



PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO DE DESVIOS DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS PROCESSADAS POR CAD/CAM

Por,
Erlan Rodrigo de Souza Cassiano

Brasília, 25 de julho de 2013.

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECANICA

PROJETO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO DOS DESVIOS DE SUPERFÍCIES COMPLEXAS PROCESSADAS POR CAD/CAM

POR,

Erlan Rodrigo de Souza Cassiano

Relatório submetido como requisito parcial para obtenção
do grau de Engenheiro Mecânico.

Banca Examinadora

Prof. Antonio Piratelli Filho, UnB/ ENM (Orientador)

Prof. Walter Gennari, UnB/ ENM

Prof. Jones Yudi, UnB/ ENM

Brasília, 25 de julho de 2013

Agradecimentos

Agradeço aos meus familiares, que são sempre uma inspiração. A todos os meus colegas que me auxiliaram em tempo tempestuosos e ao meu orientador, por todo apoio e conhecimento que me concedeu.

Erlan Rodrigo de Souza Cassiano

RESUMO

O trabalho proposto envolve a análise comparativa de peças com geometrias complexas como pás de turbinas eólicas, rotores e lentes de projetor, fabricadas por processamento CAM a partir de modelos CAD. Modelos matemáticos e reconstrução de superfícies por engenharia reversa são utilizadas para elaborar os modelos de Projeto Auxiliado por Computador (CAD) utilizados como referências para as análises. As medições são executadas usando Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) e scanner laser 3D e posteriormente os dados adquiridos são comparados aos modelos de projeto para avaliar o quanto as formas complexas se desviaram do modelo de projeto.

ABSTRACT

The proposed work involves the comparative analysis of parts with complex geometries such as wind turbine blades, rotors and projector lens manufactured by CAM processing from CAD models. Mathematical models and surface reconstruction for reverse engineering are used to develop models of Computer Aided Design (CAD) used as references for analysis. The measurements are performed using Coordinate Measuring Machines (MMC) and 3D laser scanner and subsequently acquired data are compared to the project models to evaluate how much the complex forms deviate from the project model.

RÉSUMÉ

Le travail proposé consiste à l'analyse comparative des pièces avec des géométries complexes telles que des aubes de turbines éoliennes, des rotors et des lentilles du projecteur fabriqués par traitement CAM à partir de modèles CAO. Les modèles mathématiques et la reconstruction de surface pour l'ingénierie inverse sont utilisées pour élaborer des modèles de conception assistée par ordinateur (CAO) utilisés comme références pour l'analyse. Les mesures sont effectuées en utilisant machines à mesurer tridimensionnelles (MMC) et le scanner laser 3D et les données acquises par la suite sont comparés aux modèles de conception afin d'évaluer la manière dont les formes complexes s'écartent du modèle de conception.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 SISTEMAS CAD E CAM	5
2.2 MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	5
2.3 MEDIÇÃO POR COORDENADAS COM CONTATO	6
2.4 MEDIÇÃO POR COORDENADAS SEM CONTATO	6
2.5 INCERTEZA DE MEDIÇÃO	7
2.6 CONSTRUÇÃO DE MODELOS CAD DE SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE: NURBS	7
2.7 TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICA DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE	11
2.8 SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE	13
2.8.1 PERFIS NACA.....	13
2.8.2 LENTES ASFÉRICAS	14
3 METODOLOGIA	17
3.1 EQUIPAMENTO	17
3.1.1 Máquina de Medir por Coordenadas Modelo Braço Articulado(CMA)	17
3.1.2 <i>Scanner</i> laser	17
3.1.3 Máquina de Medir por Coordenadas modelo Cantilever	20
3.2 <i>SOFTWARE</i>	22
3.2.1 Rhinoceros 5.0	22
3.2.2 ScanStudio HD PRO	22
3.2.3 CATIA V5R18	25
3.2.4 GEOGEBRA	26
3.2.5 <i>Engineering Equation Solver</i>	26
3.2.6 MATLAB	26
3.3 PROCESSO DE MEDIÇÃO.....	27
3.3.1 Peças selecionadas	27
3.3.1.1 Lente esférica.....	27
3.3.1.2 Rotor.....	28
3.3.1.3 Pás de aerogerador	28
3.5 ANÁLISE	29
3.5.1 Desvio de Forma	29
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	31
4.1 LENTE ASFÉRICA	31
4.1.1 Medição na MMC.....	31
4.1.2 Modelo teórico.....	32
4.1.3 Medição no Scanner	32
4.1.4 Alinhamento	33
4.1.5 Filtro	33
4.1.6 Desvios de forma.....	33
4.2 ROTOR	40
4.2.1 Medição com CMA.....	40
4.2.2 Medição com Scanner	41
4.2.3 Modelo teórico.....	42
4.2.4 Alinhamento	44
4.2.5 Filtro	45
4.2.6 Desvio de Forma	45
4.3 PÁ DE AEROGERADOR	50
4.3.1 Modelo teórico.....	50
4.3.2 Medição com CMA.....	51
4.3.3 Medição com Scanner	51
4.3.4 Alinhamento	52
4.3.5 Filtro	52
4.3.6 Desvio de forma	53
5 CONCLUSÕES.....	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	59
ANEXOS.....	61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - (a) Lente esférica ; (b) Pá de aerogerador; (c) Rotor de compressor	3
Figura 2 - Exemplo de CAD utilizado em simulação (CAE) de esforços	5
Figura 3 - Planejamento de usinagem de um rotor com o uso de CAM	5
Figura 4- Fonte de erro pela inclinação do apalpador: (a) coleta ideal; (b) coleta com erro.	6
Figura 5 - Exemplos de modelos formados por polígonos e NURBS	8
Figura 6 - Exemplo 1 - Mudança da posição do ponto de controle	10
Figura 7 - Exemplo 2 - Mudança do pesos do pontos de controle	11
Figura 8 - (a) linhas regadas pelo diâmetro "t"; (b) indicação da tolerância no desenho técnico.	12
Figura 9 - (a) Superfícies regadas pelo diâmetro "t"; (b) indicação da tolerância no desenho técnico.	13
Figura 10 - 1: zero lift line; 2: leading edge; 3: nose circle; 4: camber; 5: thickness; 6: upper surface; 7: trailing edge; 8: main camber line; 9: lower surface.....	13
Figura 11 - Convergencia de uma lente esférica	14
Figura 12 - Convergencia de uma lente esférica.....	15
Figura 13 - Elementos de uma lente esférica.	15
Figura 14 - Influência do k na curvatura	16
Figura 15 - Foto da MMC modelo braço	17
Figura 16 - : Scanner 3D	18
Figura 17 - Esquema de triangulação dos lasers.....	19
Figura 18 - Fenômeno da sobreposição e nuvens de pontos.....	19
Figura 19 - braço da máquina de medir por coordenadas QM-Measure 353	20
Figura 20 - Apalpador articulado utilizado na MMC	21
Figura 21 - exemplo de planos medidos pelo software MCOSMOS	21
Figura 22 - Fluxo de trabalho generalizado.	27
Figura 23 - Lente de projetor esférica	28
Figura 24 - Compressor radial estudado	28
Figura 25 - Pá modelo para a produção do molde fêmea e das pás de fibra de carbono.29	
Figura 26- Esquema didático para indenficar desvio de forma	29
Figura 27 - lente esférica utilizada no trabalho com pontos marcados	31
Figura 28 - Lente teórica gerada no Rhinoceros	32
Figura 30 - Uso do Geogebra para a definição do perfil aproximado.....	35
Figura 31 - Estudo de desvio da lente teórica com ponto adquiridos na MMC	36
Figura 32 - Estudo de desvio da lente com nuvem de pontos adquirida no scanner	36
Figura 33- Gráfico de Média e Desvio padrão para várias constantes cônicas.....	37
Figura 34 - Aproximação da região de mínimo do gráfico anterior	38
Figura 35 - Estudo de desvio da lente teotimizada com ponto adquiridos na MMC	38
Figura 36 - Estudo de desvio da lente otimizada com nuvem de pontos coletada no scanner.....	39
Figura 37 - Malha de pontos desenhada na pá para medição	40
Figura 38 - Rotor preparado para digitalização.....	41
Figura 39 - Pontos coletado da malha desenhada na pá do rotor	42
Figura 40 - Curvas criadas a partir dos pontos coletados	43
Figura 41 - Geração de superfícies por Loft e configurações	43
Figura 42 - Modelo teórico (CAD) final do Rotor.....	44
Figura 43 - Pontos de malha e de avaliação coletados no Rotor	44
Figura 44 - Estudo de desvio do Rotor.....	46
Figura 45 - Estudo de desvio de forma para a pá maior superior	47
Figura 46 - Estudo de desvio de forma para a pá menor superior	47
Figura 47 - Estudo de desvio de forma para a pá maior inferior	48
Figura 48 - Estudo de desvio de forma para a pá menor inferior	49
Figura 49 - Modelo CAD original da confecção das pás e molde	50
Figura 50 - Pá montada pronta para ser medida pelo CMA	51
Figura 51- Estudo de desvio de forma para o lado A	53

Figura 52 – Estudo de desvio de forma para o lado B	54
Figura 53 - Estudo de desvio de forma com os pontos coletados no CMA	55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores de Best Fit para modelos de Lente	33
Tabela 2 - Pontos medidos para compor a curva da lente	33
Tabela 3 – Resultados preliminares do EES (sem arredondamento).....	34
Tabela 4 - Estatística da incógnita R (sem arredondamento)	34
Tabela 5 - Desvios entre pontos medidos coordenados e respectivos pontos na curva teórica	35
Tabela 6 – Resultados do estudo de desvio de forma	37
Tabela 7 - Resultados do estudo dos desvios de forma	39
Tabela 8 - Valores de Best Fit para pás do rotor	45
Tabela 9 - Resultados do estudo de desvio de forma para os pontos coletados no CMA .	46
Tabela 10 - Resultados do estudo de desvio de forma	49
Tabela 11 - Valores de Best Fit para as nuvem do <i>scanner</i> e do CMA	52
Tabela 12 - Resultados do estudo de desvio de forma	55

LISTA DE SÍMBOLOS

Siglas

NURBS	Non-Uniform Rational B Spline
CAD	Computer Aided Design
CAM	Computer Aided Manufacturing
MMC	Máquina de Medir por Coordenada
3D	Three dimensions / Três dimensões
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
CAE	Computer-aided Engineering

1 INTRODUÇÃO

A metrologia é a ciência que estuda a medição, uma área de estudo da engenharia mecânica, que possui um papel fundamental na produção seriada de milhares de componentes, especificando tolerâncias que promovem a intercambiabilidade desses componentes.

Com os avanços em medição 3D, Projeto Auxiliado por computador (CAD) e Manufatura Auxiliada por Computador (CAM), a metrologia se aplica na especificação do desvio de sua forma de projeto, para que o desempenho de um componente, a durabilidade e a montagem não sejam prejudicados.

Essa especificação, quando usada em corpos de formas livre, ou seja, formas que não podem ser descritas por geometrias simples, como linhas, arcos, círculos e outras, é especialmente importante na engenharia de energia, náutica, aeronáutica e outras nas quais formas complexas desempenham um papel fundamental no projeto. Por exemplo, o desempenho da asa de um avião formada por perfis aerodinâmicos que geram a sustentação, é elemento fundamental nos projetos da aeronave. A complexidade dessa peça aumentou em busca de uma maior eficiência, atualmente sua forma não somente varia em duas dimensões, mas sim em três, diferentemente dos aviões utilizados na primeira guerra mundial os quais possuíam asas com o mesmo perfil e com o mesmo comprimento. Nos aviões comerciais atuais as asas mudam de perfil ao longo da envergadura.

A definição de uma tolerância de forma tridimensional para a produção do objeto é de suma importância, pois um perfil fluido dinâmico que não está de acordo com o projeto gera custos adicionais pela ineficiência do produto final, assim como refugo e retrabalho na fabricação.

Os métodos utilizados para medição de peças mecânicas se dividem em com e sem contato (Piratelli, 2007). O método com contato consiste no contato entre o sensor que irá realizar a medição, seja um paquímetro ou um braço articulado de uma Máquina de Medir por Coordenadas (MMC), com a peça. No método sem contato, não existe o contato do sensor de medição com a peça a ser medida, como ocorre nos *scanners* a laser. Utilizando princípios básicos da óptica, o laser reconhece os pontos da peça e através de um sensor e de lentes, os mesmos são gerados no software do *scanner* criando uma nuvem de pontos que representa o elemento medido.

A engenharia reversa é um processo a partir do qual de um modelo já existente se reconstrói outro modelo virtual em escala. Esse processo já é utilizado há muitos anos dentro da engenharia, principalmente na área militar, nas indústrias automobilísticas, aeroespaciais (Jatoba, 2011).

Dentro da engenharia reversa, é necessário que se faça uso de softwares que trabalham com o sistema CAD e CAM. O sistema CAD é utilizado para gerar desenhos e esquemas, assistidos por um computador (*Computer Aided Design*), o qual fornece modelos tanto em duas quanto em três dimensões, enquanto o sistema CAM é utilizado para gerar códigos e sequências de processos para a produção e aperfeiçoamento do produto final (Silva et al., 2006). Atualmente com o avanço da tecnologia, a precisão exigida na produção de peças tem aumentado, não só para resultar em um

produto melhor, mas para manter a empresa competitiva no mercado. As imagens tridimensionais geradas por digitalização através de *scanners* 3D a laser ampliam a percepção e compreensão do projeto, pois enquanto um projeto de produto se completa em uma representação 2D, o produto em si é a materialização de uma representação tridimensional.

Scanners podem criar modelos virtuais de objetos, como elementos da natureza como conchas, pedras, peças técnicas e de engenharia, obras de arte, moldes e outros elementos. Deste modo é possível gerar arquivos em diferentes formatos que permitem produzir o modelo em um material adequado, bem como criar e editar superfícies, desenvolvendo assim um produto totalmente novo (Silva et al,2006).

Independente do uso de scanners, na Universidade de Brasília já há referências a trabalhos referentes a digitalização de modelos reais para ambientes virtuais de pás de turbinas hidráulicas (Piratelli et al., 2009), de peças de grandes dimensões e com forma complexa, e de elementos pequenos como um dente utilizado em prótese (Piratelli,2007) e de estátua humanas para posterior uso em animações (Piratelli, 2012). Em todos os casos foram extraídos pontos de uma malha previamente delimitada com o auxílio de uma Máquina de Medir por Coordenadas modelo braço articulado (CMA). Evidenciando a eficiência dos métodos, a dependência da habilidade do operador e que para estes casos a necessidade de uma estratégia de medição prévia para uma reconstrução mais facilitada e fiel nos softwares.

Além de adquirir as informações dimensionais, scanners podem extrair imagens, chamadas de texturas, que carregam grande informação sobre a superfície. Por exemplo, há trabalhos referentes à digitalização de artefatos antigos e delicados para que a informação das imagens e formas não se perca com o decorrer do tempo, e que para as pessoas tenham mais acesso ao artefato sem ter a necessidade de ir ao museu (Hess, 2010).

Com fim de aperfeiçoar o método de medição por scanner, na Universidade de Brasília foi desenvolvido trabalhos referentes as fontes de erros e parâmetros que influenciam o resultado de uma digitalização (Piratelli, 2013), e elaborado um fluxograma para um uso de um determinado scanner e softwares para agilizar o processo e para que modelo CAD final seja o mais fiel possível ao modelo real.

Este trabalho foi realizado para calcular os desvios entre modelos de projeto(teóricos) com referência aos modelos fabricados, de forma indicar as regiões onde as as superfícies se distanciaram do modelo.

Com isto pode-se adquirir conhecimento do processo de medição sem contato, utilizando instrumentos como *scanners* 3D , e com contato empregando Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) e Máquina de Medir por Coordenadas Modelo Braço de Medição braço articulado, empregando softwares para análises componentes com geometrias de forma livre, em relação aos seus respectivos modelo teóricos. As análises permitem identificar as áreas com maior desvio de forma e elaborar uma metodologia para análise de desvio.

O objetivo deste trabalho foi avaliar uma metodologia para aquisição, alinhamento e análise comparativa entre modelos teóricos (CAD) e fabricados (geometria medida da peça).

O trabalho foi desenvolvido através do uso dos softwares CATIA, Rhinoceros, ScanStudio HD, utilizados para reconstruir modelos teóricos, realizar o alinhamento e analisar desvio de forma, e o EES, Geogebra e MATLAB para identificação de parâmetros dos modelos teóricos.

Foram escolhidas três peças com tamanhos, utilidades e formas diferentes, mostradas na Figura 1 para avaliar diferentes problemas e tornar o método final mais abrangente.

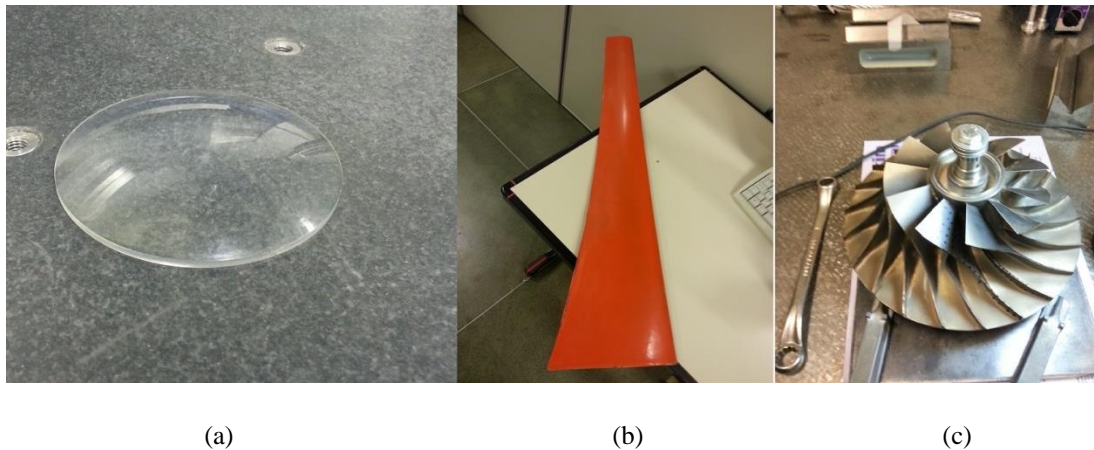


Figura 1 - (a) Lente esférica ; (b) Pá de aerogerador; (c) Rotor de compressor

Uma lente esférica com forma teórica conhecida, uma pá de aerogerador com modelo CAD de projeto conhecido e um rotor de compressor sem informações sobre o modelo teórico ou de projeto.

A lente esférica foi medida na MMC para identificar os parâmetros da lente teórica, após isso, o seu modelo teórico alcançou a ordem de incerteza da máquina, a lente foi medida no *scanner* 3D e alinhada com o modelo teórico. Neste momento, foi feito o estudo de seu desvio de forma.

A pá de aero gerador foi medida no Braço de Medir por Coordenadas e *scanner* 3D, os pontos adquiridos foram alinhados com o modelo CAD de projeto, já conhecido, e novamente foi feito o estudo do desvio de forma.

No rotor as pás foram reconstruídas com os pontos adquiridos com o Braço de Medir por Coordenada com o auxílio de NURBS (Piratelli et al., 2009), e o modelo reconstruído será comparado com pontos de controle também coletados no Braço de Medir por Coordenadas, após e atingir a ordem de incerteza do equipamento o rotor será medido no *scanner* e a nuvem de pontos será alinhada com o modelo reconstruído para a análise do perfil.

Ao se usar o *scanner* 3D, primeiramente a peça é analisada para se avaliar a necessidade de algum tratamento de superfície para a utilização do *scanner* (Piratelli,2013), em seguida identifica os melhores parâmetros para uso do scanner, e então a captura de dados é realizada. O trabalho de graduação de (Jatobá, 2012) avalia varias fontes de erros do scanner e elabora através de fluxogramas

o roteiro de medição focado na melhor reconstrução possível, neste trabalho será utilizado este trabalho como referência para a aquisição e pontos.

Para a MMC e MMC modelo braço coordenado (CMA), a peça é fixada a uma base ou mesa de grande inércia para não se mover durante a medição, uma malha de pontos é traçada sobre a superfície e os pontos imediatamente ao lado dos nós da malha são coletados, pois a própria espessura da tinta pode alterar os dados na MMC, metodologia análoga utilizada por Piratelli et al. no trabalho *Reverse engineering of hydraulic turbine runners using coordinate measuring arms and NURBS modeling*, onde um rotor de turbina hidráulica foi reconstruído com o uso do Braço de Medir por Coordenadas e modelagem NURBS.

As etapas realizadas no desenvolvimento do trabalho foram: Revisão da bibliografia envolvida; Estudo de tutoriais e manuais dos softwares envolvidos no processo de medição; Seleção de corpos de forma livre; Medição com e sem contatos dos corpos selecionados; Análise de resultados de medições realizadas com o scanner 3D e MMC e CMA; Desenhar modelo CAD teórico; Elaborar e aplicar metodologia de alinhamento; Estudo de desvio de forma; Identificação de áreas a serem mais bem trabalhadas; Apresentação do conteúdo do trabalho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 SISTEMAS CAD E CAM

Computer-aided design (CAD), é a utilização de sistemas de computador para auxiliar a criação, modificação e junto com o *Computer-aided Engineering* (CAE) analisar e otimizar um projeto. O desenho assistido por computador (CAD) descreve o processo de criação de um desenho técnico com o uso de software de computador. Software CAD é usado para aumentar a produtividade do projetista, melhorar a qualidade do design, melhorar as comunicações através de documentação e criar um banco de dados para fabricação.

Computer-aided manufacturing (CAM) é o uso de software de computador para controle de máquinas ferramentas e maquinaria relacionada na fabricação de peças. As Figuras 2 e 3 ilustram a utilização de cada sistema.

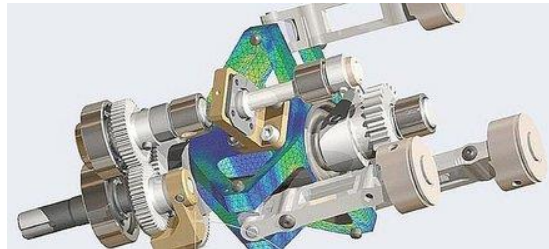


Figura 2 - Exemplo de CAD utilizado em simulação (CAE) de esforços (Adaptado de: <http://designsolutions.gillincorporated.org>)

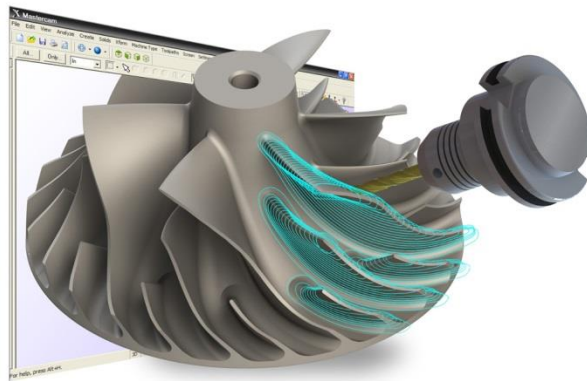


Figura 3 - Planejamento de usinagem de um rotor com o uso de CAM, (Adaptado de: <http://medspark.ms>)

2.2 MEDIÇÃO POR COORDENADAS

A base para a medição por coordenadas é o sistema cartesiano, que utiliza a representação de cada ponto num sistema ortogonal de coordenadas (x, y, z). A partir desta informação de posição, registrada diretamente do componente, é possível avaliar as características dimensionais do objeto.

