

**MÉTODO DE VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO SCANNERS LASER USANDO UM ARTEFATO
TRIDIMENSIONAL**

LAURA DANIELA ORDIEREZ ZÚÑIGA

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA**

FACULDADE DE TECNOLOGIA

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
PÓS-GRADUAÇÃO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

**MÉTODO DE VERIFICAÇÃO DO DESEMPENHO DO SCANNERS LASER
USANDO UM ARTEFATO TRIDIMENSIONAL**

LAURA DANIELA ORDIEREZ ZÚÑIGA

**ORIENTADOR: ANTONIO PIRATELLI FILHO
DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS MECATRÔNICOS**

**PUBLICAÇÃO: ENM.DM-67
BRASÍLIA/DF: DEZEMBRO-2013**

FICHA CATALOGRÁFICA

ZÚÑIGA, LAURA DANIELA ORDIÉREZ

Método de verificação do desempenho de scanners laser usando um artefato tridimensional. [Distrito Federal]2013.

xxii, 99p., 210x297 mm (ENM/FT/UnB, Mestra, Sistemas Mecatrônicos).

Dissertação de Mestrado-Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Mecânica.

- | | |
|-------------------------|------------------------|
| 1. Scanner laser 3D | 2. Medição sem contato |
| 3. Testes de desempenho | |
| I. ENM/FT/UnB | II. Título (série) |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ZÚÑIGA, L. D. O. (2013) Método de verificação do desempenho de scanners laser usando um artefato tridimensional. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM-67, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade de Brasília, Brasília, DF, 99p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Laura Daniela Ordiérez Zúñiga

TÍTULO: Método de verificação do desempenho de scanners laser usando um artefato tridimensional.

GRAU: Mestra ANO: 2013

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte dessa dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Laura Daniela Ordiérez Zúñiga

RESUMO

Instrumentos como scanner laser 3D são atualmente utilizados em diversas aplicações de engenharia reversa, uma vez que admitem a aquisição de informações da geometria da peça de objetos num tempo reduzido de medição resultando na redução de custos. Comparando com os instrumentos de medição com contato, como máquinas de medição por coordenadas (MMC). A verificação de desempenho de scanners a laser está em estudo e, atualmente, não há padrões nem normas universais para resolver este problema. Esta dissertação propõe um método para verificar o desempenho do scanners laser 3D do fabricante NextEngine. A abordagem experimental foi implementada usando um scanner a laser 3D fabricado pela NextEngine. Um padrão tridimensional foi projetado e fabricado em alumínio, com características geométricas específicas, como círculos, cilindros, aviões e esferas. As características geométricas como raios, ângulos e alturas foram determinadas através da medição em uma MMC cantilever com sonda de gatilhamento (valores convencionais). Os valores destas mesmas características foram medidas no scanner laser e comparadas com os valores convencionais, sendo que o desempenho do instrumento foi avaliado pela repetitividade e pela amplitude dos erros encontrados. O método foi adequado para avaliar o desempenho do instrumento verificado através de estimativas de exatidão e repetitividade.

Palavras-chave: laser scanner 3D, medição sem contato, os testes de desempenho.

ABSTRACT

Tridimensional laser scanner is nowadays used in several applications of reverse engineering since it admits acquisition of geometric information at reduced measurement time and cost. Comparing with instruments as Coordinate Measuring Machines (CMM).The performance verification of laser scanners is under study and currently there is no standard to address this issue. This work proposes a method to verify the performance of 3D laser scanners manufactured by Next Engine. The experimental approach was implemented using 3D laser scanner manufactured by NextEngine. A tridimensional gauge was designed and manufactured in aluminum with specific geometrical features like circles, cylinders, planes and spheres. The measured geometric characteristics were radius, angles and heights. That was determined by MMC (conventional value). These dimensions were determined by a laser scanner and compared with the calibrated values. The method was suitable to evaluate the instrument performance as estimates of the accuracy and the repeatability were obtained.

Key-words: laser scanner 3D, non-contact measurement, performance tests.

SUMARIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 DIGITALIZAÇÃO DE UMA PEÇA.....	4
2.1.1 Digitalização com contato.....	4
2.1.2 Digitalização sem contato.....	6
2.2 Erro no scanner laser.....	9
2.3 INCERTEZA de MEDIÇÃO.....	15
2.4 Testes de desempenho em Laser Scanners 3D.....	20
2.5 Estudo da variabilidade do sistema de MEDIÇÃO testes R&R	24
3. METODOLOGIA.....	26
3.1 PEÇA PADRÃO.....	26
3.2 CALIBRAÇÃO DA PEÇA PADRÃO.....	28
3.2.1 Calibração do apalpador da MMC.....	29
3.2.2 Obtenção das coordenadas dos pontos (X,Y e Z).....	30
3.2.3 Criação de superfícies e medição de sólidos.....	33
3.2.4 Parâmetros medidos.....	35
3.2.5 Cálculo da incerteza dos parâmetros.....	37
3.3 TESTE DE DESEMPENHO DO SCANNER LASER.....	39
3.3.1 Scanner laser.....	39
3.3.2 Método de medição	40
3.3.3 Análise de desempenho.....	46
3.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO, GRÁFICOS E TESTES R&R.....	46
4. RESULTADOS.....	51
4.1 CALIBRAÇÃO DA PEÇA PADRÃO.....	51
4.1.1 Resultados da medição dos parâmetros.....	52
4.1.2 Cálculos da incerteza expandida $U_{95\%}$ dos parâmetros.....	53
4.2 TESTE DO DESEMPENHO DO SCANNER LASER 3D NEXTENGINE.....	55
4.2.1 Resultados das medições com scanner.....	55
4.2.2 Teste de Repetitividade e Reprodutividade (R&R).....	57
5. CONCLUSÕES.....	67
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

APÊNDICE A. Cálculo da incerteza expandida para os parâmetros.....	72
ANEXO 1. Modelo e certificado de calibração da MMC Mitutoyo.....	74
ANEXO 2. Certificado de calibração do termo higrômetro digital.....	79
ANEXO 3. Certificado de calibração do termômetro de líquido em vidro.....	82

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 Quadro para determinação da ANOVA.....	25
Tabela 1.1 Parâmetros medidos da peça.....	35
Tabela 1.2 Configurações do modo <i>Macro</i> e <i>Wide</i> do scanner laser.....	39
Tabela 3.3. Tabela ANOVA para fatores com efeitos aleatórios, planejamento hierárquico.....	49
Tabela 1.3 Valor das parâmetros medidos.....	52
Tabela 1.2 Cálculo da incerteza expandida para <i>hI</i>	53
Tabela 1.3 Valores das incertezas calculadas para os parâmetros.....	54
Tabela 1.4 Medições feitas no <i>Scanner Laser</i>	55
Tabela 1.5 Erro calculado sistemático para os parâmetros e geometrias do padrão.....	56
Tabela 4.6 Tabela ANOVA para fatores com efeitos aleatórios, planejamento hierárquico.....	65

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 Geometria cilíndrica do scanner laser 3D.....	2
Figura 2.1 Geometria ótica da triangulação.....	9
Figura 2.2 Configuração típica da triangulação.....	11
Figura 2.3 Parâmetros de digitalização: ângulo incidente, ângulo projetado, e profundidade de digitalização.....	12
Figura 2.4 Erro sistemático e aleatório.....	13
Figura 2.5 O efeito da penetração da superfície do ponto do laser.....	14
Figura 2.6 Interpretação gráfica de precisão, exatidão e repetitividade.....	15
Figura 2.7 Representação gráfica da avaliação de incerteza de um parâmetro de entrada a partir de uma distribuição a priori, distribuição de probabilidade retangular.....	18
Figura 2.8 Representação gráfica da avaliação de incerteza de um parâmetro de entrada a partir de uma distribuição <i>a priori</i> , distribuição de probabilidade triangular.....	18
Figura 2.9. Nuvem de pontos obtida pelo scanner Nextengine para o objeto selecionado; seções escolhidos do objeto para medição do comprimento.....	21
Figura 2.10. Objetos de teste. a). Escadas em Z, b) diferentes tipos de sólidos, c) paralelepípedo e d) plano de referência.....	22
Figura 2.11. Valores de dispersão em X.....	23
Figura 3.1. Desenho da peça padrão.....	27
Figura 3.2 Peça padrão.....	27
Figura 3.3 Máquina Tridimensional de Medição por coordenadas, modelo QM-353.....	28

Figura 3.4 Sequência de medição da peça padrão.....	29
Figura 3.5 Esfera calibradora.....	30
Figura 3.6 Ponto de referência da peça padrão.....	31
Figura 3.7. Elementos geométricos e tipo de medição de parâmetros no software M-COSMOS V3.0.....	32
Figura 3.8. Pontos determinados na superfície da peça padrão usando MMC..	32
Figura 3.9 Curvas aproximadas dos pontos digitalizados.....	33
Figura 3.10 Peça modelada em Rhinoceros.....	34
Figura 3.11 Componentes do Scanner. (A) Unidade para emissão de feixes de laser. (B) base para o posicionamento (C) haste com dos suportes.....	40
Figura 3.12 Estrutura de medição com Scanner laser.....	40
Figura 3.13 Tela de parâmetros do scanner laser pelo software ScanStudio sendo single; 17 divisões; 2000 pontos/polegada ² ; modo wide.....	41
Figura 3.14 Vistas da peça padrão, montadas na base do scanner NextEngine.	42
Figura 3.15 Pontos de alinhamento.....	42
Figura 3.16 Resultado do processo de obtenção da malha.....	43
Figura 3.17 Processo de criação de malha (NextEngine, 2009).....	44
Figura 3.18 Tipos de erro na criação de malhas.....	44
Figura 3.19 Segmentação da peça digitalizada.....	45
Figura 3.20 Desvios adotados entre a malha gerada e a superfície ajustada	45
Figura 3.21 Cálculo de erros para ângulos (a), diâmetros(b), alturas (c,e d.)....	46
Figura 3.22 Planejamento hierárquico.....	48
Figura 4.1 Calibração da esfera do apalpador.....	51

