

**UNIVERSIDADE DE CAXIAS DO SUL
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

ELEANDRO JOSE SACCARO

**RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE PEÇAS COM GEOMETRIA
COMPLEXA POR MEIO DO USO DA ENGENHARIA REVERSA**

CAXIAS DO SUL

2013

ELEANDRO JOSE SACCARO

**RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE PEÇAS COM GEOMETRIA
COMPLEXA POR MEIO DO USO DA ENGENHARIA REVERSA**

Trabalho de Conclusão de Curso, apresentado
como requisito final para a conclusão do Curso
de Engenharia Mecânica na Universidade de
Caxias do Sul.

Supervisor: Prof. Dr. Marcos Alexandre
Luciano

CAXIAS DO SUL

2013

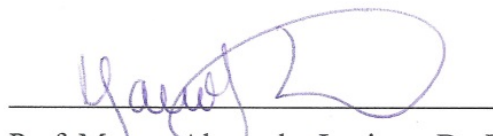
ELEANDRO JOSÉ SACCARO

**RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DE PEÇAS COM GEOMETRIA COMPLEXA
POR MEIO DO USO DA ENGENHARIA REVERSA**

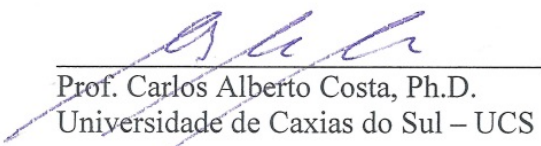
Trabalho de conclusão de curso de graduação,
apresentado como requisito final para obtenção
do título de Bacharel em Engenharia Mecânica
pela Universidade de Caxias do Sul.

Aprovado em 21/11/2013

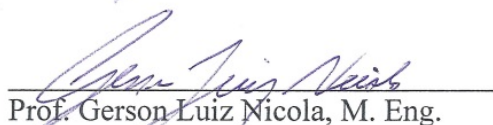
Banca Examinadora



Prof. Marcos Alexandre Luciano, Dr. Eng.
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Carlos Alberto Costa, Ph.D.
Universidade de Caxias do Sul - UCS



Prof. Gerson Luiz Nicola, M. Eng.
Universidade de Caxias do Sul - UCS

RESUMO

A Engenharia reversa é o processo de análise para identificar os componentes de um sistema com o propósito de replicação, sendo possível produzir novas peças ou produtos a partir de modelos existentes. O trabalho apresenta um procedimento para digitalização de curvas, em uma superfície desconhecida, para a reconstrução tridimensional de um modelo físico com o uso de uma máquina de medir por coordenadas. A aquisição dos dados geométricos ocorreu por meio da digitalização por contato, utilizando a técnica de *scanning* com o uso do *software Calypso*, e a peça utilizada para o estudo foi o rotor esquerdo de um reômetro de torque do tipo sigma. As etapas realizadas na digitalização dessas curvas, como a validação das ferramentas de digitalização do *software de Calypso*, e a digitalização de uma curva em uma superfície desconhecida e em uma superfície do modelo CAD, são apresentadas. Nas digitalizações por uma superfície desconhecida ocorreram distorções nas curvas em algumas regiões, sendo o valor máximo de aproximadamente 2,75 mm, enquanto as curvas digitalizadas sobre a superfície do modelo CAD apresentou melhor qualidade, com distorções máximas de 0,33mm.

Palavras-chave: Engenharia reversa. Reconstrução Tridimensional. Sistema CAD. Máquina de Medir por Coordenadas.

ABSTRACT

The Reverse Engineering is the process of analyzing an object to identify the components of a system, for the purpose of replication, with can produce new products or parts from existing models. The study presents a procedure for scanning on a surface unknown, for three-dimensional reconstruction of a physical model using a coordinate measuring machine. The acquisition of geometric data was through scanning by touch, using the technique of scanning using the Calypso software, and the part used for the study was a left sigma blades of a rheometer. The steps performed in scanning these curves, the validation of the Calypso software scanning tools, and digitalization of a curve on a surface unknown an a surface of the CAD model, are presented when scanning for of the digitalization of these curves are presented. When scanning for an unknown surface, distortions in the curves occurred in some regions, with a maximum value of approximately 2,75mm, while the curves scanned over the surface of the CAD model showed a better quality with maximum distortion of 0,33 mm .

Keywords: Reverse Engineering. Three-dimensional Reconstruction. CAD System. Coordinate Measuring Machine.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da Curva de <i>Bézier</i>	17
Figura 2 – Segmento de Curvas Polinominais na Curva <i>B-Spline</i>	19
Figura 3 – Curva NURBS Definida com Diferentes Pesos	21
Figura 4 – MMC Gagemax.....	22
Figura 5 – Peça escolhida Rotor Sigma.....	23
Figura 6 – Etapas Validação	24
Figura 7 – Posicionamento da Esfera	24
Figura 8 – Secções Esfera.....	25
Figura 9 – Erro de Apalpação.....	25
Figura 10 – Erro de Compensação	27
Figura 11 – Vetores normais	28
Figura 12 – Contato apalpador-superfície	28
Figura 13 – Curva desconhecida	29
Figura 14 – Curva desconhecida	29
Figura 15 – Sistema de coordenadas	30
Figura 16 – Identificação dos apalpadores	31
Figura 17 – Apalpadores utilizados	31
Figura 18 – Nomenclatura secções axiais.....	32
Figura 19 – Nomenclatura secções radiais	32
Figura 20 – Secções axiais	33
Figura 21 – Secções radiais	33
Figura 22 – Vetores transversais secção Z-46.....	34
Figura 23 – Distorção curva Y-0-L	35
Figura 24 – Conjunto de curvas-caminho desconhecido.....	36
Figura 25 – Modelo rotor2	36
Figura 26 – Corte modelo rotor2	37
Figura 27 – Curva Z62-caminho desconhecido.....	38
Figura 28 – Curva Z62-caminho inteseccção modelo rotor2	38
Figura 29 – Modelo rotor3	39
Figura 30 – Curva X-0-R-caminho rotor3.....	40
Figura 31 – Irregularidade superfície rotor4.....	40
Figura 32 – Irregularidade superfície rotor4.....	41

Figura 33 – Modelo rotor5	41
Figura 34 – Nuvem de pontos-malha	43
Figura 35 – Regiões de avaliação	43
Figura 36 – Resumo Etapas	45
Figura 37 – Inflexão curva Z-46.....	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Comparação entre ferramentas do <i>Software</i>	27
Tabela 2 – Coordenada ‘Z’ secção Z-46-L, Z-46-R.....	34
Tabela 3 – Coordenada ‘Y e X’ secções Y-0-L, Y-0-R,X-0-L,X-0-R	35
Tabela 4 – Comparativo amplitude curvas-desconhecida-rotor2	37
Tabela 5 – Comparativo amplitude curvas-rotor2-rotor3.....	39
Tabela 6 – Comparativo amplitude curvas axiais-rotor3-rotor4	42
Tabela 7 – Comparativo amplitude curvas radiais-rotor3-rotor4	42
Tabela 8 – Desvios da malha.....	44

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

APT	<i>Automatically Programmed Tools</i>
CAD	<i>Computer Aided Design</i>
ER	Engenharia Reversa
LNTP	Laboratório de Novas Tecnologias de Produção
LPOL	Laboratório de Polímeros
MMC	Máquina de Medir por Coordenadas
NURBS	<i>Non-Uniforme Rational B-Spline</i>
PDP	Processo de Desenvolvimento do Produto
UCS	Universidade de Caxias do Sul

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO	10
1.2	JUSTIFICATIVA.....	11
1.3	OBJETIVO GERAL	12
1.4	OBJETIVOS ESPECIFICOS.....	12
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1	ENGENHARIA REVERSA	13
2.2	SISTEMAS CAD	14
2.2.1	Sistema CAD modelador de sólidos.....	14
2.2.2	Sistemas CAD modelador de superfícies.....	14
2.2.3	Sistemas CAD modeladores híbridos	14
2.3	AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOMÉTRICOS.....	15
2.3.1	Digitalização por contato	15
2.3.2	Digitalização sem contato	15
2.4	CURVAS.....	16
2.4.1	Curva Bézier ou Spline.....	17
2.4.2	Curva B-Spline	18
2.4.3	Curva NURBS	20
2.5	CONSTRUÇÃO DE CURVAS E SUPERFÍCIES EM SISTEMA CAD	21
3	DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO	22
3.1	LABORATÓRIO DE NOVAS TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO.....	22
3.2	PEÇA DE VALIDAÇÃO	23
3.2.1	Procedimento de validação.....	23
3.2.2	Posicionamento e medição do diâmetro da esfera.....	24
3.2.3	Digitalização “curva 2D”	24
3.2.4	Digitalização “curva 3D”	27
3.3	RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DO ROTOR.....	27
3.3.1	Superfície do Rotor	27
3.3.2	Digitalização de uma curva 3D desconhecida.....	29
3.3.3	Fixação do rotor	30
3.3.4	Escolha das curvas para digitalização.....	31
3.3.5	Análise das curvas.....	33
3.3.6	Segmentação e Modelamento CAD	35
3.3.7	Análise dos modelos	43
3.3.8	Considerações Finais.....	44
4	CONCLUSÃO	49
	REFERÊNCIAS.....	50
	APÊNDICE 1.....	52

1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DO TRABALHO

No Brasil, anteriormente a onda da globalização, era comum às diversas atividades de desenvolvimento do produto serem realizadas com relativa liberdade de ação, podendo desenvolver ou modificar produtos já produzidos, e criar outros quase que exclusivos para o nosso país.

Parte desta liberdade foi perdida quando existiu uma tentativa de racionalização de uso de recursos humanos e materias por meio do desenvolvimento de produtos (LEITE *et al*, 2007).

O processo de desenvolvimento de produto (PDP) é considerado, cada vez mais, um processo crítico para a capacidade competitiva das empresas, tendo em vista a renovação frequente das linhas de produtos, redução dos custos e prazos de desenvolvimentos (TOLEDO *et al*, 2008).

Desenvolver produtos consiste em um conjunto de atividades por meio das quais busca-se, a partir das necessidades do mercado e das possibilidades e restrições tecnológicas, e considerando as estratégias competitivas e de produto da empresa, chegar às especificações de projeto de um produto e de seu processo de produção, para que a manufatura seja capaz de produzi-lo. O desenvolvimento de produto também envolve as atividades de acompanhamento do produto após o lançamento para, assim, serem realizadas as eventuais mudanças necessárias nessas especificações (ROZENFELD *et al*, 2006).

Em países em desenvolvimento, como é o caso do Brasil, as atividades de desenvolvimento de produtos tradicionalmente se concentram em grande parte nas adaptações e melhorias de produtos existentes (ROZENFELD *et al*, 2006)

De acordo com Leite *et al* (2007), de um modo geral, as atividades de concepção tratam do projeto do produto definindo sua forma externa e interna, seus sistemas e componentes. Para isso, foram desenvolvidos procedimentos nas atividades de projeto, além do uso de modernas ferramentas computacionais e uso de simulação matemática daquilo que foi projetado.

O projeto de produtos exige métodos sistematizados e específicos em função da complexidade de suas várias etapas. Os métodos tradicionais possuem algumas restrições, como o longo ciclo de projeto e a necessidade de razoáveis investimentos em pesquisas de mercado e testes de aceitação de produtos. Por outro lado, as ferramentas de projeto, como o

Computer Aided Design (CAD), se mostram valiosos pois podem significar importantes ganhos justamente nos seus pontos mais sensíveis que são prazos e custos de projeto e fabricação (NOGUEIRA e LEPIKSON, 2006).

Mesmo com todas ferramentas disponibilizadas em sistemas CAD, o projetista se depara com uma grande dificuldade quando existe a necessidade de fabricar peças, ou moldes, que possuam superfícies de forma livre (FERNEDA, 1999).

Outra situação que acontece é a necessidade de realizar um processo inverso na qual se pretende conhecer um produto concorrente e copiar ou começar a produzir um produto existente (BACK *et al*, 2008).

Em algumas ocasiões na sistemática convencional de projeto, na fase de verificações com protótipos, a performance de um produto poderá não apresentar resultados desejados. Tal desempenho poderá ser melhorado com algumas mudanças na geometria final, o que implica em alterações na documentação deste produto, sendo de difícil execução pelo método convencional.

De acordo com Nogueira e Lepkison (2006) a engenharia reversa (ER) é um método de projeto de grande interesse, pois sua utilização permite a criação de novos produtos em intervalos menores e com maior possibilidade de sucesso comparada às metodologias convencionais. Desta maneira, a ordem convencional de se manufaturar um produto, que inicia em um desenho de engenharia e termina com a execução de um modelo físico, é invertida (FERNEDA, 1999).

Conforme Lima *et al* (2003 *apud* JARDINI *et al*, 2011) sem dúvida, a maior aplicação da Engenharia Reversa está voltada ao mercado industrial. Devido à alta competitividade, as empresas precisam manter os custos baixos e aumentar a qualidade dos produtos e por isso utilizam a Engenharia Reversa. Com ela, pode-se encurtar o ciclo do produto que vai do projeto até a manufatura.

1.2 JUSTIFICATIVA

A Universidade de Caxias do Sul em parcerias com empresas fabricantes de equipamentos tecnológicos possuem o Laboratório de Novas Tecnologias de Produção (LNTP), tendo entre seus equipamentos uma máquina de medir por coordenadas (MMC) da marca Zeiss modelo Gagemax, trabalhando com a prestação de serviços e atividades de ensino. Com o uso deste equipamento do laboratório da UCS para a realização de engenharia reversa, surgiu a oportunidade de criar e consolidar conhecimentos para a realização deste

tipo de atividade, melhorando a possibilidade de prestação de serviços e desenvolvimento de projetos de pesquisa.

1.3 OBJETIVO GERAL

Identificar procedimentos para digitalização de curvas em uma superfície desconhecida para a reconstrução tridimensional de um modelo físico por meio do uso da engenharia reversa utilizando uma máquina de medir por coordenadas.

1.4 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Este trabalho objetiva:

- Compreender as ferramentas de digitalização através da validação em uma superfície conhecida.
- Digitalizar curvas em secções de um modelo físico.
- Analisar as curvas digitalizadas.
- Criar modelos com as curvas digitalizadas.
- Avaliar os modelos criados.
- Criar um guia com os métodos e comandos utilizados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 ENGENHARIA REVERSA

A Engenharia Reversa (ER) é um processo de análise de um objeto para identificar os componentes de um sistema e suas inter-relações e criar sua representação de outra forma, ou em um nível de abstração mais elevado, para posterior modelagem, simulação em busca de uma nova solução (BACK *et al*, 2008).

Para Lima (2003), a ER é a filosofia que consiste em criar modelos virtuais a partir de peças reais, sendo assim possível produzir novas peças, produtos ou ferramentas a partir de modelos ou componentes existentes .

Bagci (2009) define ER como a avaliação sistemática de um produto com o propósito de replicação, envolvendo a criação de um novo componente, cópia de uma parte existente ou ainda pode ser aplicada para a recuperação de uma peça danificada ou quebrada.

A engenharia reversa segundo Kwok e Eagle (1991 *apud* FERNEDA, 1999) pode ser aplicada em produtos cuja geometria é de difícil construção utilizando ferramentas CAD, e seriam melhor concebidas se fossem esculpidas de forma livre e depois terem seus dados extraídos e inseridos no sistema CAD, assim como em produtos antigos para os quais não existe nenhuma documentação e produtos que não tem seus desenhos atualizados de acordo com as mudanças que ocorrem durante o seu desenvolvimento.

Segundo Homen (2009), um exemplo da importância da engenharia reversa é o fato de em algumas situações alguns *designers* optarem por não trabalhar no modelo CAD necessário para materialização das suas idéias e recorrem a métodos mais sensíveis, esculpindo em barro ou madeira. A engenharia reversa oferece uma solução a este problema uma vez que o modelo físico é a fonte de informação para o modelo CAD.

A ER é um tema pouco abordado e difundido em países geradores de tecnologia por ser confundido com cópia ilegal. Esta técnica no entanto quando inserida numa sistemática para implementação de melhorias, pode resultar no aperfeiçoamento dos produtos em desenvolvimento, ao tomar como referência para o processo de desenvolvimento especificações técnicas de produtos já lançados no mercado e com desempenho consolidado (Fogliatto e Mury, 2002).

2.2 SISTEMAS CAD

O CAD faz parte do subsistema da engenharia de concepção e reconstrução de produto, tendo como objetivo modelar e formalizar por meio de documentos diversos. A origem do CAD veio de uma série de projetos independentes, tendo início na década de 50 com o projeto APT (*Automatically Programmed Tools*).

Por meio dos sistemas CAD, é possível fazer o modelamento ou reconstrução geométrica de um produto em três dimensões (AVIZ, 2010).

Segundo Soni, Chen e Lerch (2009), muitos fabricantes têm utilizado CAD como meio de concepção e desenvolvimentos de seus produtos.