Por exemplo, pode-se tomar 3 pontos no plano cartesiano e calcular qual seria a circunferência que passa pelos três pontos. O método tradicional usa um paquímetro para avaliar a circunferência com incerteza, o quanto confiamos em nossa medida, na ordem de milímetros, mas MMC's em geral possuem incertezas de medição na ordem de micrometros

2.3 MEDIÇÃO POR COORDENADAS COM CONTATO

Na medição por contato, base das MMC's, uma ponta de prova é rastreada no espaço, x, y e z a partir da origem do equipamento. O operador toca esta ponta na peça a ser avaliada e com o toque ou comando do operador a máquina grava as coordenadas x, y e z do ponto.

Neste tipo de medição há algumas desvantagens, como ao se utilizar uma ponta seca, uma ponta de apalpador semelhante a uma agulha, o operador deve posicionar a ponta de forma normal à superfície para coletar o ponto e gerar menos erro devido à inclinação, como mostrado na Figura 3, mas devido à vasta variedade de formatos das peças, isto nem sempre é possível. Também há a ponta esférica, feita de um material de alta dureza como rubi, que tem seu raio compensado na coleta do ponto de acordo com a operação de medição.

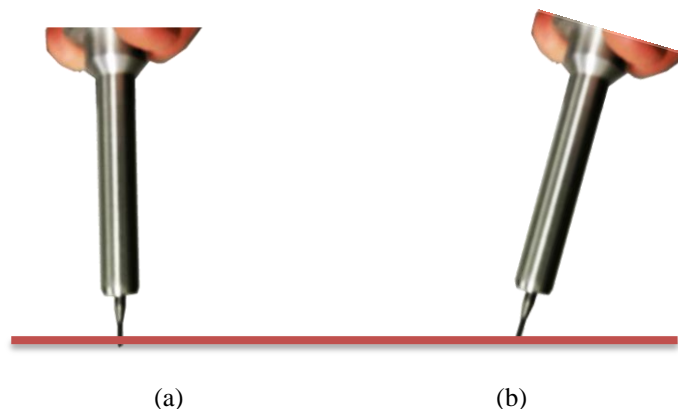


Figura 4- Fonte de erro pela inclinação do apalpador: (a) coleta ideal; (b) coleta com erro.

2.4 MEDIÇÃO POR COORDENADAS SEM CONTATO

Através de relações de triângulos, sensores óticos e lasers de alta potência, é possível identificar posição de pontos em uma dada superfície. Baseado nestes princípios que os *scanners* 3D operam.

Pela sua versatilidade, portabilidade e eficiência os scanners tem aumentado sua participação no mercado e no meio acadêmico. Podendo *scannear* grandes áreas como parques, minas e prédios (Darling LTD, 2013).

As fontes de erros do scanner surgem principalmente da superfície da peça, por exemplo, peças com grande refletividade como aços polidos, podem refletir os raios lasers de forma o tipo de superfície, o que faz o sensor captar erroneamente ou não adquirir o ponto. Em seguida pelo alinhamento das nuvens de pontos entre as mesmas para a geração do modelo completo.

2.5 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A definição formal do GUM, *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, para “incerteza de medição” traz vários pontos à destacar.

A começar, ressalte-se que a incerteza está relacionada a um valor de medição, que é o resultado da medição, e não ao valor verdadeiro do mensurando, o qual na prática não é conhecido. O resultado da medição nada mais é que a melhor estimativa de tal valor verdadeiro e, na ausência de efeitos sistemáticos, geralmente é obtido pela média aritmética de N medições repetidas do mesmo mensurando.

O segundo ponto a destacar é que a incerteza caracteriza uma faixa de dispersão ou intervalo, e não um valor pontual. Nesse sentido, a incerteza não deve ser confundida com “erro”, pois esse último é um valor pontual e não uma faixa e usualmente pode ser corrigido, quando aplicado a um fator de correção adequado. Já a incerteza é a dúvida remanescente associada ao resultado da medição. Ela mede o grau de desconhecimento sobre o que está sendo medido.

Finalmente, cabe ressaltar que a incerteza corresponde a uma faixa de valores que podem ser atribuídos ao mensurando, isto é, de uma forma fundamentada e realista, não devendo ser entendida como uma “faixa de segurança”. Ou seja, a incerteza não deve ser subestimada e, tampouco, deve ser sobre estimada.

Como um resultado de medição nada mais é do que meramente uma estimativa do valor verdadeiro do mensurando, a incerteza torna-se necessária para expressar o grau de dúvida associado ao resultado da medição. Dessa forma, a incerteza é fundamental em diversas situações, tais quais:

- Na calibração de equipamentos, instrumentos e padrões, para verificar se os mesmos encontram-se dentro das tolerâncias definidas;
- na área de ensaios, para verificar se o resultado do ensaio pode ser aprovado ou não;
- na área legal, para verificar a conformidade de resultados de medições com limites de tolerâncias legais;
- no controle de riscos associados à tomada de decisão de aprovar ou rejeitar uma amostra.

Adicionalmente, a incerteza de medição pode ser um diferencial competitivo, pois a empresa tende a buscar a melhor qualidade na medida e, portanto, a menor incerteza. Assim, a incerteza se constitui como um parâmetro fundamental que indica a qualidade da medição.

2.6 CONSTRUÇÃO DE MODELOS CAD DE SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE: NURBS

A NURBS é uma abreviação para Non-Uniform Rational B-Spline, são curvas que tem a capacidade de poder representar geometrias 3D por aproximação. Elas podem reproduzir com

precisão os objetos de padrão geométrico como linha, círculo, elipse, esfera e toróides, e de geometria de forma livre como carrocerias de automóveis e órgãos humanos(Rhinoceros,2012).

A quantidade de informação necessária para uma representação NURBS de um pedaço de geometria é muito menor do que a quantidade de informação requerida pelas comuns aproximações facetadas, ou seja, polígonos. Na Figura 5 é possível notar a diferença de detalhamento entre a descrição por NURBS e polígonos para o mesmo modelo.

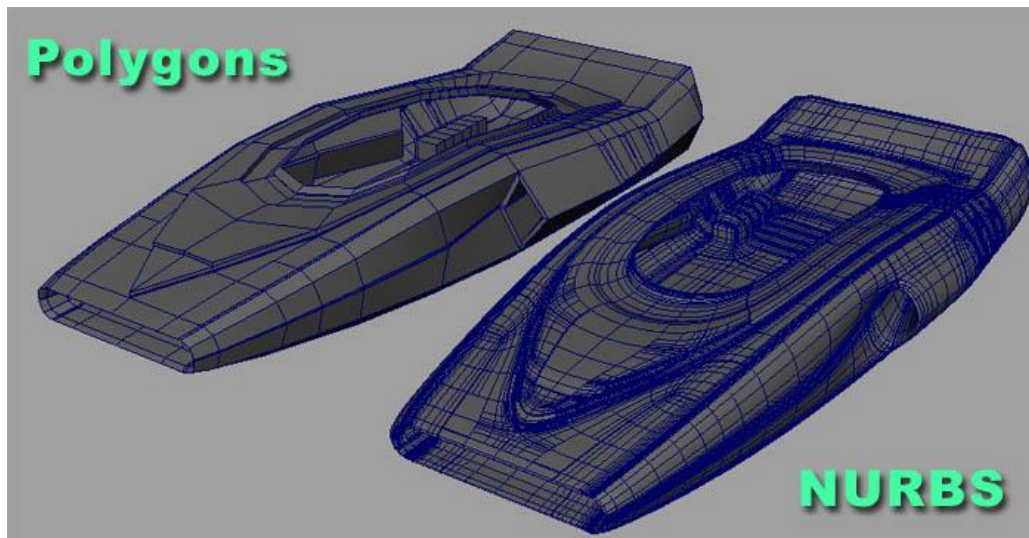


Figura 5 - Exemplos de modelos formados por polígonos e NURBS(Adaptado de: 3D Tutorial Zone, 2013)

Uma curva NURBS é definida por quatro elementos: grau, pontos de controle, nós, e uma regra de avaliação.

O grau é um número inteiro positivo. Este número é geralmente 1, 2, 3 ou cinco. Linhas e polilinhas são de grau um, círculos são de grau dois, e mais do isso são curvas de forma livre de grau três ou cinco. Os termos linear, quadrática, cúbica, e quinto grau são utilizados usualmente para descrever o grau das curvas.

NURBS são definidas como vetores de valor de funções polinomiais em seções e as equações de curva e superfícies são mostradas a seguir nas equações 1 e 2 respectivamente(Dassault Systèmes, 2000).

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n P_i \cdot w_i \cdot N_{ik}(u)}{\sum_{i=0}^n w_i \cdot N_{ik}(u)} \quad (1)$$

$$S(u, v) = \frac{\sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n P_{ij} \cdot N_{ik}(u) \cdot N_{ij}(v)}{\sum_{j=0}^m \sum_{i=0}^n w_{ij} \cdot N_{ik}(u) \cdot N_{ij}(v)} \quad (2)$$

Nessas equações, “ P_i ” e “ P_{ij} ” são os pontos de controle; “ w_i ” e “ w_{ij} ” são os pesos atribuídos aos pontos de controle; “ k ” e “ l ” são os graus das curvas nas direções “ u ” e “ v ”; “ n ” e “ m ” são os números de pontos de controle nas direções “ u ” e “ v ”. A função “ $N_{ik}(u)$ ” é a função base definida pela função “B-spline” que é determinada pelas equações 3 e 4. Os valores de “ u_i ” são o i ésimo elemento do nó do vetor “ U ”, definidos pela equação 5. A função “ $N_{jl}(v)$ ” é determinada pelas mesmas equações, trocando o índice “ i ”, “ k ” e “ u ” por “ j ”, “ l ” e “ v ”. As mesmas considerações feitas ao vetor “ U ” se aplicam ao vetor “ V ”, definido pela equação 6.

$$N_{i,0}(u) = \begin{cases} 1 & \text{se } u_i \leq u \leq u_{i+1} \\ 0 & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (3)$$

$$N_{i,0}(u) = \left(\frac{u-u_i}{u_{i+k}-u_i} \right) \cdot N_{i,k-1}(u) + \left(\frac{u_{i+k+l}-u}{u_{i+k+l}-u_{i+l}} \right) \cdot N_{i+l,k-l}(u) \quad (4)$$

$$U = \{a, \dots, a, u_{k+1}, \dots, u_{m-k-l}, b, \dots, b\} \quad (5)$$

$$V = \{c, \dots, c, v, \dots, v_{m-k-l}, d, \dots, d\} \quad (6)$$

O processamento das informações envolve em ajustar (aproximar) as curvas NURBS à trilha de medição, isso quer dizer que as curvas não passam exatamente sobre os pontos coletados na medição, e faz com que hajam erros associados ao processo de ajuste.

A seguir dois exemplos sobre como mudança da posição e dos pesos dos pontos de controle influenciam as curvas:

Exemplo 1:

Na Figura 6, um vetor nó de um arco de terceiro grau: 0 0 0 0 1 1 1 1 . Neste caso, há quatro pontos de controle.

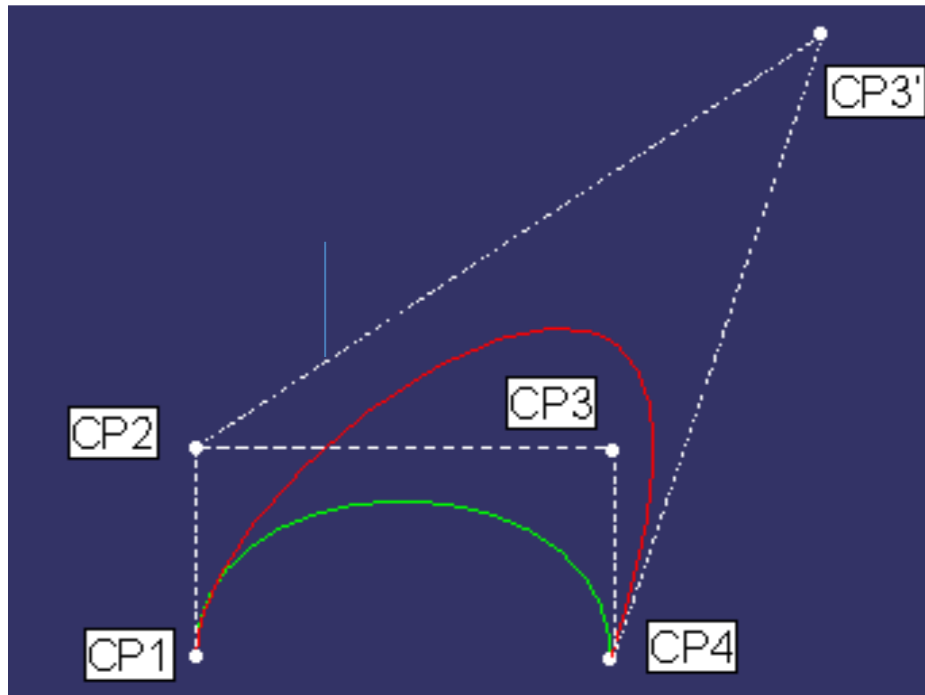


Figura 6 - Exemplo 1 - Mudança da posição do ponto de controle (adaptado de Dassault Systèmes, 2000).

A curva verde possui quatro pontos de controle, CP1, CP2, CP3 e CP4. Se movermos o ponto de controle CP3 para CP3', a curva é deslocada e atraída por seus novos pontos de controle, formando a curva vermelha.

Pode-se notar duas importantes características deste tipo de NURBS, também chamado de arco de Bézier:

- A curva está na parte convexa da curva formada pelos pontos de controle;
- A curva é tangente ao segmento que une os pontos de controle, o primeiro e o segundo, no início da curva, e para o segmento que une os últimos pontos de controle na sua extremidade.

Exemplo 2:

Na Figura 7, vê-se um vetor nó não uniforme, com 3 arcos de terceiro grau, contínuo: 0 0 0 0 2 8 9 9 9 9. Neste caso há 6 pontos de controle.

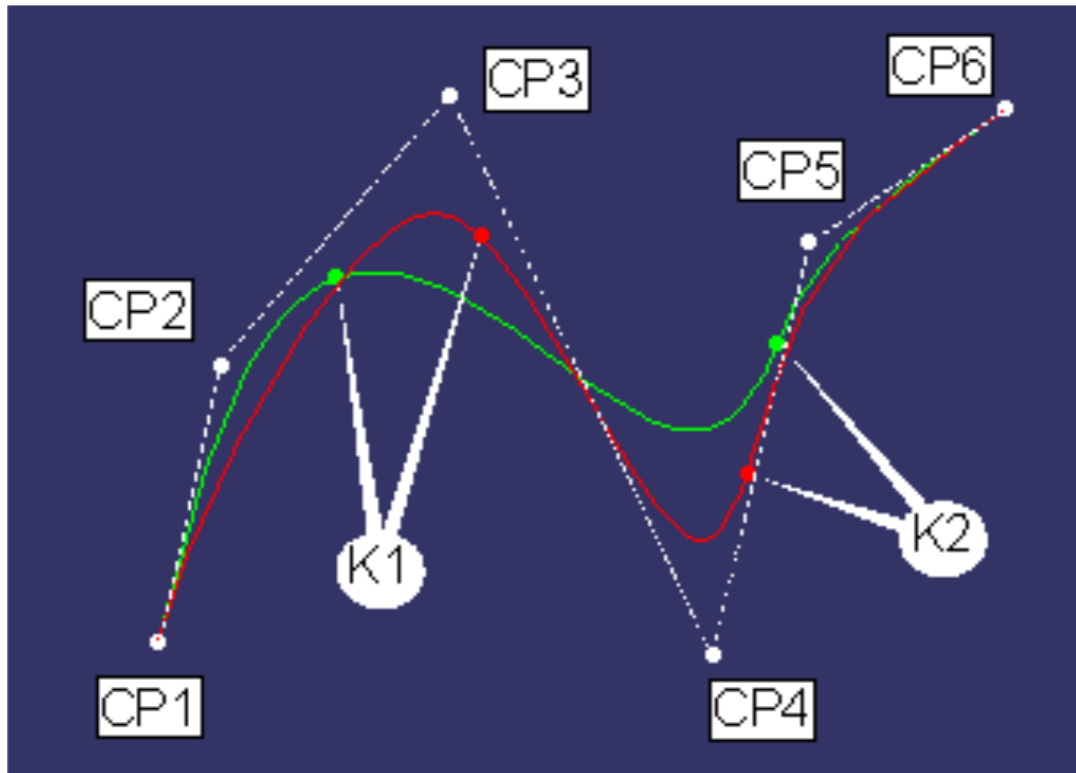


Figura 7 – Exemplo 2 – Mudança do pesos do pontos de controle (adaptado de Dassault Systèmes, 2000).

A curva verde é um exemplo de curva polinomial B-spline não uniforme, com os vetores nó K1 e K2. O peso de cada ponto de controle é 1.

Se você alterar os pontos de controle para 1,1,10,20,5,1 , o resultado é curva vermelha. Esta curva é atraída pelos pontos de controle CP3 e CP4, que possuem mais peso que os demais. Estas curvas possuem três arcos, CP1-K1, K1-K2, K2-CP2.

É possível enumerar as seguintes propriedades:

- As NURBS provem um sistema matemático unificado para representação de:
 - Formas analíticas (como cones, superfícies quadráticas que não podem ser representadas pelo modelo de Bézier, por B-spline uniformes ou não);
 - Entidades de forma livre, utilizados no design de carros, por exemplo;
- O modelo facilmente lida com a continuidade entre os arcos, e seu algoritmo é veloz e estável;
- As NURBS são invariantes sob transformações geométricas comuns, como translações e rotações;
- As NURBS generalizam os conceitos das curvas e superfícies de Bézier B-spline uniforme.

2.7 TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICA DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE

De acordo com a norma NBR 6809, os desvios geométricos permissíveis para a peça são previamente indicados, aplicando-se tolerâncias geométricas que são os limites dentro dos quais as dimensões e formas geométricas possam variar sem que haja comprometimento do funcionamento e intercambiabilidade das peças.

Tais desvios podem ser macrogeométricos, sendo os macroscópicos como retilineidade, planeza, dimensões nominais ou os microgeométricos, sendo desvios superficiais microscópicos como rugosidade e aspereza.

Os limites de erros (tolerâncias dimensionais) que uma peça pode apresentar em sua geometria, são estabelecidos pelo projetista, em função da aplicação prevista para a peça.

A determinação destas tolerâncias é um problema de projeto mecânico e não será abordado neste trabalho. Esta determinação geralmente exige grande experiência e/ou o conhecimento de procedimentos normalizados.

Existem sistemas de tolerância e ajustes normalizados para os elementos geométricos rotineiramente utilizados, como os elementos unidimensionais (eixo/furo, cones, parafuso/rosca, engrenagens e etc.).

O campo de tolerância de uma linha qualquer é limitado por duas linhas geradas por círculo de diâmetro “t”, cujo centro situa-se sobre a linha geométrica teórica, demonstrado na Figura 8 (a).

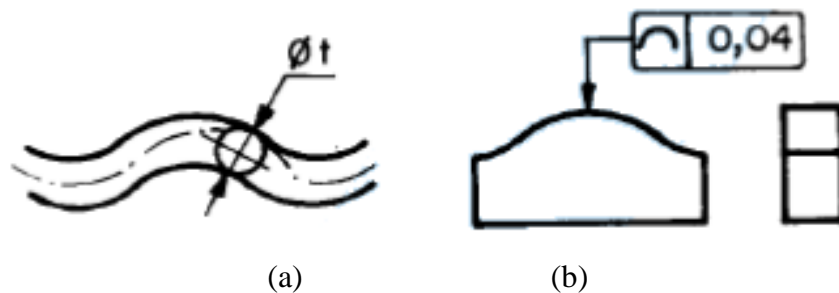


Figura 8 – (a) linhas geradas pelo diâmetro “t”; (b) indicação da tolerância no desenho técnico. (Adaptado de: NBR 6809)

Em cada seção paralela ao plano de projeção, o perfil considerado deve estar contido entre duas linhas geradas por círculos com 0,04 mm de diâmetro, cujos centros se situam sobre uma linha geométrica teórica, indicado na Figura 8 (b).

O campo de tolerância de forma de uma superfície qualquer é limitado por duas superfícies geradas por esfera de diâmetro “t”, cujos centros situam-se sobre a superfície geométrica teórica (Figura 9).

Ver exemplo de aplicação na Figura 9.

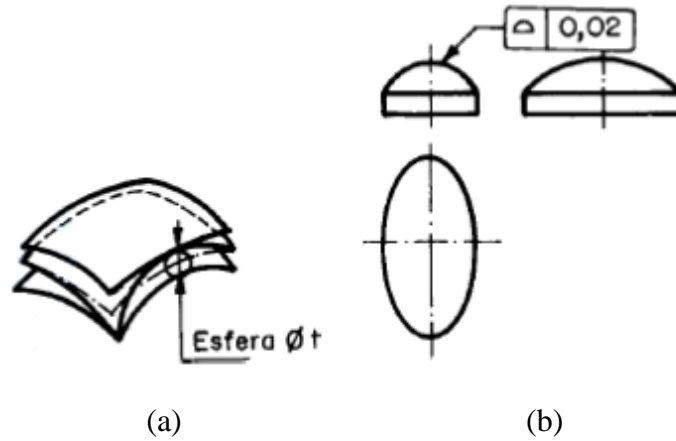


Figura 9 - (a) Superfícies regadas pelo diâmetro “t”; (b) indicação da tolerância no desenho técnico. (Adaptado de: NBR 6809)

A superfície deve estar compreendida entre duas superfícies geradas por esferas com 0,02 mm de diâmetro, cujos centros situam-se sobre a superfície geométrica teórica indicada na Figura 10.