Figura 4.2 Gráfico de erros para o furo circular.....	58
Figura 4.3 Gráfico de erros para o cone.....	58
Figura 4.4 Gráfico de erros para o eixo escalonado , alturas.....	59
Figura 4.5 Gráfico de erros para o eixo escalonado , diâmetros.....	60
Figura 4.6 Gráfico de erros para figura de forma angular.....	60
Figura 4.7 Gráfico de erros para o cilindro.....	61
Figura 4.8 Gráfico de erros para as escadas irregulares.....	61
Figura 4.9 Gráficos de erro para a esfera.....	62
Figura 1.10 Gráfico de medias das alturas vs erro.....	63
Figura 1.11 Gráfico de erros para os diâmetros e comprimentos.....	64

LISTA DE ABREVIATURAS Y SIGLAS

3D	Três dimensões
CAD	Projeto Auxiliado por Computador
CAE	Engenharia Auxiliada por Computador
CAM	Fabricação Auxiliada por Computador
MMC	Máquina de medição por coordenadas
CT	Tomografia computadorizada
R&R	Repetitividade e Reprodutividade
CCD	<i>Charge Coupled Device</i>
PDF	Função de distribuição de probabilidade
VIM	Vocabulário Internacional de Metrologia
ANOVA	Análise de variância
MANOVA	Análise de variância multivariada
G.L	Graus de liberdade
SQ	Soma dos quadrados
QM	Quadrados médios.

1. INTRODUÇÃO

As técnicas de engenharia reversa têm tido uma profunda difusão em muitos campos de aplicação, tais como conservação do patrimônio, medicina, indústria, desenho e animação 3D. A engenharia reversa representa o processo de análise de um sistema com o objetivo de identificar os componentes e seus relacionamentos, para criar representações no computador e, na maioria dos casos, para criar uma réplica que substitui aceitavelmente uma determinada peça (Jiménez *et al.*, 2006).

Através destas técnicas, modelos virtuais 3D de peças físicas são obtidas (Projeto Auxiliado por Computador, CAD), os quais podem ser usados para simulação e testes virtuais (Engenharia Auxiliada por Computador, CAE) ou ainda para fabricação (Fabricação Auxiliada por Computador, CAM).

A medição das peças pode ser feita usando tecnologias de digitalização 3D, tais como scanners laser, MMC (Máquina de medição por coordenadas), CT (tomografia computadorizada) ou sensores de luz estruturada.

Um instrumento muito usado para a medição é a Máquina de Medir por Coordenadas (MMC). Esta máquina permite determinar as dimensões e geometria das peças a partir de determinação das coordenadas cartesianas (X, Y, Z) da posição de ponto no espaço, em relação a um sistema de referência. Usando uma série de pontos, é possível construir um elemento geométrico através de algoritmos específicos que se aproxime ao máximo dos pontos. A MMC é um instrumento que tem a capacidade de determinar as dimensões, forma, posição e os desvios geométricos (perpendicularidade, planeza, etc.). Bons resultados podem ser alcançados quando o objeto medido tenha formas geométricas simples e bem definidas (Lima *et al.*, 2012).

Outro instrumento usado para medição é o *Scanner laser* 3D. Este instrumento permite determinar uma nuvem de pontos nas superfícies dos objetos, a qual é usada para obter uma aproximação da forma. Os pontos obtidos são representados através de um sistema cilíndrico de coordenadas, cuja origem é o próprio scanner, sendo que cada ponto obtido é associado com uma coordenada (θ , φ) e com uma distância que corresponde à componente r. Estas coordenadas cilíndricas descrevem completamente a posição 3D de cada ponto do modelo.

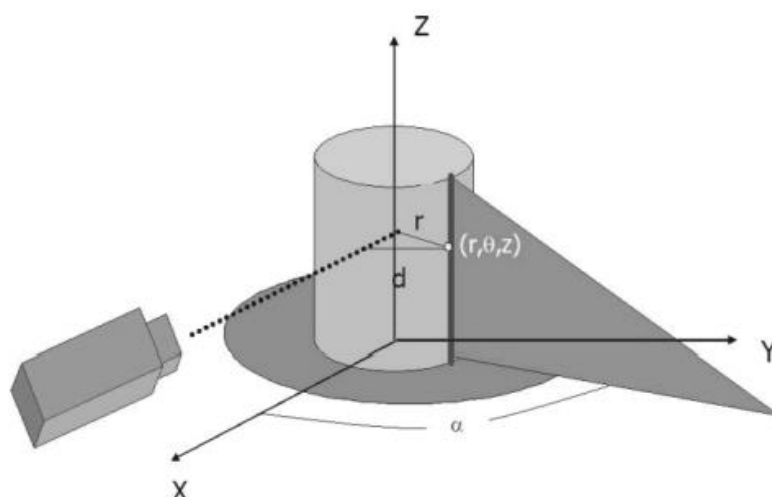


Figura 1.1 Geometria cilíndrica do scanner laser 3D

O método usado pelo scanner laser para determinar estes pontos é a triangulação, o qual consiste em determinar a profundidade da superfície mediante a interpretação da imagem gerada pelo feixe de laser refletido na superfície do objeto analisado (Sansoni *et al.*, 2009).

A utilização destes instrumentos de medição sem contato tem crescido devido a sua elevada velocidade de aquisição de pontos. Como qualquer instrumento de medição, os scanners são afetados por variáveis que introduzem erros na determinação das coordenadas dos pontos. Como exemplo, de fontes de erro, pode-se mencionar a imprecisão do hardware, a geometria da peça, as condições ambientais do laboratório e as opções selecionadas no software de digitalização. Essas fontes de erro podem ser parcialmente controladas para reduzir os erros nos dados obtidos com o instrumento (Sansoni *et al.*, 2009).

O objetivo deste trabalho é propor um método para verificar o desempenho do scanner laser tridimensional do fabricante Nextengine. O método empregado foi baseado em testes de repetitividade e reprodutividade (R&R), usado para avaliar sistemas de medição. Um padrão tridimensional foi projetado e fabricado em alumínio com características geométricas específicas, como círculos, cones, planos e esferas. As características geométricas medidas foram o diâmetro, ângulos, alturas e comprimentos, as quais foram comparadas com os resultados da calibração. A amplitude dos erros e a repetitividade do scanner foram estabelecidas como parâmetros de desempenho.

A estrutura do trabalho apresentado está dividida da seguinte forma: o segundo capítulo contém a revisão da literatura a respeito do scanner laser e dos erros relacionados, assim como a literatura a respeito das MMC; o cálculo de incerteza é estudado neste

mesmo capítulo junto com as variáveis que a influenciam. O terceiro capítulo descreve o método experimental usado, com o detalhamento de como foram realizadas todas as medições. O quarto capítulo contém os resultados obtidos e a sua discussão. Ao final, são apresentadas as conclusões.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, uma revisão bibliográfica a respeito dos métodos atuais de medição 3D com *scanner Laser* e Máquina de Medir por Coordenadas (MMC) é apresentada, com as características, vantagens e desvantagens de cada técnica de medição. Também é apresentado o cálculo de incertezas de medição e as variáveis que influenciam na incerteza.

2.1 DIGITALIZAÇÃO DE UMA PEÇA

As técnicas de digitalização 3D nos permitem captar os pontos de medição com maior precisão e velocidade, e pode ser usada em diferentes tipos de objetos, de diferentes dimensões, geometria e texturas.

Há diferentes sistemas de digitalização 3D, que principalmente podem ser divididos em dois grupos: sistemas com ou sem contato com o objeto a ser digitalizado.

2.1.1 Digitalização com contato

Estes sistemas de digitalização 3D são os mais antigos. Usado principalmente para a inspeção dimensional de peças (controle de qualidade). Com estes sistemas, obtêm-se as coordenadas de pontos por meio do deslocamento e contato de um sensor sobre a superfície a ser digitalizada.

No momento, há sondas de digitalização contínua e com contato. A taxa de aquisição de dados destas é aumentada de forma significativa em comparação com as sondas com contato convencionais, uma vez que estes não se afastam da superfície a ser digitalizada.

Outro sistema de digitalização 3D com contato são as MMCs modelo braço articulado, as quais são operadas manualmente. Estas têm uma precisão maior, mas têm uma taxa de aquisição de dados muito menor, já que é necessário trazer a sonda manualmente para cada ponto a digitalizar, o que torna a digitalização de um objeto de tamanho médio muito demorada.

Para utilizar estes sistemas, as peças devem ter uma rigidez elevada, de modo que não se deformem elasticamente no contato. Devido à geometria da ponta, a digitalização de algumas ranhuras e os ângulos interiores torna-se muito difícil se não impossível (Ferneda, 1999).

As Máquinas de Medir por Coordenadas conhecidas como MMC (*Coordinate Measuring Machine*), tais equipamentos surgiram no início dos anos 60, sendo a primeira MMC industrial da marca FERRANTI do fabricante MITUTOYO em 1998. Desde sua introdução, vem passando por diversos avanços ao longo dos anos com relação à precisão e velocidade de medição. São equipamentos que possuem grande aceitação em metrologia dimensional (Ferneda, 1999).

A MMC pode ser definida como uma máquina que usa três partes móveis que se deslocam ao longo de guias ortogonais para medir uma peça, determinando as coordenadas X, Y e Z dos pontos. Como as medições estão representadas no sistema tridimensional, a MMC pode realizar diferentes tipos de medição como dimensões e medições geométricas, com auxílio de um *software*.

As MMCs são instrumentos usados para a realização de medições dimensionais dos desvios dos objetos com regularidade geométrica simples ou complexa. Estes objetos podem apresentar diferentes tamanhos, tipos e materiais podendo ser medidos em laboratórios de metrologia, laboratórios industriais ou até na linha de produção. Existem diferentes modelos de MMCs, dependendo do volume de medição e da aplicação para a qual elas são feitas.

