE.html>. 17/Julho.
- ARONSON, R. B. (1996). Forward thinkers take to reverse engineering. *Manufacturing engineering*. v117. n5. p34 – 44. November.
- ASME B89.4.1 - 1997 (1997). *Methods for performance evaluation of coordinate measuring machines*. ASME. New York.
- AUTODESK (1990). *AutoCAD release 11: IGES Interface Specifications*. Autodesk, Inc.
- AUTODESK IGES TRANSLATOR (1997). <http://www.autodesk.com/prodsol/mech/products/dataexch/igestran.html>. 08/Novembro.
- BESANT, C. B. (1985). *CAD/CAM – Projeto e fabricação com o auxílio do computador*. Rio de Janeiro, Campus Ltda.

- BIDANDA, B.; MOTOVALLI, S.; HARDING, K. (1991). Reverse engineering: an evolution of prospective non-contact technologies and applications in manufacturing systems. *International Journal Computer Integrated Manufacturing*. v4. n3. p145-156.
- BIDANDA, P.; HOSNI, Y. A. (1994). Reverse engineering and its relevance to industrial engineering: A critical review. *Computers and industrial engineering*. v26. n2. p343-348. April.
- BOTTURA, M. C.; FUOCO, T. H. (1992). Quem usa diz que as máquinas de medir em 3D são indispensáveis. *Máquinas e metais*. p10-16. Abril.
- BRADLEY, C.; VICKERS, G. W.; MILROY, M. (1994). *Reverse engineering of quadratic surfaces employing three-dimensional laser scanning*. v208, p21-28.
- BROACHA, R.; YOUNG, M.. (1995). Getting from points to products. *Computer-Aided Engineering*. n7. v14. p28-32. July.
- CAI, Y. Y.; NEE, A. Y. C.; LOH, H. T. (1996). Geometric feature detection for reverse engineering using range imaging. *Journal of visual communication and image representation*. v7. n3. p205 – 216. September.
- CARDOZA, J. A. S. (1995). *Máquinas virtuais de medir a três coordenadas*. São Carlos. 209p. Tese (Doutorado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CARVALHO, J. (1989). *Projeto e implementação de Pré-Pós processador gráfico para o método dos elementos finitos*. São Carlos. 191p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- CARVALHO, J. (1997). *CAD I*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. /Notas de aula/.
- CERC (1998). <http://www.cerc.wvu.edu/overview.html>. 17/Setembro.
- CHEN, D-F.; MING-LUN, F. (1996). Reconstruction technique in reverse engineering. *Proceedings of the IEEE International Conference on Industrial Technology*. Piscataway, NJ, USA. p37-41.
- CHIVATE, P. N.; JABLOKOW, A. G.(1993). Solid model generation from measured point data. *Computer Aided Design*. v25. n9. p587-600.
- CHOI, B. K.; JU, S. U. (1989). Constant radius blending in surface modeling. *Computer Aided Design*. v21. n4. p213 – 220.
- CHOI, B. K.; JUN, C. S. (1989). Ball-end cutter interference avoidance in NC machining of sculptured surfaces. *Computer Aided Design*. v21. n6. p371 – 378.