2.2.1 Sistema CAD modelador de sólidos

Segundo Menon (1993 *apud* FERNEDA, 1999), o modelamento sólido surgiu no final dos anos 70 como uma tecnologia crucial em CAD, devido ao fato de proporcionar representações de peças de forma geométrica mais completa. Por possuir representação mais completa, eles podem ser gerados de maneira mais automatizada (AVIZ, 2010).

De acordo com Souza e Coelho (2003), os sistemas CAD modeladores de sólido geram objetos tridimensionais sólidos, possuindo propriedades como centro de gravidade e volume, e para o modelamento de produtos eles são capazes de realizar operações booleanas (soma, interseção e subtração) entre geometria, tornando ágil o trabalho com estes *softwares*.

2.2.2 Sistemas CAD modelador de superfícies

Quando se trata de obter formas complexas, a utilização de modeladores sólidos não se mostra suficiente para a construção de um modelo geométrico de forma fiel. Disso surgem os modeladores de superfícies, fazendo uso de formulações matemáticas estes modeladores são capazes de gerar formas geométricas complexas, com possibilidade de edição dos pontos em qualquer momento. Estas superfícies não possuem espessura e, qualquer ponto dela pode ser editado a qualquer momento alterando a estrutura do objeto apenas localmente e mantendo as demais características inalteradas (LUCENA, 2009).

2.2.3 Sistemas CAD modeladores híbridos

Os sistemas CAD podem trabalhar com recursos de modelamento tridimensional de produtos, por sólidos e superfícies em *softwares* diferentes. Em um sistema mais robusto,

contudo, pode-se trabalhar de forma que permite a junção desses dois tipos de modelamento conhecido como modeladores híbridos, tendo como principal característica a utilização de complexos algoritmos matemáticos que permitem ao usuário trabalhar com a integração do modelamento sólido com o de superfícies em um mesmo *software* (AVIZ, 2010).

2.3 AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOMÉTRICOS

A aquisição dos dados geométricos na reconstrução tridimensional é o primeiro passo do processo de engenharia reversa, onde na aquisição dos dados obtêm-se um conjunto de pontos, também classificado como nuvem de pontos. Atualmente dispõe-se de várias tecnologias comercialmente disponível para a digitalização tridimensional, sendo dividido em duas categorias principais: digitalização por contato físico e sem contato físico (AVIZ, 2010).

2.3.1 Digitalização por contato

A digitalização por contato é operacionalizada com *hardwares* específicos, entre eles, os mais utilizados são os centros de usinagem, braços de medição e MMC, onde nesta última, segundo resultados de Weckenmann *et al* (2009 *apud* AVIZ, 2010) possui a menor incerteza de medição. Na digitalização por contato, existe o contato físico entre um produto e um componente conhecido como probe ou apalpador. Neste método existem duas técnicas empregadas atualmente, sendo a aquisição ponto-a-ponto e a aquisição por varredura ou *scanning* (AVIZ, 2010).

Na digitalização ponto-a-ponto o apalpador se aproxima da superfície em uma direção normal a superfície até coincidir com a mesma. As coordenadas do ponto central do apalpador são adquiridas e então o apalpador se afasta da peça em busca do ponto seguinte. As coordenadas do ponto de contato entre peça e apalpador são obtidas através da correção do raio do sensor esférico (AVIZ, 2010).

Na digitalização por varredura ou *scanning* o apalpador permanece em contato com a superfície da peça, deslocando-se em uma direção pré-determinada, conseguindo uma grande quantidade de pontos em tempo menor que na aquisição ponto-a-ponto SAVIO *et al* (2007 *apud* AVIZ, 2010).

2.3.2 Digitalização sem contato

Nesta digitalização, não existe contato físico entre peça e aparelho de medição (FERNEDA, 1999). Para isso utilizam a projeção de fontes de energia, sendo atualmente mais

utilizadas, as fontes de luz, magnéticas e sônicas. A energia é projetada na direção perpendicular a superfície do objeto e em seguida a transmissão de energia é refletida e observada. Assim esses dados geométricos são finalmente calculados usando tecnologias de triangularização, *time-of-flight*, interferometria e algoritmos de processamento de imagem (AVIZ, 2010).

2.4 CURVAS

Segundo Lucena (2009), o conceito matemático de uma curva tem o objetivo de capturar a ideia intuitiva de um objeto contínuo no espaço cujo domínio é o intervalo finito deste objeto. Curvas podem ser expressas por três tipos de representação: implícita; explícita e paramétrica.

A forma explícita é representada pela Equação 1, onde nesta formulação existe a falta de parâmetros que limitem a forma do objeto.

$$y = f(x) \tag{1}$$

Onde:

x, y pertencem aos números reais.

A representação implícita é descrita pela Equação 2, permitindo apresentar sob certas condições, mais de um valor para y para o mesmo valor de x , mas ainda tem o fator limitante que defina o campo finito de trabalho.

$$f(x,y) = c \tag{2}$$

Onde:

x e y pertencem aos números reais.

A representação paramétrica é descritas nas Equações 3 e 4, controladas pela mesma variação de parâmetro t , com maior controle de formas, permitindo formas finitas, sendo utilizadas na representação de modelos virtuais em sistemas CAD.

$$x = f(t) \text{ e } y = f(t) \tag{3}$$

$$x = f(t) \text{ e } y = f(t) \tag{4}$$

Onde x , y e t pertencem aos números reais.

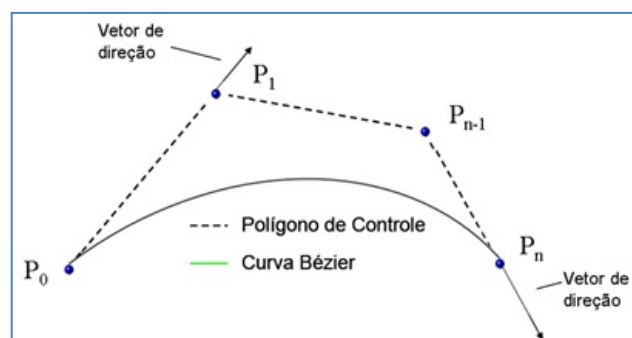
Devido aos graus de liberdade em uma curva tridimensional, sua manipulação torna praticamente inviável sem a utilização de modelos matemáticos que permitam controlá-los a fim de facilitar o uso em modelamento geométrico. À medida que foi aumentando a necessidade de controle na descrição de uma curva, outros modelos surgiram, como as curvas do tipo *spline*, *B-Spline* e *NURBS*.

2.4.1 Curva Bézier ou Spline

No passado, construtores de embarcações utilizavam longas e estreitas madeiras para atingir a forma geométrica desejada para a base de uma embarcação. Essas ripas eram chamadas *splines*. Eles deformavam esta *spline* com pesos em locais e direções específicos, chamados de *ducks*. A forma resultante desse processo era uma curva suave que obedecia ao posicionamento e ao peso dos *ducks*. Dessa forma desejou utilizar o método manual de criação de *spline* para uma representação matemática, utilizando pontos de controle e pesos associados, análogo ao método artesanal (AVIZ, 2010).

A curva de Bézier emprega no mínimo três pontos para sua definição, podendo chegar a ‘ n ’ pontos de controle. O grau de interpolação polinomial desta curva é relacionado ao número de vértices de seu polígono de controle, de modo que alterando um dos pontos, toda a sua curva é alterada. Uma característica da curva de Bézier é passar pelo primeiro e ultimo ponto (*end points*) do polígono de controle e não passar pelos pontos intermediários (*control points*). Outra característica da curva de Bézier é ser tangente aos vetores definidos pelo segmento formado pelos pontos P_0 e P_1 e o segmento formado pelos pontos P_{n-1} e P_n de seu polígono de controle. A figura 1 ilustra uma curva de Bézier formada por ‘ n ’ pontos em seu polígono de controle. (LUCENA, 2009).

Figura 1 – Representação da Curva de Bézier



Fonte: o autor

Matematicamente uma curva *Bézier* pode ser definida pela Equação 5.

$$P(t) = \sum_{i=0}^n B_i J_{n,i}(t) \quad (5)$$

Onde:

$P(t)$ = Curva de *Bézier*;

B_i = Pontos do Polígono de Controle;

n = Grau do Polígono de Controle;

t = Parâmetro da curva que varia de $t_{\min}$ à $t_{\max}$;

$J_{n,i}(t)$ = Função de Suavização.

A Equação 6 define a função de suavização de uma curva *Bézier*;

$$J_{n,i}(t) = \left[\frac{n!}{i!(n-i)!} \right] t^i (1-t)^{n-1} \quad (6)$$

2.4.2 Curva *B-Spline*

Em uma curva *spline* ou *Bézier*, ao se modificar um dos pontos de controle, toda curva é afetada. No entanto, as curvas *B-Spline* exibem a características de que o ponto de controle não são transpassados pela curva, permitindo que sejam mais simples as alterações locais e a simplicidade de cálculo requerido para possibilitar esta alteração. Para desenhar uma curva *B-Spline* precisa-se de um conjunto de pontos de controle, um vetor de nós com ao menos um coeficiente para cada ponto de controle, de forma que todos os segmentos de curva sejam unidos satisfazendo certa condição de continuidade. A definição da curva *B-spline* pode ser representada pela Equação 7 (Lucena, 2009).

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad (7)$$

Onde se tem:

$P(t)$ = Curva *B-Spline*;

B_i = Vértices do Polígono de Controle;

$n+1$ = Quantidade de pontos do Polígono de Controle;

t = Parâmetro da curva que varia de $t_{\min}$ à $t_{\max}$;

k = Ordem da Curva *B-Spline*, podendo ser definida no intervalo $2 \leq k \leq n+1$;
 $N_{i,k}(t)$ = Função de Suavização (Função *Cox De-Boor*).

A função de suavização para uma curva *B-Spline* é definida pela Equação 8.

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1 & \text{se } x_i \leq t \leq x_{i+1} \\ 0 & \text{para demais casos} \end{cases} \quad (8)$$

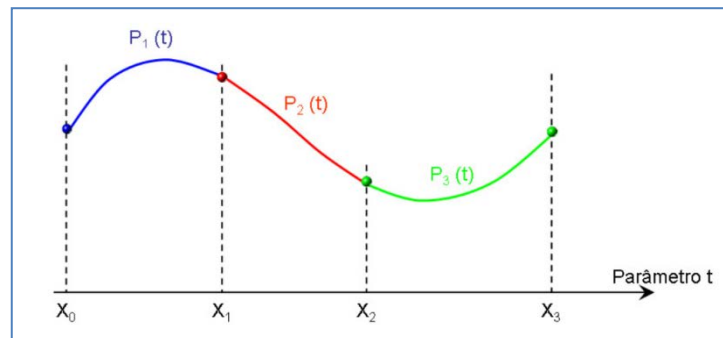
$$N_{i,k}(t) = \frac{(t - x_i)N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t)N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}}$$

Onde:

x_i = vetores de nó em relação ao parâmetro t que respeitam a relação $x_i \leq x_{i+1}$

Uma propriedade das curvas *B-spline*, é a obrigatoriedade de uma curva deste tipo ser representada por segmentos de curvas polinomiais de grau $k-1$, presentes em cada parâmetro da curva, dados por $x_i \leq t \leq x_{i+1}$. A figura 2 ilustra os segmentos das curvas polinomiais encontradas em uma curva *B-Spline*.

Figura 2 – Segmento de Curvas Polinomiais na Curva *B-Spline*



Fonte: Lucena (2009)

Para assegurar a continuidade entre os segmentos da curva, criaram-se duas restrições adicionais, chamadas de continuidade geométrica representada por G^n e continuidade paramétrica representada por C^n . Na situação de continuidade geométrica com grau G^0 os segmentos são unidos por um ponto comum, e em grau G^1 além de segmentos por ponto comum, as suas tangentes tem a mesma direção. Na situação de continuidade paramétrica, a continuidade C^0 apresenta a mesma situação da continuidade geométrica de mesmo grau, e no caso de uma continuidade paramétrica maior que zero C^n , os segmentos se unem em relação a

sua n -ésima derivada dos pontos de união. Ou seja, além dos pontos de união, suas tangentes têm mesma direção e magnitude.

2.4.3 Curva NURBS

Embora as curvas *B-spline* sejam flexíveis e apresentam propriedades úteis para os sistemas CAD, elas não podem representar uma curva mais simples como um círculo, elipses e muitas outras. Para obter um grau adicional de flexibilidade na manipulação geométrica das curvas *B-spline* foi adicionado um parâmetro denominado de peso (h) aos vértices dos polígonos de controle. Com esse controle tornou-se possível o controle de uma curva *spline* por seu grau polinomial, quantidade de vértices no polígono de controle, união de segmentos de curva através do controle não uniforme dos nós e controle local em cada segmento através do parâmetro peso, definindo o grau de atração que o vértice de controle tem em relação à curva. Como essa propriedade visa um grau total de flexibilidade na manipulação da curva, ela foi introduzida nas curvas *B-Spline* abertas não uniformes. Dai se tem o nome NURBS (*Non-Uniforme Rational B-Spline*), ou seja, uma curva *B-Spline* não uniforme em sua forma racional devido ao controle local que o parâmetro peso (h) proporciona. Atualmente, este tipo de curva é amplamente utilizado na utilização de superfícies complexas nos mais diversificados sistemas CAD (LUCENA, 2009).

Naturalmente com a adição de mais um parâmetro, a sua forma matemática é ligeiramente diferente de uma curva *B-Spline*, sendo definida pela Equação 9.

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i R_{i,k}(t) \quad (9)$$

Onde se tem:

$P(t)$ = Curva *NURBS*;

B_i = Vértices do Polígono de Controle;

$n+1$ = Quantidade de pontos do Polígono de Controle;

t = Parâmetro da curva que varia de $t_{\min}$ à $t_{\max}$;

$R_{i,k}(t)$ = Função de Suavização

A diferença entre uma curva *B-Spline* para uma NURBS está na função de suavização que recebe um parâmetro de peso (h) conforme Equação 10.

$$R_{i,k} = \frac{h_i N_{i,k}(t)}{\sum_{i=1}^{n+1} h_i N_{i,k}(t)} \quad (10)$$

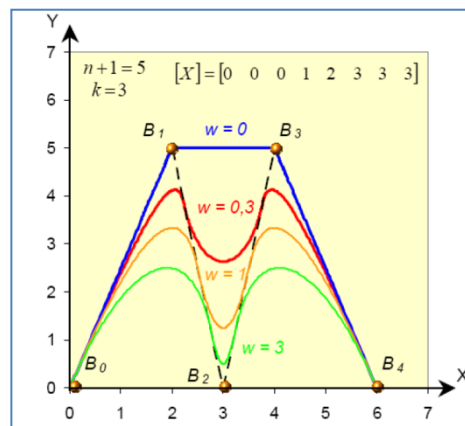
Onde se tem:

h_i = Peso de atração do vértice do Polígono de Controle;

$N_{i,k}$ = Função de Suavização de uma curva *B-Spline* não uniforme

A figura 3 ilustra uma curva NURBS com diferentes exemplos de variação de seu parâmetro peso.

Figura 3 - Curva NURBS Definida com Diferentes Pesos



Fonte: Lucena (2009)

2.5 CONSTRUÇÃO DE CURVAS E SUPERFÍCIES EM SISTEMA CAD

Normalmente a representação gráfica de peças medidas é obtida a partir de um banco de dados contendo pontos coletados (pontos de controle) por uma MMC. Um objeto será mais bem modelado quanto maior for o número de pontos medidos sobre a sua superfície. Sem dúvida alguma, o método sem contato com laser consegue obter um número maior de pontos num curto intervalo de tempo Lee *et al* (2002, *apud* SILVA *et al* 2012). Porém a maioria das indústrias não possui esse tipo de equipamento, e sim, MMC com uso de apalpadores de contato (SILVA, 2012).