2.8 SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE

2.8.1 PERFIS NACA

As séries de aerofólios NACA, de 4 dígitos, 5 dígitos e as modificada 4 / 5 dígitos, foram geradas utilizando equações analíticas que descrevem o *camber* (curvatura) da linha-média (linha de centro geométrica) da seção do aerofólio, bem como a distribuição de espessura na seção ao longo de seu comprimento (Aerospaceweb, 2012).. Mais famílias foram inseridas ao longo do tempo, incluindo a série de 6, que são formas mais complicadas derivadas dos métodos teóricos, em vez de geométricos, a Figura 10 indica as principais partes na formulação de um perfil série NACA.

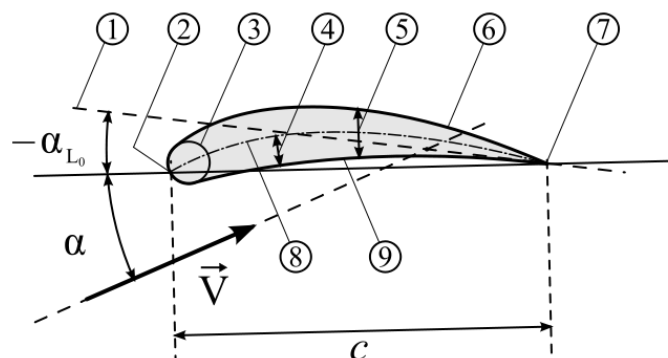


Figura 10 - 1: zero lift line; 2: leading edge; 3: nose circle; 4: camber; 5: thickness; 6: upper surface; 7: trailing edge; 8: main camber line; 9: lower surface (Adaptado de: Mooran, 1984)

A série de perfis aerodinâmicos foi criada para aplicações em jatos, regimes supersônicos e aviões à pistão. Devido ao fato de ter sido otimizada para altas velocidades, alto coeficiente de sustentação e pequenos arrastos em uma faixa reduzida de trabalho (Aerospaceweb, 2012).

Embora a NACA já tenha experimentado métodos teóricos aproximados que produziram a série 2 da série 5, nenhuma dessas abordagens foi suficiente para produzir com precisão o comportamento desejado do aerofólio citado. A série 6 foi derivada usando um método teórico melhorado, focado em especificar a distribuição de pressão desejada, no qual foi empregada matemática avançada para derivar a forma geométrica exigida. O objetivo desta abordagem foi desenhar perfis aerodinâmicos que maximizam a região sobre a qual o fluxo de ar permanece laminar. Ao fazê-lo, o arrasto ao longo de um pequeno intervalo de coeficientes de sustentação pode ser substancialmente reduzido. A convenção de nomenclatura da série 6 é mais indefinida, se comparada com qualquer das famílias discutidas até agora, devido às muitas variações diferentes existentes (Aerospaceweb, 2012).

2.8.2 LENTES ASFÉRICAS

As lentes esféricas são aquelas nas quais o raio de curvatura é igual em toda a seção transversal da lente, sendo que os raios luminosos proporcionam aberrações de imagem nas bordas. A

Figura 11 mostra um esquema dessa lente, com os raios de luz. Nota-se que nessas lentes não se pode concentrar toda a luz em um único ponto.

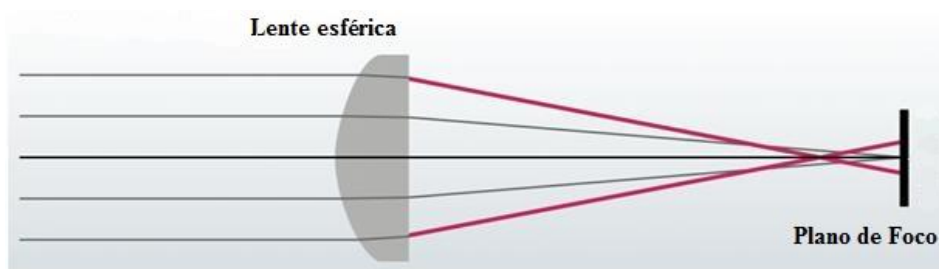


Figura 11 – Convergência de uma lente esférica (Adaptado de: ARRI, 2011)

Para contornar os problemas das aberrações esféricas, distorções de imagem que ocorrem nas bordas da lente, foram desenvolvidas as lentes asféricas. Estas lentes são aquelas com superfícies curvas complexas, em que o raio de curvatura muda de acordo com a distância a partir do eixo do feixe de luz. A Figura 12 apresenta um esquema do caminho dos raios luminosos atravessando uma lente asférica.

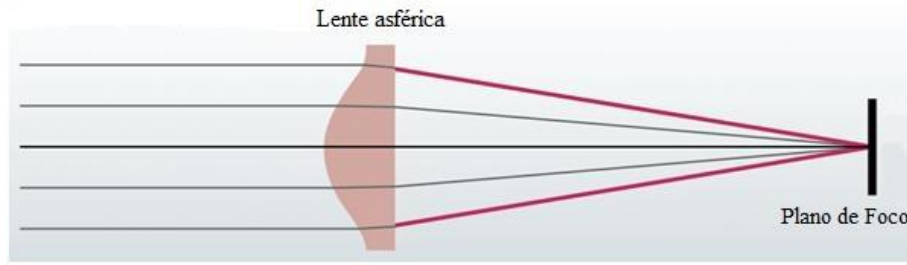


Figura 12 – Convergencia de uma lente esférica(Adaptado de: ARRI, 2011).

A forma mais comum de representar uma superfície esférica é definida pela equação 13 (Quin, 2012) para o perfil da lente.

$$z(y) = \frac{y^2}{R} \left(\frac{1}{1 + \sqrt{1 - (k+1)\frac{y^2}{R}}} \right) \quad (13)$$

Nessa equação, os parâmetros “z” e “y” são a distancia do fundo ao topo da lente e a distância coordenada a partir da origem, respectivamente, enquanto que o valor “R” equivale ao raio de curvatura, raio de um circulo próximo ao vertex(Quin, 2012), a Figura 13 ilustra cada elemento .

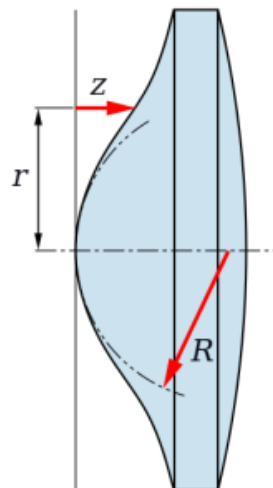


Figura 13 – Elementos de uma lente esférica(Adaptado de: ArtMechanic,2012).

O parâmetro “k” é definido como a constante que determina a forma da seção cônica revolucionada sobre o eixo óptico (posição $y = 0$). Os valores assumidos pela constante estão associados à curvatura, como mostrado abaixo.

$$k \begin{cases} < -1, \text{hiperparabolóide} \\ = -1, \text{parabolóide} \\ -1 < k < 0, \text{elipsóide} \\ = 0, \text{esfera} \\ > 0, \text{tabularelipsóide} \end{cases} \quad (14)$$

A Figura 15 mostra a influencia do k, com outros parâmetros constantes.

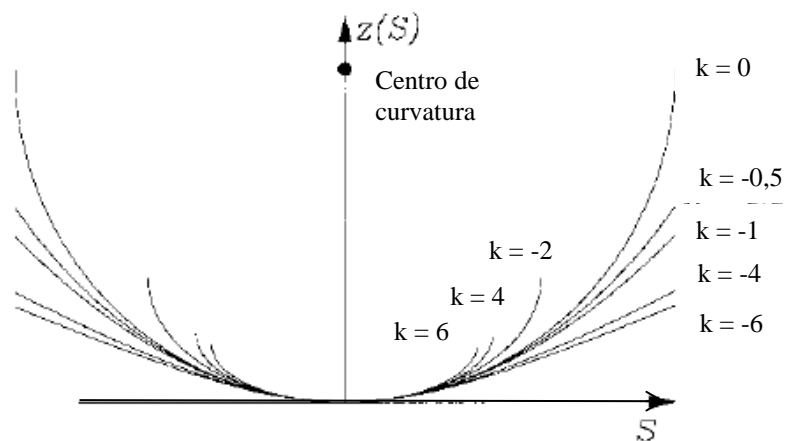


Figura 14 – Influência do k na curvatura (Adaptado de: Malacara, 2004)

No campo de determinação de desvios de forma, o autor Nasir Mannan (Nasir, 2009), mediu uma pá de turbina a gás nova com o auxílio de um *scanner*, e foi efetuado um estudo de desvios entre o modelo medido (real) e o modelo CAD teórico. Em seguida uma pá desgastada pelo uso foi medida e foi realizado o estudo de desvios, para a comparação entre os modelos e localizar as áreas que sofreram desgaste devido ao uso. Os resultados indicaram desgastes (desvios negativos) de até 0,0126 mm nas pás após o uso.

No trabalho do autor Igor Budak (Budak et al., 2013) comparam a utilização e as características de nove sistemas de digitalização dentária, realizando a medição com dois sistemas mais abrangentes e comparando a precisão dos scanners pelos desvios em relação ao modelo CAD. Uma arcada dentária padrão foi digitalizada pelos diferentes sistemas de medição e alinhados. O estudo de desvio 3D permitiu concluir que a maioria dos desvios são positivos, com média de -0,442 mm e desvio padrão de 1,411 mm, e do estudo de perfil (2D), concluiu-se que a precisão do scanner depende da posição do objeto e de sua forma, apresentando uma média de 0,013 mm de desvio padrão de 0,026 mm para a primeira seção de corte analisada.

3 METODOLOGIA

3.1 EQUIPAMENTO

3.1.1 Máquina de Medir por Coordenadas Modelo Braço Articulado(CMA)

O equipamento utilizado foi uma Máquina de Medir por Coordenadas modelo braço articulado (CMA) da ROMER®, com 6 graus de liberdade, com 0,087 μm de incerteza previamente calibrado, mostrado na Figura 14. Utilizou-se o programa *G-Pad* para aquisição dos pontos. Certificado de Calibração em Anexo.

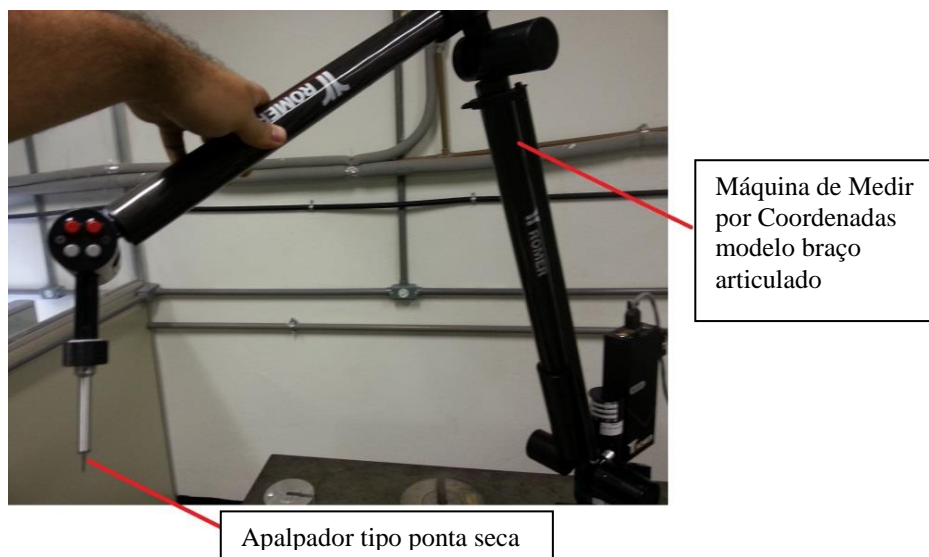


Figura 15 – Foto da MMC modelo braço

3.1.2 Scanner laser

O scanner 3D possui uma unidade para emissão de feixes de laser e sensores para captação de pontos como citado nas referências bibliográficas. A Figura 15 mostra o *scanner* utilizado durante os testes com suas unidades e componentes. A base *AutoDrive* para posicionamento da peça com o movimento de rotação em relação ao eixo é chamada de *TILT* e o movimento giratório é chamado de *TURN*, a qual é conectada diretamente com o *scanner* via conexão USB, em sua estrutura é encontrada uma haste com dois suportes para fixar a peça a ser medida. Esta base suporta um peso máximo de 20 lb (9 kg).

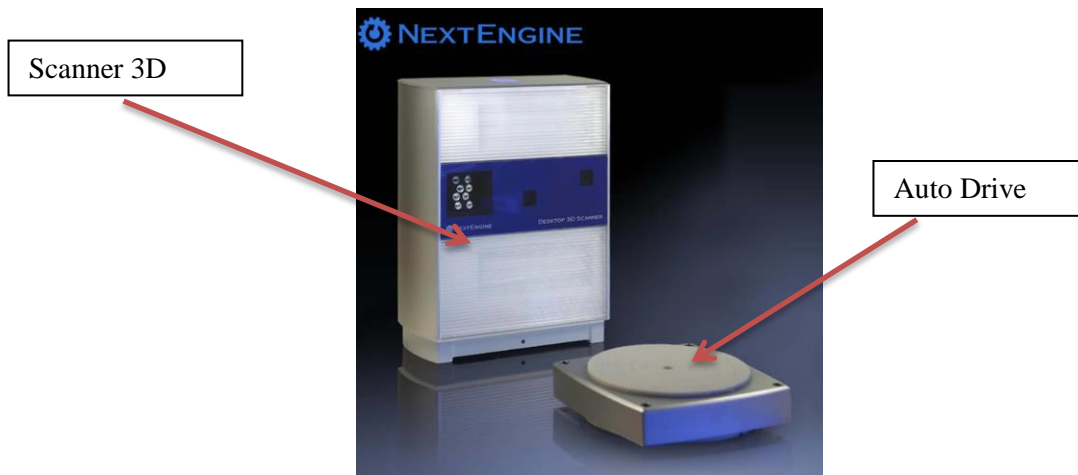


Figura 16 - : Scanner 3D, (Adaptado de: <http://www.javelin-tech.com>)

A unidade principal funciona com o princípio de triangulação dos feixes de laser emitidos.

Podem ser emitidos quatro feixes lasers, os quais incidem na superfície da peça e são refletidos, divididos cada um em pares e em seguida direcionados corretamente por lentes para serem captados por sensores internos receptivos que irão criar um código computacional para cada ponto refletido, gerando então uma nuvem de pontos e, por fim, uma malha de pontos baseada na união de pontos via triangulação. O tamanho dos triângulos formados com os pontos coletados vai depender das configurações iniciais do *software* que auxilia a medição.

O *scanner 3D NextEngine* possui as seguintes especificações, *Data Sheet* do aparelho em Anexo:

- Iluminação para Foto: Iluminadores de embutidos de luz branca especialmente diversificado com tri-fósforo e larga gama de cor;
- *AutoDrive*TM: Servo posicionador controlado pelo *scanner*. Suporta até 20 lb(9 kg);
- Tamanho do Objeto: Sem limite predeterminado. Objetos maiores que o campo podem ser formados com o *software* fornecido;
- Tamanho do campo: 5.1" x 3.8" (Macro) e 13.5" x 10.1" (Wide). *HD PRO Extended Mode* 22.5" x 16.75";
- Acurácia Dimensional: ± 0.005 " in (0,127 mm) no modo Macro, *Extended* e ± 0.015 " in (0,381 mm) no modo *Wide*;
- Conjuntos de dados típicos: Modelos típicos pequenos possuem um quarto de milhão de pontos, após amostragem e otimização.

O *scanner 3D* em geral funciona da seguinte maneira: é feita a leitura dos pontos da peça pela reflexão de luz em lentes e sensores e estes pontos são computados e posicionados pelo *software* responsável pela captação de pontos formando um modelo tridimensional para análise no *software*.

O scanner “Next Engine” funciona através do princípio de triangulação, sendo um aparelho que não realiza contato nenhum com a peça a ser modelada e medida. Possui internamente um emissor de feixe de *lasers*, uma câmera e lentes de direcionamento. O princípio é chamado de triangulação, pois, o sensor que emite o feixe de *laser*, a câmera e o *laser* formam um triângulo, como mostrado na Figura 16. Após o feixe de ser emitido ele é refletido na peça, retornando para o *scanner* em direção a câmera interna. Esta faz o reconhecimento do local onde o feixe refletiu na peça através de cálculos feitos com o uso das informações geradas pelo triângulo formado entre a câmera e o feixe.

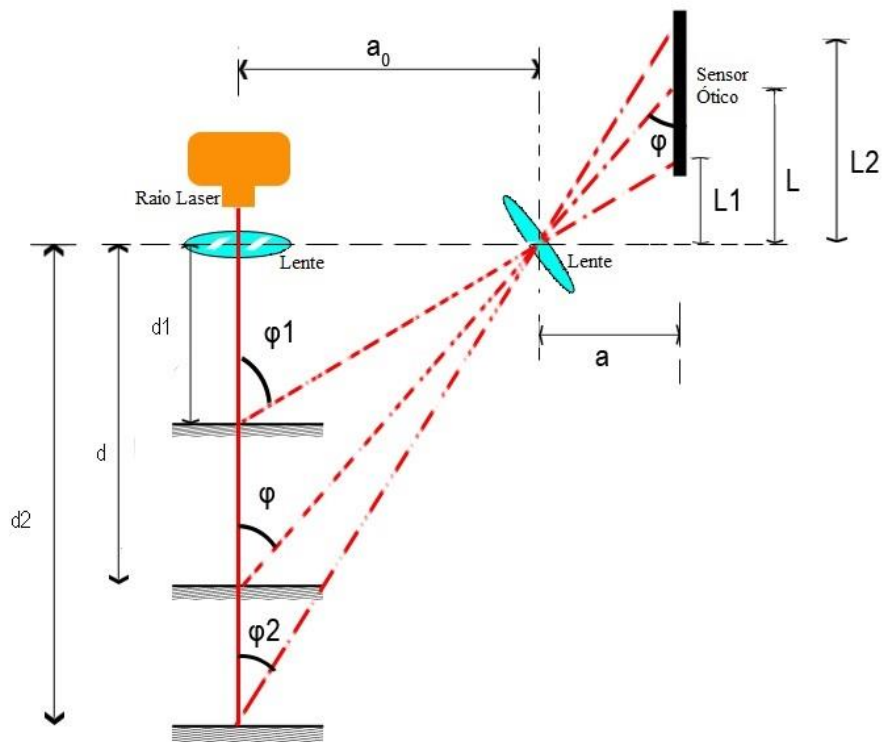


Figura 17 – Esquema de triangulação dos lasers

Como os scanners 3D sobrepõem varias novem de pontos, certas áreas ficam com maiores concentração de pontos que outras. Caso a nuvem não seja filtrada o desvio padrão irá apresentar valores que não condizem com a realidade, pois foi mascarado pela concentração de pontos em uma área com ou sem erro. A Figura 18 ilustra o fenômeno.

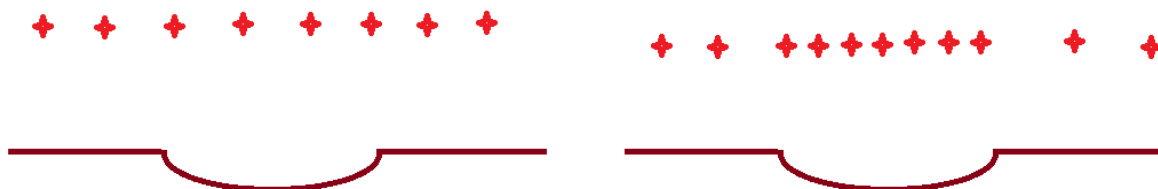


Figura 18 – Fenômeno da sobreposição e nuvens de pontos

3.1.3 Máquina de Medir por Coordenadas modelo Cantilever

Para a medição com contato foi utilizada a *QM-Measure 353* da empresa *MITUTOYO*. Um sistema simples com um braço para coleta de pontos e uma mesa para fixação das peças. A máquina é acoplada diretamente à um computador e através de um *software* chamado *MCOSMOS*, é possível se fazer a medição.

O *QM-Measure* possui as seguintes especificações (Catálogo fabricante da MMC):

- Alcance por eixo (mm): 300 eixos X e Z, 500 eixo Y
- Resolução (μm): 0,5
- Incerteza (μm): 3,0
- Peso máximo sobre a mesa de trabalho (kg): 30
- Altura máxima de peças a serem medidas (mm): 410

O braço da máquina possui 3 graus de liberdades para os eixos “X”, “Y” e “Z”, sendo possível fazer a fixação dos eixos, caso seja necessário, para uma medição mais precisa. Funciona através de um sistema pneumático, o que facilita sua movimentação, além de que, em sua extremidade há um apalpador para coletar os pontos. A Figura 19 mostra o braço da MMC.



Figura 19 - braço da máquina de medir por coordenadas QM-Measure 353

Existem alguns tipos de apalpadores para coletar os pontos, com contato ou sem contato (ópticos) direto com a peça a ser medida. Foi utilizado apenas um apalpador articulado esférico mostrado na Figura 20.

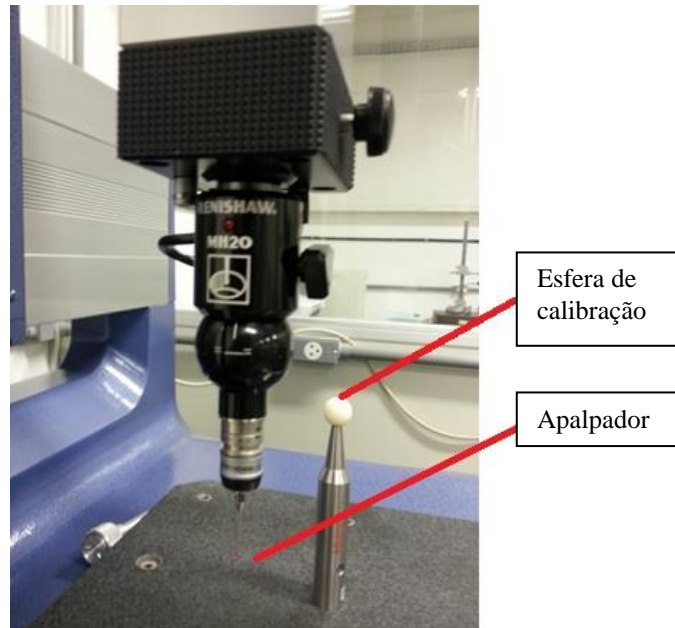


Figura 20 - Apalpador articulado utilizado na MMC

Importante que se faça a seleção do tipo de medição a ser feita, um plano, um ponto, uma reta, uma circunferência, e este será representado pelo software de acordo com os pontos medidos como mostrado na Figura 21. Certificado de Calibração em Anexo.