- CHOI, B. K.; LEE, C. S. (1990). Sweep surfaces modeling via coordinate transformation and blending. *Computer Aided Design*. v22. n2. p87 – 96.
- CHOI, B. K. (1991). *Surface modelling for CAD/CAM*. Amsterdam, Elsevier Science.
- CHORUS (1998). <http://www.bwnshp.com/ms/cho.htm>. 26/Agosto.
- CLAIR, J. J. (1996). Stereolithography and the biomedical engineering. *Journal of the materials processing technology*. v57. p393 – 396.
- COMMERCIAL SYSTEMS (1998). <http://mtiac.hq.iitri.com/mtiac/pubs/rp/rp31.htm>. 01/Outubro.
- CTEK (1998). <http://www.ctek-on-line.com/about/htm>. 16/Setembro.
- DASCHBACH, J. M.; ABELLA, R. J.; WANG, C. (1989). CAD/CAM: reverse engineering applications. *University programs in computer aided engineering, design, and manufacturing*. Seventh annual conference. p174 – 181. July.
- DASCHBACH; ABELLA; McNICHOLS (1995). Reverse engineering: a tool for process planning. *Computers & Industrial Engineering*. v29. n1 – 4. p637 – 640. September.
- DIEHL, Larry. (1998). Machining Molds and Dies. *Manufacturing Engineering*. v120. n4.
- DHANDE, S. G.; KARUNAKARAN, K. P. (1993). Realibility in Computer Aided Design. Graphics, Design and Visualization. Proceedings of the IFIP TC5/WG5.2/WG5.10 CSI *International Conference on Computer Graphics – ICCG93*. Bombay, India. p259-270. Elsevier Science Publishers.
- DIGISCAN (1998). <http://www.bwnshp.com/ms/digis.htm>. 26/Agosto.
- DUNCAM, J. P.; MAIR, S. G. (1983). *Sculptured surfaces in engineering and medicine*. U. K, Cambridge University.
- DUSAUSSOY, N. J.; CAO, Q.; YANCEY, R. N.; STANLEY, J. H. (1995). Image processing for CT-assisted reverse engineering and caracterization. *Proceedings of the IEEE: International Conference on Image Processing*. Part 3. Washington, DC, USA. v3. p33-36.
- ECRC (1998). <http://www.ecrc.uofs/ce.html>. 16/Setembro.
- ENCARNAÇÃO, J.; SCHUSTER, R.; VÖGE, E. (1986). *Product data interfaces in CAD/CAM applications – Design , implementation and experiences*. Springer – Verlag. Berlin.

- EVANS, M. S. (1991). Robotics based part inspection and reverse engineering system. *Proceedings, 39 th Conference on Remote Systems Technology*. p189 – 193.
- FAROUKI, R. T.; NEFF, C. A. (1990). Analytic properties of plane offset curves. *Computer Aided Geometric Design*. p83 – 100.
- FERREIRA, A. B. (1990). CAD/CAM: *Conceitos e aplicações em projetos mecânicos e critérios para a seleção e utilização em Engenharia*. São Paulo. Dissertação (Mestrado). Escola Politécnica - Universidade de São Paulo.
- FENSTER, D. P.; CARRIER, T. (1989). On the direct programming of CNC milling equipment. *Computers & Industrial Engineering*. v17. n1 – 4. p252 – 257.
- FLAG TECNOLOGIA. (1998)./ *Catálogo*/.
- FLORES, F. J. (1998). *Medição do tipo passa-não passa em máquina de medir a 3 coordenadas*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. /No prelo/
- FIOD, M. N.; BACK, N. (1995). Análise Crítica de Métodos de Projeto, visando o desenvolvimento de um Sistema CAD para Concepção de Produtos. *Revista Brasileira de Ciências Mecânicas*. v17. n4. p387-393.
- GONZÁLEZ, E. V. (1995). Integración máquina de mediciones de tres coordenadas com sistema CAD/CAM. *Jornadas Internacionales de Mecanica Computacional e CAD/CAM*. Universidad de Concepcion – Chile. p309-316.
- GRI. RAPID PROFILE SENSOR. (1997). /*Catálogo*/.
- GROOVER, M. P.; ZIMERS, E. W. (1984). CAD/CAM: *Computer-Aided Design and Manufacturing*. Ed Prentice-Hall. Englewood Cliffs, New Jersey.
- GU, P.; KUSIAK, A. (1998). Concurrent Engineering. <http://www.elsevier.com/inca/publications/store/5/2/4/5/9/7/524597.pub.htm>. 16/Setembro.
- GURUMOORPHY, B. (1996). Reverse engineering of solid models. *Journal of the Indian Institute of Science*. v76. n1. p93 – 107.
- HINZMANN, B. (1998). <http://www.mcb.co.uk/services/conferen/dec95/rapidpd/hinzmann/backgnd7.htm>. 16/Setembro.
- HOSCHEK, J (1984). Detecting regions with undesirable curvature. *Computers Aided Geometric Design*. v1. n2. p183 – 192.