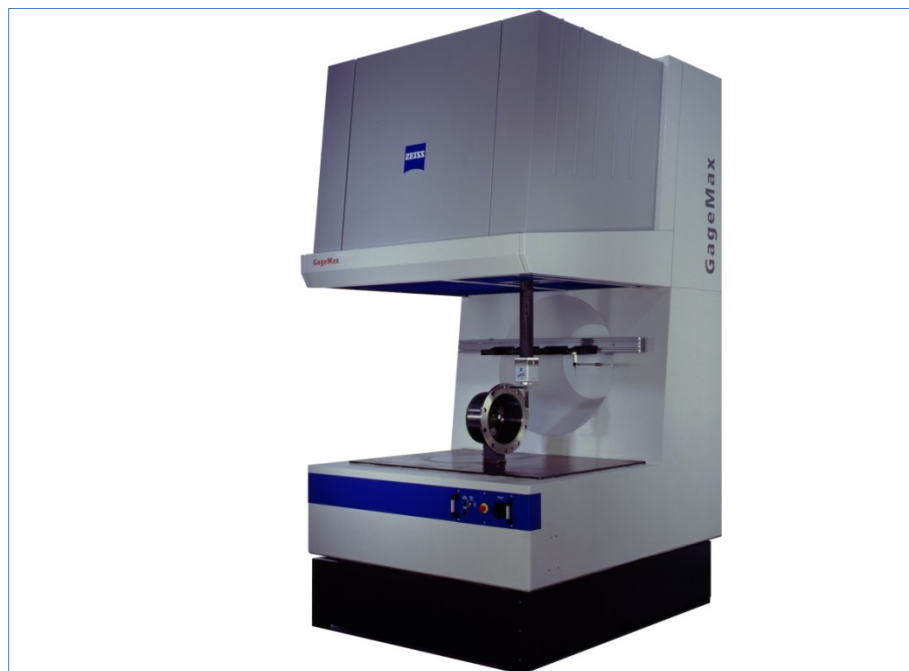
Segundo Aviz (2010), os modelos de superfície podem ser agrupados em três tipos principais: superfícies geradas a partir de matrizes de pontos de controle, onde a superfície é obtida por técnicas de interpolação/aproximação; superfícies geradas a partir de outras curvas, semelhantes a uma capa que reveste uma estrutura de arames; e superfícies geradas a partir de interpolações entre duas ou mais superfícies, tais como raio de concordância e chanfro.

3 DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

3.1 LABORATÓRIO DE NOVAS TECNOLOGIAS DE PRODUÇÃO

O LNTP possui uma máquina tridimensional modelo Gagemax da fabricante Zeiss (Figura 4), desenvolvida para trabalhar em ambiente de produção devido a sua alta velocidade de medição e confiabilidade de resultados. A aquisição dos dados geométricos é realizada por contato, possuindo um cabeçote fixo modelo VAST XT onde podem ser configurados apalpadores conforme necessidade de medição. A digitalização pode ser feita pela técnica ponto-a-ponto ou por *scanning*. O volume de medição do equipamento é de 750 mm no eixo X e 500 mm nos eixos Y e Z.

Figura 4 – MMC Gagemax

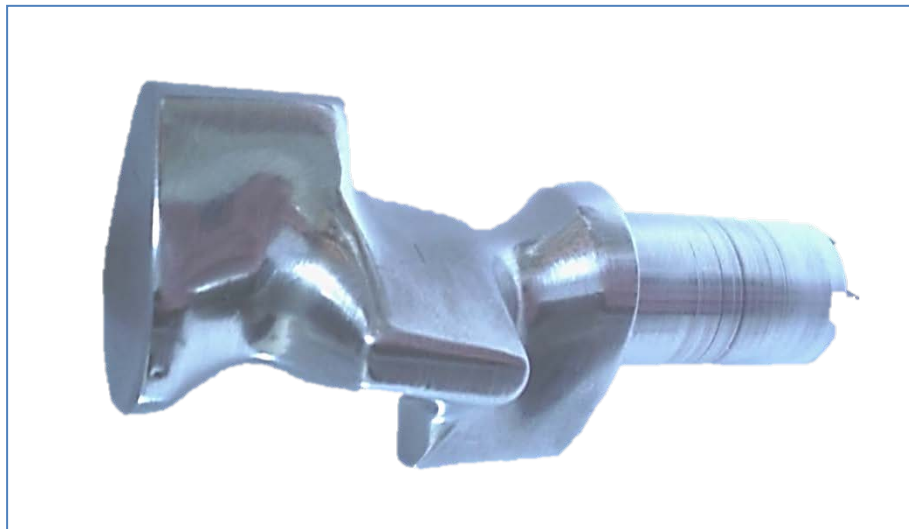


Fonte: Zeiss (2003)

O equipamento dispõe do *software* de medição *Calypso* Versão 4.0, que pode ser utilizado em diferentes tipos de MMC. O *Calypso* é um *software* de metrologia visual, onde se pode criar um plano de medição sem programar uma única linha e sem necessidade de uso de programação estruturada. Os elementos a serem medidos podem ser extraídos do próprio modelo CAD facilitando as estratégias de medição. O módulo *Curve* adquirido como complemento do *Calypso* propicia medir superfícies de forma livre com resultados precisos, como em árvore de cames, compressores de parafuso e turbo compressores.

A peça escolhida para este trabalho é o rotor esquerdo de um reômetro de torque do tipo sigma, usado no laboratório de Polímeros (LPOL) que integra o Centro de Ciências Exatas e Tecnologias da UCS. O rotor apresentou uma falha por ruptura e, portanto necessita ser reconstruído tridimensionalmente para sua posterior fabricação. Por apresentar formas desconhecidas e complexas foi usado como estudo de caso para o desenvolvimento deste trabalho. A peça possui alguns cames curvados, conforme mostrado na figura 5

Figura 5 – Peça escolhida Rotor Sigma



Fonte: o autor

Para a construção dos modelos matemáticos, foi utilizado o software comercial da empresa *Dassault Systèmes*, o *SolidWorks 2012 x64 Edition*.

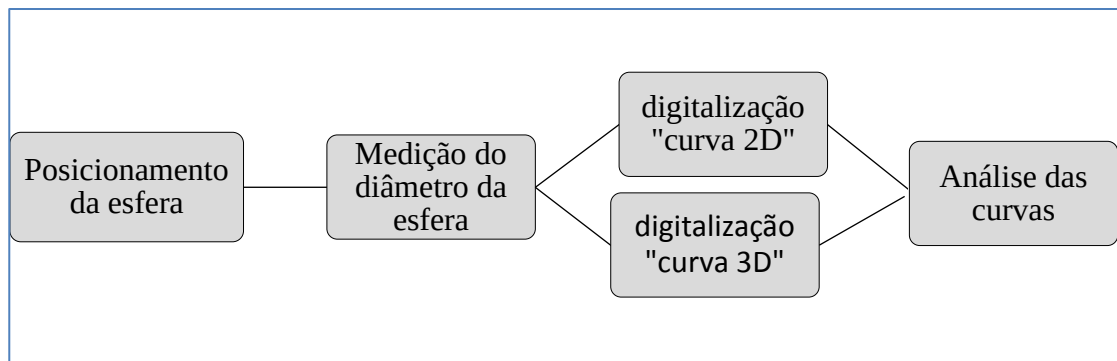
3.2 PEÇA DE VALIDAÇÃO

3.2.1 Procedimento de validação

A fim de compreender as ferramentas (comandos) de digitalização do *software Calypso*, foi utilizada uma esfera de rolamento para validação, por ser uma peça normatizada e que apresenta tolerâncias de circularidade na ordem de 0,0001 mm e, pelas coordenadas da superfície da mesma ser conhecidas.

Utilizando o *software Calypso* e um apalpador com diâmetro de 3 mm foram realizadas as seguintes etapas: posicionamento da esfera, medição do diâmetro da esfera, digitalização com as ferramentas “curva 2D” e “curva 3D” e análise das curvas, como pode ser visto na figura 6. O uso da ferramenta “curva 2D” foi para verificar se existiam erros de compensação do raio do apalpador quando utilizado este comando.

Figura 6 – Etapas Validação

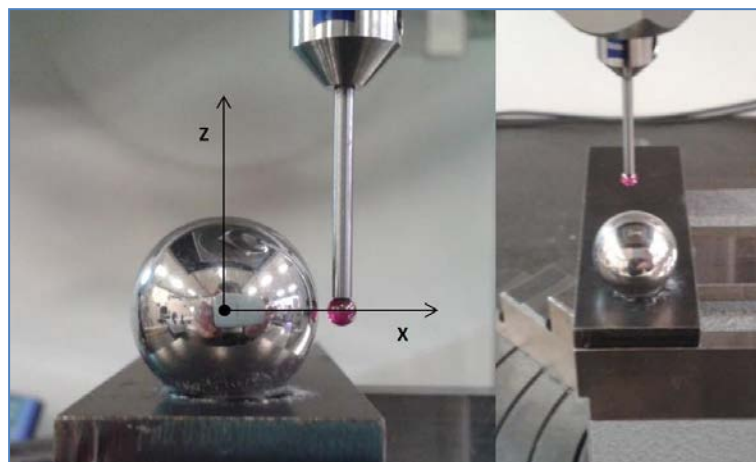


Fonte: o autor.

3.2.2 Posicionamento e medição do diâmetro da esfera

A esfera foi posicionada no volume de medição restringindo seus graus de liberdade, de tal modo que, a coordenada x, y, z (0, 0, 0) da esfera foi o centro da mesma como mostrado na figura 7.

Figura 7 – Posicionamento da esfera



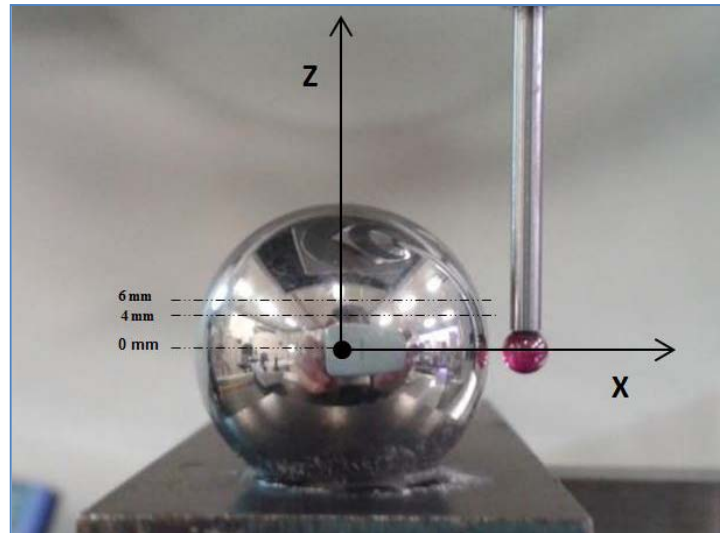
Fonte: o autor

O diâmetro correspondente a calota superior da esfera foi medido com 472 pontos, e resultou em um diâmetro de 19,0451 mm com desvio padrão de 0,0059 mm.

3.2.3 Digitalização “curva 2D”

Com a ferramenta “Curva 2D” do *software Calypso*, foi realizada a digitalização em 3 secções ao longo do eixo Z como mostrado na figura 8.

Figura 8 – Secções Esfera

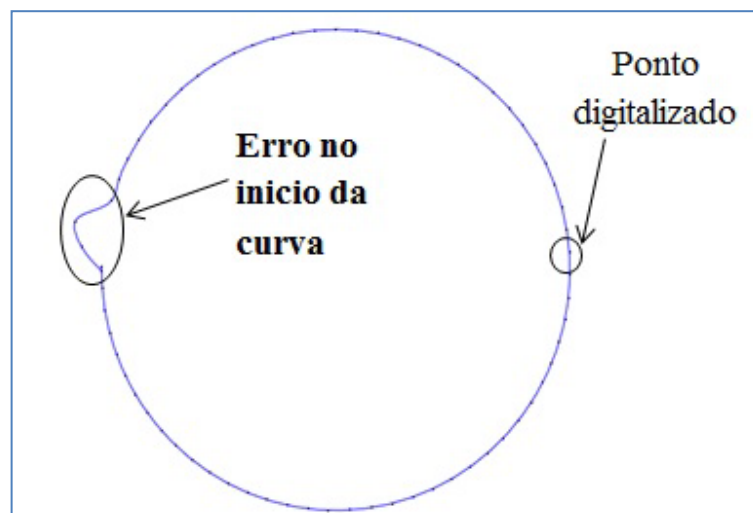


Fonte: o autor

As 3 secções são em planos perpendiculares ao eixo Z e interceptam o eixo nas posições 0 mm, 4 mm e 6 mm. Na secção que intercepta o eixo Z na posição 0 mm obteve-se uma curva com 69 pontos. Essa quantidade de pontos é escolhida por *default* do *software* e pode ser modificada.

Na figura 9 são mostrados os pontos digitalizados para essa curva e um erro associado no início da apalpação.

Figura 9 – Erro de Apalpação



Fonte: o autor

Desconsiderando os pontos iniciais, para cada coordenada desses pontos restantes digitalizados foi calculado o diâmetro usando a Equação 11, na qual resultou em uma média de 19,0463 mm, e desvio padrão de 0,0058 mm.

$$D = 2 \sqrt{(x^2 + y^2 + z^2)} \quad (11)$$

Onde se tem:

D = Diâmetro;

x=coordenada do eixo x;

y=coordenada do eixo y;

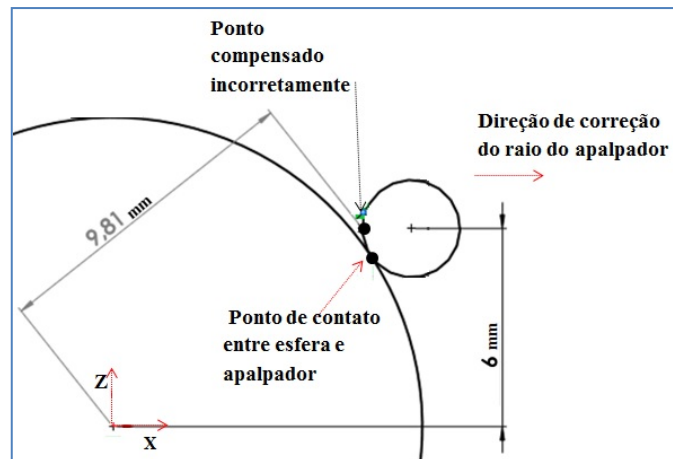
z=coordenada do eixo z;

Como exemplo, o ponto N°10 possui coordenadas x,y,z (-6,2848; 7,1515; 0,0290) e utilizando a equação 11 resulta em um valor D =19,04138 mm.

Na secção interceptando o eixo z em 4 mm, resultou em uma curva com 64 pontos. Calculando o diâmetro com as coordenadas dos pontos digitalizados, resultou em um diâmetro médio de 19,2918 mm e, desvio padrão de 0,0052 mm. Na secção interceptando o eixo z na posição de 6 mm, resultou em uma curva com 58 pontos, onde calculando o diâmetro com as coordenadas dos pontos, resultou em um diâmetro médio de 19,6261 mm e desvio padrão de 0,004675 mm. Nesses cálculos também foram desconsiderados os pontos iniciais.

Analisando a secção que apresentou a maior diferença de diâmetro calculado em relação ao diâmetro medido da esfera, conclui-se que essa diferença é devido a compensação do raio da esfera do apalpador onde, a ferramenta “curva 2D” do *software*, realiza a compensação do vetor normal na direção paralela ao plano da secção, e não na direção do vetor normal do ponto de contato entre a superfície da esfera e apalpador. Na figura 10 pode se observar que caso a compensação do raio do apalpador for realizada na direção normal a secção, o ponto de contato compreendido pela ferramenta situa-se a uma distância de 9,81 mm do centro da esfera, no que compreenderia em um diâmetro de 19,62 mm, que é o mesmo diâmetro calculado pelos pontos obtidos nesta secção.

Figura 10 – Erro de Compensação



Fonte: o autor

3.2.4 Digitalização “curva 3D”

Com a ferramenta “Curva 3D” do *software* foi realizada a digitalização nas secções que interceptam o eixo Z em 4 mm e 6mm.

Seccionando o eixo z em 4 mm, a curva obtida com 64 pontos e um diâmetro médio calculado de 19,0460 mm e desvio padrão de 0,0026 mm. Na secção em 6 mm a curva com 54 pontos teve um diâmetro médio calculado de 19,0449 mm e desvio padrão de 0,0026 mm.

A tabela 1 tem a comparação com as duas ferramentas do *software*.

Tabela 1 – Comparação entre ferramentas do *Software*

Secção	Diâmetro calculado “Curva 2D” (mm)	Desvio padrão “Curva 2D” (mm)	Desvio entre diâmetro medido e calculado “Curva 2D” (mm)	Diâmetro calculado “Curva 3D” (mm)	Desvio padrão “Curva 3D” (mm)	Desvio entre diâmetro medido e calculado “Curva 3D” (mm)
0 mm	19,0463	0,0058	0,0012	-----	-----	-----
4 mm	19,2918	0,0052	0,2467	19,0460	0,0026	0,0009
6 mm	19,6261	0,0046	0,5810	19,0449	0,0026	0,0002

Fonte: o autor

Dessa forma, se verificou que a ferramenta “curva 3D” oferece melhor resultado em uma superfície desconhecida, onde o vetor normal é transversal ao plano de uma secção escolhida, como é o caso da esfera.