A posição de um ponto no espaço é definida, em coordenadas cartesianas, por os valores relativos dos três eixos X, Y e Z no que diz respeito a um sistema de referência. Usando um conjunto de pontos, pode-se construir um elemento geométrico que se aproxima através deles. Uma máquina de medição tridimensional é capaz de definir exclusivamente e com determinada precisão a posição destes pontos no espaço tridimensional, e de calcular parâmetros representativos das figuras geométricas onde estes pontos foram tomados. Uma Máquina de Medir por Coordenadas, é, portanto, um instrumento de medição capaz de determinar com precisão a dimensão, a forma, a posição, a planeza e a perpendicularidade de um objeto através da medição da posição dos diferentes pontos de sua própria superfície.

Quando comparadas com técnicas de inspeção manuais tradicionais, o benefício do uso das MMC está relacionado com os tempos de inspeção que são significativamente mais baixos, podendo-se observar normalmente reduções de 90%. Tais equipamentos podem ser usados para inspecionar peças complexas, bem como para a inspeção de componentes antes, durante e depois dos processos de produção individuais.

Hoje em dia, as MMCs são altamente automatizadas e frequentemente incorporam trocadores de sensor, sondas de sensor articuladas, manipulação de peça, identificação automática de peças, *software* controlado por usuário, análise estatística automática.

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

- Tipo braço horizontal como mesa fixa
- Tipo cantilever (braço balançado) com mesa móvel
- Tipo braço horizontal com mesa móvel
- Tipo ponte L
- Tipo cantilever (braço em balanço) com mesa fixa.
- Tipo ponte fixa
- Tipo coluna
- Tipo ponte móvel
- Tipo braço horizontal
- Tipo *Gantry* (ou pórtico)
- Tipo modo Duplex

2.1.2 Digitalização sem contato.

Nos últimos anos, a demanda por sensores ópticos 3D tornou-se cada vez mais relevante, o que levou ao desenvolvimento de novos instrumentos agora disponíveis. Durante a década de 1970 e 1980, seu desenvolvimento foi realizado principalmente em laboratórios de pesquisa, e tendo como objetivo projetar novas técnicas para explorar a utilização de feixes de luz (coerente e incoerente), em vez de sondas com contato, visando a sua aplicação na indústria de transformação mecânica, para a medição e controle de qualidade. Novos princípios de medição foram propostos e protótipos foram desenvolvidos e caracterizados para testar seu desempenho (Sansoni *et al.*, 2009).

Um considerável esforço foi dirigido para a miniaturização e integração de fontes de luz, detectores ópticos e componentes, com o equipamento eletrônico e a estrutura mecânica dos sensores. Na última década, a disponibilidade de novas técnicas levou à produção de uma vasta gama de instrumentos de digitalização sem contato, com resolução de medida de alguns nanômetros. Nos últimos tempos, a tendência tem sido produzir dispositivos com custos reduzidos e com uma maior robustez e portabilidade (Sansoni *et al.*, 2009).

Os sensores de imagem 3D geralmente funcionam projetando (forma ativa) ou adquirindo energia eletromagnética do objeto (forma passiva), registrando a energia transmitida ou refletida. O exemplo mais importante de aquisição da energia transmitida é a tomografia computadorizada industrial que utiliza energia de raios-x e mede a radiação transmitida através do objeto (Sansoni *et al.*, 2009).

Os sensores de reflexão para a aquisição de imagens podem ser classificados em sensores não óticos e óticos (Sansoni *et al.*, 2009).

Os sensores não óticos de detecção incluem sensores acústicos (ultrassom, sísmica), eletromagnéticos (infravermelho, ultravioleta, radar de micro-ondas, etc.) e outros. Estas técnicas normalmente podem medir distâncias de objetos através da medição do tempo necessário para que um impulso de som ou energia de micro-ondas retorne a partir do objeto (Sansoni *et al.*, 2009).

Os sensores óticos operam através da detecção por reflexão sendo que a luz transporta a informação de medição. Existe uma notável variedade de técnicas óticas em 3D, e sua classificação não é única. (Sansoni *et al.*, 2009).

As técnicas de sensores de imagem 3D são geralmente operadas pela projeção (método ativo) ou pela aquisição (método passivo) da energia eletromagnética transmitida ou refletida a partir de um objeto. O exemplo mais importante de medição a partir de energia transmitida é a tomografia computadorizada industrial (CT), este instrumento de medição usa energia dos raios x e mede a radiação transmitida através do objeto.

Os instrumentos de medição a partir de energia refletida podem ser divididos em detecção ótica e não ótica. A detecção não ótica inclui sensores acústicos (ultra sônicos, sísmicos), eletromagnéticos (infravermelho, ultravioleta, radar de micro-ondas). Estas técnicas medem a distância do objeto pela medida do tempo requerido para que um pulso de micro-ondas retorne do objeto. Na detecção ótica a luz leva a informação da medição.

As técnicas 3D são baseadas na triangulação ótica, no intervalo de tempo, e na utilização de imagens monoculares. Estas técnicas podem ser divididas em técnicas diretas e indiretas; nas técnicas diretas a medida da distância resulta dos dados obtidos pela configuração de distâncias entre a superfície desconhecida e a feixe incidente do sensor. E nas técnicas indiretas as distâncias são inferidas a partir de imagens monoculares e a partir do conhecimento prévio das propriedades do objeto. (Sansoni *et al.*, 2009).

Uma das técnicas de medição 3 D mais recentes foi desenvolvida no ano 2010, a Microsoft com ajuda da PrimeSense desenvolveram um sensor para controlar e interatuar com a consola de vídeo Xbox 360. Este sensor chamado Kinect usa o método ativo de não contato para fazer a medição das distancias.

Os sensores de triangulação laser são baseados no princípio de triangulação ativa. A técnica de triangulação laser está baseada na iluminação de uma peça com um padrão laser que pode ser uma linha laser, ou um ponto laser, ou um plano laser. A luz projetada da superfície do corpo produz um único padrão que depende da forma e das dimensões do corpo.

A figura 2.1 representa um arranjo ótico de triangulação onde utiliza um plano laser. Quando a linha é projetada na superfície (XY), a imagem é captada por uma câmara 2D. Se o sistema de observação é livre de aberrações, a imagem deve ser uma linha reta. O eixo óptico da câmara e o plano de laser projetado formam em um ângulo de inclinação α , e o deslocamento lateral d que sofre cada ponto da linha projetada com respeito a uma linha de referência, depende deste ângulo de inclinação, assim como também da rugosidade da peça, e sua coordenada radial com relação ao eixo de rotação.

A figura 2.1 mostra a deformação do feixe laser projetado, nesta figura o ponto O_c representa a pupila de entrada da câmara CCD e o ponto e O_p representam a saída do feixe laser do projetor. O parâmetro $d = \overline{O_p O_c}$ é a linha de referência do sistema e L é a distância entre a linha de referência e o campo de visão.

As coordenadas (X_s, Y_s, Z_s) de um ponto da peça (ponto S na figura 2.1) são avaliadas pela intersecção do segmento de linha $\overline{O_p S}$ pertencente ao plano σ e o segmento de linha $\overline{S O_c}$ pertencente à linha λ . A linha λ intercepta o plano imagem nas coordenadas (I_s, J_s) . O resultado é um ponto com triple coordenada (σ, I_s, J_s) . Estes pontos são digitalizados nas coordenadas espaciais por médio de adequados processos de calibração que estimam a posição e orientação do projetor laser e a câmara respeito ao sistema de coordenadas cartesianas (X, Y, Z) e a compensação das distorções radiais e tangenciais das lentes (Sansoni e Docchio, 2005).

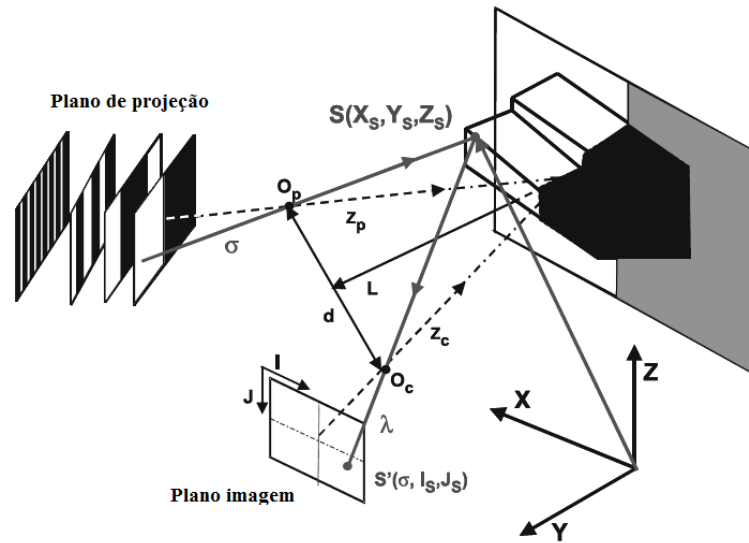


Figura 2.1 Geometria ótica da triangulação. (Modificado - Sansoni e Docchio, 2005)

Uma das vantagens mais significativas da triangulação laser é sua insensibilidade pequena às condições de iluminação ambiental e efeitos de textura de superfície. Os instrumentos que empregam a triangulação laser são amplamente utilizados no campo da indústria, para a medição de distâncias, diâmetros, espessuras, bem como na avaliação de superfície durante o controle de qualidade. Os instrumentos que empregam luz laser estão se tornando populares para o controle de qualidade, engenharia reversa e modelagem de artefatos e obras de arte. Alguns exemplos são o sistema 910 *Vivid* (*Konica Minolta*, Inc.), o *SmartRay* sensores da série *SmartRay* (*GmbH*, Alemanha) e os sistemas *ShapeGrabber* (*ShapeGrabber Inc.*, CA, EUA). Sensores 3D são projetados para integração com braços de robô, para implementar estações "*Pickandplace*". O sistema *NextEngine* (*NextEngine Inc.*, CA, EUA) e o scanner (*Comtronics Inc.*, EUA) mostram um preço bastante reduzido desta tecnologia (Sansoni *et al*, 2009).