- HOSCHEK, J. (1985). Smoothing of curves and surfaces. *Computer Aided Geometric Design*, v2. n2. p97 – 105.
- HOSCHEK, J.(1991). *Freeform tools in CAD systems: a comparison*. Stuttgart, B. G. Teubner.
- HOSNI, Y.; FERREIRA, L. (1994). Laser based system for reverse engineering. *Computers & Industrial Engineering*. v26. n2. p387-394.
- HUANG, C.; MOTOVALLI, S. (1994). Reverse engineering of planar parts using machine vision. *Computers & Industrial Engineering*. v26. n2. p369 – 379. April.
- HUANG, C.; ZHENG, Y. F. (1996). Determining digitizing distances on sculptured surfaces using short time Fourier transform. *Proceedings of the 1996 13th IEEE International Conference on Robotics and Automation*, part 2 (of 4). v2. p1493 – 1498.
- HUANG, X.; GU, P. ; ZERNICKE, R.. (1996). Localization and comparison of two free-form surface. *Computer Aided Design*. v28. n12. p1017-1022.
- INGLE, K. A. (1994). *Reverse Engineering*. New York., McGraw-Hill.
- IP, W. L. R.; LOFTUS, M. (1996). Shaded image machining: a reverse engineering approach using computer vision techniques and analytical methods to reproduce sculptured surfaces. *International Journal of Production Research*. v34. n7. p1895 – 1916.
- KANKANAHLI, Mohan. S.; YU Chun Pong; KRUEGER, Richard C. (1993). Volume modeling for Orthopedic Surgery. Graphics, Design and Visualization. Proceedings of the IFIP TC5/WG5.2/WG5.10 CSI *International Conference on Computer Graphics – ICCG93*. Bombay, India. p303-315. Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland).
- KAMPA, H., WECKERMAN, A. (1984). *Design of coordinate measuring machines*. In Handbuch für Industrie und Wissenschaft, Fertigungstechnik. Springer-Verlag. Berlin.
- KJELLANDER, J. (1983a.). Smoothing of cubic parametric splines. *Computer Aided Geometric Design*. v15. n3. p175 – 179.
- KJELLANDER, J. (1983b.). Smoothing of bicubic parametric surfaces. *Computer Aided Design*. v15. n6. p288 – 293.
- KHOO, L. P.; GOH, J. C. H.; CHOW, S. L. (1993). Parametric modelling of a knee joint prosthesis. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers. Part H: Journal of Engineering in Medicine*. v207. p115-120.

- KOCHAN, D. (1986). CAM – *Developments in Computer-Integrated Manufacturing*. Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg. Capítulos 5, 6, 7 e 8.
- KOELSH, J. R. (1997). Better handling makes the best molds. *Manufacturing Engineering*. v118. n6.
- KOTLYAR, Y. (1991). Gear fundamentals reverse engineering. *Gear technology*. v8. n4. p34 – 38.
- KWOK, W-L.; EAGLE, P. J. (1991). Reverse engineering. Extracting CAD data from existing parts. *Mechanical Engineering*. v113. n3. p52 – 55. March.
- LA ROSA, A. C. M. (1992). Estágio atual dos padrões para comunicação entre sistemas CAE/CAD/CAM - Workshop gerencial sobre integração cliente-servidor com uso de CAE/CAD/CAM. *Anais da Sobracom*.
- LAI, J. Y.; HUA-SHING, L.; LAI, W-B. (1995). NC cutting generation from laser scan measurement data. Journal of the Chinese Society of Mechanical Engineers. *Transactions of the chinese institute of engineers*. v16. n3. p245 – 255. June.
- LAI, J-Y; LU, C-Y. (1996). Reverse engineering of composed sculptured surfaces. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v12. n3. p180-189.
- LATERZA, L. B M.; SANTOS, E. T. (1997). Digitalizadores capturam imagens em 3D. *CADesign*. p38-40.
- LEE, A. C.; CHEN, D. P.; LIN, C. A. (1990). A CAD/CAM system from 3D coordinate measuring data. *International Journal of Production Research*. v8. p2353 – 2371.
- LEGGE, D. I. (1996). Integration of design and inspection systems – a literature review. *International Journal of Production Research*. v34. n5. p1221 – 1241.
- MA, W. (1994). *Nurbs-Based CAD modelling from measured points of physical models*. Doctor tesis. Katholieke Universiteit Leuven. Leuven (Heverlee) - Belgium.
- MENON, J. P. (1993). The Raycasting Engine and Ray Representations for Solid Modeling: A Research Synopsis. Graphics, Design and Visualization. *Proceedings of the IFIP TC5/WG5.2/WG5.10 CSI International Conference on Computer Graphics – ICCG93*. Bombay, India. p241-257. Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland).
- MERAT, F. L.; RADACK, G. (1992). Automatic inspection planning within a feature-based CAD system. *Robotics & Computer Integrated Manufacturing*. v9. n1. p61-69.