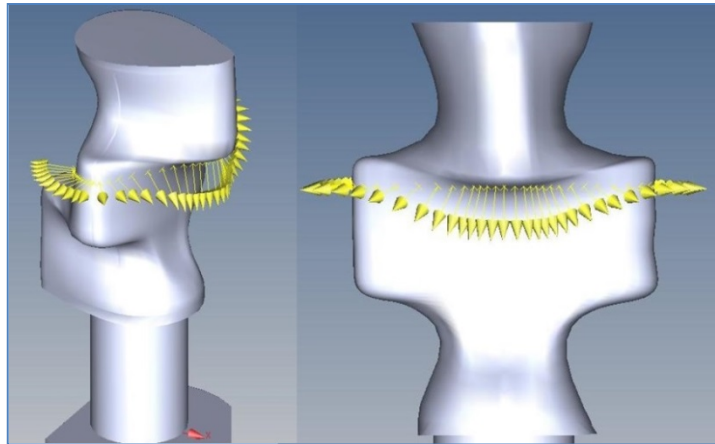
3.3 RECONSTRUÇÃO TRIDIMENSIONAL DO ROTOR

3.3.1 Superfície do Rotor

O rotor escolhido para a reconstrução tridimensional apresenta superfícies complexas, com secções que possuem regiões com mudança nos vetores transversais ao plano da secção.

A figura 11 mostra um exemplo dessa variação dos vetores normais de uma curva em uma secção, onde as setas representam o vetor normal da superfície do rotor nos pontos de contato com a superfície da peça localizada no plano da secção.

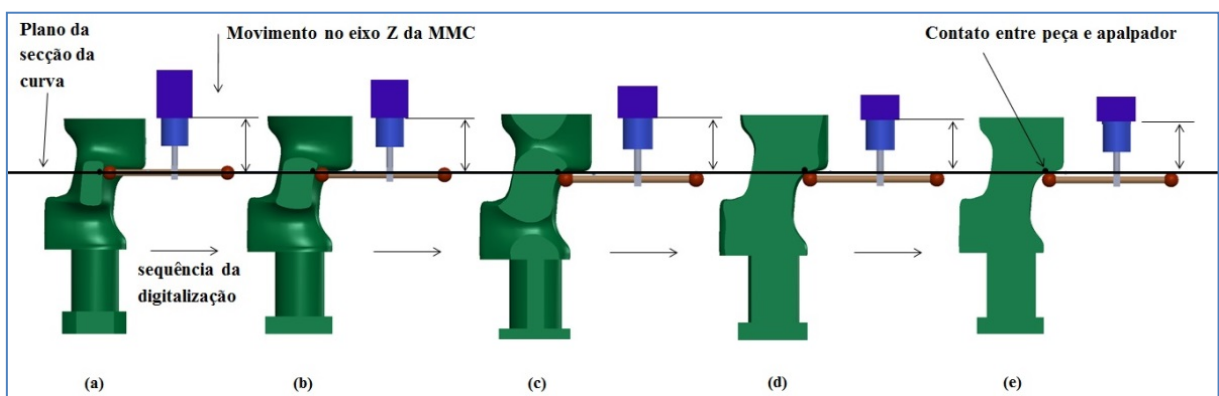
Figura 11 – Vetores normais



Fonte: o autor

Devido a essa variação do vetor transversal que existe no plano da secção em uma superfície complexa, durante o caminho (trajeto feito pelo apalpador) em torno do eixo da secção, ela deve executar um movimento alternando a posição do centro do apalpador, a fim de manter o contato entre o apalpador e a peça no mesmo plano da secção. Esse movimento alternado pode ser visto na figura 12, onde sequência da digitalização em uma secção do rotor e o movimento alternado para manter esse contato é mostrada.

Figura 12 – Contato apalpador-superfície



Fonte: o autor

Na figura 12(a), o centro apalpador coincide com o plano da secção. Já nas sequências da figura 12(b) até a figura 12(e) o centro do apalpador movimentou para baixo conforme prosseguiu com a digitalização desta secção.

3.3.2 Digitalização de uma curva 3D

Para a digitalização de uma curva 3D são necessárias 3 linhas (trajeto entre 2 pontos) paralelas, a fim de encontrar a direção do vetor normal dos pontos em uma secção. As linhas são criadas a partir de 6 pontos apalpados, onde o apalpador percorre em torno de um eixo o menor caminho representados pelas três linhas. Como mostrado na figura 13 a MMC percorre primeiramente o caminho 6-3, depois o caminho 2-5 e por último 4-1, e como resultado, ela grava uma sequência de pontos com as coordenadas do contato entre superfície da peça e apalpador que ficaram próximo do caminho 2-5.

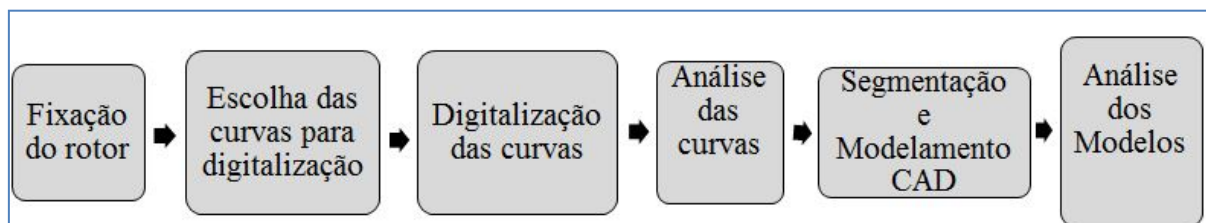
Figura 13 – Curva desconhecida



Fonte: Zeiss, 2004

A reconstrução do rotor iniciou a partir da digitalização de uma curva desconhecida e teve as seguintes etapas: fixação do rotor; escolha das curvas para digitalização; análise das curvas; segmentação e modelamento CAD e a análise do modelo CAD, conforme é mostrado na figura 14. Os comandos e ferramentas utilizados nesta reconstrução encontram-se no Anexo I.

Figura 14 – Curva desconhecida

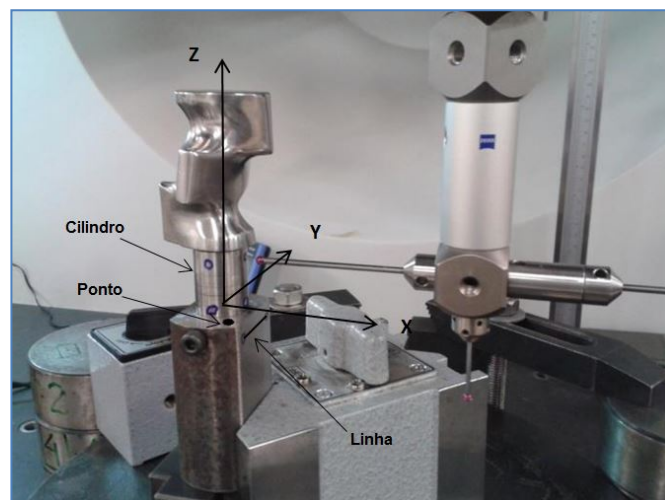


Fonte: o autor

3.3.3 Fixação do rotor

Em uma digitalização por contato, a peça deve ter um sistema de alinhamento definido. Com apenas os elementos conhecidos do rotor não é possível definir um sistema de alinhamento confiável. Com isso foi desenvolvido um meio de fixação do rotor no volume de medição da MMC, preocupando-se em possuir uma referência para restringir os graus de liberdade para o alinhamento do rotor, e também contribuir para uma posição de digitalização ideal que utilize o menor número de segmentos de curvas para criar as seções axiais. Na figura 15 pode-se observar que com essa fixação, o elemento de forma cilíndrica foi utilizado para restringir o grau de liberdade de rotação e translação dos eixos x e y , assim como, a linha mostrada restringiu a liberdade de rotação do eixo z , e o ponto restringiu a translação do eixo Z . Essas referências definiram o sistema de coordenadas restringindo os seis graus de liberdade do rotor.

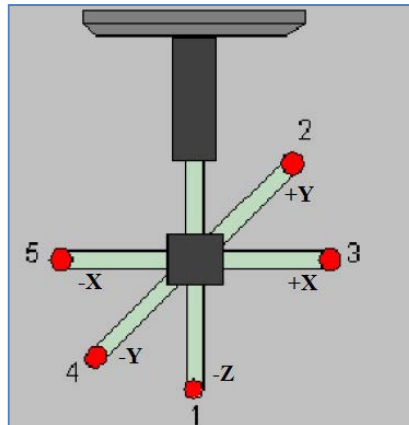
Figura 15 – Sistema de coordenadas



Fonte: o autor

Em uma MMC, cada apalpador é identificado com um número que depende da posição que ele se encontra no espaço, e normalmente essa identificação segue a sequência conforme é mostrado na figura 16. No caso da máquina Zeiss, a linha entre os apalpadores 5 e 3 é paralela ao eixo x , entre os apalpadores 4 e 2 é paralelo ao eixo y , e a linha entre o apalpador 1 e o guia da máquina é paralelo ao eixo z .

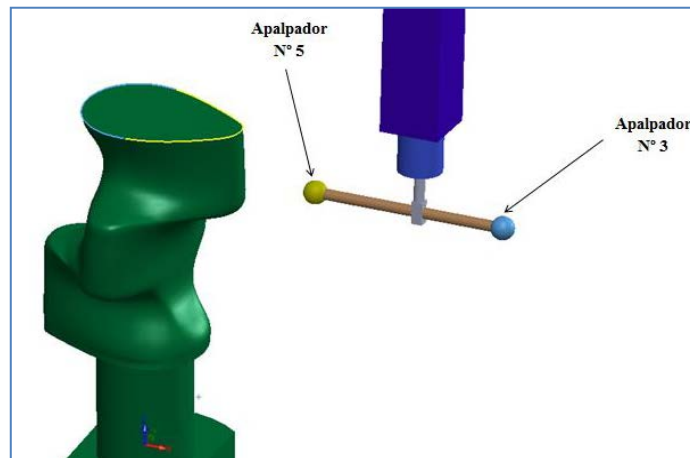
Figura 16 – Identificação dos apalpadores



Fonte: adaptado de Zeiss, 2004.

Devido a limitação física entre apalpador e peça, que ocorre em uma digitalização por contato, foram utilizados 2 apalpadores para digitalização das curvas. Dividindo o rotor pelo plano Y-Z, para os segmentos com valores positivos de X, foi utilizado o apalpador número 5, e para os segmentos com valores negativos de X, foi utilizado o apalpador número 3 como mostra a figura 17.

Figura 17 – Apalpadores utilizados



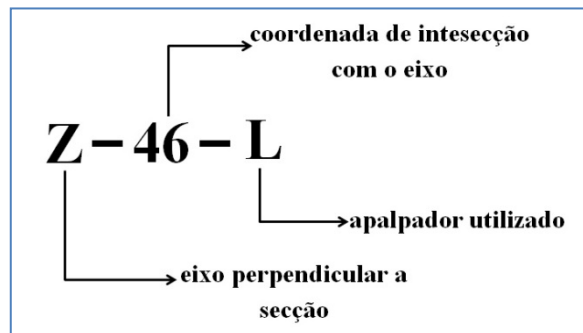
Fonte: o autor

3.3.4 Escolha das curvas para digitalização

Para facilitar a digitalização e modelagem do rotor, foi utilizada uma nomenclatura para as curvas, a fim de organizá-las e facilitar a análise e discussão das mesmas. As curvas das secções axiais (curvas em planos perpendiculares ao eixo Z) foram nomeadas de forma

que o primeiro algarismo corresponde ao eixo perpendicular à secção da curva, o segundo corresponde a coordenada da intersecção do plano da secção com o eixo, e o terceiro algarismo corresponde ao apalpador utilizado para criar a curva, sendo para o apalpador número 5 utilizado a letra R, e o apalpador número 3 utilizado a letra L. A figura 18 mostra um exemplo da nomenclatura de uma secção axial.

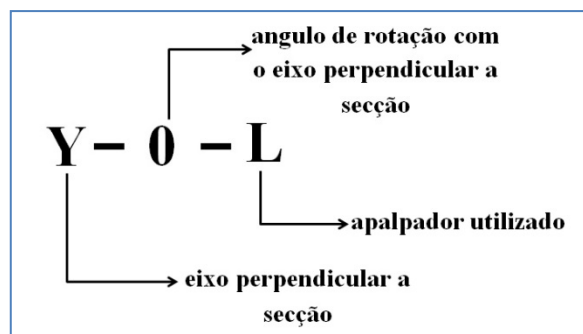
Figura 18 – Nomenclatura secções axiais



Fonte: o autor

Nas curvas radiais (curva em planos radiais ao eixo Z), o primeiro algarismo corresponde ao eixo perpendicular a secção da curva, o segundo corresponde a rotação do plano normal a secção em torno do eixo Z, e o terceiro algarismo correspondem ao apalpador utilizado para criar a curva, sendo para o apalpador número 5 utilizado a letra R, e o apalpador número 3 utilizado a letra L. A figura 19 mostra um exemplo da nomenclatura de uma secção radial.

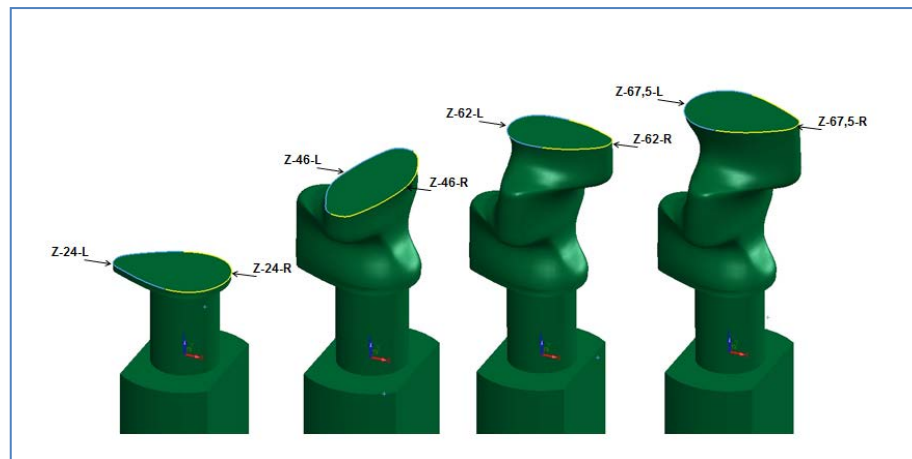
Figura 19 - Nomenclatura secções radiais



Fonte: o autor

Como tentativa inicial, as curvas axiais escolhidas para o modelamento do rotor utilizado para obter um conjunto de pontos com a ferramenta “curva 3D” do *software Calypso*, são aquelas representadas na figura 20, onde também são mostradas suas respectivas nomenclaturas, como por exemplo as curvas Z-24-L, Z-24-R, Z-46-L, Z-46-R.

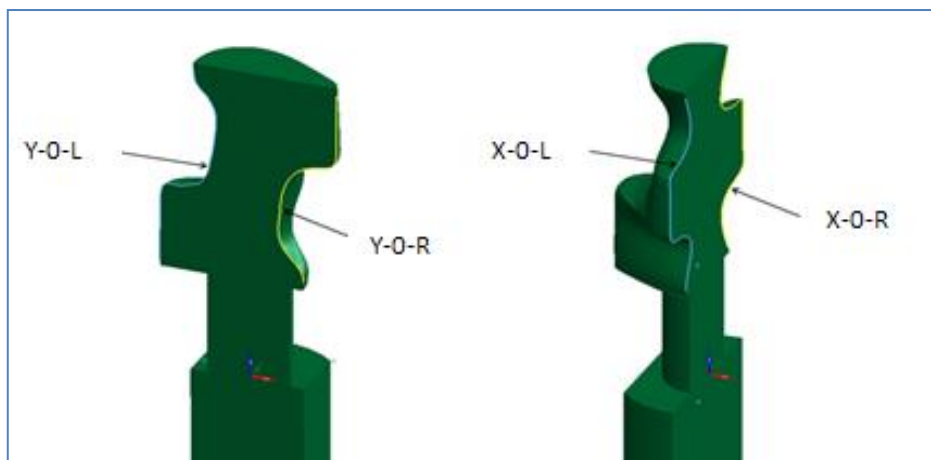
Figura 20 – Secções axiais



Fonte: o autor

Como tentativa inicial, as curvas radiais escolhidas foram as que não tinham rotação com os eixos X e Z, ou seja, uma secção em cada quadrante como mostrado na figura 21. Elas foram digitalizadas da secção axial Z-24 até a secção axial Z-67,5.

Figura 21 – Secções radiais



Fonte: o autor

3.3.5 Análise das curvas

As secções axiais Z-46-L e Z-46-R foram digitalizadas com a ferramenta “curva 3D” com 3 parâmetros diferentes. Nessas mudanças de parâmetros, na digitalização por *scanning* o *software Calypso* armazenou as informações dos pontos com passos (distância entre 2 pontos) variando de 1 mm, 0,5 mm e 0,1 mm. Para verificar se a curva pertencia ao plano da secção, os valores da coordenada Z, onde que nesse trabalho a diferença entre o máximo e mínimo valor chamaremos de amplitude, foram avaliados, e os resultados são mostrados na tabela 2.