O software MCOSMOS ligado diretamente com a MMC realiza todo o processo de reconhecimento, compensação e alinhamento dos pontos coletados pelo sensor localizado na extremidade do apalpador. Primeiramente é preciso fazer a calibração do sensor e a coleta de pontos para um referencial de posição e do diâmetro do apalpador. Em seguida, com um simples toque na peça a ser medida, os pontos coletados são expostos na tela do computador.

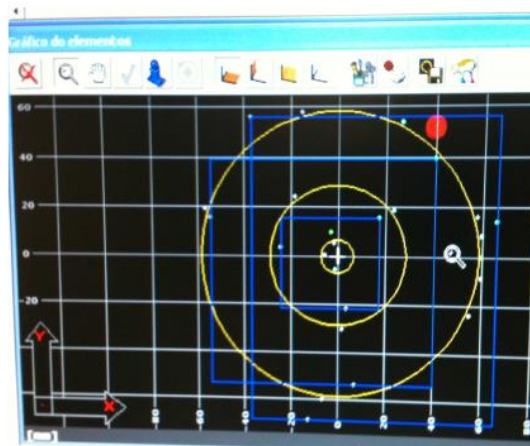


Figura 21 - exemplo de planos medidos pelo software MCOSMOS

3.2 SOFTWARE

3.2.1 Rhinoceros 5.0

A modelagem dos modelos foi efetuada com o menor número possível de comandos para a redução do tamanho dos arquivos e manter ainda assim a praticidade do método.

No programa Rhinoceros, utilizamos os comandos:

- *Loft*: Cria uma superfície através de curvas de perfil selecionadas que definem a forma da mesma. A configuração usada no artigo foi *Flip Automatic Natural, Stile:Loose, Cross Sectioncurve options: Rebuild with 50 control points*;
- *CurveThroughPt*: Adapta-se uma curva através de um ponto de objetos selecionado, criando uma curva NURBS, em que podemos controlar se ela é fechada ou aberta, o grau do polinômio, tipo de curva e a distribuição de nós. Utilizamos neste artigo grau 3, curva interpolada e distribuição uniforme de nós;
- *ExtractPt*: Extrai pontos de uma determinada curva, necessário para se obter os pontos do arquivo IGES importado, pois o que G-Pad exporta pelo IGES são linhas seguindo
- *Import*: importa arquivos IGES para a mesa de trabalho;
- *Array Polar*: Comando para copiar radialmente um elemento ao redor de uma entidade, como um ponto ou eixo;
- *Revolve*: Comando para cria uma superfície de revolução, a partir do giro de um perfil em torno de um eixo;
- *Align*: Comando que delimita os corpos em volumes e os alinha horizontalmente, verticalmente e axialmente;
- *PointDeviation*: retorna um gráfico de quanto os pontos estão normalmente distantes da superfície mais próxima, gerando fios coloridos referentes ao desvio.

Também foi utilizado o plug-in MathforV4 para a criação de pontos ao longo de equações de curvas.

3.2.2 ScanStudio HD PRO

O software *ScanStudio* auxilia o scanner em todo o processo de medição do Scanner 3D, gerando uma malha de pontos para cada imagem formada. Alguns ajustes nas imagens, ou seja, nas malhas de pontos geradas, podem ser feitos pelo software *ScanStudio*.

No caso da medição de peças que apresentam características que podem dificultar a medição e a captação de pontos como acabamento superficial ou por aspectos relacionados a cor ou grande reflexão de luz (Piratelli,2013). Dessa maneira, algumas providências podem e devem ser tomadas como a utilização de pincéis, pós ou sprays que marcam a peça, auxiliando o laser na captura de pontos. Podem-se fazer também pequenas marcações como referência, colocando pontos de cores diferenciadas ou apenas uma cor, o que facilita o alinhamento das imagens geradas.

Após ser feita a calibração inicial, tanto o scanner quanto o software estão prontos. Escolhida a peça a ser medida, a mesma deve ser fixada na base através do suporte. O software é capaz de formar uma família por medição, mas ao se repetir o comando repetidamente, é possível ter várias famílias abrangendo assim várias posições.

É possível que se faça uma seleção da parte que se quer medir, não sendo necessário que o scanner faça a captação de todos os pontos que aparecem na tela e estão sendo “vistos” pelo scanner.

Usa-se esta seleção para que não entre nas imagens formadas, como os fixadores por exemplo. Nessas configurações iniciais do software *ScanStudio* existem os seguintes controles:

- Posição (*Positioning*) – quantas posições se quer medir, a peça toda (360°), apenas um ângulo (*single*) ou 3 ângulos consecutivos (*bracket*), quando a peça se encontra sobre a base *AutoDrive*.
 - 360°: Todos os ângulos são explorados e medidos. O número de divisões (comentado logo abaixo) irá influenciar a rotação da base automática de medição. Como exemplo, tendo a número de divisões em 4, ao se comandar uma rotação (*turn*), a base irá girar em 90° e a cada imagem formada será feito um giro com essa angulação de acordo com o número de divisões. Ao terminar a medição, as imagens geradas são agrupadas em uma única família.
 - “*Bracket*” (3 ângulos consecutivos): É medida somente a primeira vista posicionada e mais duas sendo uma de cada lado referentes a vista inicial. Assim como na opção 360° o número de divisões também controla o ângulo de rotação da base automática e as 3 imagens geradas serão agrupadas em uma única família.
 - *Single* (1 ângulo): Nesta opção, apenas um ângulo ou vista é usada e gerará apenas uma imagem. Divisões (*Divisions*) – é possível se escolher quantas divisões se quer na captação das imagens, ou seja, quantas imagens serão geradas dependendo da angulação escolhida. Esta opção divide a peça em ângulos iguais e cada parte dessas irá gerar uma imagem. Quanto maior o número de divisões, mais precisa é a medição, pois mais imagens da peça serão geradas. Depende somente de quão complexa é a geometria da peça a ser medida.
- Número de pontos (*Points/In²*) - Define quantos pontos serão captados na peça a ser medida. Quanto mais pontos escolhidos, mais preciso será o modelo tridimensional.
- *Target* – definido para o tipo de peça escolhido quanto a sua coloração superficial. As opções são *DARK* para peças escuras, *NEUTRAL* para peças neutras e *LIGHT* para peças claras.
- *Range* - Controla a “visão” que o scanner terá da peça escolhida. Depende do tamanho da peça e da resolução da imagem a ser gerada.

Escolhidos todos os parâmetros, ajustes e feito o tratamento da superficial caso seja necessário, inicia-se o processo de medição.

Terminada a medição, pode-se usar algumas ferramentas básicas ainda no ScanStudio para se fazer pequenos ajustes nas imagens tridimensionais criadas, como recortes, alinhamento de imagens, entre outras.

Para cada uma dessas ferramentas há uma tolerância associada, a qual deve ser observada com cautela, pois influenciará a formação do modelo. Existe a possibilidade de se escolher qual a margem de tolerância que se quer antes de realizar o processo de ajuste com qualquer uma das ferramentas abaixo, exceto a ferramenta “*TRIM*”. Cada ajuste irá acrescentar um erro associado no modelo gerado.

As ferramentas de ajuste do software são as seguintes:

- “*Trim*” – Ferramenta utilizada para cortar pedaços das imagens que não são desejadas, ou seja, não fazem parte da peça estudada e medida. Para isso basta fazer a seleção das partes indesejadas e realizar o corte. Não é recomendado que se fizesse este tipo de ajuste na peça após o alinhamento, somente em partes que estão se sobressaindo. A ferramenta “*trim*” pode ser usada a qualquer momento, porém é recomendado que fosse usada antes do alinhamento.
- “*Align*” – Utilizado para realizar o alinhamento entre as imagens formadas. É recomendado que realize pequenas marcações na peça antes de iniciar o processo para que seja mais fácil realizar o alinhamento manual com o programa. Pode-se fazer o alinhamento de dentro da família gerada, ou seja, imagens geradas todas de uma vez só, ou entre várias famílias (*multi-family*), onde serão alinhadas as famílias que foram geradas separadamente. O software realiza um alinhamento automático, porém não muito preciso e pode não estar de acordo com o desejado, como no caso do alinhamento entre imagens geradas na posição horizontal e vertical, sendo necessário se fazer o alinhamento manual. Para se fazer o alinhamento manual, separe as famílias(*Detach*) e posicione pinos de referência em uma imagem e se posicione o mesmo pino (cor) na imagem a ser alinhada, faça o ajuste de tolerância de desvio entre as imagens e solicitar o alinhamento pelo software, O numero total de pontos de referencia é 9, se for possível alinhar os nove pontos, o alinhamento ocorrerá mais facilmente e em seguida é aconselhável usar o subcomando refinamento (*Refine*) para terminar de fazer o alinhamento por algoritmo, mas ele também acrescenta erros ao modelo. Dentro das opções do comando é possível alterar o numero de iterações, tamanho de amostra, se o alinhamento anterior deve se mover para se ajustar ao novo.
- “*Fuse*” – Após realizar o alinhamento entre imagens é preciso que se junte todas as imagens alinhadas em uma única família, e terminado o processo, será formada uma nova família com apenas uma malha de pontos. Dentro da ferramenta, existe a função “*regenerate*” que pode ser utilizada quando se deseja recriar as imagens antes dessa junção. Ainda dentro desta ferramenta, a função “*volume-merge*” irá criar uma nova família com todas as outras de acordo com o volume de cada uma. É preciso sempre trabalhar com imagens que ainda não foram tratadas e antes de realizar tal função, deve se fazer o ajuste da tolerância de desvio entre as imagens, assim como na ferramenta “*align*”.

Existem algumas opções de visualização do modelo gerado. Pode se usar a visualização da peça com a cor e textura capturadas pelo scanner, superfície sem textura e cor, pontos capturados e malha criada com os pontos criados.

Feita toda a captura de imagens e seus ajustes manuais com o auxílio do software, foi feita a exportação do modelo da nuvem de pontos em .xyz , um tipo de que que armazena em três colunas a posição cartesiana de cada ponto da nuvem.

3.2.3 CATIA V5R18

O CATIA foi utilizado para o alinhamento de modelos teóricos, formulados do CAD e modelos teóricos e equações, e medidos, advindos da medição dos modelos reais.

Ambientes de trabalho utilizados:

- *Digitized Shape Editor*
- *Quick Surface Reconstruction*
- *Generative Shape Design*

Comandos utilizados:

- *Open*: Para abrir arquivos nativos, e em outros formatos, como o IGES.
- *Deviation study*: estudo de desvio de pontos a superfícies, que retorno valores estatísticos para análise posteriores e gráficos de barra de cor.
- *Copy*: copia a entidade selecionada e é posicionada manualmente;
- *Axis*: cria um eixo a partir de um círculo, plano e ponto, direção e ponto;
- *Point*: cria um ponto coordenado no desenho;
- *Filter*: Comando reposnável por homogeneizar a nuvem de pontos. Você pode mudar o seu raio através da opção homogêneo na caixa de diálogo. Isso modifica a dimensão esfera na tela e o percentual de filtragem:
 - A esfera passa por cima da nuvem de pontos, a partir do primeiro ponto encontrado.
 - Todos os pontos que estão no interior da esfera, em seguida, são ocultadas.
 - A esfera vai para o ponto seguinte e remove os restantes pontos que ela contém, e assim por diante.
- *Import*: Comando para importar a nuvem de pontos;
- *Align by Best Fit*: Comando que alinha a nuvem de pontos a superfície através de uma rotina de topologia, aconselh-se utilizar e alianhar grosseiramente com o comando *Align using the Compass*, antes de executar este passo ;
- *Align using the Compass*: alinhamento manual entre a nuvem de pontos e a superfícies.

3.2.4 GEOGEBRA

O software GEOGEBRA é um aplicativo que combina conceitos de geometria e álgebra para ensino didático em escolas de nível médio.

Segundo produtor do software o programa permite realizar construções geométricas com a utilização de pontos, retas, segmentos de reta, polígonos etc., assim como permite inserir funções e alterar todos esses objetos dinamicamente, após a construção estar finalizada.

No trabalho, este software foi utilizado para a identificação dos parâmetros de curva esférica, onde o modelo teórico fora inserido no programa com vários parâmetros pré-determinados no EES, citado abaixo, e assim identificado qual a curva com o melhor ajuste, avaliando o módulo da distancia vertical do ponto medido a curva.

3.2.5 *Engineering Equation Solver*

Para resolver a equação da curva esférica e encontrar uma solução simplificada da mesma, foi utilizado o programa EES (*Engineering Equation Solver*), o programa também pode ser usado para resolver equações diferenciais e integrais, funções etc.

Apesar de ele ser voltado para resolução de sistemas lineares, foi utilizada sua parametrização para encontrar as constantes da curva esférica para cada ponto medido na lente.

Este programa retorna valores de variáveis não conhecidas, então se inserirmos o resultado de uma equação com todas as suas constantes a não ser uma, o EES irá retornar o valor desta, a interpretando como a variável do sistema linear a ser calculada.

Com a equação inserida, elaboramos também uma tabela paramétrica variando o valor de certas variáveis, y , z e R , retornando assim vários valores de k para serem analisados.

3.2.6 MATLAB

O MATLAB é um programa de computação técnica que integra computação, visualização e em um ambiente de programação fácil de usar, com linguagem de alto nível, em que os problemas e soluções são expressas em notação matemática conhecidas. Neste software é possível elaborar rotinas de cálculos onde o programa realizara por um determinado numero vezes uma operação delimitada pelo programador.

3.3 PROCESSO DE MEDIÇÃO

Utilizando o diagrama apresentado na Figura 22, pode-se determinar o desvio de forma e os processos de fabricação de qualquer peça, seja de forma livre ou forma regular(círculo, plano, etc.).

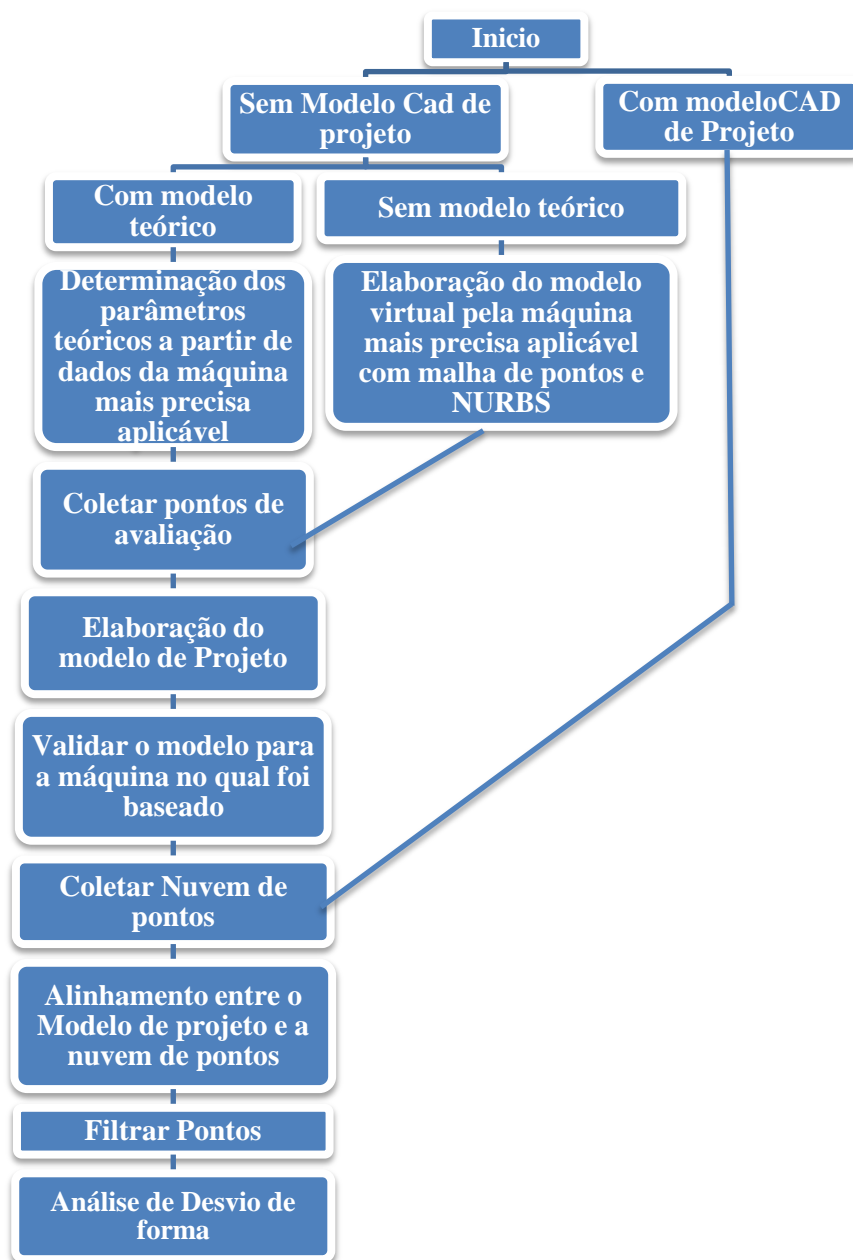


Figura 22 - Fluxo de trabalho generalizado.

3.3.1 Peças selecionadas

3.3.1.1 Lente esférica

Lente Esférica utilizada em retroprojektor, tem uma forma teórica conhecida na qual é possível estimar os parâmetros, foto na Figura 23.

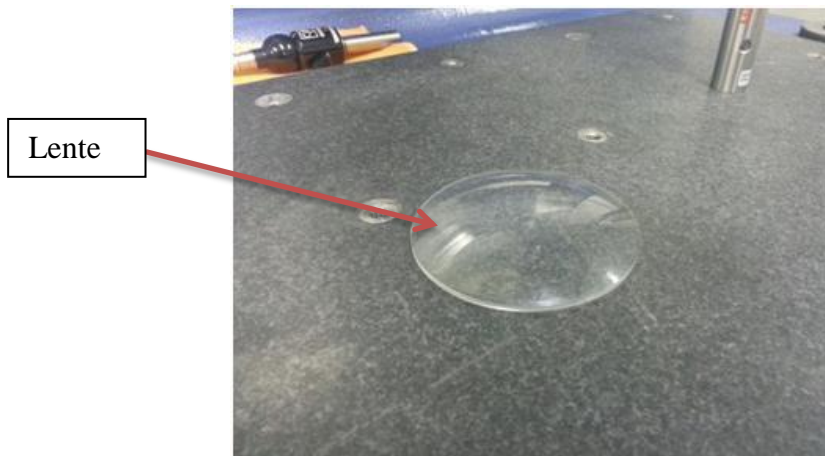


Figura 23 – Lente de projetor asférica

3.3.1.2 Rotor

O compressor centrífugo, Figura 24, foi escolhido devido a complexidade de suas pás, que além de apresentarem um perfil aerodinâmico elas vão se torcendo em relação ao eixo de rotação. Como a peça não apresenta solda ou detalhes de fundição, infere-se que sua fabricação utilizou de CAM para a confecção do rotor.



Figura 24 – Compressor radial estudado

3.3.1.3 Pás de aerogerador

No Projeto de Graduação “Estudo aerodinâmico e de funcionamento de uma turbina eólica no Distrito Federal”, foram produzidas pás, a partir do perfil NACA 63-215 da Série 6, de um aerogerador de fibra de carbono e fibra de vidro, e seu modelo CAD original e molde macho, Figura 25, serão estudados para se identificar desvios de formas, já que por se tratar de um processo no qual foi utilizado CAM para a fabricação do molde macho este é um bom exemplo para estudar o desvio de forma que uma usinagem por CAM causa.



Figura 25 – Pá modelo para a produção do molde fêmea e das pás de fibra de carbono

3.5 ANÁLISE

3.5.1 Desvio de Forma

Neste trabalho define-se como desvio de forma, toda variação da superfície em relação a geometria teórica para uma dada superfície.

Quando os modelos teóricos e reais, formados por superfícies de forma livre, são sobrepostos, podemos notar diferenças em certas áreas que denominamos desvios de forma.

Podemos quantificar estes desvios através da coleta de pontos nestas áreas defeituosa e analisar a média dos desvios e sua repetitividade através do desvio padrão. A Figura 26 ilustra esquematicamente o procedimento para realizar o desvio de forma.

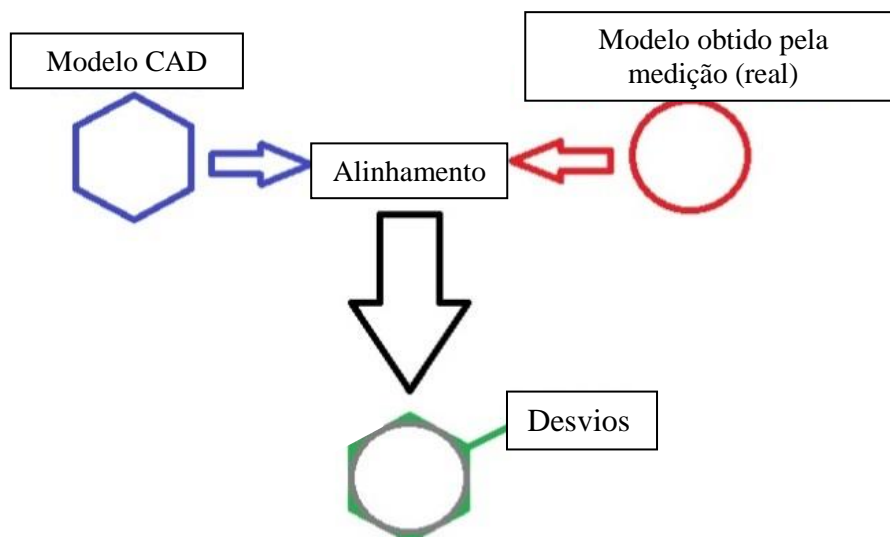


Figura 26- Esquema didático para indenficar desvio de forma

No *ScanStudio* HD, foram digitalizados os objetos segundo as condições de suas superfícies e tamanhos (Piratelli et al, 2013). Alinham-se as famílias de nuvem de pontos com o comando *Align*, nas opções de *Align* foi utilizada uma amostra de 1/64 e 50 iterações. Após o modelo alinhado, use o comando *Fuse* em 0,0000 para que nenhum ponto seja eliminado no processo de fusão, então um só arquivo compreenderá todas as nuvens. Em File, e salve o arquivo como .xyz .

Para realizar o estudo de desvio, siga o tutorial no Anexo 4.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 LENTE ASFÉRICA

4.1.1 Medição na MMC

A lente foi limpa com álcool Etilico Absoluto P.A (Etanol) para retirada de impurezas que possam interferir na coleta dos pontos ou na marcação dos mesmos. Após o processo de limpeza da peça elementos de fixação foram grudados entre a lente a mesa da Cantilverver.