2.2 ERRO NO SCANNER LASER.

Nos últimos anos a demanda por sensores óticos de imagem 3D tem vindo a aumentar e tem permitido o desenvolvimento de ferramentas que já estão validados comercialmente. Durante os anos 1970 e 1980, seu desenvolvimento foi principalmente feito em laboratórios de pesquisa e teve como objetivo projetar novas técnicas que exploram o uso de feixes de luz (coerente e incoerente) em vez de sondas de contato,

tendo em vista a sua aplicação na indústria de fabricação mecânica para aplicações de medição e controle de qualidade. Foram propostos novos princípios de medição.

Na última década, a disponibilidade de técnicas e componentes levou à produção de uma ampla variedade de dispositivos comercialmente disponíveis, com a resolução de alguns nanômetros até frações de um metro, e em intervalos de medição de micrometros até alguns quilômetros. A tendência tem sido para produzir dispositivos de menor custo e maior robustez e portabilidade.

Como resultado, o interesse na utilização do sensor de imagem 3D aumentou já que na indústria mecânica e de produção, em superfícies de controle de qualidade, e em *microprofilig* é usada a base da ótica de não-contato. Mas neste momento, a exatidão da medição e a eficiência do processo são os pontos críticos da técnica. (Sansoni *et al.*, 2009).

Apesar da crescente utilização de tecnologias de scanner 3D ainda não existem certificações e padrões unificados para a avaliação do desempenho destes e as determinações das características do processo de medição, estas características são a precisão a qual está associada à proximidade do valor verdadeiro, e a repetitividade a qual está associada à dispersão dos valores resultantes de uma série de medidas, sendo que ainda não foram definidos (Nick Van Gestel, 2009).

Como todo instrumento de medição o scanner laser está sujeito à ação de fontes internas e externas que causam erros no resultado da medição. O erro é constituído por dois componentes, uma componente aleatória e uma componente sistemática (BIPM, 2008).

O erro aleatório se origina de variações temporais ou espaciais, estocásticas ou imprevisíveis, das variáveis envolvidas na medição. Os efeitos de tais variações, chamados efeitos aleatórios, são a causa de variações em observações repetidas do mensurando. Embora não seja possível compensar o erro aleatório de um resultado de medição, ele pode geralmente ser reduzido aumentando-se o número de observações (BIPM, 2008).

O erro sistemático da medição é o resultado de uma medição menos o valor verdadeiro do mensurando. Se um erro sistemático se origina de um efeito reconhecido de um parâmetro de influência em um resultado de medição, é chamado efeito sistemático, o efeito pode ser quantificado como valor medido resultado de medições do mesmo mensurando efetuadas nas mesmas condições de repetitividade, menos o valor verdadeiro

obtido por uma medição perfeita, uma vez que o valor verdadeiro não pode ser determinado, utiliza-se, na prática, um valor convencional (BIPM, 2008).

O scanner laser é um dispositivo opto - eletrônico. As coordenadas 3D de um ponto digitalizado são determinadas com base no princípio da triangulação ótica, a partir da imagem do feixe laser, e através de um fotodetector CCD (*Charge Coupled Device*). Assim a variação dos parâmetros do processo de digitalização, tais como a intensidade do laser de imagem e área de foco, influencia potencialmente a precisão da medição. A Figura 2.2 descreve a geometria de uma triangulação laser baseada num sensor típico laser. Os raios laser da fonte são focados em um ponto fixo da PT , que está muitas vezes dentro da janela de digitalização do sensor laser. A superfície digitalizada difunde os raios laser, os quais são focados para formar a imagem correspondente de laser sobre o fotodetector (Sansoni e Docchio, 2005).

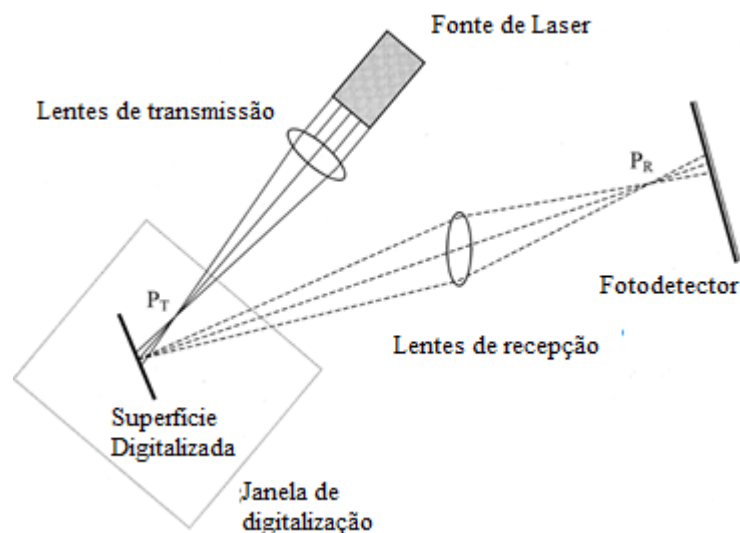


Figura 0.1 Configuração típica da triangulação. (Modificado de Sansoni, *et al.*, 2009)

A fonte de luz laser ilumina a superfície digitalizada, sendo que a posição desta muda dentro da janela de digitalização, porém a intensidade e a área do ponto de laser iluminado nesta superfície muda. A luz laser é refletida pela superfície levando a raios difusos por uma lente de recepção que converge estes no ponto de focagem PR , esta lente de recepção muda devido às diferenças relativas de distância entre a superfície digitalizada e esta. Estes dois efeitos causam, juntos, variações na intensidade e na área da imagem de laser percebida pelo sensor câmera CCD. De uma maneira semelhante, as mudanças na orientação da superfície digitalizada com respeito aos raios de laser incidente variam a

intensidade e a área da imagem. Isto indica que a posição e orientação da superfície digitalizada dentro da janela de digitalização afetam a precisão de digitalização. Entre os vários parâmetros do processo de digitalização, a profundidade de digitalização está relacionada diretamente com a posição da superfície de digitalização dentro da janela de digitalização. A orientação da superfície digitalizada com respeito aos raios laser incidentes pode ser representada pelo ângulo de incidência no plano de varredura e o ângulo projetado fora do plano de digitalização, como mostrado na figura 2.3 (Sansoni, *et al*, 2009).

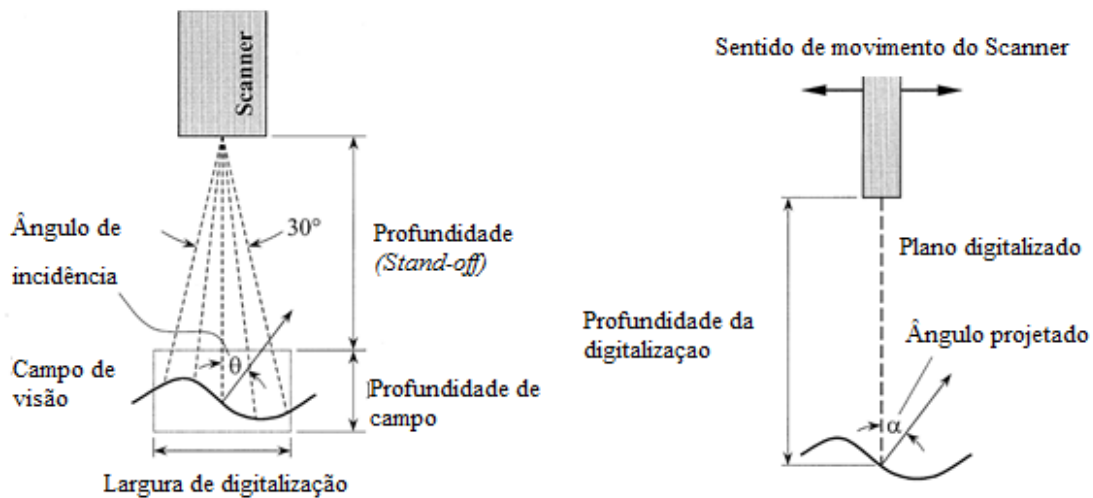


Figura 0.2 Parâmetros de digitalização: ângulo incidente, ângulo projetado, e profundidade de digitalização. (Modificado- Sansoni *et al.*, 2009)

Na figura 2.3, o ângulo de incidência é o ângulo entre os raios laser incidente e a superfície normal projetada do ponto digitalizado e do plano digitalizado. O ângulo projetado é o ângulo normal (mínimo) entre a superfície normal do ponto de digitalização e o plano de digitalização. Como o scanner laser digitaliza a superfície de um objeto, cada ponto digitalizado corresponde a um conjunto único de profundidade de digitalização, o ângulo de incidência e o ângulo projetado.

O erro aleatório nos dados digitalizados vem de um grande número de fontes temporais e espaciais, imprecíveis ou estocásticas, difíceis de controlar. Para os scanners laser baseados na triangulação, o ruído *speckle* causado pela soma de ondas de luz sobre o CCD é uma das principais fontes de contribuição para o erro aleatório, sendo este causado pela transmissão ou espalhamento do feixe de luz laser de uma superfície com rugosidades da ordem do comprimento de onda incidente ocorrendo a formação de uma estrutura granular no espaço livre de um fenômeno de interferência. A somatória de ondas de luz

muitas vezes envolve fasores aleatórios. Estes fasores podem-se reforçar ou cancelar um com o outro, levando a escuridão ou manchas brilhantes, respectivamente. Este processo aleatório cria incertezas da determinação do centroide exato de posição da imagem de laser CCD, que é usado para calcular as coordenadas digitalizadas. (Guidi *et al.*, 2011)

Como a medida do erro sistemático corresponde à interpretação errada repetível das imagens no fotodetector CCD, os três parâmetros do processo de varredura (profundidade de digitalização, o ângulo de incidência, e ângulo projetado) que afetam as propriedades da imagem CCD são considerados como tendo efeitos primários sobre o erro sistemático. Os erros sistemáticos, devidos ao ângulo de incidência são minimizados pelo fabricante durante a configuração do sistema. Os erros sistemáticos devido à profundidade de digitalização e ao ângulo projetado deve ser identificado usando um procedimento experimental. A figura 2.4 mostra um exemplo gráfico do erro sistemático e o erro aleatório.