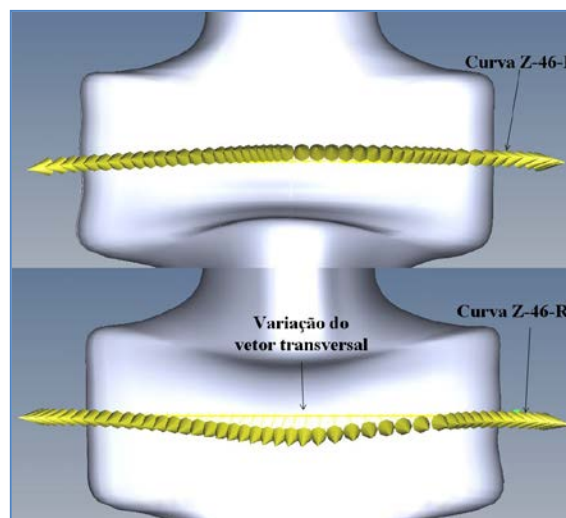
Tabela 2 – Coordenada ‘Z’ secção Z-46-L, Z-46-R

Curva	Passo	Valor Mínimo “Z”	Valor Máximo “Z”	Valor Médio	Amplitude “Z” da curva	Desvio padrão
Z-46-L	1 mm	45,5893 mm	46,0290 mm	45,8187 mm	0,4397 mm	0,1259 mm
Z-46-L	0,5 mm	45,5940 mm	46,0446 mm	45,826 mm	0,4506 mm	0,1258 mm
Z-46-L	0,1 mm	45,5603 mm	46,1126 mm	45,8213 mm	0,5523 mm	0,1329 mm
Z-46-R	1 mm	45,9168 mm	46,6465 mm	46,3183 mm	0,7297 mm	0,2035 mm
Z-46-R	0,5 mm	45,9165 mm	46,6476 mm	46,3202 mm	0,7311 mm	0,2022 mm
Z-46-R	0,1 mm	45,6377 mm	46,6873 mm	46,3076 mm	1,0496 mm	0,2137 mm

Fonte: o autor

Na tabela 2 percebe-se que com a mudança do passo, houve pouca diferença de amplitude da coordenada Z em regiões que apresentavam pouca variação do vetor transversal à secção como a curva Z-46-L que teve 0,1123 mm de variação entre as 3 digitalizações desta curva. Houve maior diferença da amplitude da coordenada Z em regiões que apresentavam maior variação do vetor transversal à secção como a curva Z-46-R que teve 0,3199 mm. Essa variação do vetor transversal à seção pode ser visto na figura 22.

Figura 22 – Vetores transversais secção Z-46



Fonte: o autor

O mesmo foi realizado nas secções radiais com passo de 1 mm, 0,5 mm e 0,1 mm para a curva Y-0-L, 0,5 mm e 0,1 mm para curva Y-0-R, e 0,1 mm para as curvas X-0-R e X-0-L, como apresentado na tabela 3.

Tabela 3 – Coordenada ‘Y e X’ secções Y-0-L, Y-0-R,X-0-L,X-0-R

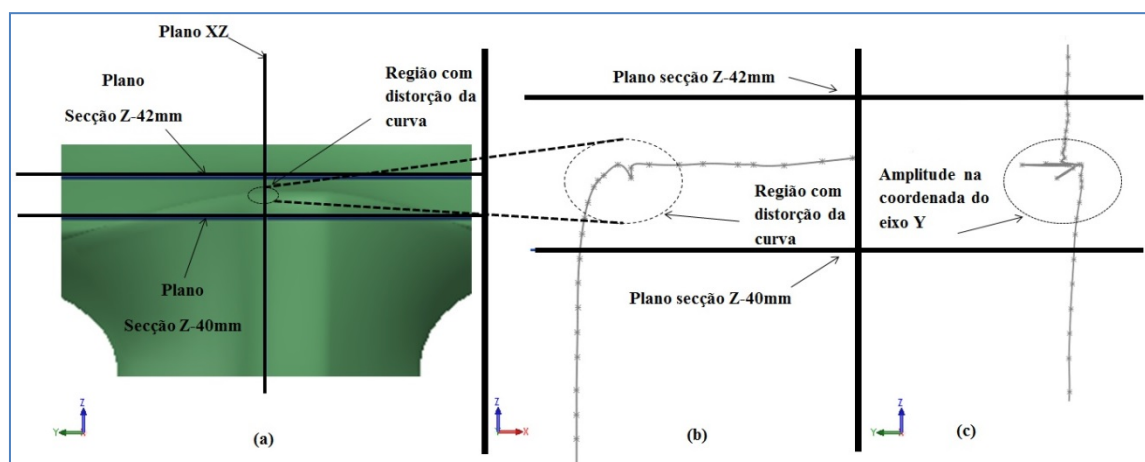
Curva	Passo	Valor Mínimo	Valor Máximo	Valor Médio	Amplitude Y e X	Desvio padrão
Y-0-L	1 mm	-0,4450 mm	0,0889 mm	-0,1703 mm	0,5339 mm	0,1213 mm
Y-0-L	0,5 mm	-0,4413 mm	0,0876 mm	-0,1736 mm	0,5289 mm	0,1221 mm
Y-0-L	0,1 mm	-0,5326 mm	0,4672 mm	-0,1612 mm	0,9998 mm	0,1224 mm
Y-0-R	0,5 mm	-0,0553 mm	0,5532 mm	0,1127 mm	0,6085 mm	0,1314 mm
Y-0-R	0,1 mm	-0,0887 mm	0,6027 mm	0,1192 mm	0,6914 mm	0,1452 mm
X-0-L	0,1 mm	-1,5097 mm	1,2312 mm	-0,0441 mm	2,7409 mm	0,1681 mm
X-0-R	0,1 mm	-1,3416 mm	0,9680 mm	0,0518 mm	2,3096 mm	0,1608 mm

Fonte: o autor

Devido às curvas radiais passarem por regiões com grandes mudanças do vetor transversal à secção da curva, foram encontradas maiores amplitudes na coordenada do eixo perpendicular a secção. Como se pode ver na tabela 3 a variação da amplitude da coordenada Y com a mudança do passo foi de 0,4639 mm. Também foi percebida que um passo menor entre os pontos existiu uma distorção na curva, localizada em uma região que teve grande mudança na curvatura em relação a secção como pode ser observado na figura 23.

A figura 23 (a) mostra a localização dessa distorção no rotor. Na figura 23(b) pode-se ver a distorção em seu plano de secção, e na figura 23(c) é mostrado de outra vista esta distorção, onde é possível ver a amplitude na coordenada correspondente ao eixo Y.

Figura 23 – Distorção curva Y-0-L

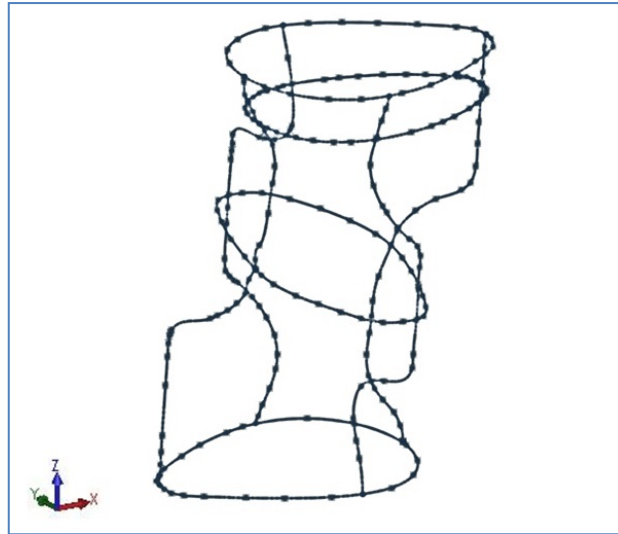


Fonte: o autor

3.3.6 Segmentação e Modelamento CAD

As curvas mostradas na figura 20 e figura 21 foram criadas com a ferramenta “curva 3D” e foram segmentadas no ambiente CAD criando *sketchs* utilizando essas curvas como base em seus respectivos planos das secções. Esse conjunto de curvas é ilustrado na figura 24.

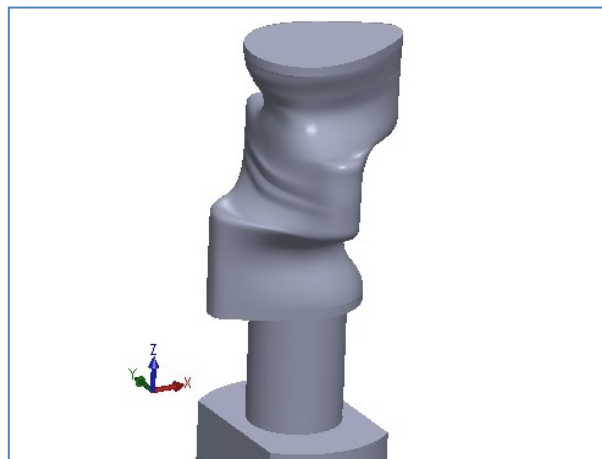
Figura 24 – Conjunto de curvas-caminho desconhecido



Fonte: o autor

No *Solidworks* foi criada uma superfície usando o comando *loft*, que cria uma superfície fazendo uma transição entre perfis, na qual foram utilizadas as curvas axiais como perfis, e as curvas radiais foram utilizadas como guia entre essas transições. O modelo matemático resultante foi chamado de rotor2 e é mostrado na figura 25.

Figura 25 – Modelo rotor2

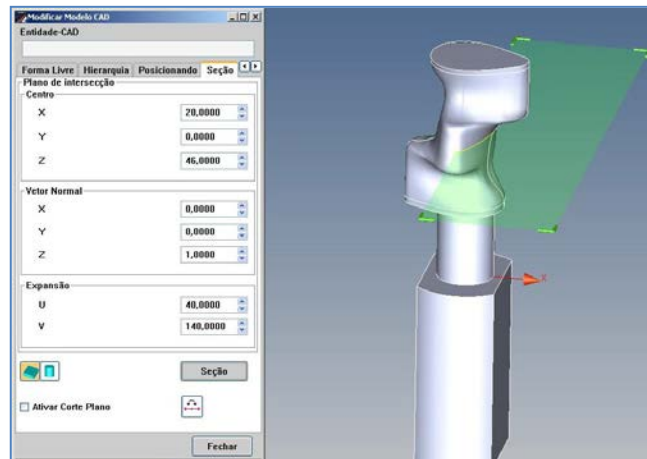


Fonte: o autor

Como outra forma de digitalização de uma curva, com a tentativa de diminuir a amplitude da secção da curva, estas mesmas secções axiais e radiais foram digitalizadas novamente com passo de 1 mm, e tendo como caminho as curvas nominais criadas a partir da

intersecção entre o plano da secção e o modelo CAD rotor2. Na figura 26 é mostrada essa intersecção para a curva Z-46-R.

Figura 26 – Corte modelo rotor2



Fonte: o autor

Na tabela 4 é mostrado o comparativo da amplitude da coordenada relativa ao eixo da curva para 8 secções digitalizadas a partir de uma curva desconhecida e para as curvas digitalizadas a partir de uma curva nominal criada com a intersecção dos planos das secções com o modelo rotor2.

Tabela 4 – Comparativo amplitude curvas-desconhecida-rotor2

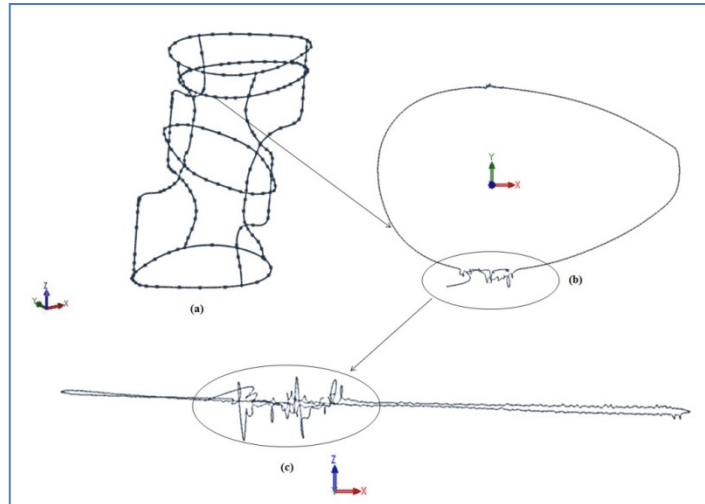
Curva	Caminho Curva desconhecida	Amplitude	Caminho Intersecção com modelo rotor2	Amplitude
Z-46-L		0,5523 mm		0,0421 mm
Z-46-R		1,0496 mm		0,1063 mm
Z-62-L		2,6718 mm		0,3353 mm
Z-62-R		1,6589 mm		0,1063 mm
X-0-L		2,7409 mm		0,0916 mm
X-0-R		2,3096 mm		0,0474 mm
Y-0-L		0,9998 mm		0,1243 mm
Y-0-R		0,6914 mm		0,0493 mm

Fonte: o autor

Analisando as curvas Z-62-L e Z-62-R, pode-se perceber que, utilizando como caminho para digitalização, as curvas nominais da intersecção do modelo rotor2 com os planos das secções, diminui a amplitude da coordenada Z. Com a digitalização sobre o caminho da curva que intercepta o modelo rotor 2 pode se perceber pela tabela 4 que a amplitude da curva Z-62-L diminuiu 2,33 mm e a curva Z-62-R diminuiu 1,55 mm.

Na figura 27 pode-se visualizar as curvas Z-62-L e Z62-R na vista frontal mostrada na figura 27 (b) e a amplitude ocorrida na digitalização de uma curva desconhecida mostrado na figura 27 (c).

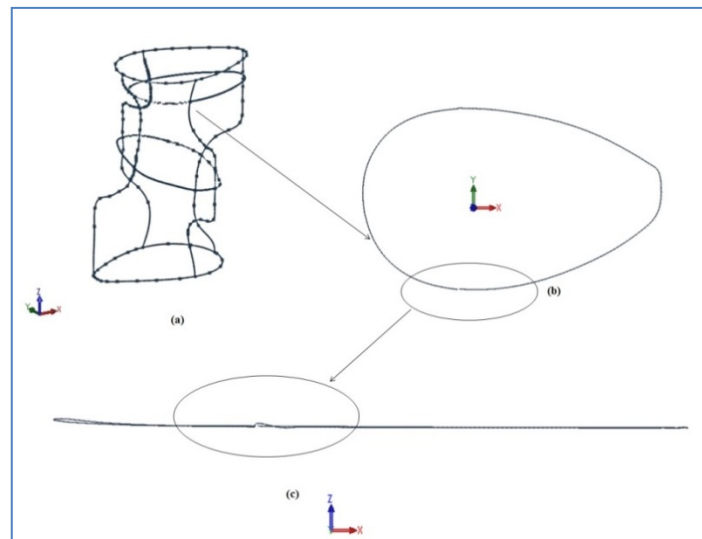
Figura 27 – Curva Z62-caminho desconhecido



Fonte: o autor

Na figura 28 pode-se ver a curva Z-62 na vista de sua secção mostrada na figura 28 (b) e a amplitude ocorrida na digitalização de uma curva desconhecida mostrado na figura 28 (c).

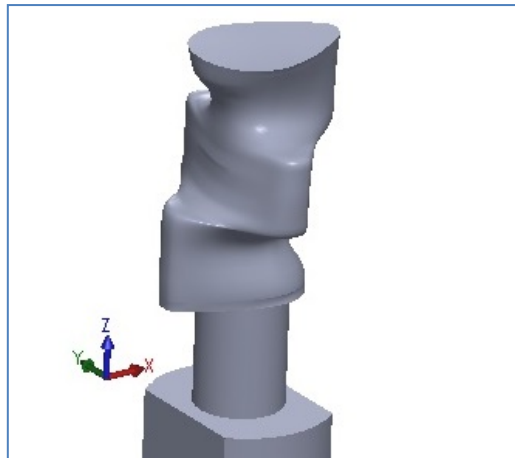
Figura 28 – Curva Z62-caminho inteseccção modelo rotor2



Fonte: o autor

No ambiente CAD foi criada uma superfície por *loft* utilizando como perfis as secções axiais e como curvas guias as secções radiais das curvas geradas a partir da intersecção com o modelo rotor2. O modelo resultante foi chamado de rotor3 e é mostrado na figura 29.

Figura 29 – Modelo rotor3



Fonte: o autor

Utilizando o modelo rotor3 as secções axiais da figura 20 e as secções radiais da figura 21 foram digitalizadas novamente com passo de 0,1 mm, tendo como caminho o conjunto de curvas nominais criadas a partir da intersecção entre o plano da secção e o modelo CAD rotor3.

Na tabela 5 é mostrado o comparativo da amplitude da coordenada relativa ao eixo da curva para 8 secções digitalizadas a partir de uma curva nominal criada com a intersecção dos planos das secções com o modelo rotor2 e a partir de uma curva nominal criada com a intersecção dos planos das secções com o modelo rotor3.