Para passar a curva de pontos sobre o centro da lente, foi medido o centro do cilindro base da lente e pelo MCOSMOS foi possível medir o centro do cilindro (Figura 27). Cuidadosamente o eixo x foi levado até o ponto central e travado, desta forma somente os eixo y e z poderiam se mover, coletando assim um perfil de pontos com aponta de prova esférica de rubi, de 1,98 mm de diâmetro.

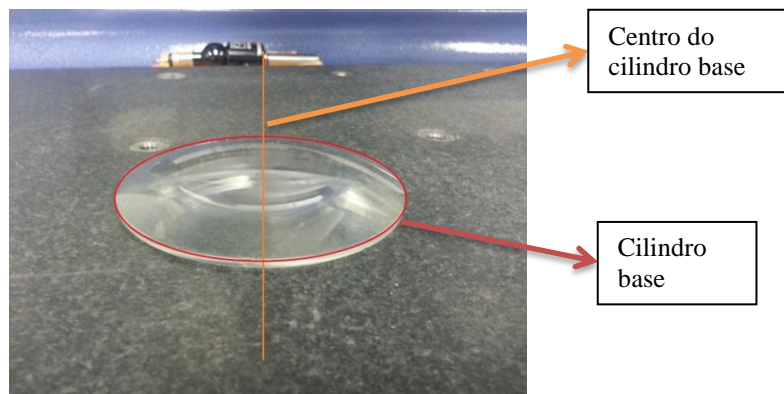


Figura 27 - lente esférica utilizada no trabalho

O próximo passo realizado foi a seleção dos pontos a serem coletados. Para esta peça foram escolhidos pontos no comprimento da curva da lente. Para esta peça foram escolhidos 36 pontos no comprimento da curva sobre a lente. O espaçamento de cada ponto foi de aproximadamente de 2 mm.

O processo de coleta de pontos foi realizado de forma manual em que o operador manuseia o apalpador da MMC. Neste momento foi relevante verificar a velocidade de aproximação do apalpador sobre a peça, inclinação, rotação e também a não coleta acima da marca, devido à espessura adicionada pela tinta.

Com os pontos coletados e armazenados no formato IGES foi possível trabalhar com o software CATIA-V5 para modelagem do modelo CAD. Já o GEOGEBRA utilizará os dados importados no formato .xls, formato do Microsoft Office Excel, para uso das tabelas. Para a construção da curva foram escolhidos apenas 10 pontos, que foram escolhidos no CATIA, para análise com o software GEOGEBRA. Nesta fase do experimento foram necessárias somente as coordenadas dos pontos em y e z para compor a curva.

4.1.2 Modelo teórico

Através do Geogebra avaliou-se cada k com R de 103,965 mm e um y máximo de 45 mm, diâmetro da lente, foi constatado que para o k de 0,09 gerava menos desvios verticais se aproximando assim mais do perfil da lente real, um detalhamento desta avaliação será apresentada no tópico Desvio de Forma.

Através do *Plug-in* MathforV4, foi possível inserir 1000 pontos ao longo do perfil esférico e em seguida esta foi revolucionada em relação ao eixo de sua origem, através do comando Revolve, gerando a superfície de uma lente teórica, ilustrado na Figura 28.

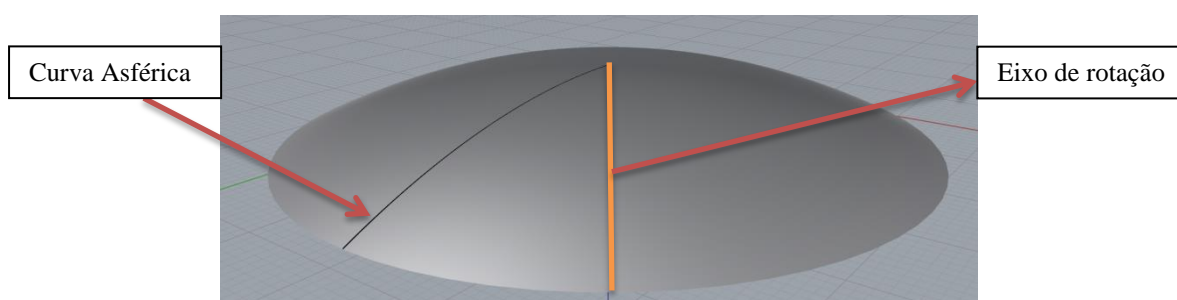


Figura 28 - Lente teórica gerada no Rhinoceros

No cálculo do raio de curvatura, utilizamos a média dos pontos de adquiridos, pois como não sabemos de qual parte da curva a lente pertence, do cume ou da maior parte da curva, esta hipótese é base para a formulação da curva.

4.1.3 Medição no Scanner

Devido a translucidez da lente, a lente foi borrifada com o pó que acompanha o Scanner NextEngine para a aquisição dos pontos e presa a base *AutoDrive*. A seguinte configuração foi utilizada:

- Bracket;
- 8 divisões;
- HD 1;
- Light;
- Macro;

Desta forma, o scanner trabalha com a menor incerteza, 0,127 mm, e as nuvens se alinhariam automaticamente tomando como referencia o posicionamento da base Autodrive. Após o alinhamento a precisão resultou em 0,0254 mm.

4.1.4 Alinhamento

No software CATIA V5, importa-se a nuvem de pontos e a superfície referência, alinha-se manualmente com o comando *Align using the Compass* e em seguida é aplicado o comando *Align by Best Fit*, que alinha automaticamente a nuvem de pontos em relação à superfície, retornando os seguintes dados da Tabela 1, a lente otimizada será descrita no próximo tópico.

Tabela 1 – Valores de Best Fit para modelos de Lente

	Lente teórica com Nuvem da MMC	Lente teórica com Nuvem do <i>Scanner</i>	Lente otimizada com Nuvem da MMC	Lente otimizada com Nuvem do <i>Scanner</i>
Número de iterações	2	1	7	1
Número de pontos usados no cálculo estatístico	305	15288	305	15288
Desvio mínimo [mm]	0,000233	0,000003	0,000003	0,000003
Desvio médio [mm]	0,016500	0,032569	0,011492	0,032569
Desvio máximo [mm]	0,058639	0,32485	0,0114923	0,32485
Desvio Padrão [mm]	0,011608	0,025482	0,007834	0,025482
Amplitude [mm]	0,058872	0,324853	0,0114923	0,324853

Como o CATIA não é um software OpenSource, ele não informa os métodos empregados para o alinhamento.

4.1.5 Filtro

O filtro homogêneo foi aplicado através do comando *Filter* no CATIA de 0,8 mm foi aplicado sobre a nuvem de pontos, retirando da nuvem 95,4% dos pontos originais.

4.1.6 Desvios de forma

A lente adotada no estudo é esférica, pois sua comparação com uma calota esférica gerava erros de grande magnitude, logo ela pertencia a classificação de lente.

A Tabela 2 apresenta os valores escolhidos para as coordenadas que formam o perfil da lente.

Tabela 2 - Pontos medidos para compor a curva da lente

Coordenadas (mm)	Pt1	Pt2	Pt3	Pt4	Pt5	Pt6	Pt7	Pt8	Pt9	Pt10
y	9,360	15,150	19,170	24,480	28,440	30,790	34,360	37,320	40,610	42,50
z	0,420	1,115	1,791	2,936	3,982	4,686	5,865	6,960	8,291	9,128

Obtido os valores de x e y , o programa EES foi utilizado para encontrar as variáveis restantes da equação da lente esférica que são: z , k e R . Estas variáveis são inseridas no programa digitando diretamente na área de trabalho, em seguida o comando *calculate* na barra de ferramentas é acionado e o programa retorna os resultados obtidos. Para este estudo os valores inseridos foram os da Tabela 2 para x e y e os valores de z e R foram obtidos pelo programa conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Resultados preliminares do EES (sem arredondamento)

R [mm]	y [mm]	z [mm]	k
103,763593400	42,61196	9,12838	2,335
103,884307530	40,69705	8,29066	0,8167
103,955643090	37,4072	6,95978	0,5025
103,958750310	34,43233	5,86544	0,318
104,015574320	30,86346	4,68603	0,2329
103,988299840	28,50454	3,98226	0,1967
104,004956150	24,53016	2,93581	0,1561
104,013727730	19,2108	1,79070	0,1361
104,037637590	15,18337	1,11547	0,1089
104,027605580	9,38145	0,42507	0,09847

Clicando com o botão direito do mouse no campo referente à variável R , o programa EES fornece a ferramenta *properties*, que além de configurações de casas decimais e formatação do campo para a variável, fornece ainda a estatística dos resultados obtidos, no caso de R , onde se obtém os valores na Tabela 4.

Tabela 4 - Estatística da incógnita R (sem arredondamento)

Medida de R [mm]	103,965010
Desvio Padrão [mm]	0,083977
Valor máximo [mm]	103,763593
Valor mínimo [mm]	104,037638

Como o perfil da lente é simétrico em ambos os lados, a análise foi realizada em apenas um dos lados da curva da lente. A construção e a análise seriam semelhantes, uma vez que a quantidade de pontos escolhidos foi pequena e o espaçamento entre eles são bastante próximos.

Após escolhidos os pontos, o próximo passo seria a construção do modelo de uma curva simulada no GEOGEBRA para comparação e definição da constante k , que define o tipo de curvatura para nossa lente medida.

Com o GEOGEBRA aberto em sua tela inicial foi inserido na caixa de entrada o Raio da lente (R) obtido no programa EES, com um valor médio de 103,965 mm e um valor de k que seria aproximado para nossa lente experimental. Assim, este software foi utilizado para gerar a curva de teste através da equação da lente esférica. Nesta equação, o valor de y corresponde à coordenada de posição (mm) e R é o raio do vértice da superfície na posição $y = 0$ (mm).

O valor de k é definido como constante cônica, o qual define o perfil da curvatura, sendo objeto do estudo.

Utilizando a caixa de entrada do software GEOGEBRA para inserir a equação fora criado o modelo de curva em 2D considerado modelo ideal para posterior comparação.

Depois de inserida a equação da lente esférica na caixa de entrada o próximo passo seria inserir os pontos coordenados coletados da lente conforme a Tabela 2.

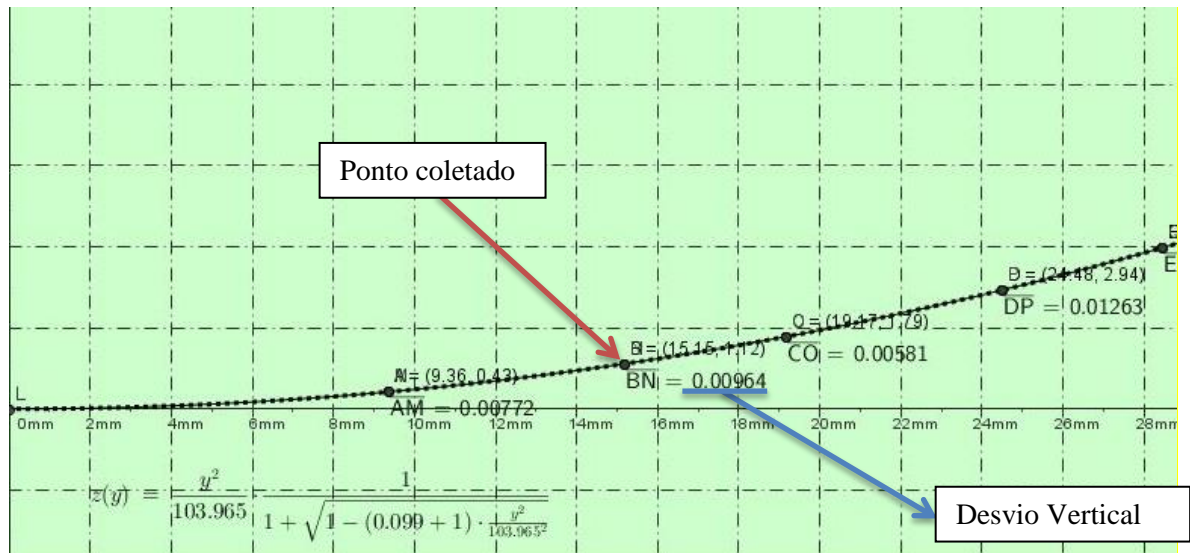


Figura 29 – Uso do Geogebra para a definição do perfil aproximado

Como a representação foi feita em 2D os valores de y para a equação da lente esférica estão representados no eixo x do gráfico e os valores de z estão representados no eixo y do gráfico da Figura 30.

Ajustando o valor de k da equação da lente esférica, inserido no GEOGEBRA, foi possível obter valores para a constante k que melhor se ajusta para o conjunto de pontos coordenados inseridos anteriormente. Conforme o valor de k se aproxima de 0,08 e 0,09 os desvios entre os pontos medidos e a curva teórica aumentam ou diminuem a certos pontos sobre a curva.

Para um ajuste com menor desvio, entre os pontos coordenados e a curva teórica, foi escolhido o valor para $k = 0,09$. Assim, foi elaborada a Tabela 5 com os desvios entre a curva gerada pela equação da lente esférica e os valores dos pontos coordenados coletados da lente experimental.

Tabela 5 - Desvios entre pontos medidos coordenados e respectivos pontos na curva teórica

Ponto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Desvio [μm]	7,7	9,7	6	13,	7,3	16,1	12,2	8,4	1,8	2,2

Com esses dados é possível a criação do modelo CAD teórico para ser a referência na análise com a nuvem de pontos.

Para a comparação dos desvios simulado no GEOGEBRA foi criado no programa CATIA-V5 com os pontos coletados experimentalmente um modelo CAD com os pontos sobre a superfície, que será usado para comparar os desvios entre o modelo CAD com uma maior quantidade de pontos medidos experimentalmente.

A comparação entre o modelo CAD e a lente experimental foi feita com a coleta de 309 pontos com a MMC sobre a superfície da lente experimental e com nuvem de pontos coletada no scanner, quando sobrepostas podemos obter os desvios entre os dois elementos. A Figura 31 e 32 são os estudos de desvio de forma.

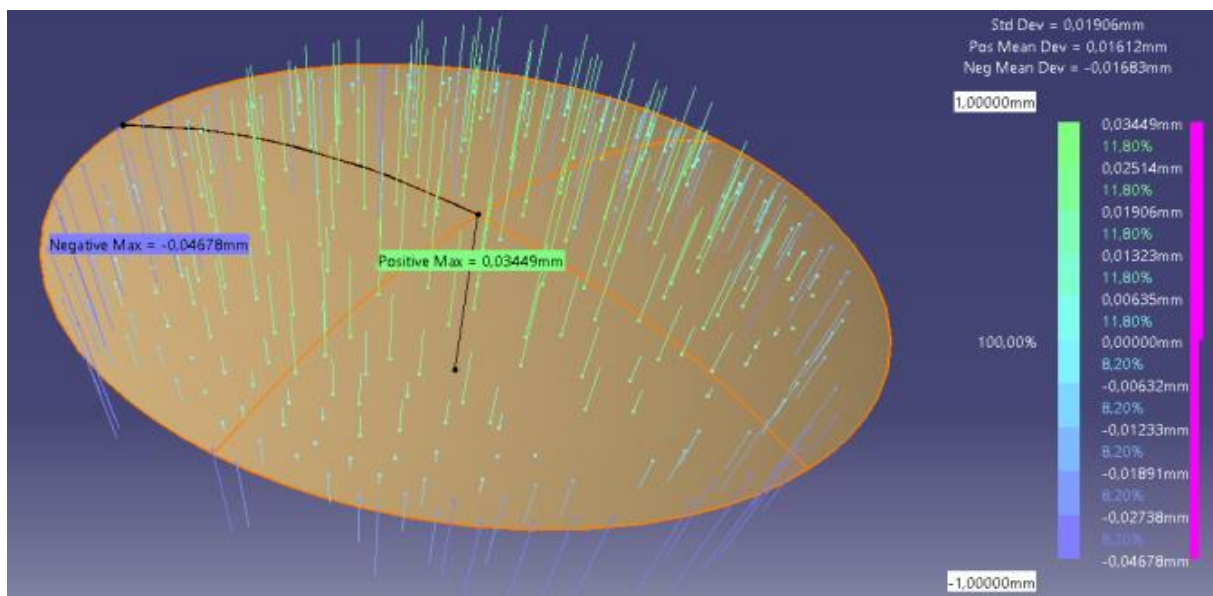


Figura 30 – Estudo de desvio da lente teórica com ponto adquiridos na MMC

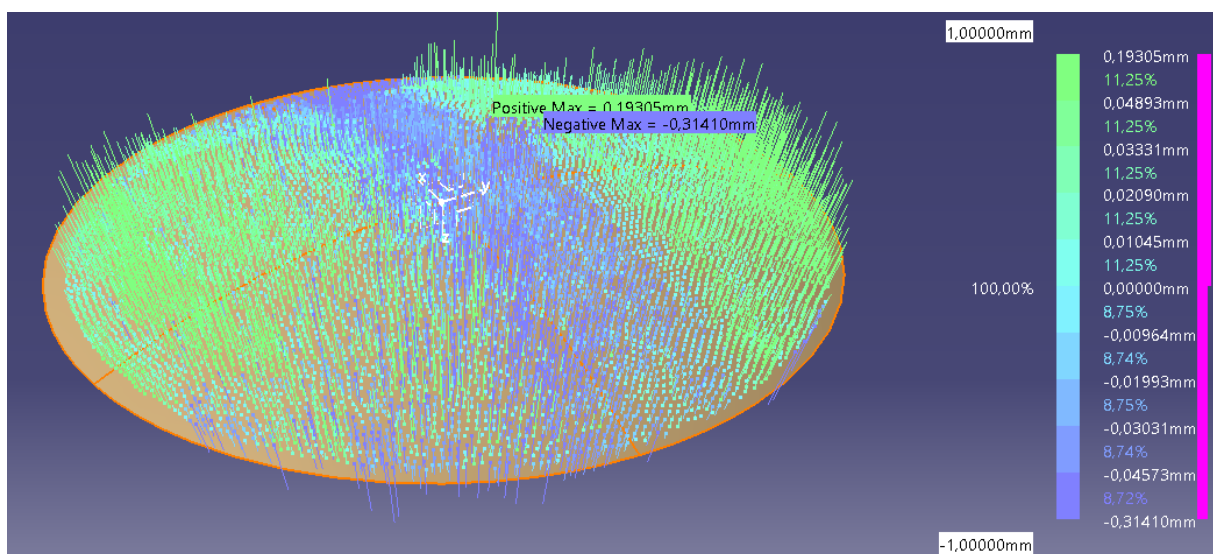


Figura 31 - Estudo de desvio da lente com nuvem de pontos adquirida no scanner

Tabela 6 – Resultados do estudo de desvio de forma

	Lente teórica com Nuvem da MMC	Lente teórica com Nuvem do <i>Scanner</i>
Número de pontos medidos	309	7003
Desvio máximo Positivo [mm]	0,035	0,193
Desvio máximo negativo [mm]	-0,047	-0,314
Desvio médio [mm]	0,003	0,004
Desvio Padrão [mm]	0,019	0,040
Desvio Médio Positivo [mm]	0,016	0,030
Desvio Médio Negativo [mm]	-0,017	-0,032
Amplitude [mm]	0,082	0,507

A Tabela 6 descreve os valores do estudo de desvios, mostrados nas Figuras 32 e 33.

Para tornar todo o processo de identificação de parâmetros de curva automático e mais preciso, foi elaborada uma rotina no MATLAB, em Anexo, que a partir de um R e os pontos do perfil seja retorna o valor de k para que o desvio padrão e a média sejam os menores possíveis.

Esta rotina segue o seguinte algoritmo:

- Inserir R e as coordenadas z e y em relação ao vertex dos pontos de perfil;
- Identifica-se qual menor e maior valor de k para os pontos;
- Divisão da faixa de do menor da até o maior constante cônica em milhares de constantes;
- Calculo da média e do desvio padrão do desvio vertical de cada k para os pontos originais;
- Plotar o desvio padrão e média para da constante cônica.

Os gráficos, Figura 33 e Figura 34, abaixo é o retorno da rotina, dela podemos retirar o valor de k = 1,040 para o R = 103,965 mm gerará o menor desvio padrão e média.