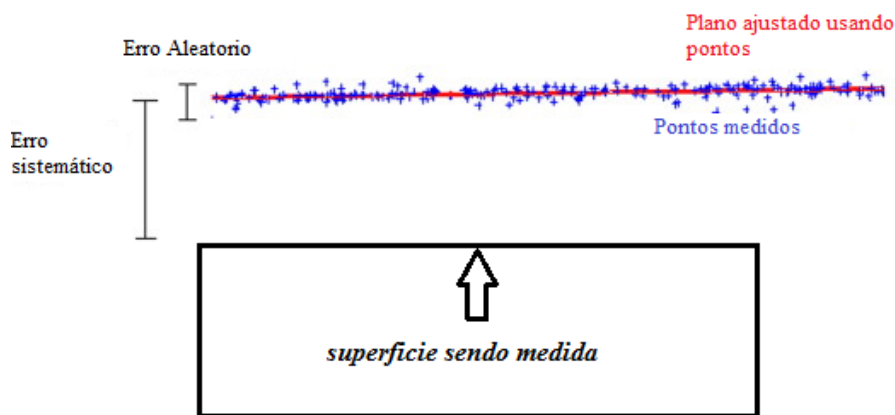


Figura 0.3 Erro sistemático e aleatório (modificado - Qing *et al.*, 2013).

Qing, Nick e Roger (2013) fazem uma análise das técnicas de exploração em larga escala usando um scanner laser. Estes autores investigaram os erros aleatórios e sistemáticos que surgem durante o processo de medição. Foram realizadas medições de pontos e superfícies das nuvens de pontos obtendo como resultado que a consistência das medições de distância entre dois pontos foi de 65 μm e entre duas superfícies foi de 9 μm .

Um Efeito físico que corresponde a importantes fontes de erro, afetando a precisão e a incerteza de um sensor ativo é a penetração superficial do laser, esta é raramente explorada (figura 2.5), este efeito faz que a porcentagem do feixe laser incidente na peça de superfície semitransparente seja refletido em profundidades diferentes, devido ao índice de refração do material, este efeito é estudado em (Godin *et al.*, 2001).

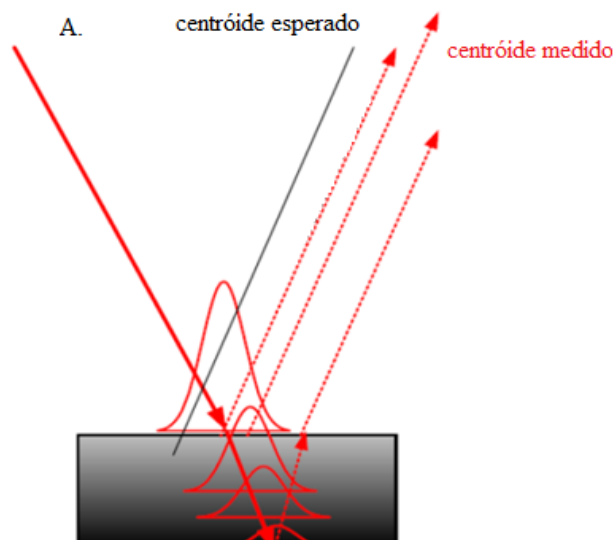


Figura 0.4 O efeito da penetração da superfície do ponto do laser

Outros efeitos físicos que podem se considerar como fonte de ruído são: o tamanho do feixe laser, o ruído ambiental (elétrico), e a geometria da câmera CCD.

Em todo processo de medição há limitações relacionadas aos instrumentos utilizados, ao método de medição e ao observador que realiza a medição. Os instrumentos que são usados para medir e os próprios parâmetros são fontes de incertezas na medição. Os instrumentos possuem uma precisão finita, de modo que, para um determinado instrumento, há sempre uma variação mínima da parâmetro que pode ser detectada. Esta quantidade mínima é chamada a resolução.

Como foi discutido acima, a precisão de um aparelho ou um método de medição está relacionado com a sensibilidade ou menor variação da parâmetro que pode ser detectada com qualquer instrumento ou método. A figura 2.6 ilustra esquematicamente o conceito de precisão, onde o centro do círculo indica a posição do "valor verdadeiro" do mensurando, os círculos vermelhos representam os valores de várias medições da parâmetro escolhida com alta repetitividade e baixa exatidão, os quadrados amarelos representam valores de várias medições da parâmetro escolhida com baixa repetitividade e alta exatidão. A dispersão dos pontos dá uma ideia da precisão que é a exatidão mais a repetitividade.

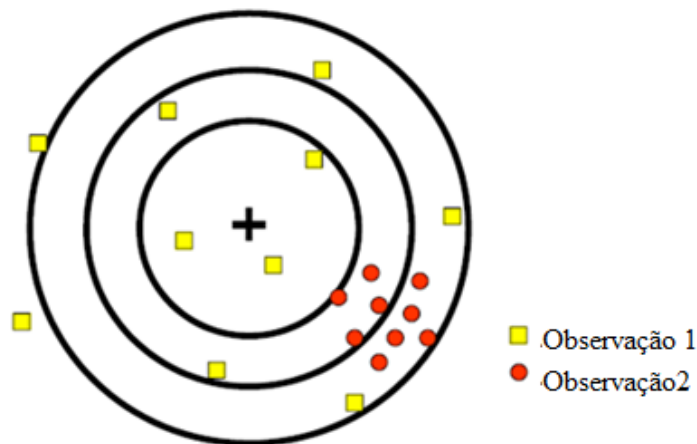


Figura 2.6 Interpretação gráfica de precisão, exatidão e repetitividade.

2.3 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A declaração de um resultado de uma medição só está completa se incluir o valor atribuído ao mensurando e a incerteza da medição associada a esse valor. A incerteza de medição é um parâmetro, associado ao resultado da medição, que caracteriza a dispersão de valores que podem razoavelmente ser atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2012). A avaliação da incerteza é convencionalmente feita pelo uso do método proposto pela ISO e chamado de *GUM*, que é baseado na definição de uma relação funcional entre uma parâmetro aleatória (mensurando) e várias parâmetros de entrada como é mostrado na equação 2.4.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad \text{Eq (2.4)}$$

Na equação 2.4 a função f do modelo estatístico representa o procedimento de medição e o método de avaliação, descrevendo a forma como o valor do mensurado Y é obtido a partir das N parâmetros de entrada X_i . Em muitos casos pode constituir uma simples expressão analítica explícita, mas pode ser também uma relação implícita mais complexa, ou ser apenas determinada experimentalmente ou ainda um mero algoritmo computacional.

As parâmetros de entrada nesta expressão tem associada uma função de distribuição de probabilidade (pdf) que caracteriza razoavelmente o seu comportamento, tendo por isso uma natureza aleatória que condiciona o valor real do mensurando, não permitindo o seu conhecimento exato. Daí a necessidade de associar ao resultado da medição uma estimativa da dispersão dos valores em torno do valor obtido, dada pela incerteza padrão.

A estimativa resultante denominada por y , é obtida da equação (2.5) usando estimativas das parâmetros de entrada x_i para os valores das dessas parâmetros (BIPM,2008).

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad \text{Eq (2.5)}$$

A incerteza de medição associada com as estimativas das parâmetros de entrada é avaliada de duas formas distintas: avaliação tipo A ou avaliação tipo B. Esta classificação não indica que exista alguma diferença na natureza das componentes resultantes, os dois tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade e as componentes resultantes são quantificadas usando variâncias ou desvios padrão. A variância estimada s^2 das n observações individuais q_k é mostrada na equação 2.6, esta descreve a componente da incerteza obtida pela avaliação tipo A, conhecida como variância estimada estatisticamente.

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad \text{Eq (2.6)}$$

Onde \bar{q} é a media aritmética de n observações independentes obtidas nas mesmas condições de medida de uma parâmetro q como é mostrado na equação 2.7.

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad \text{Eq (2.7)}$$

A melhor estimativa de s^2 é a variância da media dada pela equação 2.8.

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q_k)}{n} \quad \text{Eq (2.8)}$$

Deste modo para uma parâmetro de entrada X_i , a incerteza padrão s tipo A é a raiz quadrada positiva da variância tipo A s^2 .