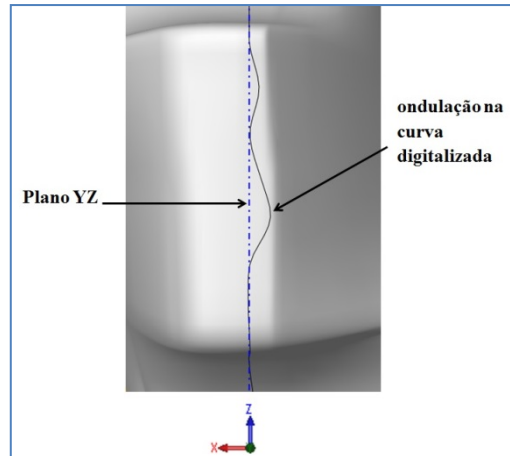
Tabela 5 – Comparativo amplitude curvas-rotor2-rotor3

Curva	Caminho Intersecção com modelo rotor2	Amplitude	Caminho Intersecção com modelo rotor3	Amplitude
Z-46-L		0,0421 mm		0,0328 mm
Z-46-R		0,1063 mm		0,0258 mm
Z-62-L		0,3353 mm		0,0414 mm
Z-62-R		0,1063 mm		0,0098 mm
X-0-L		0,0916 mm		0,1091 mm
X-0-R		0,0474 mm		1,1235 mm
Y-0-L		0,1243 mm		0,6216 mm
Y-0-R		0,0493 mm		0,0505 mm

Fonte: o autor

Para as curvas axiais, a amplitude da coordenada Z diminui com passo menor, como pode ser visto na Curva Z-62-R a amplitude da coordenada Z diminuiu 0,0965 mm. Já nas curvas radiais a amplitude relativa a coordenada do eixo aumentou, porém essa amplitude não provocou distorções com as mesmas características mostradas na figura 23. Na figura 30 é mostrada uma ondulação da curva que representa 1,1235 mm da coordenada do eixo x para a curva X-0-R.

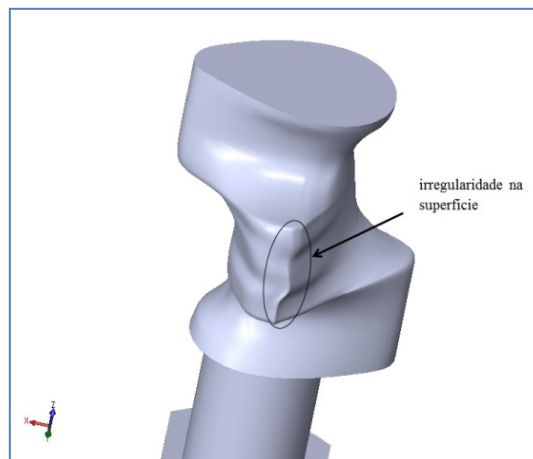
Figura 30 – Curva X-0-R-caminho rotor3



Fonte: o autor

O modelo resultante das curvas digitalizadas pelo caminho criado entre os planos das secções e o modelo rotor3 foi chamado de rotor4. Na figura 31 é possível observar uma irregularidade na superfície do modelo provocada pela ondulação da curva guia X-0-R mostrada na figura 30.

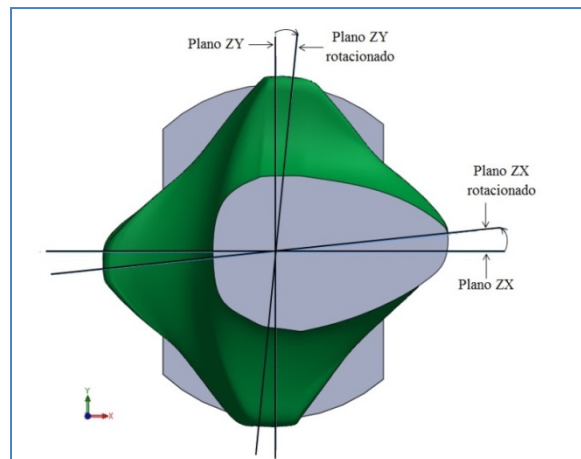
Figura 31 – Irregularidade superfície rotor4



Fonte: o autor

Como tentativa de diminuir essa variação na amplitude de uma secção de uma curva guia onde provocou ondulação na curva que provoca superfícies irregulares no modelo CAD, os planos das secções Y-0-L, Y-0-R, X-0-L e X-0-R, foram rotacionadas em torno do eixo Z como mostrado na figura 32.

Figura 32 – Irregularidade superfície rotor4

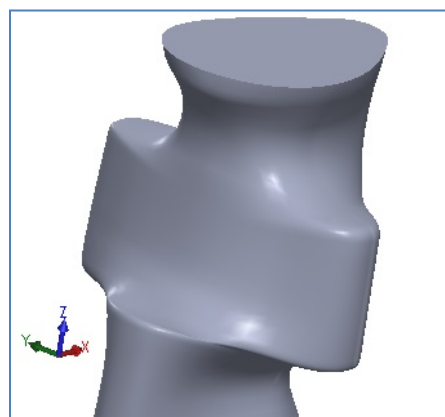


Fonte: o autor

Os planos ZX e ZY foram rotacionados em torno do eixo Z em $5,74^\circ$. Visto da figura 32, o plano ZX foi rotacionado no sentido anti-horário e o plano ZY foi rotacionado em torno do no sentido horário as curvas sobre esses planos passaram a ser denominadas Y-5,74-L, Y-5,74-R, X-5,74-L e X-5,74-R. Estes ângulos foram escolhidos para evitar do apalpador passar por uma aresta do rotor.

Utilizando o modelo rotor4 as secções axiais utilizadas anteriormente e as curvas radiais Y-5,74-L, Y-5,74-R, X-5,74-L e X-5,74-R foram digitalizadas com passo de 0,1 mm, tendo como caminho o conjunto de curvas nominais criadas a partir da intersecção entre o plano da secção e o modelo CAD rotor4. O resultado é o modelo rotor5 mostrado na figura 33

Figura 33 – Modelo rotor5



Fonte: o autor

Na tabela 6 é mostrado o comparativo da amplitude da coordenada relativa ao eixo da curva para 4 secções digitalizadas a partir de uma curva nominal criada com a intersecção dos

planos das secções com o modelo rotor3, e a partir de uma curva nominal criada com a intersecção dos planos das secções com o modelo rotor4.

Tabela 6 – Comparativo amplitude curvas axiais-rotor3-rotor4

Curva	Caminho Intersecção com modelo rotor3	Amplitude	Caminho Intersecção com modelo rotor4	Amplitude
Z-46-L		0,0328 mm		0,0357 mm
Z-46-R		0,0258 mm		0,0407 mm
Z-62-L		0,0414 mm		0,0393 mm
Z-62-R		0,0098 mm		0,0158 mm

Fonte: o autor

Nesta digitalização sobre o modelo rotor4, a amplitude da coordenada Z aumentou em 0,0149 mm para a curva Z-46-R.

Para analisar as amplitudes das curvas radiais, cada ponto da curva foi rotacionado em torno do eixo Z em 5,74° utilizando as equações 12 e 13.

$$x' = x \cdot \cos \theta - y \cdot \sin \theta \quad (12)$$

Onde se tem:

x=valor da coordenada do ponto digitalizado;

x'=valor da coordenada do ponto rotacionado;

$$y' = y \cdot \cos \theta - x \cdot \sin \theta \quad (13)$$

Onde se tem:

y = valor da coordenada do ponto digitalizado;

y'= valor da coordenada do ponto rotacionado;

Na tabela 7 é mostrado o comparativo da amplitude (diferença entre o máximo e mínimo valor da coordenada x' ou y' do eixo da curva), para 4 curvas guias digitalizadas a partir de uma curva nominal criada com a intersecção dos planos das secções com o modelo rotor3 e a partir de uma curva nominal criada com a intersecção dos planos rotacionados das secções com o modelo rotor4, avaliando para essas curvas os valores x' e y'.

Tabela 7 – Comparativo amplitude curvas radiais-rotor3-rotor4

Curva	Caminho Intersecção com modelo rotor3	Amplitude	Caminho Intersecção com modelo rotor4	Amplitude
Y-0-L/Y-5,74-L		0,6216 mm		0,0137 mm
Y-0-R/ Y-5,74R		0,0505 mm		0,0662 mm
X-0-L/ X-5,74-L		0,1091 mm		0,0701 mm
X-0-R/ X-5,74-R		1,1235 mm		0,0826 mm

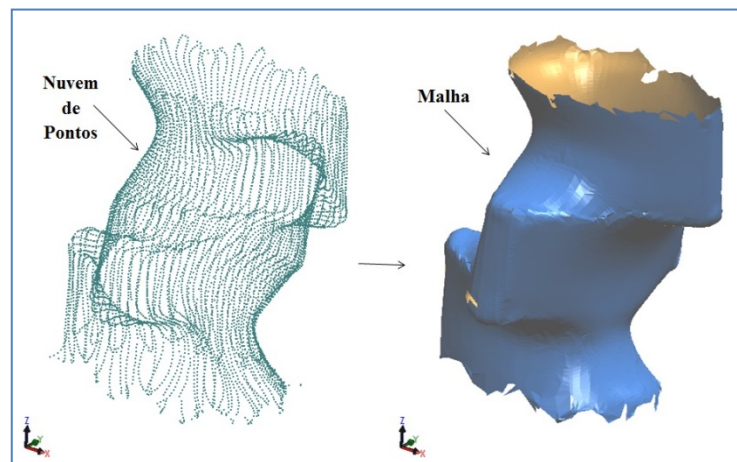
Fonte: o autor

Percebe-se que comparando as curvas X-0-R e X-5,74-R, com essa rotação do plano da secção da curva, a amplitude diminui em 1,0409 mm.

3.3.7 Análise dos modelos

Utilizando o modelo rotor2 foi realizada uma estratégia de digitalização por *scanning* sobre a superfície da peça, com um passo de 0,6 mm. Isso totalizou em uma nuvem de pontos com 8500 pontos. Com esses pontos foi criada uma malha no CAD como é mostrado na figura 34.

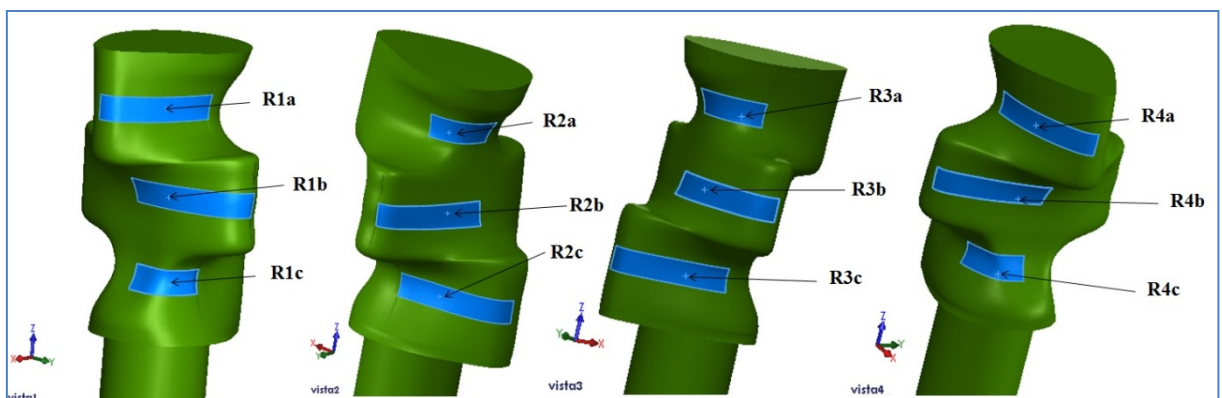
Figura 34 – Nuvem de pontos-malha



Fonte: o autor

Sobre a malha criada no CAD foi comparado os pontos sobre as superfícies dos modelos em 12 regiões. Na figura 35 são mostradas essas regiões.

Figura 35 – Regiões de avaliação



Fonte: o autor

Na tabela 8, são mostrados para cada ponto os desvios entre a malha e os modelos construídos. Valores de desvios negativos significam que o ponto da malha encontra-se dentro

do sólido do modelo CAD, enquanto que valores positivos indicam que o ponto da malha encontra-se fora do sólido do modelo.

Tabela 8 – Desvios da malha

Ponto	Desvio rotor2(mm)	Desvio rotor3(mm)	Desvio rotor4(mm)	Desvio rotor5(mm)
R1a	0,062	0,0054	0,0235	-0,1085
R1b	0,0308	0,0238	-0,0484	0,0749
R1c	-1,7976	-1,8776	-1,8713	-0,2969
R2a	-0,4937	-0,0665	-0,04722	-0,2389
R2b	0,0105	0,0129	-0,0182	-0,0133
R2c	0,4079	0,0579	0,2262	0,1886
R3a	-0,3164	-0,1959	-0,1352	-0,1091
R3b	-0,1619	-0,0338	-0,026	0,014
R3c	0,2687	0,2252	-0,0474	0,2271
R4a	-0,0303	-0,0568	-0,0100	0,0095
R4b	-0,132	-0,0468	-0,0103	-0,1186
R4c	-0,4544	-0,5364	-0,4850	-0,8303

Fonte: o autor

Na tabela 8 os desvios entre a malha criada e os modelos CAD dos pontos R3a, R3b diminuíram a cada digitalização. Como se percebe, o desvio do ponto R3a diminuiu 0,2073 mm e o do ponto R3b diminuiu 0,1479 mm, comparado entre os modelos rotor2 e rotor5. Os outros pontos restantes não seguiram esta condição, como os pontos R1a que diminuiu 0,0566 mm entre o modelo rotor2 e rotor3 e depois voltou a aumentar em 0,1031 mm no modelo rotor5. Alguns pontos tiveram aumento do desvio ainda entre a 1ª e 2ª digitalização como o ponto R1c que aumentou 0,0797 mm e o ponto R4c que aumentou 0,082 mm.

3.3.8 Considerações Finais

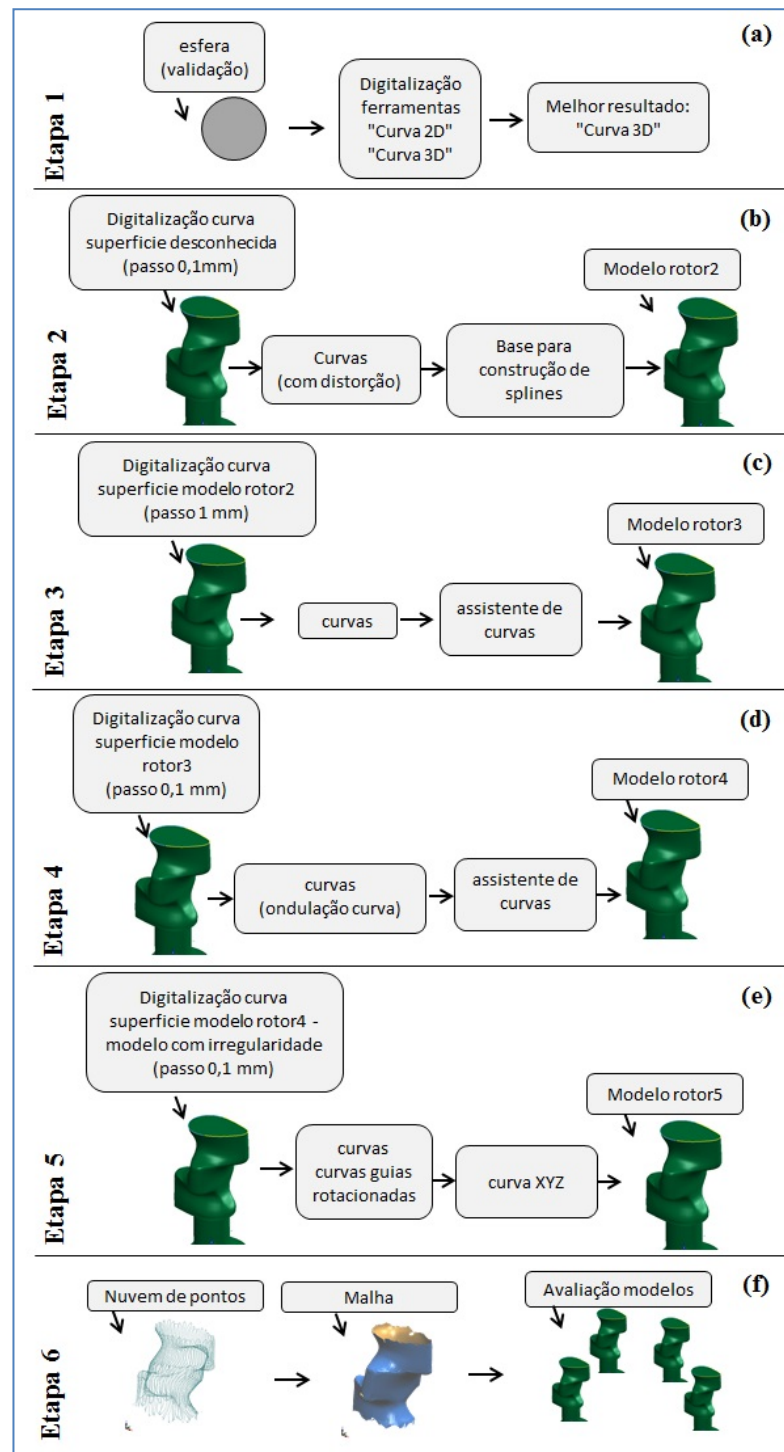
Para melhor compreensão das considerações finais, como ilustrativo foi criado a figura 36 que apresenta um resumo das etapas desenvolvidas neste trabalho.