- MIGUEL, P. A. C.; KING, T. G. (1996). Fontes de erros e critérios gerais de ensaios em máquinas de medir por coordenadas. *Revista de Ciência & Tecnologia*. v5/2. n10. p07-20.
- MILROY, M. J.; BRADLEY, C.; VICKERS, G. W. (1996a). Automated laser scanning based on orthogonal cross sections. *Machine Vision and Applications*. v9. n3. p106-118.
- MILROY, M. J.; WEIR, D. J.; BRADLEY, C.; VICKERS, G. W. (1996b). Reverse engineering employing a 3D laser scanner: a case study. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v12. n2. p111-121.
- MITUTOYO SUL AMERICANA Ltda. (1998). PG-41/2, Abril. /Catálogo/.
- MÓDULO, D. L. (1991). *Desenvolvimento de um ambiente de planejamento do Processo Assistido por Computador para Planejamento Interativo*. São Carlos. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.
- MOTTA, G. D. (1998). Aplicação do CAE na medicina. (1998). *CADware Technology*. a3. n9. p28-29.
- MOTOVALLI, S.; BIDANDA, B. (1994). Modular software development for digitizing systems data analysis in reverse engineering applications: case of concentric rotational parts. v26. n2. p395-410. Apr.
- MTIAC (1998). <http://mtiac.hq.iitri.com/mtiac/pubs/rp/rp1.htm>. 16/Setembro.
- NUPES (1998). <http://nupes.cefetpr.br/documentos/simultanea.html>. 16/Setembro.
- NOECRC (1998). <http://www.noerc.ctc.com/index.htm> 16/Setembro.
- OH, K.; ABELLA, R. J.; DASCHBACH, J. M. (1989). CMM Application in Reverse Engineering – Integrating CMM with CAD/CAM without drawings. SME Technical Papers. Society of Manufacturing Engineers. *Conference of Precision Metrology with CMM Systems Clinic*. Schaumburg, Illinois. June 6-7.
- OMOKAWA, R. (1998). *Utilização de sistemas PDM em ambiente de engenharia simultânea: O estudo de um caso em uma empresa fabricante de veículos pesados*. São Carlos. Dissertação (Mestrado). Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. /No prelo/
- PC-DMIS (1998). <http://www.bwnshp.com/ms/pc-d.htm>. 26/Agosto.
- POLHERMUS INC. (1991). BROCHURE ON 3SPACE DIGITIZER. Livonia, Michigan. /Catálogo/

PROCAST (1998). <http://procast.com>. 16/Setembro.

REMBOLD, U.; BLUME, C.; DILLMANN, R.. (1985). *Computer-Integrated Manufacturing Technology and Systems*. New York, Marcel Dekker. Cap. 1, 5, 6, 7 e 8.