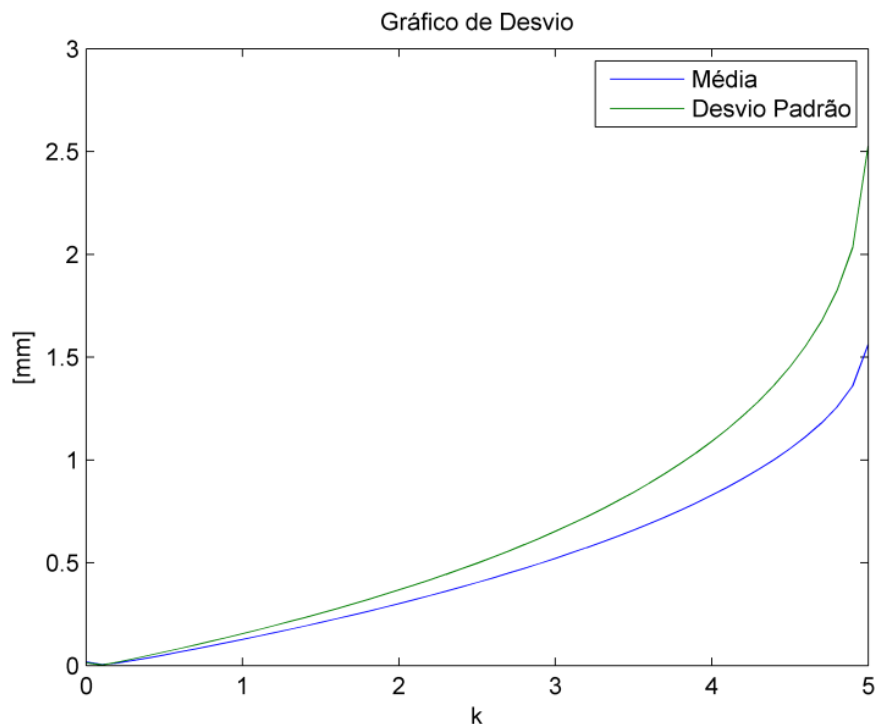


Figura 32- Gráfico de Média e Desvio padrão para várias constantes cônicas

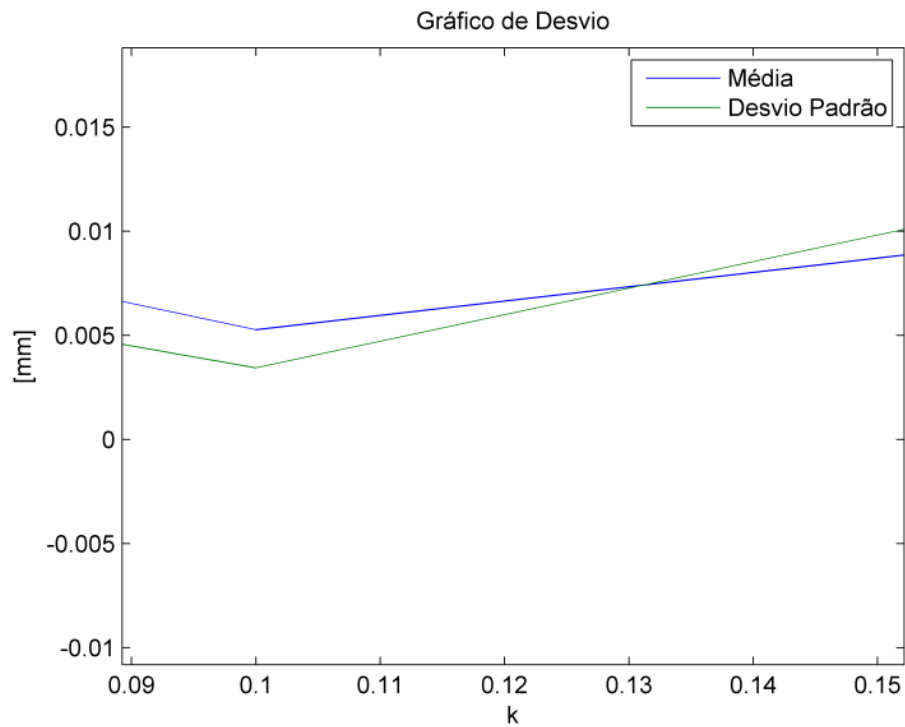


Figura 33 – Aproximação da região de mínimo do gráfico anterior

Fazendo o mesmo procedimento de estudo de desvio para o modelo otimizado:

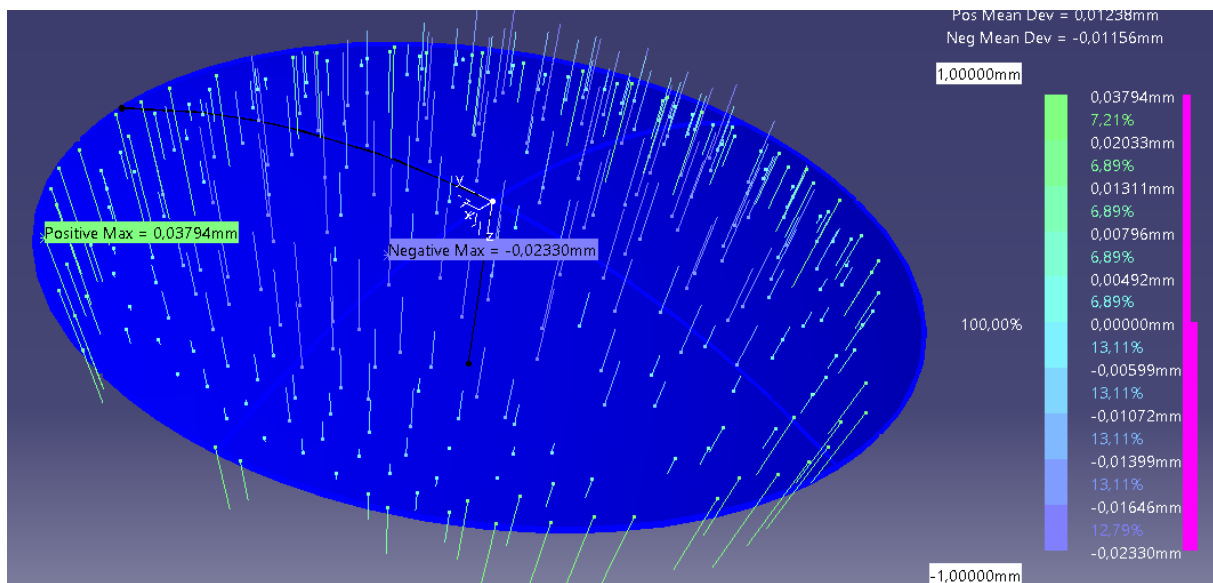


Figura 34 - Estudo de desvio da lente teotimizada com ponto adquiridos na MMC

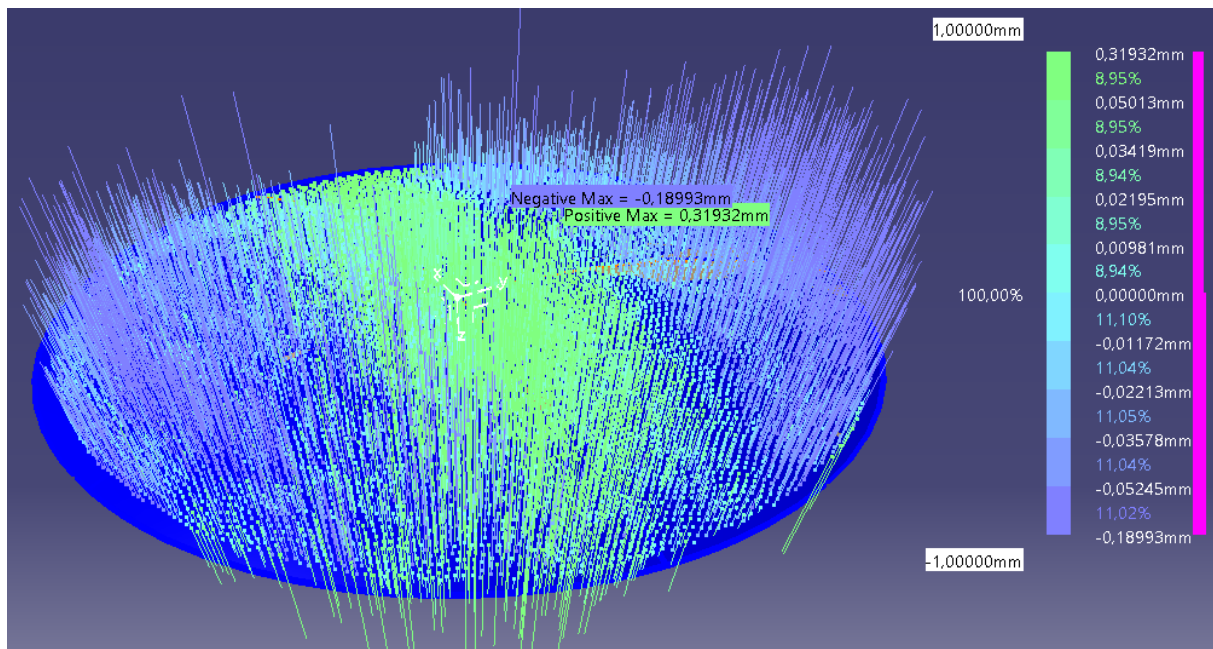


Figura 35 - Estudo de desvio da lente otimizada com nuvem de pontos coletada no scanner

Tabela 7 - Resultados do estudo dos desvios de forma

	Lente otimizada com Nuvem da MMC	Lente otimizada com Nuvem do <i>Scanner</i>
Número de pontos medidos	309	7003
Desvio máximo Positivo [mm]	0,038	0,319
Desvio máximo negativo [mm]	-0,023	-0,190
Desvio médio [mm]	-0,003	0,003
Desvio Padrão [mm]	0,013	0,043
Desvio Médio Positivo [mm]	0,013	0,034
Desvio Médio Negativo [mm]	-0,012	-0,033
Amplitude [mm]	0,0612	0,509

Pelas Tabelas 6 e 7, em ambos os casos encontra-se uma média na ordem da incerteza da MMC, indicando que o alinhamento está aceitável. O desvio padrão está na ordem da precisão do scanner somado a tolerância do alinhamento e a incerteza da MMC, indicando que foi possível aferir com qualidade a forma da lente. Nota-se deste estudo que o alinhamento está diretamente relacionado com média, mas o desvio padrão está relacionado com forma. É possível alinhar um plano de forma conseguiu a mesma média neste caso, mas o desvio padrão no caso do plano seria demasiadamente grande, evidenciado que a forma não corresponde ao modelo medido.

Com a otimização da constante cônica, foi possível reduzir a média e o desvio padrão em cada nuvem de pontos a ordem de incerteza da MMC Cantilever, evidenciando que a forma do modelo otimizado é mais fiel.

A partir de uma avaliação visual nota-se que a lente possui um rebaixo na faixa central que passa pelo vertex, com a amplitude de desvios de no máximo de 0,49 mm e no mínimo 0,01 mm, podemos inferir que o polimento da lente na fabricação possa ter causado essa diferença. Para este caso seria sugerido uma avaliação do processo de polimento para tornar a lente mais uniforme.

4.2 ROTOR

4.2.1 Medição com CMA

Neste caso outra estratégia de medição foi aplicada. Primeiramente, limpamos toda a superfície a ser medida. Em seguida é desenhada uma malha de pontos com uma caneta permanente, que engloba todas as superfícies analisadas.

Esta malha é desenhada de forma que a superfície é segmentada por linhas e pontos sejam adquiridos ao longo destas linhas, o número de pontos se mantenha o mesmo ao longo da superfície para facilitar a reconstrução e análise.



Figura 36 - Malha de pontos desenhada na pá para medição

Em seguida fixamos a peça na mesa passando um parafuso passante em seu eixo furado à placa de metal, e a prendemos a mesa com o uso de sargentos.

Com a MMC modelo Braço, utilizou-se do apalpador tipo ponta seca e em cada ponto traçado sobre a pá foi coletado um ponto. Vale ressaltar que os pontos mais ao interior da peça infelizmente

fazem o apalpador ponta seca não ficar normal a superfície, o que leva a maiores erros. Pontos de avaliação foram coletados ainda neste processo sobre a superfície das outras pás.

4.2.2 Medição com Scanner

Para digitalizar este modelo, foi necessário de vários escaneamentos em diversas posições, visto que não era permitido danificar o rotor para ter um melhor acesso visual às pás, o rotor teve que ser posicionado de diversas forma para que se possa adquirir todas as faces das pás. Neste modelo foram utilizados adesivos coloridos fora da superfície medida para realizar o alinhamento entre as digitalizações.



Figura 37 – Rotor preparado para digitalização

Somente duas configurações foram utilizadas, variando somente no uso do Light para Neutral:

- Single;
- 8 divisões;
- HD 1;
- Light/Neutral
- Wide;

A tolerância para o alinhamento entre as diversas famílias foi de 0,0762 mm.

4.2.3 Modelo teórico

Os pontos da malha coletados pela MMC modelo Braço Articulado foram exportados para o software Rhinoceros para análise (Figura 39).

Em seguida foram criadas curvas de foram livre ajustadas para os pontos, com grau 3 e com pontos de controle, através do comando *Fit Points* (Figura 40). Vale a pena ressaltar que a direção para a criação da curva é a da linha de corrente, para que quando a superfície for gerada a partir destas curvas, ela possua mais informação nesta direção.

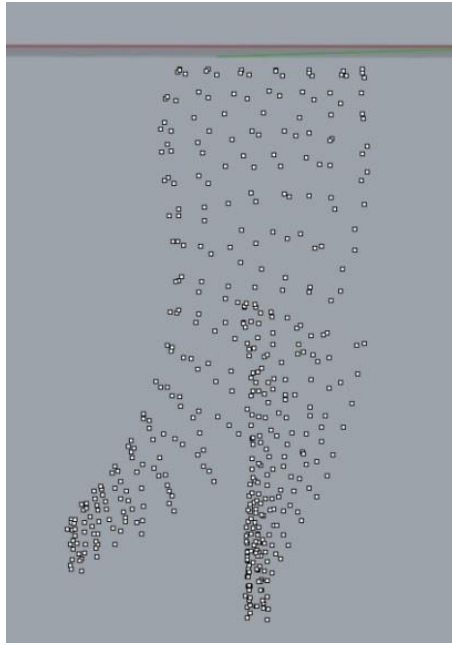


Figura 38 - Pontos coletado da malha desenhada na pá do rotor

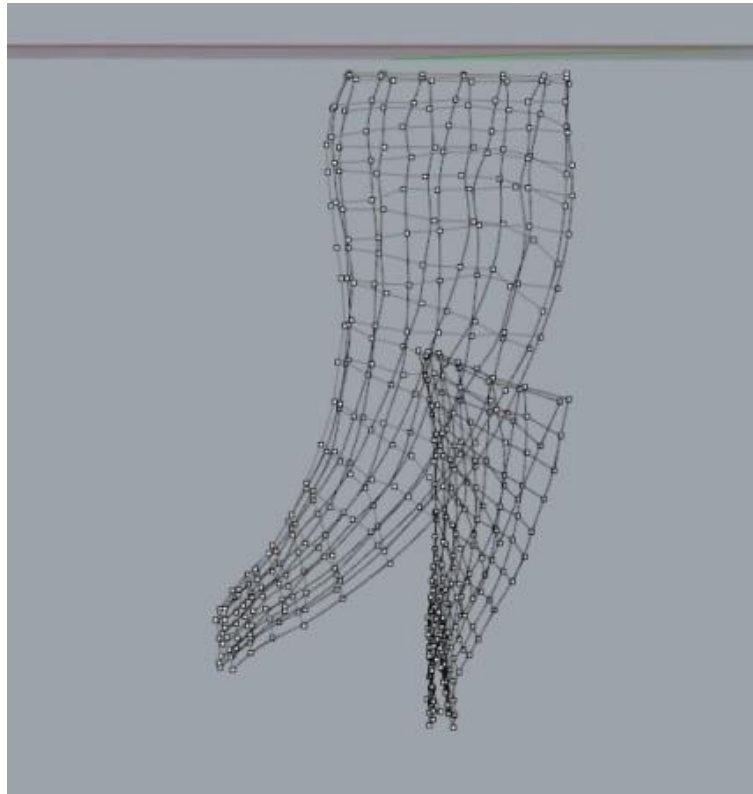


Figura 39 - Curvas criadas a partir dos pontos coletados

O comando *Loft* foi utilizado para criar superfícies a partir das curvas, com opção *Loose* na área de *Style* (Piratelli et al., 2012), as configurações são mostradas na Figura 41.

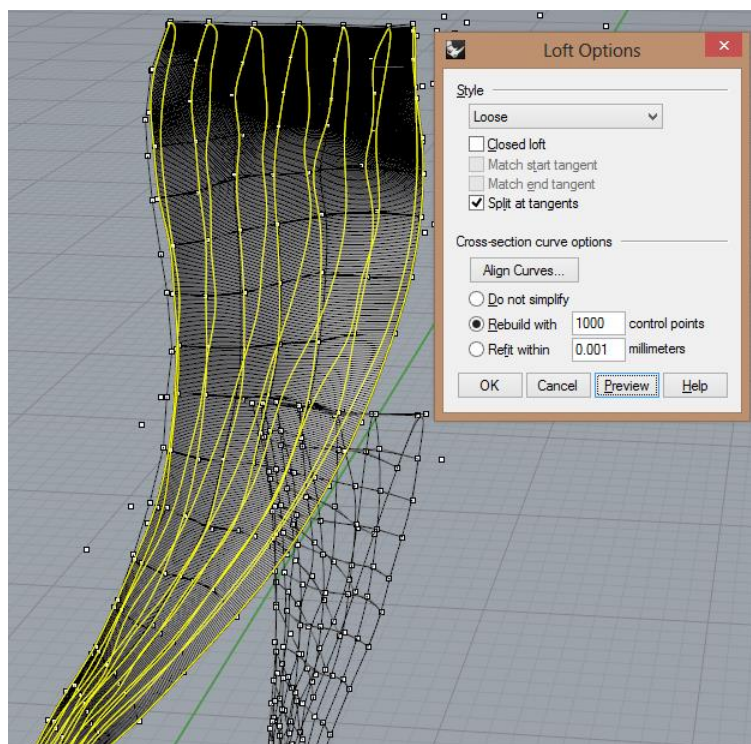


Figura 40 - Geração de superfícies por *Loft* e configurações

Utiliza-se do comando *Revolve* para criar o corpo do rotor e o comando *Array Polar*, para multiplicar 11 vezes as pás em volta do eixo do rotor, gerando assim o modelo final da Figura 42.

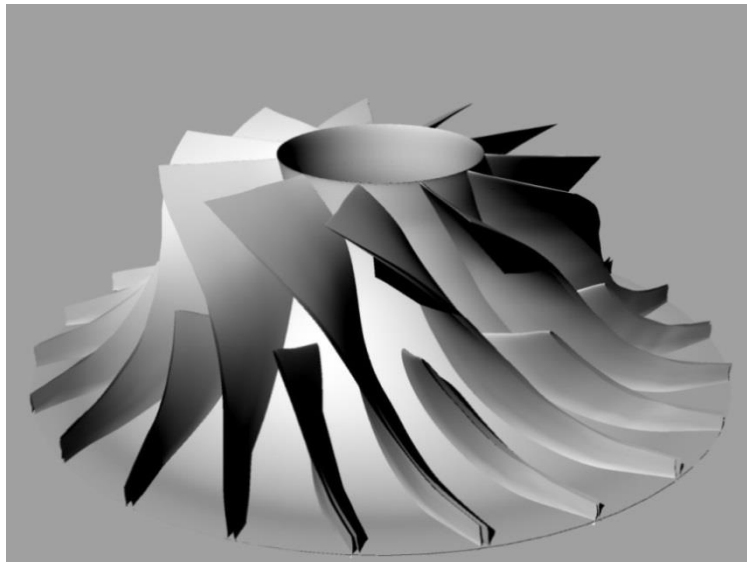


Figura 41 - Modelo teórico (CAD) final do Rotor

4.2.4 Alinhamento

Os pontos de avaliação foram coletados no ato da coleta de pontos da malha da pá, os pontos já estão alinhados com o modelo desde a aquisição.

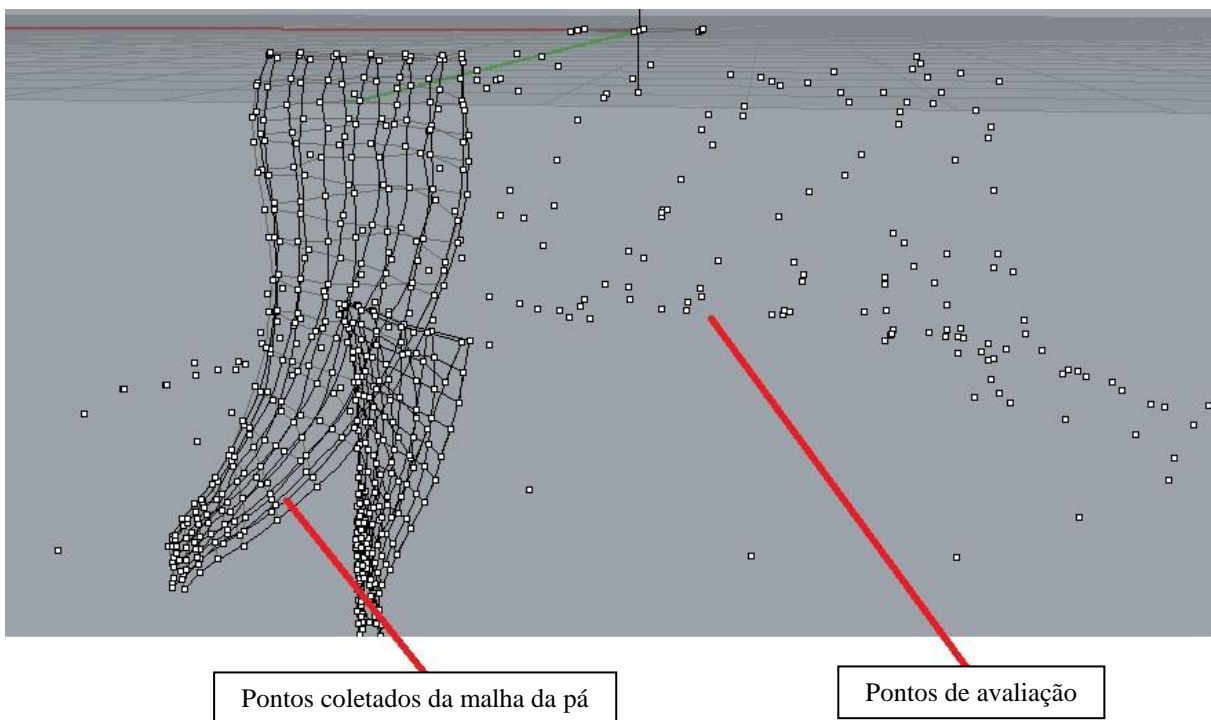


Figura 42 - Pontos de malha e de avaliação coletados no Rotor

Para alinhar a nuvem de pontos com as superfícies, utilizou-se a mesma metodologia da lente. Neste caso os dados de retorno para cada superfície apresentados na Tabela 7.

Tabela 8 - Valores de Best Fit para pás do rotor

	Pá maior Superior	Pá maior inferior	Pá menor Superior	Pá menor inferior
Número de iterações	25	25	5	2
Número de pontos usados no cálculo estatístico	3332	2359	1196	1434
Desvio mínimo [mm]	0,000001	0,000044	0,000046	0,000066
Desvio médio [m]	0,356	0,262	0,180	0,198
Desvio máximo [mm]	2,372	2,551	1,154	2,033
Desvio Padrão [mm]	0,340	0,249	0,156	0,220
Amplitude [mm]	2,372	2,551	1,1534	2,033

4.2.5 Filtro

O filtro homogêneo foi aplicado através do comando *Filter* no CATIA de 0,6 mm foi aplicado sobre a nuvem por completo, retirando 91,5% de todos os pontos.

4.2.6 Desvio de Forma

No caso dos pontos coletados pela CMA, os pontos de avaliação foram coletados junto aos pontos da malha, para que após a reconstrução do modelo, os pontos já estejam alinhados com o modelo teórico.

Então para fazer a análise de desvio de foram, forma coletados 473 pontos aleatoriamente pelo rotor e o estudo de desvio de ponto a superfície fora executado através do comando *Point Set Deviation*, resultado na figura a seguir.