A reconstrução do rotor iniciou com a digitalização de uma curva desconhecida com a ferramenta “Curva 3D” (Etapa 1- figura 36a), onde na validação da esfera se percebeu que esta ferramenta apresentou melhores resultados do que a ferramenta “Curva 2D”, principalmente em curvas que possuem vetores normais a superfície, transversais ao plano em que se encontram.

No entanto ao digitalizar as curvas do rotor, em regiões com grandes mudanças na direção desses vetores transversais, notou-se que, com um passo pequeno de digitalização dos pontos, foram percebidas algumas distorções nas curvas, como apresentada na figura 23. Com

isso essas curvas serviram apenas de base para a construção de curvas *splines* pelo *software Solidworks* para a construção do modelo rotor2, desviando dos locais onde se percebeu essa distorção (Etapa 2- Figura36b).

Figura 36 – Resumo Etapas

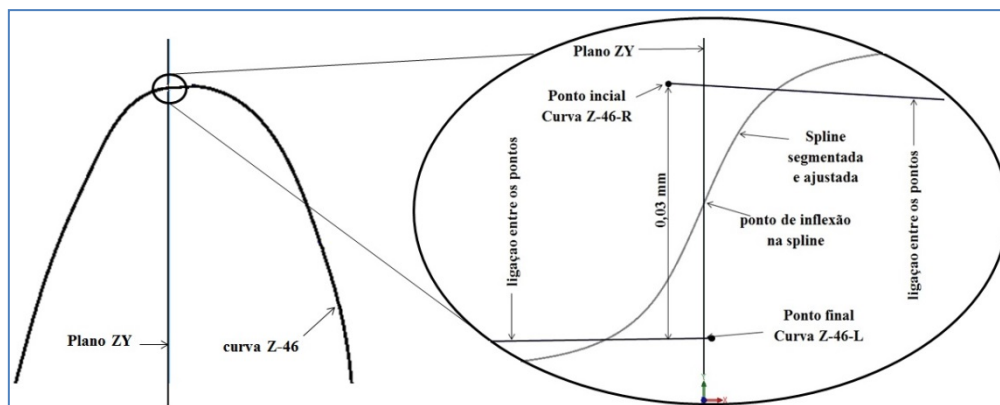


Fonte: o autor

Como forma de obtenção das curvas, cujos pontos passassem o mais próximo das secções escolhidas, teve como tentativa a digitalização sobre um caminho entre o plano da secção e o modelo rotor2 criado no *software* CAD, onde foi digitalizado com um passo de 1 mm e notou-se que com isso diminuiu a amplitude da secção da curva, como pode ser visto na tabela 4 (Etapa 3- Figura36c).

O modelo rotor3 foi criado com essas curvas (Etapa3-Figura36c), utilizando o comando assistente de curvas do *Solidworks* onde que nas secções axiais criaram-se duas curvas *splines* que foram unidas e ajustadas para terem continuidade geométrica. Porém o que não foi percebido nessa etapa é que na secção Z-46, devido a distância entre os pontos estarem afastados em 1 mm, e o ponto de início de apalpação da curva Z-46-L e o fim de apalpação da curva Z-46-R estarem localizados em uma aresta da peça, pode ter havido um erro no início da apalpação como mostrado na figura 9 e que criou uma inflexão na curvatura desta *spline* como é apresentado na figura 37.

Figura 37 – Inflexão curva Z-46



Fonte: o autor

O que se percebe na figura 37 é que o afastamento de 0,03 mm entre os pontos gerou uma inflexão na curva para que ela pudesse ter continuidade geométrica neste local.

Isso explica o fato da curva X-0-R mostrada na figura 30, possuir uma ondulação, pois devido a essa curva radial ter sido digitalizada, tendo como caminho a intersecção do modelo rotor3 com o plano ZY (Etapa4-Figura36d), ao passar por essa região de inflexão da curva Z-46, o apalpador teve um deslocamento devido a mudança do vetor normal nesse ponto. Na probabilidade de digitalizar a curva Z-46 com um passo menor, esse problema poderia não ter ocorrido na construção do modelo rotor4. Com essa probabilidade, talvez não teria sido necessário criar as curvas radiais em um plano rotacionado, como apresentado na figura 32.

As curvas que foram obtidas através da digitalização, por um trajeto de uma curva nominal criada pela intersecção do modelo rotor4 com os planos das secções, utilizando um passo de 0,1 mm (Etapa5-Figura36e), apresentaram na maioria dos casos melhora na amplitude da secção como pode ser visto na tabela 7, onde a curva que teve maior amplitude foi a curva radial X-0-R que passou da amplitude de 1,1235 mm para 0,08 mm, e o pior caso, foi o aumento da amplitude da curva axial Z46-R mostrado na tabela 6 que passou de amplitude 0,0258 mm para 0,0407 mm.

Como os valores de amplitude dessas secções ficaram abaixo de 0,08 mm, nesse modelamento do rotor5 foram testados no *software* CAD, com o comando inserir curva através dos pontos XYZ, pois foi visto que se utilizado *splines* para a construção do modelo, o *software* não conseguia gerar a superfícies, devido as simplificações das curvas *splines* que o *Solidworks* criava, elas não passavam pelas coordenadas dos pontos digitalizados.

Essas curvas através dos pontos XYZ foram projetadas nos planos referidos de suas secções onde se percebeu visualmente, que o modelo rotor5 apresentou uma superfície mais suavizada comparado com os outros modelos.

Uma tentativa também foi de criar uma nuvem de pontos sobre a superfície do rotor2 (Etapa6-Figura36f), e criar as curvas, utilizando uma malha criada a partir destes pontos. Uma estratégia de *scanning* com grades espaçadas em 0,6 mm foi o mínimo de espaçamento conseguido, pois na tentativa de uma estratégia com espaçamentos menores, o sistema operacional era afetado e parava de funcionar devido à falta de memória virtual do computador, visto que, com a minimização do espaçamento uma grande quantidade de pontos era gerada, impossibilitando a criação dos pontos. Dessa forma, a quantidade conseguida de 8500 pontos, não foi possível reconstruir o modelo, pois as *splines* criadas não interseccionavam com as curvas radiais, não conseguindo gerar uma superfície no ambiente CAD.

Sendo assim, a malha criada foi utilizada para comparar alguns pontos sobre a superfície dos modelos gerados no CAD. Na tabela 8, pode ser visto que o ponto R1c apresentava desvios em média de 1,8488 mm nos modelos rotor2, rotor3 e rotor4, enquanto que no modelo rotor5 o desvio otimizou para 0,2969 mm. Em outros pontos como o R4c que estava com desvio médio de 0,4919 mm nos modelos rotor2, rotor3 e rotor4, passou a ter desvio de 0,8303 mm.

Os desvios apresentados na tabela 8 podem ter ocorrido devido à pouca quantidade de curvas radiais e axiais, por exemplo, nos pontos R4c e R1c, que apresentaram maiores

desvios, estão em uma região intermediária da transição das curvas axiais Z-24 à Z-46 e, entre as curvas radiais Y-0-R à X-0-R e Y-0-R à X-0-L respectivamente, como visto na figura 35.

Ao longo da criação dos modelos CAD rotor3, rotor4 e rotor5, ocorreram tentativas de digitalização em curvas axiais intermediárias, porém ao adicionar essas curvas ao comando por *loft* no *solidworks* essas curvas não interceptavam a curva radial ou a operação falhava.

4 CONCLUSÃO

Este trabalho avaliou procedimentos para digitalização de curvas em uma superfície desconhecida para a reconstrução tridimensional de peças com geometria complexa por meio do uso da engenharia reversa utilizando uma máquina de medir por coordenadas.

Ao analisar a superfície complexa do rotor de reômetro de torque, a ferramenta “curva 3D” do *software Calypso*, encontrou melhores resultados para capturar a curva digitalizada através da máquina de medir por coordenadas, tendo como método de validação das ferramentas do *software*, a digitalização de uma esfera, ou seja, uma superfície conhecida.

Na digitalização de curvas desconhecidas em secções axiais e radiais na superfície do rotor, se identificou problemas como a distorção em locais que possuem mudança no vetor transversal à secção, quando digitalizado com uma determinada quantidade de pontos, criando uma amplitude relacionada a coordenada do eixo perpendicular à secção de uma curva.

Essa amplitude e distorções diminuíram, quando realizadas digitalizações que tinham como caminho as curvas nominais criadas com a intersecção dos planos das secções, com a superfície do modelo.

Com a criação de uma nuvem de pontos através de estratégia de *scanning* sobre a superfície do rotor não foi possível reconstruir o modelo, pois o número de pontos não foi suficiente para criar as *splines* no *Software CAD*, e aumentando o número de pontos, os recursos de *hardware* disponíveis não eram suficientes e afetavam o sistema operacional do computador, requerendo dessa maneira, incremento de *hardware* para essa digitalização.

Dessa forma, os modelos foram avaliados em alguns pontos e percebidos que com o uso de poucas curvas para a reconstrução dos modelos, contribuiu para os desvios entre a malha criada e as superfícies dos modelos CAD.

Sugere-se para trabalhos futuros, a reconstrução de um modelo físico iniciando, de igual forma, com a digitalização de uma curva desconhecida, porém após a criação de um modelo CAD inicial, criar uma estratégia de *scanning* sobre a superfície do modelo, a fim de obter uma nuvem de pontos com espaçamentos menores que 0,6 mm, e a partir dela criar uma malha onde as curvas axiais e radiais possam ser criadas no ambiente CAD com o uso dessa malha para reconstrução do modelo físico.

REFERÊNCIAS

- AVIZ, Daniel. **Estudo da técnica de engenharia reversa para construção de geometrias complexas focando erros de forma e métodos de digitalização geométrica**. 2010. 147f. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Sociedade Educacional de Santa Catarina. 2010.
- BACK, Nelson; OLIARI, André; DIAS, Acires; SILVA, Jonny Carlos da Silva. **Projeto integrado de produtos: planejamento, concepção e modelagem**. Barueri, SP: Manoele, 2008.
- BAGCI, Eyup. Reverse engineering applications for recovery of broken or worn parts and re-manufacturing: Three case studies. **Advances in Engineering Software**, v. 40, p. 407-419, jun. 2009. Disponível em: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0965997808001312>. Acesso em: 09 mai. 2013.
- FERNEDA, Amauri Bravo. **Integração metrologia, CAD e CAM: uma contribuição ao estudo de engenharia reversa**. 1999. 112f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade de São Paulo, 1999
- HOMEM, Nuno Miguel M. da S.T. **Estratégias automáticas de modelação em processos de engenharia reversa**. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) Universidade de Aveiro. 2009.
- JARDINI, Andre Luiz; BINELI, Aulus Roberto Romão; ULRICH, Cristiane Brasil; BERNARDES, Luis Fernando; FILHO, Rubens Maciel. Integração de prototipagem rápida e engenharia reversa no desenvolvimento rápido de produto. In: **6º COBEF**, Caxias do Sul, RS, 11 a 15 de abril 2011
- LEITE, Heymann A R; MONTESINI, Anthony; OLIVEIRA, Arnaldo Jr; CALOI, Giuliano; MORA, Luiz Nemorino; HUNG, Ngan Wai; JUNIOR, Oswaldo de Paula Ramos; AMARAL, Roberto Galassi. **Gestão de projeto do produto: a excelencia da industria automotiva**. São Paulo: Atlas, 2007.
- LIMA, Cristiane Brasil. **Engenharia reversa e prototipagem rápida**. Estudos de Casos. Dissertação (Mestrado Engenharia Mecânica) - Universidade Estadual de Campinas. 2003. 108f.
- LUCENA, Henrique Neves. **Geração de estratégias de medição de superfícies complexas CAD para máquinas de medir por coordenadas**. 2009. 127f. Dissertação (Mestrado Engenharia de Produção) - Universidade Metodista de Piracicaba. 2009.
- MURY, Luiz G.M.; FOGLIATTO, Flavio S. Adaptação de produtos para mercados diferenciados a partir da engenharia reversa. **Revista Produção**, v11, n2, abril 2002.
- NOGUEIRA, Tarso Barretto Rodrigues; LEPIKSON, Herman Augsto. Um método de engenharia reversa para projeto de produto mecatrônico aplicado à pequena e média empresa. In: **XXVI ENEGEP**, Fortaleza, CE, 9 a 11 de Outubro de 2006.

PAHL, Gerhard; BEITZ, Wolfgang; FELDHUSEN, Jörg; GROTE, Karl Heinrich. **Projeto na engenharia**: fundamentos do desenvolvimento eficaz de produtos, métodos e aplicações. São Paulo: Edgard Blucher, 2005.

ROZENFELD, Henrique; FORCELLINI, Fernando Antônio; AMARAL, Daniel Capaldo; TOLEDO, José Carlos de; SILVA, Sergio Luis da; ALLIPRANDINI, Dário Henrique; SCALICE, Régis Kovacs. **Gestão de desenvolvimento de produtos**: uma referencia para a melhoria do processo. São Paulo: Saraiva, 2006.

SILVA, Esly Cesar Marinho, et al. Modelagem de curvas e superfícies de formas livres para aplicação em engenharia reversa utilizando NURBS. **Revista Ciências exatas** - Universidade de Taubaté. Vol.18, n2, 2012.

SONI, Kunal; CHEN, Daniel; LERCH, Terence. Parameterization of prismatic shapes and reconstruction of free-form shapes in reverse engineering. **International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, v. 41, p. 948-959, abr. 2009. Disponível em: <http://link.springer.com/content/pdf/10.1007%2Fs00170-008-1550-1.pdf>. Acesso em: 09 mai. 2013.

SOUZA, Adriano Fagali de; COELHO, Reginaldo Teixeira. Tecnologia CAD/CAM - Definições e estado da arte visando auxiliar sua implantação em um ambiente fabril. **XXIII Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Ouro Preto, MG, 21 a 24 de out. de 2003.

TOLEDO, José Carlos; SILVA, Sérgio Luis da; ALLIPRANDINI, Dário Henrique; MARTINS, Manoel Fernando; FERRARI, Fernanda Menezes. **Práticas de gestão no desenvolvimento de produtos em empresas de autopeças**. Produção, v. 18, n. 2, p.405-422, mai./ago. 2008.

VOLPATO, Neri; AHRENS, Carlos Henrique; FERREIRA, Cristiano Vasconcellos; PETRUSH, Günter; CARVALHO, Jonas de; SANTOS, Jorge Roberto Lopes dos; SILVA, Jorge Vicente Lopes da. **Prototipagem rápida**: técnicas e aplicações. São Paulo: Edgar Bulcher, 2007.

APÊNDICE 1

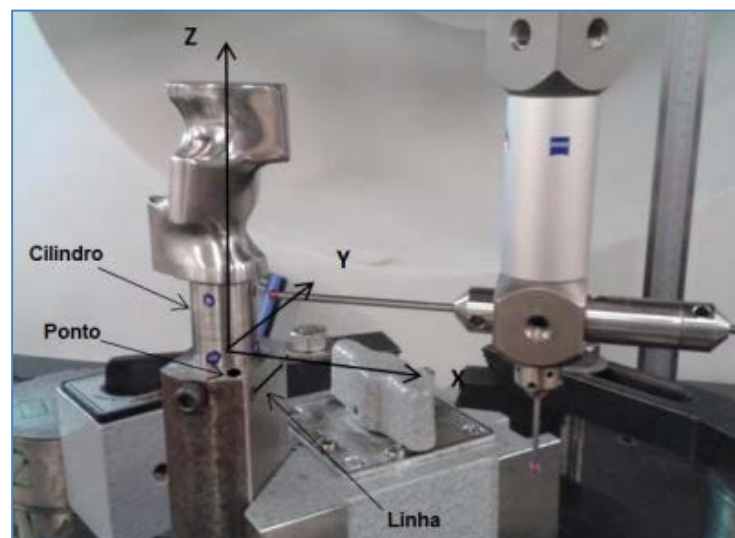
Este Apêndice apresenta um guia com as ferramentas e métodos para digitalização de uma curva em uma superfície utilizada no trabalho: reconstrução tridimensional de um rotor por meio do uso da engenharia reversa, e contém:

- 1.1 - Definições do Sistema de Coordenadas,
- 1.2 - Digitalizações de uma Curva Desconhecida
- 1.3 - Digitalizações de uma Curva Conhecida
- 1.4 – Exportar Pontos Digitalizados.