Para uma medição bem planejada sob o controle estatístico, pode estar disponível uma estimativa da variância s_p^2 ou também conhecida como o desvio padrão agrupado experimental que caracteriza a medição. Nesse caso, a variância experimental da média

aritmética \bar{q} das n observações é mais bem estimada por s_p^2/n , e a incerteza padrão s_p/\sqrt{n} . s_p^2 é mostrada na equação 2.9 é efetuada sob um conjunto de N observações independentes da mesma variável aleatória.

$$s_p^2 = \frac{\sum_{i=1}^N v_i s_i^2}{\sum_{i=1}^N v_i} \quad \text{Eq (2.9)}$$

Para uma componente de incerteza obtida de uma avaliação tipo B, a variância estimada s^2 é avaliada mediante o julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a variabilidade de uma parâmetro de entrada. Estas informações podem ser encontradas em um certificado de calibração, manual técnico, padrão de referência e respectiva degradação ou instabilidade no seu valor ou indicação, a resolução e estabilidade do equipamento sob calibração, o procedimento ou método de medição (e.g. erros de alinhamento) e os efeitos das condições ambientais. Depois de identificados todos os possíveis componentes da incerteza, baseados tanto quanto possível em dados experimentais ou considerações teóricas, eles deverão ser caracterizados em termos de desvios padrão com base nas distribuições de probabilidades assumidas. A distribuição de probabilidade de uma incerteza obtida de uma avaliação do tipo B pode tomar uma variedade de formas, mas é em geral aceitável assumir formas geométricas bem definidas para as quais o desvio padrão pode ser obtido facilmente. As figuras 2.7 e 2.8 representam a estimativa de uma parâmetro de entrada X_i e a avaliação da incerteza desta a partir de uma distribuição de probabilidade conhecida *a priori*, para ambos os casos a parâmetro de entrada é suposto, sendo a temperatura. Para o caso mostrado na figura 2.7 pode se concluir que tem uma distribuição de probabilidade retangular simétrica, de limite inferior a_- , de limite superior a_+ com uma meia largura de $a = (a_+ - a_-)/2$ tendo como densidade de probabilidade de t é

$$p(t) = 1/2 \text{ Para } a_- \leq t \leq a_+$$

$$p(t) = 0 \text{ Para outros valores}$$

$$\text{A incerteza padrão desta estimativa é } s(\mu_t) = a/\sqrt{3}.$$

Para o caso mostrado na figura 2.8 pode ser descrito por uma distribuição de probabilidade *a priori* triangular e simétrica dos mesmos limites inferior e superior e meia largura. A função de densidade de probabilidade de t é

$$p(t) = (t - a_-) / a^2, \quad a_- \leq t \leq (a_+ + a_-) / 2$$

$$p(t) = (a_+ - t) / a^2, \quad (a_+ + a_-) / 2 \leq t \leq a_+$$

$p(t) = 0$ Para outros valores

A incerteza padrão desta estimativa é $s(\mu_t) = a / \sqrt{6}$.

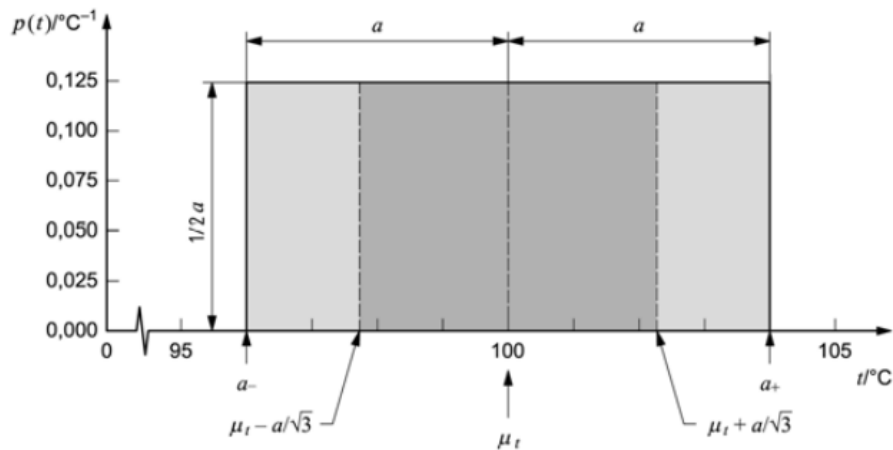


Figura 2.7 Representação gráfica da avaliação de incerteza de um parâmetro de entrada a partir de uma distribuição a priori, distribuição de probabilidade retangular (modificado- BIPM, 2008)

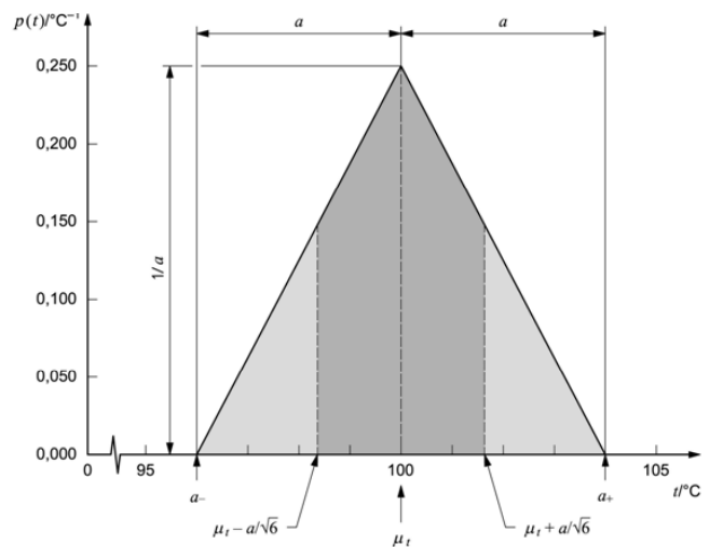


Figura 2.8 Representação gráfica da avaliação de incerteza de um parâmetro de entrada a partir de uma distribuição a priori, distribuição de probabilidade triangular. (modificado- BIPM, 2008).

Uma vez determinadas as incertezas padrão das variáveis de entrada x_i , é preciso determinar a incerteza padrão combinada $u_c(Y)$ do valor do mensurando. Para isto, deve ser aplicada a lei de propagação de incertezas (BIMP,2008). No caso das parâmetros de entrada não correlacionadas, a representação simplificada mais usual deste cálculo é indicada pela equação 2.10, onde $c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i}$.

$$u^2(y) = \sum_{j=1}^n c_j^2 u^2(c_j) = \sum_{i=1}^n u_{x_i}^2(y) \quad \text{Eq (2.10)}$$

Em metrologia, porém, é habitual a utilização de intervalos de confiança, normalmente de 95%, aos quais corresponde a adoção de um fator de abrangência igual a $k=2$, considerando que a distribuição associada a y é normal, de acordo como Teorema do limite central. Uma probabilidade de 99% pode ser adotada e deve ser mencionada no cálculo. A adoção de níveis de confiança na expressão da incerteza de medição designada por incerteza expandida, genericamente representada na forma da equação 2.11, onde k representa o fator de abrangência.

$$U = k \cdot u(y) \quad \text{Eq (2.11)}$$

O cálculo do fator de abrangência k deve ser baseado na distribuição *t-Student*, a qual permite determinar a incerteza expandida a partir de amostras de qualquer tamanho garantindo uma incerteza expandida U com o nível de confiança requerido. Para se ter este k é necessário determinar uma estimativa do número efetivo de graus de liberdade ϑ_{eff} associado à incerteza padrão combinada $u(y)$. O GUM recomenda que a equação de *Welch-Satterthwaite* seja utilizada para calcular o valor de ϑ_{eff} , baseada nos graus de liberdade ϑ_i das componentes de incerteza individuais, conforme mostrado na equação 2.12.

$$\vartheta_{eff} = \frac{u^4(y)}{\sum_{i=1}^n \frac{u_i^4(y)}{\vartheta_i}} \quad \text{Eq (2.12)}$$

O valor dos graus de liberdade ν_i para as incertezas padrão $u(x_i)$ obtidas de avaliações do tipo A resulta da dimensão da amostra, sendo igual a $(N - 1)$ se a amostra tiver uma dimensão n . No caso das contribuições do tipo B é normalmente possível tomar um número de graus de liberdade ν_i como sendo infinito, isto é, o seu valor é conhecido com um grau de confiança muito elevado (BIPM, 2008).

2.4 TESTES DE DESEMPENHO EM LASER SCANNERS 3D

Apesar de que seu uso data de mais de 20 anos atrás, atualmente ainda não existe protocolo de teste padrão para avaliar o desempenho dos sistemas de imagem 3D, tais como scanners a laser ou sensores 3D, assim como não há métodos para avaliar a precisão da saída de derivados, tais como modelos 3D, volumes, ou dimensões geométricas (Beraldin *et al.*, 2005). No entanto, existe uma necessidade de avaliar o desempenho operacional, estabilidade e repetitividade, resolução espacial e temporal destes instrumentos. A compreensão da teoria básica e da operação de sensores ativos é essencial para analisar estas características.

O procedimento de calibração padrão especificado pelo fabricante de *Scanners Lasers* envolve a minimização do efeito da variação do ângulo de incidência dos pontos digitalizados na determinação da exatidão. Os efeitos da profundidade de verificação e, mais importante, do ângulo projetado não são considerados no procedimento de calibração padrão. O erro resultante da digitalização nos dados obtidos representa uma combinação de erros aleatórios e erros sistemáticos. O erro produzido pela profundidade já foi estudada por Gestel e Cuypers (2009). Os autores propõem um método que usa um artefato planar, qual permite identificar a influência do ângulo de incidência com o plano e a profundidade de digitalização nos erros sistemáticos e aleatórios do scanner laser. Os resultados experimentais mostraram que o *Scanner Laser* testado apresentou erros sistemáticos de cerca de 10 μm .

Procedimentos de testes adotados pela indústria para sistemas de imagens 3D são definidos isoladamente e as características técnicas obtidas não são com frequência comparáveis entre si. Portanto, grupos de trabalho específicos foram criados para definir um padrão e criar uma norma metrológica para testar dispositivos ópticos 3D.

Polo e Felicísimo (2012) fizeram a análise de incerteza e repetitividade de um scanner 3D de baixo custo modelo NextEngine scanner. As medições de um objeto foram feitas

pela digitalização com o scanner e foram comparados com medições feitas com um paquímetro digital (resolução correspondente a 0,01 mm), tomados como valores verdadeiros. Os autores realizaram as medições de duas seções do objeto mostrado na figura 2.9, escolhidas com antecedência, depois calcularam as regressões lineares correspondentes para medir a incerteza. Como resultado para um intervalo de confiança de 95%, foram obtidos para o modo *wide* o valor 0,84 mm e para o modo *macro* o valor 1,82 mm. Estes resultados experimentais são significativamente mais elevados comparativamente com os valores relatados pelo fabricante.