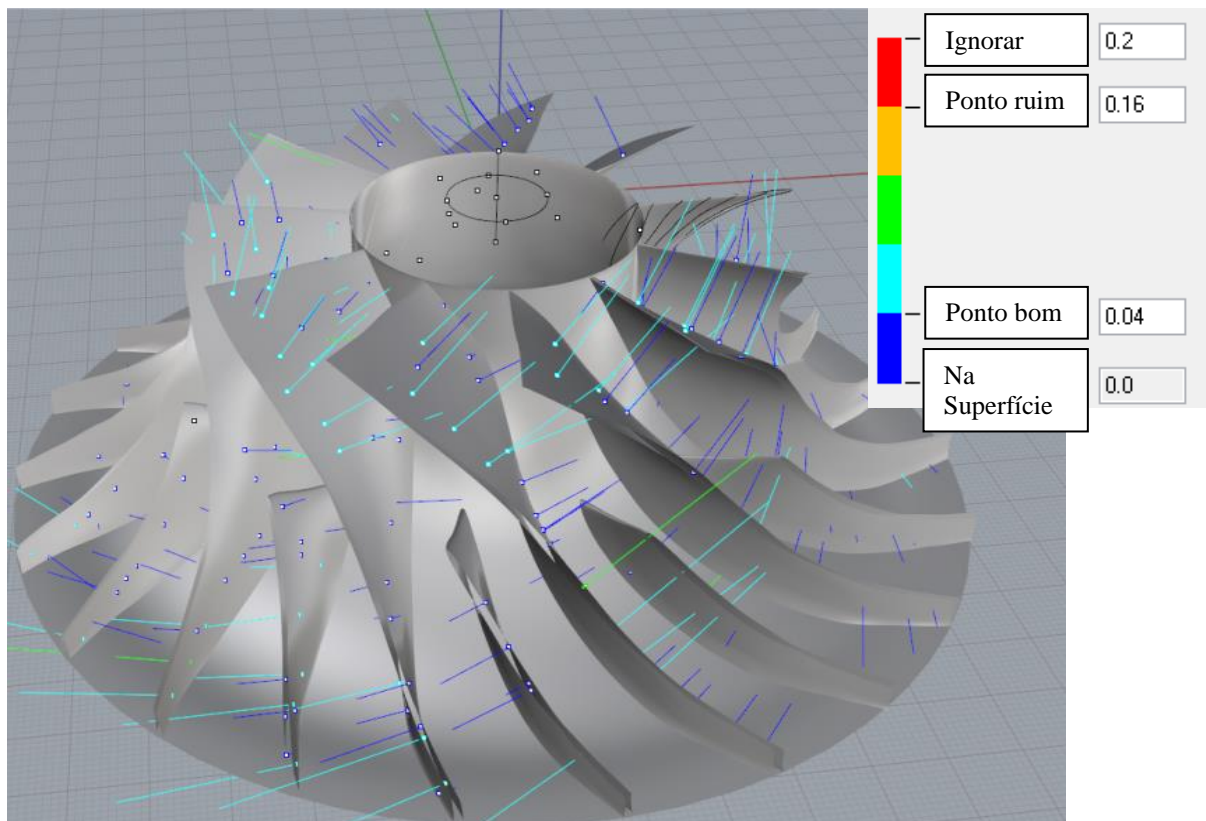


Figura 43 - Estudo de desvio do Rotor

Tabela 9 - Resultados do estudo de desvio de forma para os pontos coletados no CMA

Número de pontos	473
Desvio médio	0,144
Distância Mediana	0,134
Desvio Padrão	0,096

Para tornar mais limpa a análise de desvio de forma no rotor com a nuvem de pontos, será analisado 4 superfícies, A face superior e inferior da pá maior e menor. Elas serão alinhadas separadamente e serão realizados seus respectivos estudos de desvio de forma.

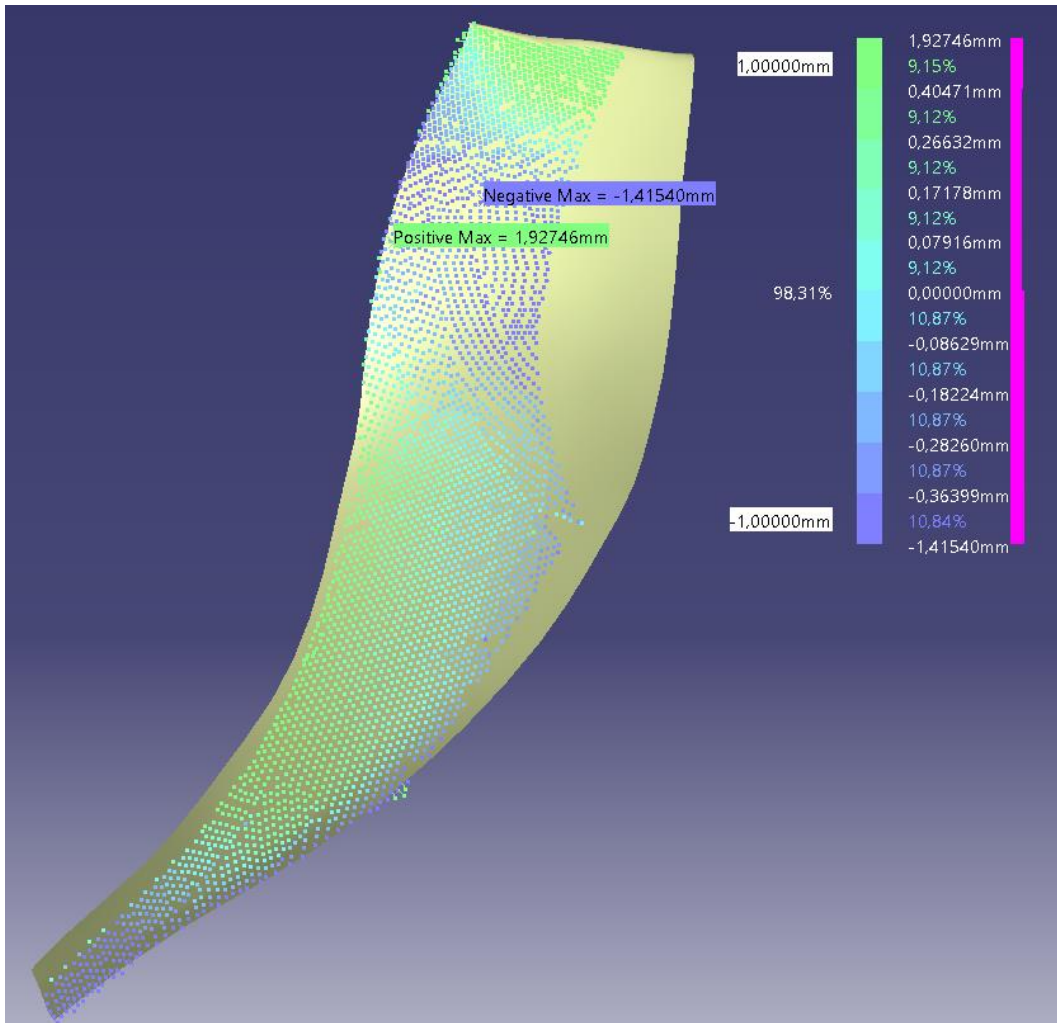


Figura 44 - Estudo de desvio de forma para a pá maior superior

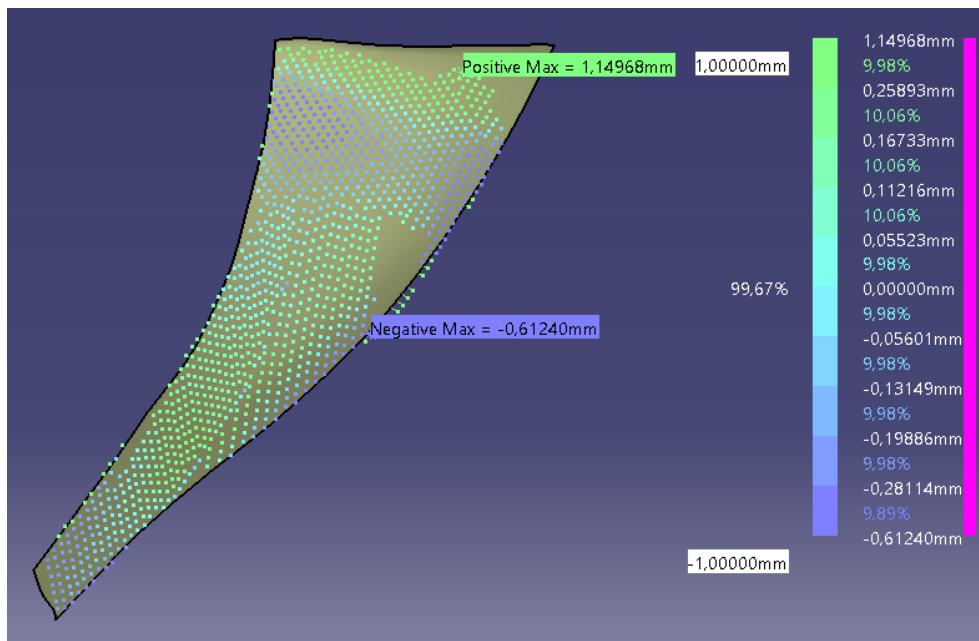


Figura 45 – Estudo de desvio de forma para a pá menor superior

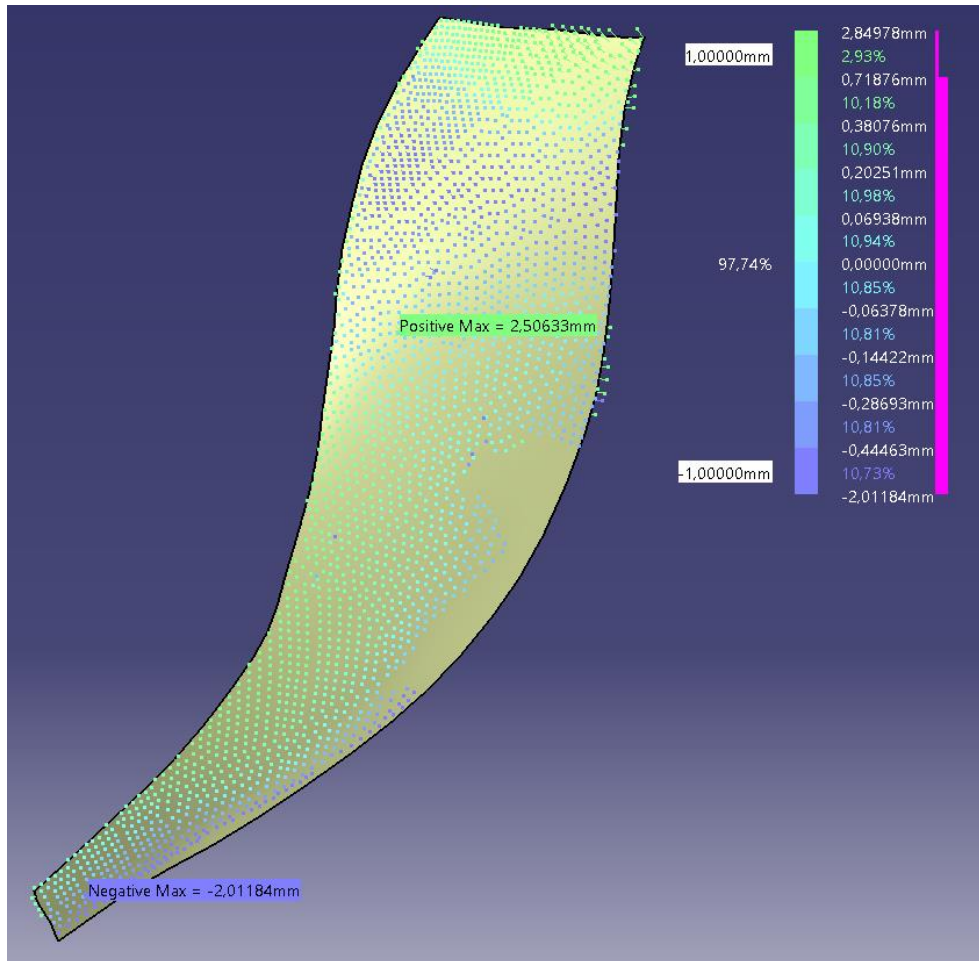


Figura 46 – Estudo de desvio de forma para a pá maior inferior

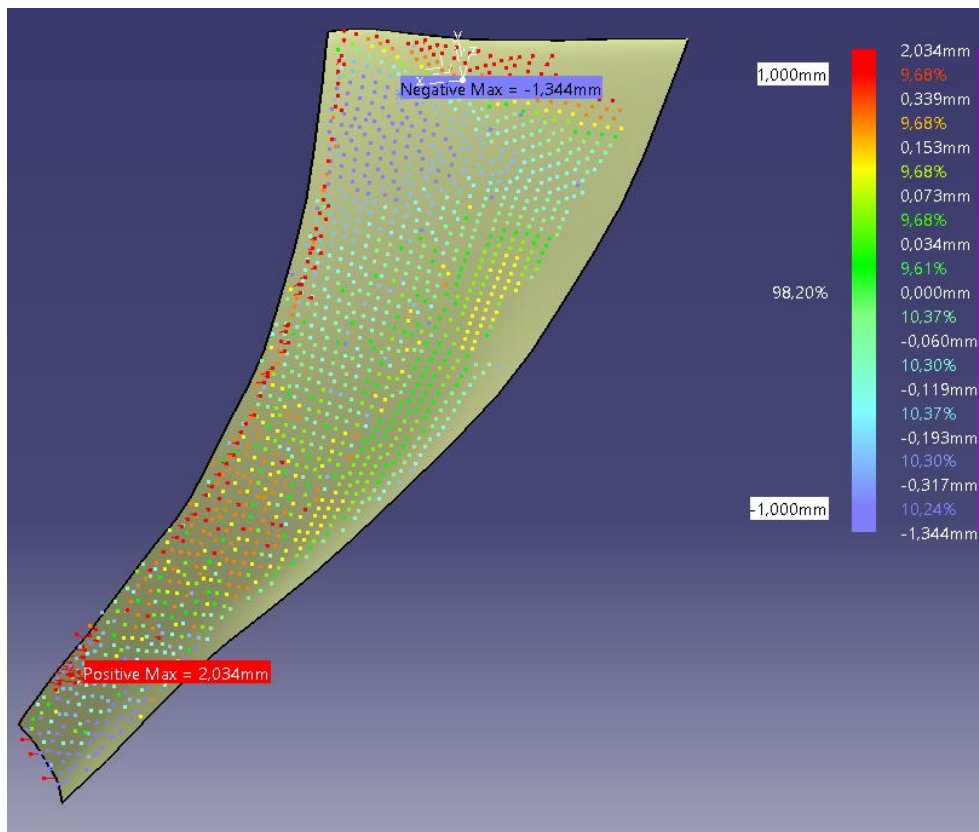


Figura 47 – Estudo de desvio de forma para a pá menor inferior

A Tabela 9 foi elaborada com os resultados do estudo de desvio de forma.

Tabela 10 - Resultados do estudo de desvio de forma

	Pá maior Superior	Pá maior inferior	Pá menor Superior	Pá menor inferior
Número de pontos	3496	2386	1223	1446
Desvio máximo Positivo [mm]	1,393	2,506	1,150	2,034
Desvio máximo negativo [mm]	-1,415	-2,012	-0,61240	-1,344
Desvio médio [mm]	-0,001	0,012	0,009	0,008
Desvio Padrão [mm]	0,343	0,375	0,245	0,311
Desvio Médio Positivo [mm]	0,286	0,286	0,193	0,221
Desvio Médio Negativo [mm]	-0,241	-0,265	-0,176	-0,190
Amplitude [mm]	2,808	4,518	1,762	3,378

Através do estudo das pás do rotor, pelas Tabelas 10 e 8 nota-se que a média de desvio para o estudo com nuvem de pontos do scanner é menor que a com pontos de avaliação, levando q crer que o rotor possui deformações na ordem de décimo de milímetros que influenciam a média dos pontos de avaliação. Já o desvio padrão para o scanner é maior, pois pontos das bordas e filetes, *features* não computadas na reconstrução do modelo CAD, elevaram o desvio padrão por não existir uma forma

correspondente a eles. No estudo com os pontos de avaliação, todos os pontos foram coletados na região central das pás, evitando este fenômeno. A variação de amplitude se deve a torção das pás, que produzem filetes de raios diferentes, induzindo a distintos desvios. As transições suaves das formas devem-se a aproximação realizada na geração das NURBS e das superfícies no comando *Loft*, estas aproximações suavizaram as transições entre as curvas e pontos gerando essas distribuições uniformes.

Na reconstrução total de um elemento para um posterior estudo de desvio de forma, é necessário que a reconstrução absorva todos os detalhes da peça, pois como evidenciado, se algum elemento construtivo não for computado, o desvio padrão é mascarado por estes pontos dispersos, o que não ocorre com estudo de desvios feitos com pontos de avaliação.

4.3 PÁ DE AEROGERADOR

4.3.1 Modelo teórico

Será utilizado neste trabalho o mesmo modelo CAD utilizado no trabalho de (Souza, 2010).

Este modelo CAD é o que fora enviado a uma empresa especializada para a confecção do molde e da pá original, utilizados para a confecção das pás de fibra de vidro e carbono.



Figura 48 - Modelo CAD original da confecção das pás e molde

4.3.2 Medição com CMA

Foi medido com o CMA, utilizando a ponta seca, perfis de pontos traçados sobre a pá para avaliar o desvio de forma. A pá foi devidamente limpa com etanol e presa a mesa de desempenho, como mostra a Figura 50.

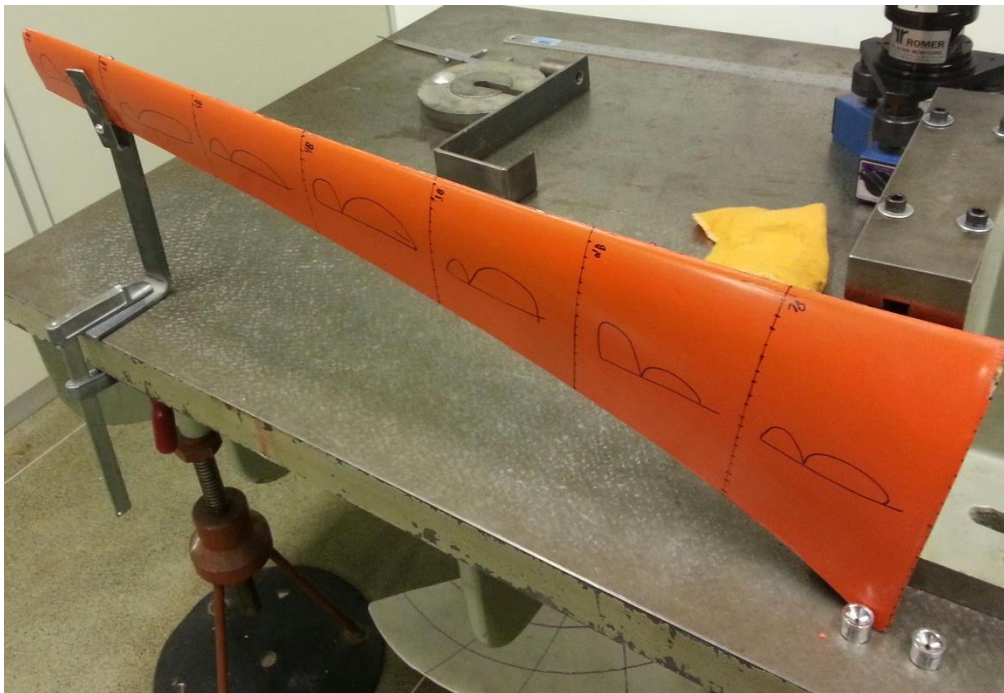


Figura 49 – Pá montada pronta para ser medida pelo CMA

4.3.3 Medição com Scanner

Um lado foi denominado A e o outro B para orientar o alinhamento com o ScanStudio HD.

Como esta é uma peça grande foi preciso de um conjunto de digitalizações para cobrir toda a peça. Duas configurações foram utilizadas:

- 360;
- 8 divisões;
- HD 1;
- Light;
- Wide;

Nesta configuração foi possível digitalizar a parte mais larga da pá em 360°, mas para as demais digitalizações foi utilizado a configuração a seguir, pois a pá teve que ser posicionada em várias outras posições para coletar cada seção.

- Single;

- 8 divisões;
- HD 1;
- Light;
- Wide;

A tolerância para o alinhamento entre as diversas famílias foi de 0,0254 mm para lado A e 0,127 mm para o lado B.

4.3.4 Alinhamento

Utilizou-se o mesmo procedimento da lente e do rotor para os pontos coletados na CMA e no scanner. Retornando os valores da Tabela 9.

Tabela 11 - Valores de Best Fit para as nuvens do *scanner* e do CMA

	Pontos da CMA	Nuvem do Lado A	Nuvem do Lado B
Número de iterações	25	25	25
Número de pontos usados no cálculo estatístico	234	40438	38208
Desvio mínimo [mm]	0,004	0,000062	0,000128
Desvio médio [mm]	0,829	0,911	1,047
Desvio máximo [mm]	2,614	5,986	5,522
Desvio Padrão [mm]	0,512	0,673	0,660
Amplitude [mm]	2,618	5,986	5,522

4.3.5 Filtro

O filtro homogêneo de 1,4 mm foi aplicado sobre as duas nuvens de pontos, retirando da nuvem A e B, 85% e 72,39% de pontos respectivamente.

4.3.6 Desvio de forma

Para os pontos da CMA, o seguinte estudo de desvio resulta na Figura 53, e para os dados do *scanner* nas Figuras 52 e 51.