1.1 DEFINIÇÃO DO SISTEMA DE COORDENADAS

Deve-se fixar a peça e definir um sistema de coordenada de modo a restringir os graus de liberdade da peça, como mostrado na fig 1.

fig 1 – Sistema de coordenadas

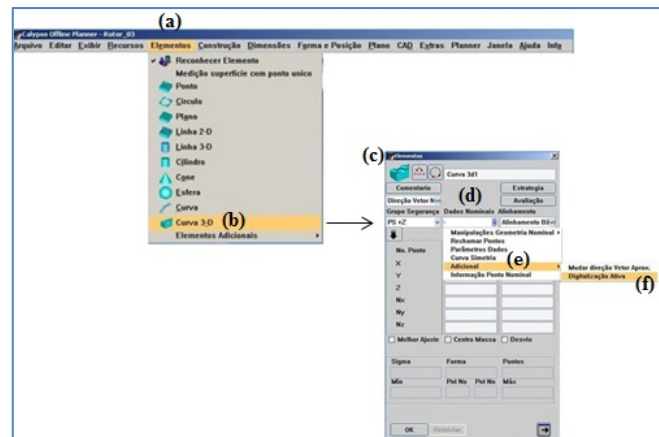


Fonte: o autor

1-2 DIGITALIZAÇÃO DE UMA CURVA DESCONHECIDA

Para a digitalização de uma curva em uma superfície desconhecida, no software *Calypso*, selecionar no menu **Elementos** (fig2a), o comando **Curva 3-D** (fig1b). A janela **Elementos** (fig2c) irá abrir. Em **Dados Nominais** (Fig2d), selecionar **Adicional** (fig2e) > **Digitalização Ativa** (fig2f)

fig 2– Curva3-D



Fonte: o autor

Após, na janela **Elementos** (fig3), habitar o campo **Correção Apalpador** (Fig3a), e clicar em **Estratégia** (Fig3b).

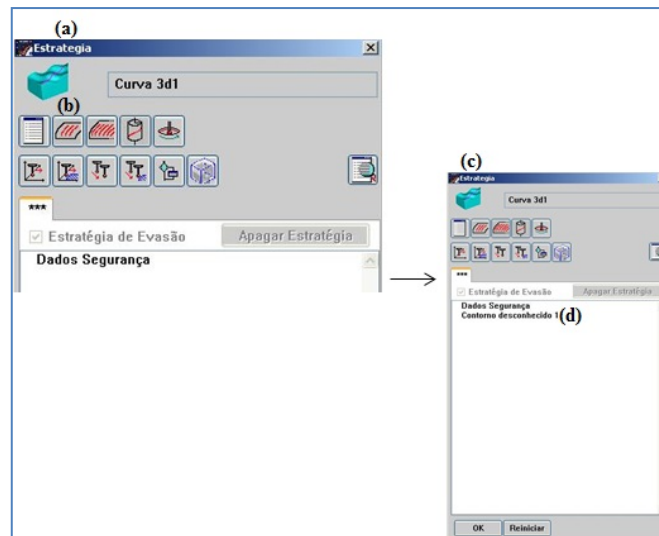
fig 3 –Elementos



Fonte: o autor

A janela **Estratégia** (fig4a) irá abrir. Clicar no ícone **Contorno Desconhecido** (fig4b). e a janela **Estratégia** mudara como mostrado na fig4c. Selecionar o campo **Contorno Desconhecido** (fig4c)

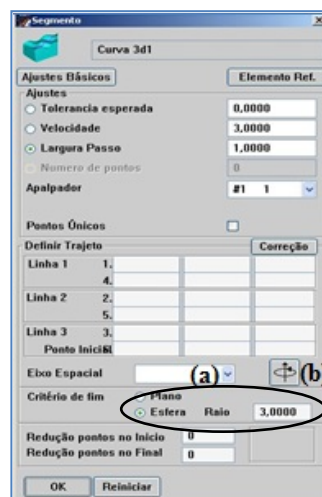
fig4 –Estratégia



Fonte: o autor

Após a janela **Segmentos** (fig5) irá abrir. Em Eixo Espacial (fig5a) , seleccionar o eixo perpendicular a secção da curva e na fig5b escolher o sentido da digitalização.

fig5– Segmentos



Fonte: o autor

Apalpar na peça os pontos de 1-6 na superfície , como mostrado na figura 6. A direcção da curva resultante terá início no ponto 5 e o sentido escolhido conforme mostrado na fig5b.

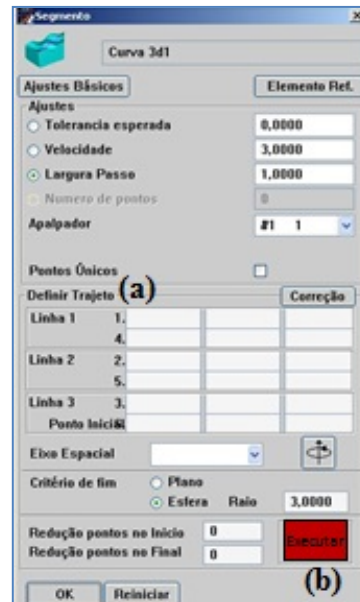
fig6 – Pontos Trajeto



Fonte: Zeiss, 2004

Quando todos os pontos tiverem sido apalpados, os valores das coordenadas de cada ponto estarão inseridos no campo **Definir Trajeto** (fig7a). Clicar no botão **Executar** (fig7b).

fig7 – Executar digitalização.



Fonte: o autor

1.3 DIGITALIZAÇÃO DE UMA CURVA CONHECIDA

Para digitalizar uma curva através da intersecção de um modelo matemático com um plano, seleccionar no menu **CAD** (fig8a) > **Modificar Entidades CAD** (fig8b) .

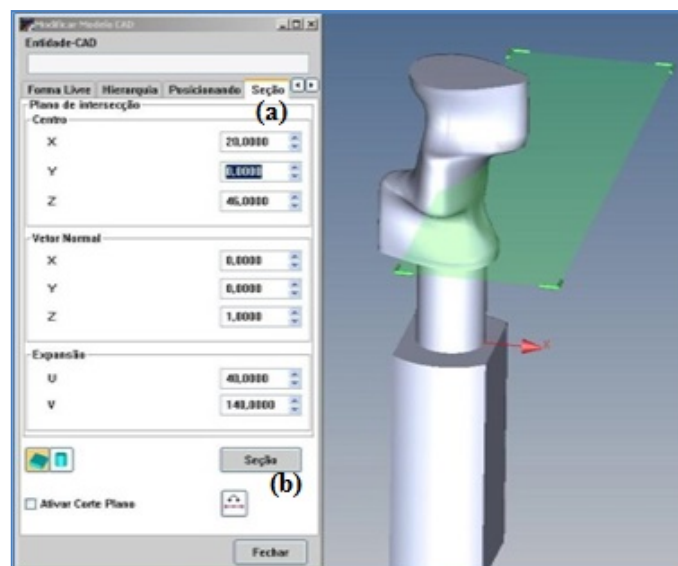
Fig8– Modificar Entidades CAD



Fonte: o autor

A janela **Modificar Modelo CAD** (fig9) irá abrir. Clicar na aba **Seção** (figura 9a), e colocar os valores das coordenadas e vetores do plano a ser interseccionado com o modelo e clicar em **Seção** (fig9b). Uma curva será criada no modelo CAD.

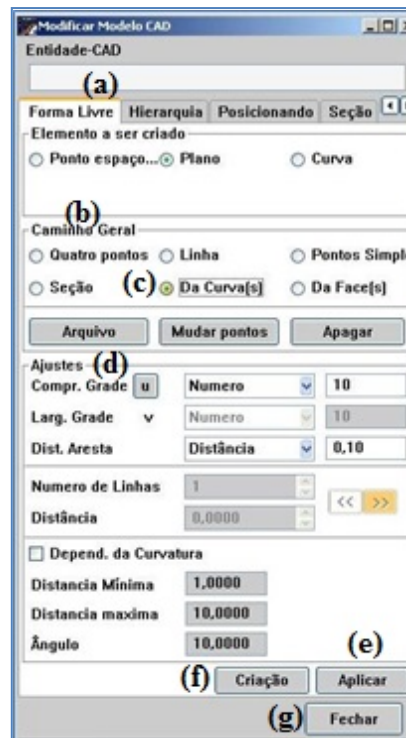
fig9– Seccção.



Fonte: o autor

Após clicar na aba **Forma Livre** (fig10a), escolher no campo **Caminho Geral** (fig10b) a opção **Das Curva(s)** (fig10c), em **Ajustes** (fig10d), escolher o número de pontos ou a distância entre eles e clicar em **Aplicar** (fig10e), e depois em **Criação** (fig10f).

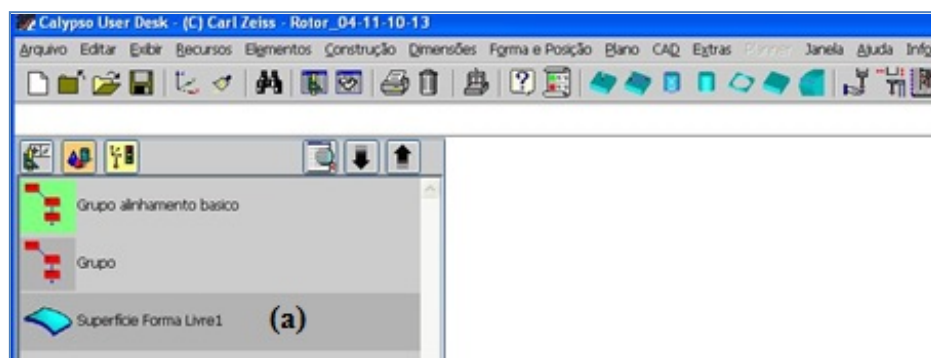
fig10 – Modificar Modelo CAD



Fonte: o autor

Depois de fechar a janela **Modificar Modelo CAD** (fig10g), no software Calypso, irá criar o elemento **Superfície Forma Livre1** (fig11a)

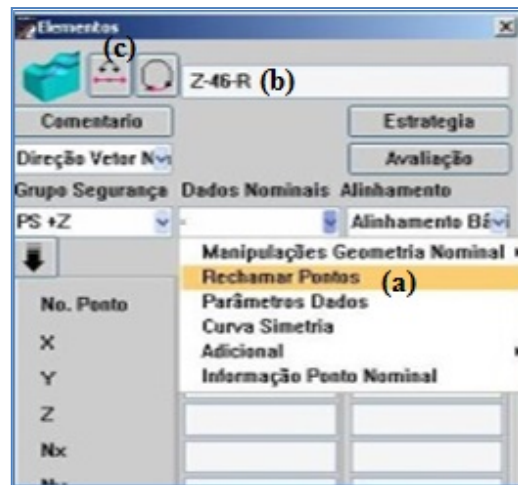
fig11 – Superfície Forma Livre1



Fonte: o autor

No menu **Elementos** (fig2a), selecionar o comando **Curva 3-D** (fig1b). A janela **Elementos** (fig2c) irá abrir. Em **Dados Nominiais** (Fig2d), clicar na opção **Rechamar Pontos** (fig12a) e escolher o elemento **Superfície Forma Livre1**. Colocar o nome da curva (fig12b). Nesta mesma janela, clicar no ícone **Inverter Vetores** (fig12c), caso a curva criada ficar com os vetores invertidos na peça.

fig12-Rechamar Pontos

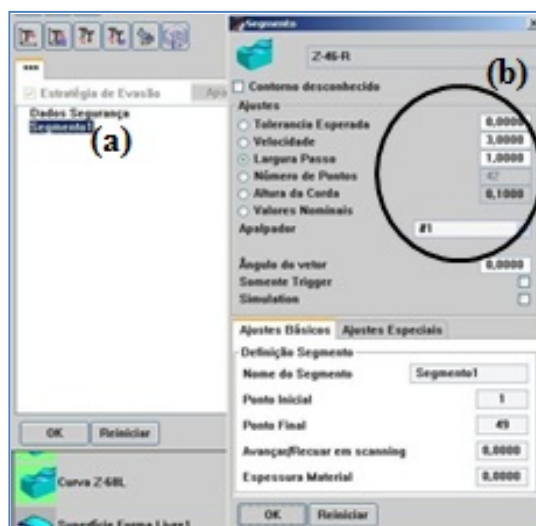


Fonte: o autor

Clicar em **OK** e abrir novamente a janela **Elementos** (fig2a), o comando **Curva 3-D** (fig1b). Em **Dados Nominais** (Fig2d), selecionar **Adicional** (fig2e) > **Digitalização Ativa** (fig2f).

Clicar em **OK**, e abrir novamente a janela **Elementos** (fig2a), abrir a opção **Estratégia** (fig3b) e clicar em **Segmento1** (fig13a), e alterar os parâmetros, como apalpador utilizado, dados de segurança, velocidade, como mostrado na fig 13b.

fig13– Segmento1



Fonte: o autor

Selecionar a curva, e executar a digitalização da curva.

1.4 EXPORTAR PONTOS DIGITALIZADOS

Para exportar os pontos, selecionar a curva e na opção **Estratégia** (fig3b) clicar no ícone **Lista de Pontos**, como mostrado na fig 14a.

fig14 – Estratégia



Fonte: o autor

A janela **Lista de Pontos** irá abrir. Clicar no Ícone **Salvar** como mostrado na fig 15a.

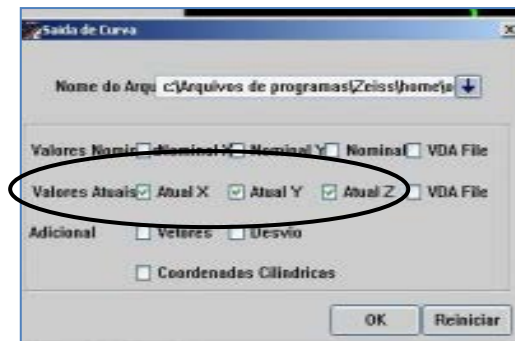
fig15– Lista de Pontos

Pto	Nominal X	Nominal Y	Nominal Z	NC	NY	NZ
1	8,3386	18,1881	45,9178	-0,2265	0,9724	0,0554
2	8,2882	18,1683	45,9188	-0,1667	0,9839	0,0648
3	8,8254	18,1388	45,9796	0,8634	0,9978	0,0195
4	1,7634	18,0688	46,0373	0,1958	0,9943	-0,0154
5	2,5828	17,9282	46,0528	0,2595	0,9652	-0,8339
6	3,1881	17,6744	46,0795	0,5099	0,8586	-0,8529
7	3,6962	17,2682	46,1383	0,7121	0,6958	-0,8937
8	4,1994	16,6583	46,1528	0,8106	0,5761	-0,1849
9	4,6865	15,8977	46,1444	0,8549	0,5089	-0,1088
10	5,1388	15,0896	46,1657	0,8788	0,4635	-0,1148
11	5,5739	14,2343	46,1772	0,8914	0,4342	-0,1296
12	5,9864	13,3657	46,2183	0,9012	0,4032	-0,1589

Fonte: o autor

A janela **Saída de Curva** irá abrir. Habilitar os campos Valores Atuais, **Atual X**, **Atual Y** e **Atual Z** como mostrado na fig 16 e clicar em **OK**.

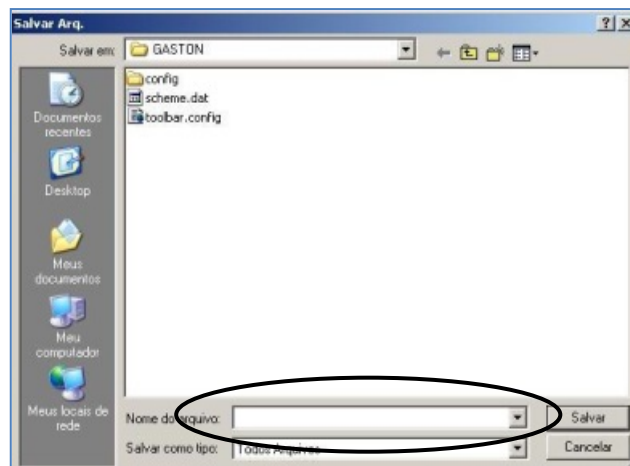
fig16– Saída da Curva



Fonte: o autor

Após abrirá a janela **Salvar Arq.** Escolher o local para salvar os pontos e colocar em **Nome do arquivo** o mesmo nome da Curva digitalizada seguido de **.txt**, como mostrado na fig 17.

fig17 – Salvar Arq.



Fonte: o autor