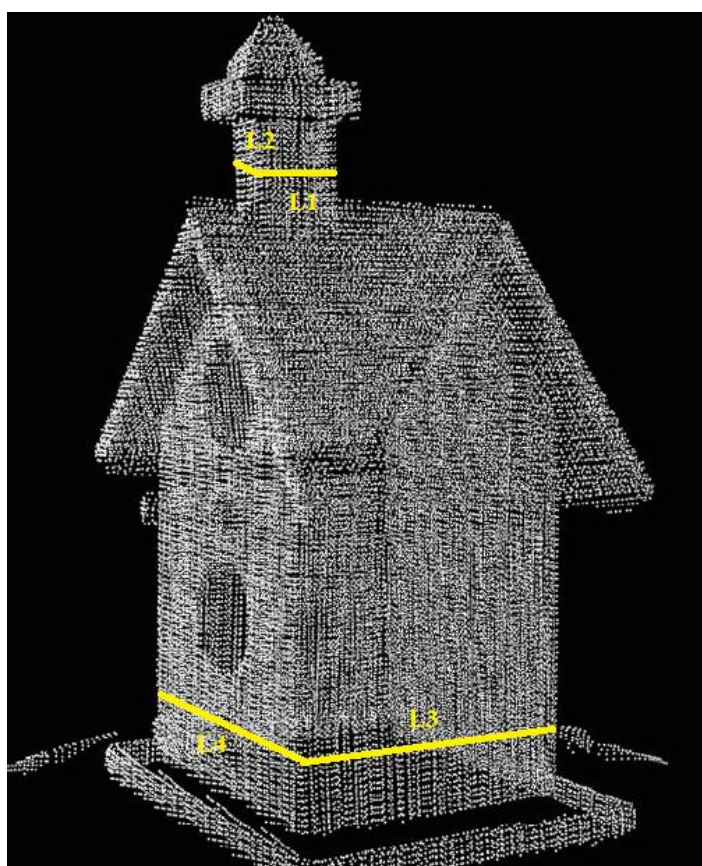


Figura 2.9. Nuvem de pontos obtida pelo scanner Nextengine para o objeto selecionado; seções escolhidos do objeto para medição do comprimento. (Modificado - Polo e Felicísimo, 2012).

Guidi *et al.* (2011) realizaram a avaliação e caracterização de instrumentos de medição 3D sem contato efetuando um teste de desempenho. Foram investigados os efeitos físicos, tais como a penetração de superfície laser e a amplitude de operação que afetam a precisão de um sensor 3D. A digitalização foi efetuada em um plano de referência feito em vidro,

cujo desvio máximo é maior que um micrometro. Os scanners utilizados para comparação foram NextEngine, Minolta Vivid 910, ShapeGrabber SG100.

A nuvem de pontos obtida desta superfície é ajustada a um plano e considerada como o valor convencional. A incerteza expandida de cada um destes instrumentos foi determinada, sendo que para o *scanner* NextEngine este valor foi de 48 micrometros.

Guidi *et al.* (2010) realizaram a caracterização de sete tipos diferentes de *scanners* 3D através da determinação da resolução, exatidão e incerteza expandida. Os resultados das medições sobre os artefatos mostrados na figura 2.10 foram feitas pelo scanner e comparados com os valores verdadeiros (medidas feitas na MMC). Foram encontrados dois tipos diferentes de incerteza, para ângulos e comprimentos. Para o scanner laser Nextengine foram relatadas as incertezas expandidas com valores de $0,11^\circ$ para ângulos, $221 \mu\text{m}$ para alturas, e $12 \mu\text{m}$ para o cálculo do raio.

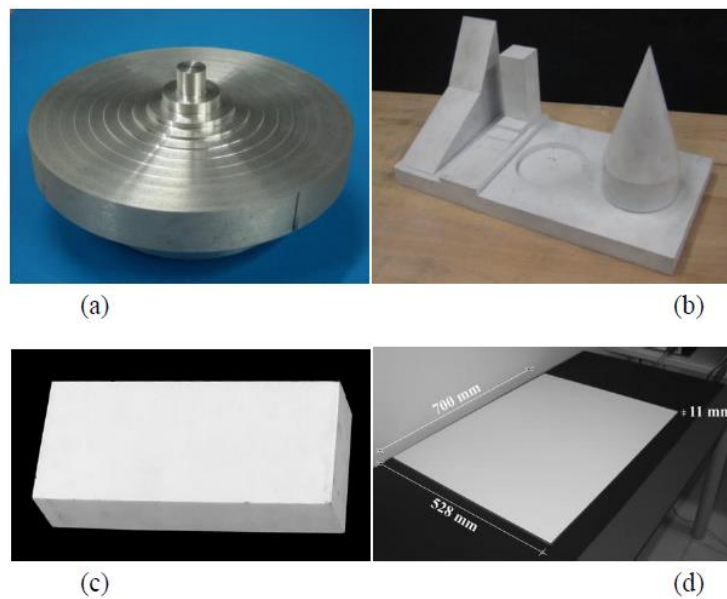


Figura 2.10. Objetos de teste. a). Escadas em Z, b) diferentes tipos de sólidos, c) paralelepípedo e d) plano de referência (modificado - Guidi *et al.*, 2010)

Barbero e Ureta (2011) realizaram um estudo comparando diferentes técnicas de digitalização. As técnicas investigadas foram tomografia computadorizada, MMC com sonda laser, scanner laser HAndyScan Exascan, Scanner laser câmera Krypton, Projeção de listras com Athos.

Os autores realizaram cinco medições de objetos calibrados (esfera, bloco e cilindros). As medidas tomadas como valor verdadeiro foram obtidas no certificado de calibração.

Dos objetos foram feitas as medições nas três peças calibradas obtendo assim valores de incerteza de medição dos instrumentos de acordo com a metodologia proposta pelo ISO GUM. Também foi realizada uma comparação entre as malhas geradas pelos sistemas de digitalização Mimics 13.0 (Materialise N. V.), Focus-Inspection, VxScan, Metris Scan e GOM 3-D ATOS. A comparação foi feita segundo a qualidade da malha, caracterizando os defeitos obtidos. A nuvem de pontos foi filtrada e otimizada com o software Catia, em cada um dos 5 sistemas de digitalização, a fim de comparar as malhas resultantes.

Outra contribuição para a avaliação do desempenho de scanners laser foi feito por Crescenzo *et al.* (2011), no qual foi realizada uma análise experimental para a compensação de erros sistemáticos de pontos XYZ obtidos por triangulação laser. Um scanner laser Konica Minolta 9i vívida foi usado com três tipos de lentes variando a distância entre o objetos e o scanner. Um plano de referência foi medido, obtendo assim uma nuvem de pontos ajustada.

Foram calculadas as distâncias médias, máximas e mínimas nas direções X e Y. Na sequência foi observada uma grande dispersão nas arestas do plano como pode ser visto na Figura 2.11. Para o plano adquirido, foi encontrado um valor de incerteza de 0,164 mm e para o plano compensado um valor de 0,106 mm, o valor da compensação de erro foi achado pelo cálculo do erro sistemático. O valor de exatidão para o plano compensado foi próximo ao valor informado pelo fabricante 0,100 mm. Esta metodologia pode ser amplamente utilizada para diferentes tipos de scanners lasers 3D, sendo que estudos mais detalhados dos erros e da variabilidade das medições pode proporcionar informação mais detalhada.

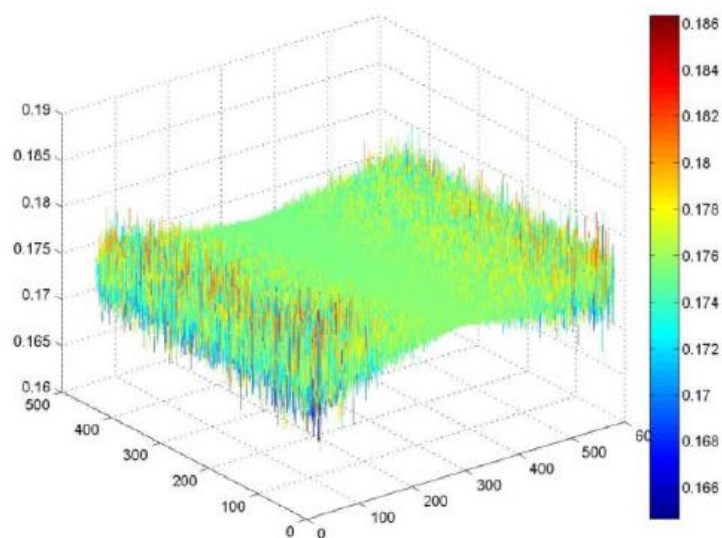


Figura 2.11. Valores de dispersão em x.

2.5 ESTUDO DA VARIABILIDADE DO SISTEMA DE MEDIÇÃO TESTES R&R

O estudo da variabilidade em sistemas de medição tem sido proposto pela literatura como forma de avaliar parâmetros como a repetitividade e a reprodutividade (AIAG, 2002). O objetivo destes estudos é avaliar a capacidade do sistema de medição quanto aos erros, determinados como, a combinação de linearidade, repetitividade e reprodutividade.

De acordo com o VIM (Vocabulário Internacional de Metrologia) a repetitividade (**r**) dos resultados das medições é a aptidão de um instrumento de medição em fornecer indicações muito próximas, em repetidas aplicações do mesmo mensurando. Onde estas condições são chamadas de condições de repetitividade. As condições de repetitividade incluem o mesmo processo de medição, o mesmo observador, o mesmo instrumento de medição, usado sob as mesmas condições, o mesmo lugar, repetem em um curto período de tempo.

De acordo com o INMETRO (2012) a reprodutividade (**R**) dos resultados de medição é o grau de concordância entre os resultados de medições sucessivas de um mesmo mensurando sob condições variadas de medição. Onde a declaração válida da reprodutividade requer que você especifique as condições alterações. Mudanças nas condições podem incluir: princípio de medição, método de medição, observador, instrumento de medição, padrão de referência, localização, condições de utilização, tempo.