REMBOLD, U.; NNAJI, B. O.; STORR, A. (1994). *Computer Integrated Manufacturing and Engineering*. New York, Addison-Wesley.

RENISHAW (1998). *Sistemas de scanning da Renishaw*. São Bernardo do Campo. /Catálogo/.

REVERSE ENGINEERING (1997). <http://www.pic.net/nvision/reverse.html> . 20/Julho.

SARKAR, B.; MENQ, C. H. (1991). Smooth surface approximation and reverse engineering. *Computer Aided Design*. v23. n9. p623 – 628. November.

SARKAR, B.; MENQ, C. H. (1991). Scanning compound surfaces with no existing CAD model using a touch probe of a coordinate measuring machine. *Intelligent Design and Manufacturing for Prototyping*. PED – 50. ASME. p97 – 112.

SCANNING SYSTEMS. (1998a). <http://www.renishaw.com/scanning/retrosca.htm>. 26/Agosto.

SCANNING SYSTEMS. (1998b). <http://www.renishaw.com/scanning/renscan200.htm>. 26/Agosto.

SCANNING SYSTEMS. (1998c). <http://www.renishaw.com/scanning/renscan350.htm>. 26/Agosto.

SCANNING SYSTEMS. (1998d). <http://www.renishaw.com/scanning/cyclone.htm>. 26/Agosto.

SCIENCE ACCESSORIES CORPORATION. (1989). *Brochure on GP-8-3D Sonic Digitizer*. Stratford, CT.

SCHÜTZER, K. (1988). *Desenvolvimento de um sistema de projeto de engrenagens auxiliado por computador*. São Carlos. 236p. Dissertação (Mestrado) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

SEILER, A.; BALENDRAN, V.; SIVAYOGANATHAN, K.; SACKFIELD, A. (1996). Reverse engineering from uni-directional CMM scan data. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. v11. p276 – 284.

SHIGLEY, J. E. (1977). *Mechanical Engineering Design*. McGraw-Hill. New York.

- SMITH, B.; RINAUDOT, G. R.; REED, K. A.; WRIGHT, T. (1988). *Initial Graphics Exchange Specification (IGES), version 4.0*. Society of Automotive Engineers. Warrendale, USA.
- SOBH, T. M.; DEKHIL, M.; OWEN, J. C. (1994). Discrete Event Control for Insoction and Reverse Engineering. http://www.bridgeport.edu/sobhdir/proj/RA94specialsessionpaper/section3_5.html. (19Julho1997).
- SOLINHO, J. L. G. (1998). A indústria mecânica e a revolução do processo de projeto. *CADware Technology*. Ano2. n8. p31-33.
- STANLEY, J. H.; YANCEY, R. N.; CAO, Q.; DUSAUSOY, N. J. (1995). Reverse engineering and rapid prototyping for solid free-form fabrication. *Proceedings of SPIE*. Society of Photo-optical Instrumentation Engineers. Bellingham, WA, USA. v2455. p305-311.
- SUHARITDAMRONG, V. ; MOTOVALLI, S. (1995). Feature-based model generation for reverse engineering. Proceedings of the 1995 4th Industrial Engineering Research Conference. *Industrial Engineering Research - Conference Proceedings 1995*. IIE, Norcross, GA, USA. p183-189.
- SURFACE RECONSTRUCTION (1998). <http://www.cs.washington.edu/research/graphics/projects/scanning/>. 15/Setembro.
- SYAN, C. S.; MENON, U. (1994). *Concurrent engineering: concepts, implantation and practice*. Chapman & Hall. London, England.
- 3D DIGITIZING SYSTEM (1998). Laser Design Inc. *Catálogo*.
- TREVISAN, F. (1997). Engenharia reversa. *Cadware technology*. a2. n4. p24-27.
- TSENG, H. H.; LAI, F. S. (1994). Integration of CAD/CAM/CAE in mold design and manufacturing. *Proceedings of the 52nd Annual Conference ANTEC 94*. Part 1 (of 3). San Francisco, USA. p1100-1103.
- VAN DIJK, C. G. C. (1993). Conceptual surface modeling for industrial design. Graphics, Design and Visualization. *Proceedings of the IFIP TC5/WG5.2/WG5.10 CSI International Conference on Computer Graphics – ICCG93*. Bombay, India. p271-278. Elsevier Science Publishers B. V. (North-Holland).
- VASILASH, G. S. (1989). Defining the unknown part. *Production*. p57-59. February.