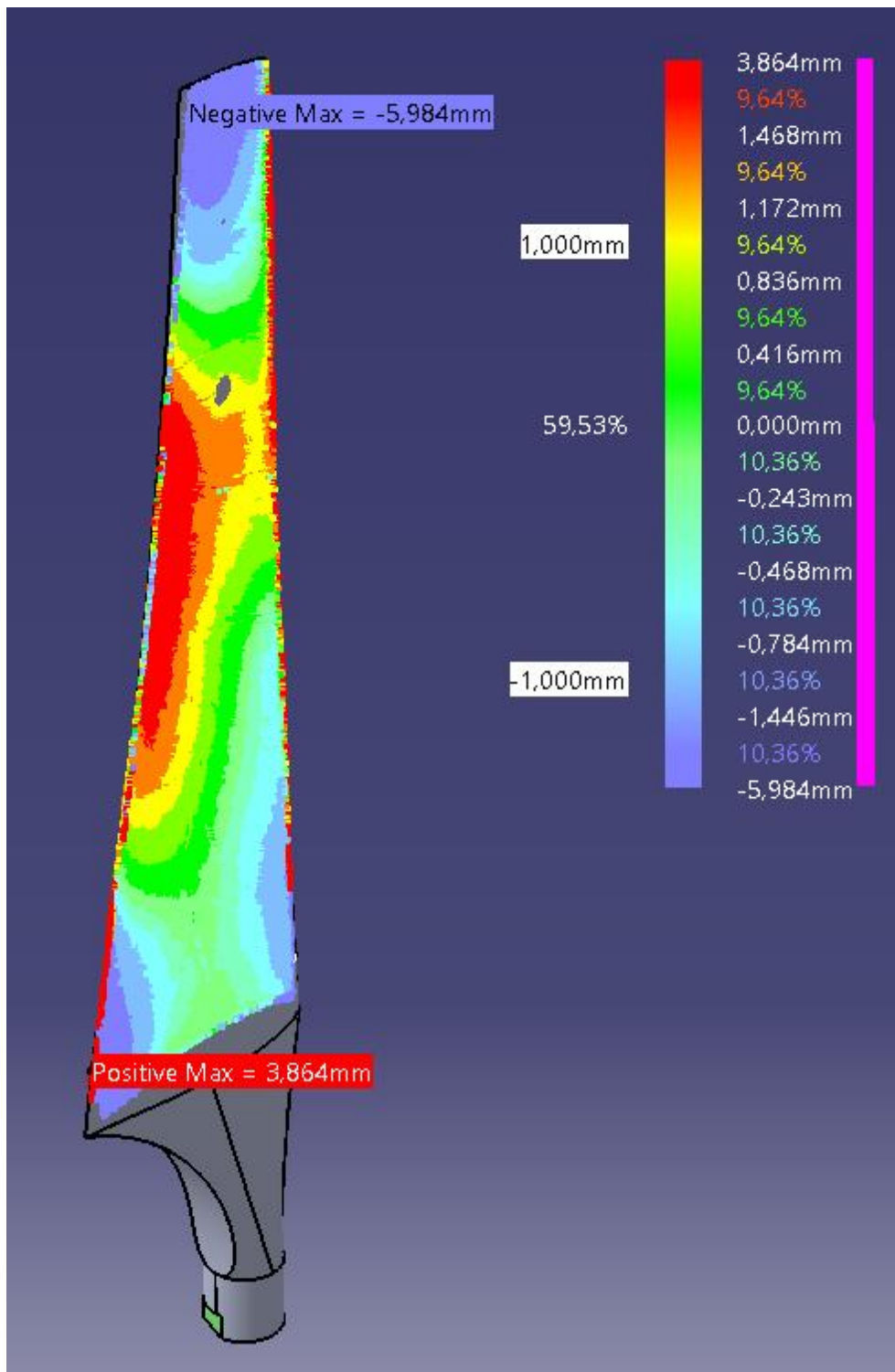


Figura 50- Estudo de desvio de forma para o lado A

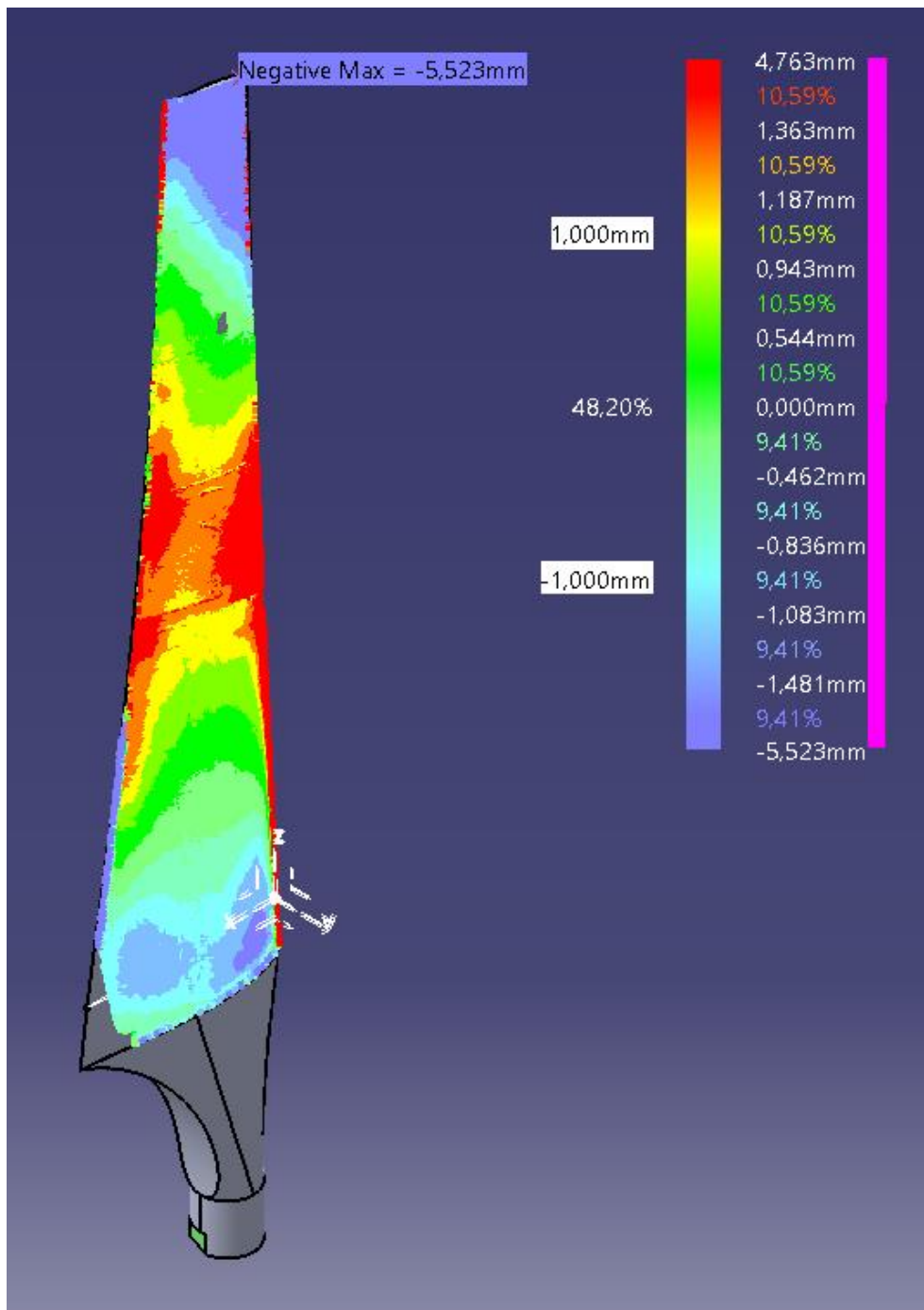


Figura 51 – Estudo de desvio de forma para o lado B

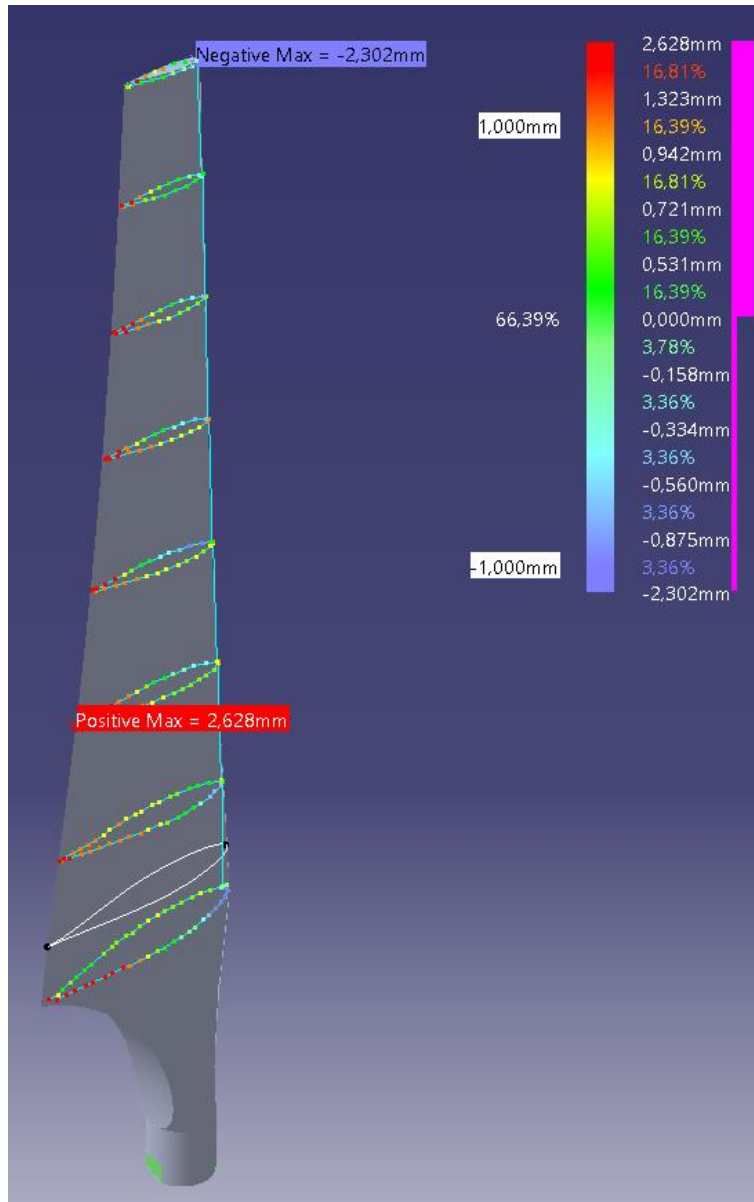


Figura 52 - Estudo de desvio de forma com os pontos coletados no CMA

Elabora-se a Tabela 12 abaixo para os valores do estudo de desvio.

Tabela 12 - Resultados do estudo de desvio de forma

	Pontos da CMA	Nuvem do Lado A	Nuvem do Lado B
Número de pontos	238	40958	38348
Desvio máximo Positivo [mm]	2,628	3,864	4,763
Desvio máximo negativo [mm]	-2,302	-5,984	-5,523
Desvio médio [mm]	0,657	0,024	0,023
Desvio Padrão [mm]	0,767	1,147	1,243
Desvio Médio Positivo [mm]	0,916	0,982	1,014
Desvio Médio Negativo [mm]	-0,586	-0,867	-1,092
Amplitude [mm]	4,93	9,848	10,286

Este caso é a situação ideal para inspeção da confecção de um elemento. Obtemos o modelo CAD de projeto, que será utilizado como referência na fabricação, e obtemos uma peça processada por CAD/CAM. Avaliando visualmente e os valores da Tabela 12 e das Figuras 51,52 e 53 pode-se notar que a superfície está alinhada com a nuvem de pontos, pois a média nos três casos é pequena em relação ao comprimento característico da pá, a corda. Entretanto o desvio padrão é de cerca de 1 mm em todos os casos, evidenciando que o modelo fabricado possui disparidades em relação ao modelo CAD de projeto. Na Figura 53, nota-se que os pontos se distanciam bastante no bordo de ataque do lado A e do bordo fuga de ambos os lados da pá. Na Figura 51 temos abaulamento na ponta da pá e ressalto no meio do bordo de fuga na ordem de milímetros no lado A e na Figura 52 ainda temos um ressalto no bordo de ataque no lado B. A amplitude destes desvios é demasiadamente grande, cerca de 4% da corda do perfil aerodinâmico central, estas variações podem influenciar no desempenho gerador aerodinâmico.

5 CONCLUSÕES

A metodologia adotada permitiu realizar comparar desvios de forma de diferentes corpos com forma livre. Três casos distintos foram investigados: i) Com conhecimento do modelo de projeto, caso da pá de aerogerador; ii) com conhecimento teórico prévio sobre a forma estudada, caso da lente; iii) sem nenhuma referência, caso do rotor. Para este estudo, foram os mesmo programas para os alinhamentos e as análises, sendo apresentados as vantagens de desvantagens de cada caso.

No caso da lente o raio de curvatura do modelo CAD foi aproximado, pois se desconhecia a posição da lente em relação a curva esférica. Os resultados revelaram a média dos desvio se relaciona com o alinhamento, enquanto que o desvio padrão se relaciona com a sua forma. O modelo obtido é fiel à lente, visto que foi alcançada a ordem de incerteza da MMC Cantilever conforme observado no desvio padrão do estudo de desvios, a média e o desvio padrão alcançados para o modelo teórico otimizado com nuvem de pontos obtidos na MMC foram de 0,003 mm e 0,013 mm respectivamente, para o modelo teórico otimizado com nuvem de pontos obtidos no *scanner* a média foi de 0,003 mm e desvio padrão de 0,043 mm.

No caso do rotor, aproximações das curvas NURBS nos pontos coletados da malha desenhada (estratégia) na pá, na geração de superfície teórica foram observadas e a necessidade de e eliminar detalhes de bordas e filetes no modelo CAD para viabilizar a reconstrução. Os finais influenciam o desvio padrão na análise de desvios com a nuvem de pontos do *scanner*, assim para se obter um modelo reconstruído mais próximo ao modelo fabricado, é necessário considerar estes detalhes para que os desvios de forma não sejam alterados. A média e o desvio padrão alcançados para o modelo reconstruído com nuvem de pontos de avaliação foram de 0,114 mm e 0,096 mm respectivamente, com a nuvem de pontos obtida pelo scanner na pá maior foram de -0,001 mm e 0,343mm respectivamente.

O caso da pá de aerogerador corresponde a uma situação de inspeção ideal, onde o modelo de projeto, o mesmo utilizado na fabricação, e alinhamos as nuvens de pontos em relação as suas superfícies para analisar os desvios. Os resultados revelaram que ser possível identificar áreas com desvios negativos de até 5,9 mm, e desvios positivos de até 4,763 mm em relação as superfícies de projeto. Assim enviar um *feedback* ao fabricante indicando onde e quanto a fabricação daquelas áreas devem ser retrabalhadas. Obtivemos uma média de 0,657 mm e desvio padrão de 0,767 mm para pontos coletados na MMC modelo braço articulado, para os pontos obtidos no *scanner* no lado A obtemos a média de 0,024 mm e desvio padrão de 1,147 mm.

Como sugestão de trabalhos, podem ser mencionados: A avaliação do processo de alinhamento de nuvens de pontos, determinando a influencia na incerteza nos desvios; alaboração uma metodologia para a reconstrução de modelos com superfícies de forma livre utilizando Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) modelo braço articulado incluído detalhes de bordas e filetes; avaliação dos

desvios em cada processo de produção da pá de aero gerador, uma que possui o molde macho, o molde fêmea e produto final.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 3D Tutorial Zone. **Polygons To NURBS. 2012** Disponível em: <<http://www.3dtutorialzone.com/tutorial?id=67>>. Acessado em: outubro de 2012
- Aerospaceweb. **NACA Airfoil Series. 2012.** Disponível em: <<http://www.aerospaceweb.org/question/airfoils/q0041.shtml>>. Acesso em: 05/06/2013.
- ARRI, **High Speed with Breathtaking Optical Performance.** MASTER PRIMES, Munich, n.4, p.5, 2011. Disponível em: <[http://www.zeiss.com/C12567A8003B8B6F/EmbedTitelIntern/ARRIMasterPrimesBrochure/\\$File/ARRI_MasterPrimes_brochure.pdf](http://www.zeiss.com/C12567A8003B8B6F/EmbedTitelIntern/ARRIMasterPrimesBrochure/$File/ARRI_MasterPrimes_brochure.pdf)> Acesso em: 20 outubro de 2012.
- ArtMechanic, **Pfeilhöhe.svg,** Disponível em: <<http://en.wikipedia.org/wiki/File:Pfeilh%C3%B6he.svg>>. Acessado em: Fevereiro de 2013.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6809: Tolerâncias geométricas – Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento – Generalidades.** Rio de Janeiro: ABNT 1997.
- Budak, I., Trifkovic, B., Puskar, T., Vukelic, D., Vucaj-Cirilovic, V., Hodolic, J., Todorovic, A. **Comparative analysis of 3d digitization systems in the field of dental prosthetic.** Technical Gazette 20, 2(2013), 291-296. 2013. ISSN 1330-3651
- Darlingltd. **3D Laser Scanning and Mine Surveying and 3D Scanning.** 2012 Darling Environmental & Surveying, Ltd. <<http://www.darlingltd.com>>. Acesso em: outubro de 2012.
- Dassault Systèmes. **About NURBS - A first glance at CATIA Geometric Modeler. Concepts and CGM implementation.** 2000. Disponível em: <<http://www.maruf.ca/files/caadoc/CAAGobTechArticles/Nurbs.htm>>. Acesso em: 09/10/2012.
- Dassault Systèmes. **CATIA V5 Documentation.** 2011. Disponível em: <<http://catiadoc.free.fr/>> Acessado em: julho de 2013.
- Gill Incorporated Design Solutions. 2010 Disponível em: <<http://designsolutions.gillincorporated.org>> Acesso em: julho de 2013.
- Hess, M., Robson, S. **3D Colour imaging for cultural heritage artefacts,** International Archives of Photogrammetry, 2010 Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Vol. XXXVIII, Part 5 Commission V Symposium, Newcastle upon Tyne, UK.
- Javelin. **Bibliography.** <<http://www.javelin-tech.com>>. Acesso em: julho de 2013.
- Jatobá, F. B. S. . **Projeto de graduação planejamento do processo de medição utilizando um scanner 3D.** Universidade de Brasília. 2011. Departamento de Engenharia Mecânica.
- Malacara, D., Malacara, Z.. **Handbook of Optical Design. Second Edition.** Centro de Investigaciones en Optica, A.C. León, Mexico. 2004. Marcel Dekker, Inc. ISBN: 0-8247-4613-9.
- Mannan, N. **3D Imaging of Turbine Blade for Comparative Deviation Analysis between Ideal Part Designs to As Built Part.** Rensselaer Polytechnic Institute Hartford, CT. 2009. Master Degree.
- MaxWell Lambda. **Fundamentos da medição por coordenadas.** Puc-Rio Disponível em: <www.maxwell.lambda.ele.puc-rio.br/16694/16694_3.PDF> Acesso em: 05/06/2013.
- Moran, J. **Theoretical and Computational Aerodynamics.** University of Minnesota, 1984. John Wiley & Sons, Inc. ISBN 0-471-87491-4.
- Med Spark, **Process.** Disponível em: <<http://medspark.ms>> .Acesso em: outubro de 2012.
- NextEngine. **NextWiki Help.**2012 Disponível no programa, tecla F1.
- NextEngine. **Scan Studio HD manual.**2009 Disponível no programa, tecla F1.
- Polo M.-E., Felicísimo A. M. **Analysis of Uncertainty and Repeatability of a Low-Cost. 3D Laser Scanner.** University Centre of Mérida. 2012 *Sensors* 2012, 12, 9046-9054; doi:10.3390/s120709046 ISSN 1424-8220.
- Piratelli, A. F., Motta, J. M. S. T. **Desempenho de método de recuperação de modelos CAD baseados na medição com CMA e modelagem NURBS aplicado à superfícies de forma livre de dimensões reduzidas** Universidade de Brasília. 2007 Revista Ciência & Engenharia, v. 16, n. 1/2, p. 67 – 72.

- Piratelli, A. F., Araújo, J. A., Júnior, A. C. P. B. **Reverse engineering of hydraulic turbine runners using coordinate measuring arms and NURBS modeling** Universidade de Brasília 2009 Rev. Tecnol., Fortaleza, v.30, n.1, p. 114-114 122, jun.
- Piratelli, A. F., Cassiano, E. R. S., Viana, D. M., Zamboni, J.G., **Digitalização de figuras humanoides para animação por computador**. Universidade Federal do Maranhão. 2012 P&D Design 2012 São Luís.
- Piratelli, A. F., Álvares, A. J. Cassiano, E. R. S., Jatobá, F., Arencibia, R. V. **Planejamento do processo de medição com scanner laser tridimensional**. ABCM. 2013 7º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE FABRICAÇÃO Pg. 0143-0155.
- Qin, H., **Aberration correction of a single aspheric lens with particle swarm algorithm**. Shandong University of Technology. 2012. Elsevier Optics Communications.
- Rede Metrológica. **RM 68: INCERTEZA DE MEDIÇÃO: GUIA PRÁTICO DO AVALIADOR DE LABORATÓRIOS - PROCEDIMENTO DO SISTEMA DE GESTÃO DA QUALIDADE**.2009. Disponível em: <www.redemetrológica.com.br/ftp/dados/rec/DOC_53.pdf>. Acessado em: Novembro de 2012.
- Rhinoceros. **Rhinoceros Help**. 2012. Disponível no programa, tecla F1.
- Silva, F. P., Freese, S. H., Kindlein, W. Jr.. **A digitalização tridimensional a laser como ferramenta para o desenvolvimento de novos produtos**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul 2006. P&D Design .
- Sousa, G. C., Oliveira, T. B. S.. **Projeto de graduação: Estudo aerodinâmico e de funcionamento de uma turbina eólica no Distrito Federal**. Universidade de Brasília. 2010. Departamento de Engenharia Mecânica.

ANEXOS

		Pág.
Anexo I	Certificado de Calibração da Máquina de Medir por Coordenadas modelo braço articulado (CMA) da ROMER®	17
Anexo II	Data Sheet do Scanner 3D NextEngine	18
Anexo III	Certificado de Calibração da Máquina de Medir por Coordenadas <i>QM-Measure 353</i> da empresa <i>MITUTOYO</i>	20
Anexo IV	Tutorial para realizar estudo de desvios	30
Anexo V	Rotina Matlab	37

Anexo IV

Abra o software Rhinoceros e com o comando *Import*, importe os pontos do arquivo .xyz e salve o arquivo como .iges.

No CATIA V5, abra o arquivo referente a superfície referência, abra o ambiente *Shape > Digitized Shape Editor*, e use o comando *Import* para importar a nuvem de pontos.

Com o comando *Align by compass*, escolha a nuvem de pontos a ser movida e a superfície teórica como referência e alinhe manualmente com as opções de *Move* a nuvem com a superfície, de forma que o próximo comando, *Align by Best Fit* somente faça um ajuste fino no alinhamento. No *Align by Best Fit* selecione a superfície referência e nuvem de pontos a ser alinhada. Anote os resultados que são exibidos quando o processamento é finalizado.

Com a nuvem alinhada a superfície referência, com o comando *Deviation Analysis*, se escolhe a referência, nossa superfície teórica, e o que medir, a nuvem de pontos. A caixa de *Accuracy* fica o valor da incerteza do instrumento de medição, para o nosso caso, utilizamos o da MMC Cantilever, de 0,003 mm, pois esta é menor incerteza que o laboratório pode conseguir. Confirme o comando e o gráfico de desvios será gerado. Para exibir todos os dados, como média, desvio padrão, pontos extremos e etc., clique com o botão direito sobre a barra de cores e selecione *Display > All*. Também Selecione o *Smoth mode*, para as cores transacionarem de forma mais suave, e *Equalization mode*, com esta opção os valores são distribuídos de tal maneira que cada intervalo na barra de cores contém o mesmo número de pontos. Anote os resultados no topo da barra de cores.