- VUOSKOSKI, J. (1996). Exchange of Product Data between CAD systems and Physics Simulation Program. http://cadd.cern.ch/cad_geant_int/thesis/thesis.html. (08Janeiro1998).
- ZEID, I. (1991). *CAD/CAM Theory and Practice*. McGraw-Hill, Inc. New York.
- WALLACE, Jeff (1997). Nurbs in a nutshell. *Manufacturing Engineering*. v119. n4. October.
- WEIR, D. J.; MILROY, M. J.; BRADLEY, C.; VICKERS, G. W. (1996). Reverse engineering physical models employing wrap-around B-spline surfaces and quadratics. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, part B: journal of engineering manufacture.
- WERNER, W. (1993). Digitisation – An alternative to copy milling. *European Product Engineering*. v17. n3. p27-28.
- WOHLERS, T. T. (1998). Rapid Prototyping & Tooling State of the Industry. 1998 *Worldwide Progress Report*. Fort Collins, Wholers Associates.
- WOOD, K. L.; OTTO, K. N. (1995). A Reverse Engineering Design Methodology. http://shimano.me.utexas.edu/papers/reverse/reverse_1992/rev1.html. (08Julho1997).
- YAN, X.; GU, P. (1996). Review of rapid prototyping technologies and systems. *Computer Aided Design*. v28. n4. p307-318. Apr.
- YAU, H-T; MENQ, C.-H. (1992). An automated dimensional inspection enviroment for manufactured parts using coordinate measuring machines. *International Journal of Production Research*. v30. n7. p1517-1536.
- YAU, H-T; HAQUE, S.; MENQ, C-H (1993). Reverse engineering in the design of engine intake and exhaust parts. *Proceedings of the 1993 ASME Winter Annual Meeting*. Manufacturing Science and Engineering. Production Engineering Division. v64. p139-148.
- YAU, H-T. (1997). Reverse engineering of engine intake parts by digitalization and surface approximation. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*. v37. n6. p855-871.
- YOGUI, R. (1998). Engenharia com tecnologia aplicada. *CADware Technology*. v.2, n.8, p.30.
- YU, D.; DUAN, Z.; ZHANG, W.; LIU, J. (1996). Flat-end cutter path generation for a sculptured surface dor 3-axes NC machining. *Journal of Materials Processing Technology*. v57. p65-69.

YU, D.; DUAN, Z.; ZHUANG, X.; LIU, J. (1996). Local discretization without tolerance in the CAD/CAM and NC programming of a sculptured surface. *Journal of Materials Processing Technology*. v57. p195-200.

8 - BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTAR

FOLEY, J. D.; VAN DAM, A.; FEINER, S. K.; HEGHES, J. F. (1997). *Computer Graphics: Principles and Practice*. New York. Addison-Wesley.

PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997). Pro/MFGTM & Pro/NC-CHECKTM user's guide release 18.0. Parametric Technology Corporation. USA.

PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997). Pro/MANUFACTURING - Basic Milling. Training guide. Version 17.0. Parametric Technology Corporation. USA.

PARAMETRIC TECHNOLOGY CORPORATION (1997). Pro/SURFACE. Training guide. Version 17.0. Parametric Technology Corporation. USA.

ROZENFELD, H. (1997). Desenvolvimento de produtos na manufatura integrada por computador (CIM). Anais da Sobracon. Abril.

TORI, R.; ARAKAKI, R.; MASSOLA, A. M. A.; FILGUEIRAS, L. V. L. (1987). *Fundamentos de computação gráfica..* Rio de Janeiro, Livros técnicos e científicos.