Os métodos aceitáveis para a determinação de estudos da repetitividade e reprodutividade são baseados na avaliação estatística da dispersão dos resultados, seja através da amplitude estatística (máximo - mínimo) ou pelas variâncias ou desvios-padrão. Os métodos mais empregados são: amplitude, média e amplitude, ANOVA (análise de variância), e MANOVA (análise de variância multivariada) (AIAG, 2002).

- Método de amplitude: Este método fornece uma imagem completa do sistema de medição. Não analisando a variabilidade pela repetitividade e reprodutividade.
- Método da média e amplitude: Este método permite uma estimativa da reprodutividade tanto da repetitividade, no entanto, não divulga sua interação, a interação entre a repetitividade e reprodutividade, ou entre o instrumento e o operador pode saber se há com método de análise de variância.

- Método ANOVA: análise de variância (ANOVA) é uma técnica estatística padrão e pode ser usada para analisar o erro de medição e outras fontes de variabilidade de dados num sistema de medição de estudo. Na análise de variância, a variação pode ser decomposta em quatro categorias: partes, avaliadores, interação entre avaliadores e as partes, e erro devido à réplica. A tabela ANOVA é utilizada para decompor o desvio total em quatro componentes: partes, avaliadores, avaliadores e interação das partes, e repetitividade devido ao instrumento. A Tabela 2.1 mostra os cálculos de ANOVA, para uma amostra de efeitos fixos, onde g.l representa os graus de liberdade, SQ representa a soma dos quadrados e QM representa os quadrados médios.

Tabela 2.1 Quadro para determinação da ANOVA.

Fonte	g.l	SQ	QM	f_{calc}
Modelo	1	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{1}$	QM Modelo/
Resíduos	$n - 2$	$\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2$	$\frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{n - 2}$	QM Resíduos
Total	$n - 1$	$\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2$	—	—

A análise é completada por comparação do valor obtido em relação ao r reprodutividade da repetitividade R apresentada na equação 2.15.

$$\sigma_{GRR}^2 = \sigma_{reprodutividade}^2 + \sigma_{repetitividade}^2 \quad \text{Eq (2.15)}$$

Se a reprodutividade é inferior a 10% da repetitividade ($R < 0,1 \times r$), e geralmente considerado que a reprodutividade é aceitável e existe compatibilidade entre as diferentes condições. Se reprodutividade é entre 10% e 30% da repetitividade ($0,1 \times r < R < 0,3 \times r$), considera-se que a reprodutividade entre os diferentes condições pode ser aceitável com base na importância do pedido, o custo de equipamentos de medição, o custo do serviço de calibração ou de reparação, etc. Se a reprodutividade é superior a 30% da repetitividade ($R > 0,3 \times r$) deve ser melhorado o sistema de medição (pessoal, equipamentos, métodos, as condições). Ao analisar as informações geradas pelo estudo de R & R é possível avaliar as causas da variação do sistema ou um instrumento.

3. METODOLOGIA.

Na metodologia proposta para testar o desempenho do scanner laser 3D Nextengine deve ser usado um padrão ou peça teste calibrada. O padrão deve ser medido no scanner laser 3D Nextengine e os valores dos erros de medição devem ser computados e apresentados em gráficos e índices que reportem as suas características metrológicas. A nuvem de pontos obtida na medição com o scanner deve ser processada e ajustada usando o software Rapidworks.

O desenvolvimento desta metodologia envolveu o projeto, a construção e a calibração de um padrão tridimensional com diferentes elementos geométricos. Os erros foram analisados usando técnicas de testes de repetitividade e reprodutividade (R&R). Foi realizada uma análise de gráficos de média e amplitude e também foi realizada uma análise de variância para determinar um índice que expresse o comportamento do instrumento.

3.1 PEÇA PADRÃO

A peça padrão selecionada para a obtenção dos dados calibrados foi projetada no laboratório de processos de fabricação da Universidade de Brasília. A esta peça pertencem um conjunto de oito tipos de figuras geométricas bem definidas tais como cone, esfera, cilindro, eixo escalonado, escadas irregulares, furo circular e furo retangular e uma figura em forma angular, as quais foram escolhidas porque fornecem superfícies bem definidas para definir as características dimensionais destas nos eixos XYZ.

O primeiro passo foi o desenvolvimento de um modelo tridimensional da peça, utilizando o software *SOLIDEDGE*. Após obter o desenho da peça mostrada na figura 3.1, foram usinadas em alumínio cada uma das oito figuras geométricas.

As figuras geométricas foram feitas separadamente em uma máquina *IMOR* modelo RN400 permitindo usinar as peças que tem forma geométrica de revolução escolhidas no desenho, depois foi usada uma máquina fresadora ferramenta do fabricante *HECKERT*, com uma fresa tipo topo de diâmetro 12 mm e para as figuras geométricas que precisaram mais detalhes como as escadas irregulares foi usada uma fresa tipo topo de 6 mm.

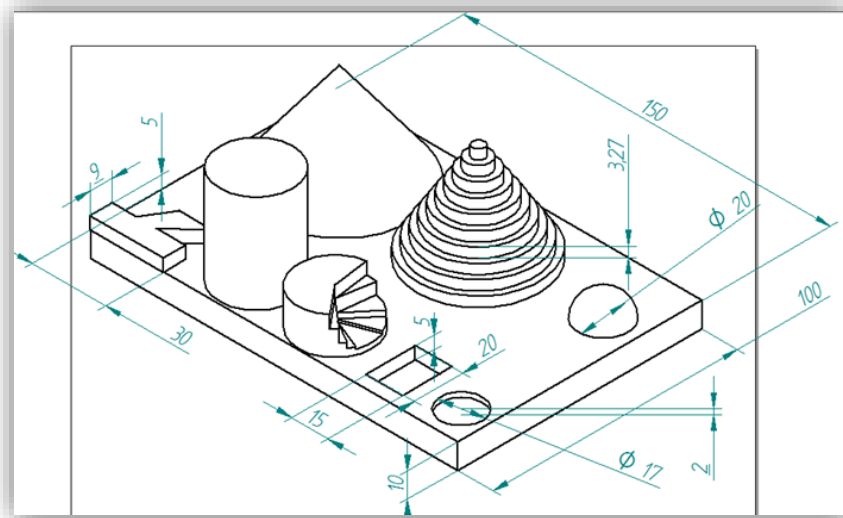


Figura 3.1. Desenho da peça padrão.

Após da usinagem individual das figuras geométricas, estas foram fixadas em uma base retangular de alumínio de dimensões 141,799 mm x 82,898 mm x 10,090 mm por meio de parafusos tipo Allen de 3/16" (4,763 mm) de diâmetro como é mostrado na figura 3.2.

O tempo empregado para fazer a peça padrão foi de 30 horas, e tem um valor estimado de 1600 Reais.

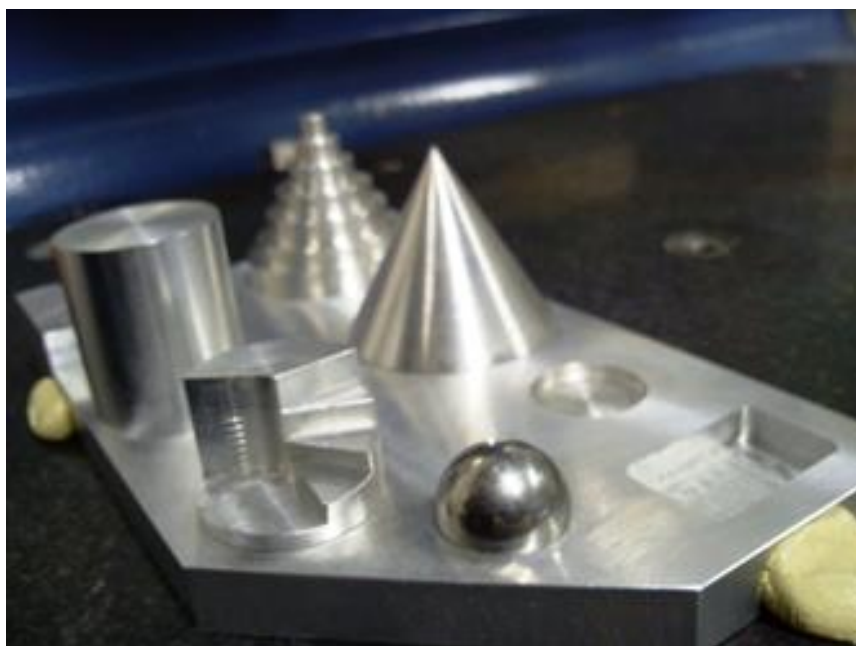


Figura 3.2 Peça padrão

3.2 CALIBRAÇÃO DA PEÇA PADRÃO

Para avaliar o desempenho do scanner laser é necessário fazer a comparação das medições deste instrumento de medida com as medições determinadas como medidas padrão. Para obter as medidas padrão foi usada uma máquina de medir por coordenadas do fabricante Mitutoyo, modelo QM-353 mostrada na figura 3.3, usando o software M-CosmosV3.0. Este instrumento tem uma resolução de 0,005 mm em cada eixo de coordenadas, um erro de apalpação para pontos de 3,2 µm e uma incerteza expandida de medição (95%) para comprimento de $U = 1,2 + L/600$, a qual é a maior incerteza obtida em direção E4 como é mostrado no certificado de calibração da MMC, onde L é o valor do comprimento medido. A Figura 3.3 mostra esta MMC, de modelo cantilever. A determinação dos pontos foi feita com uma sonda de gatilhamento com uma esfera de diâmetro 2 mm.

Esta MMC foi calibrada pela rede brasileira de calibração de acordo ao ISO 17025 (2005) em agosto 8 de 2008, com certificado de calibração número 7407/08.

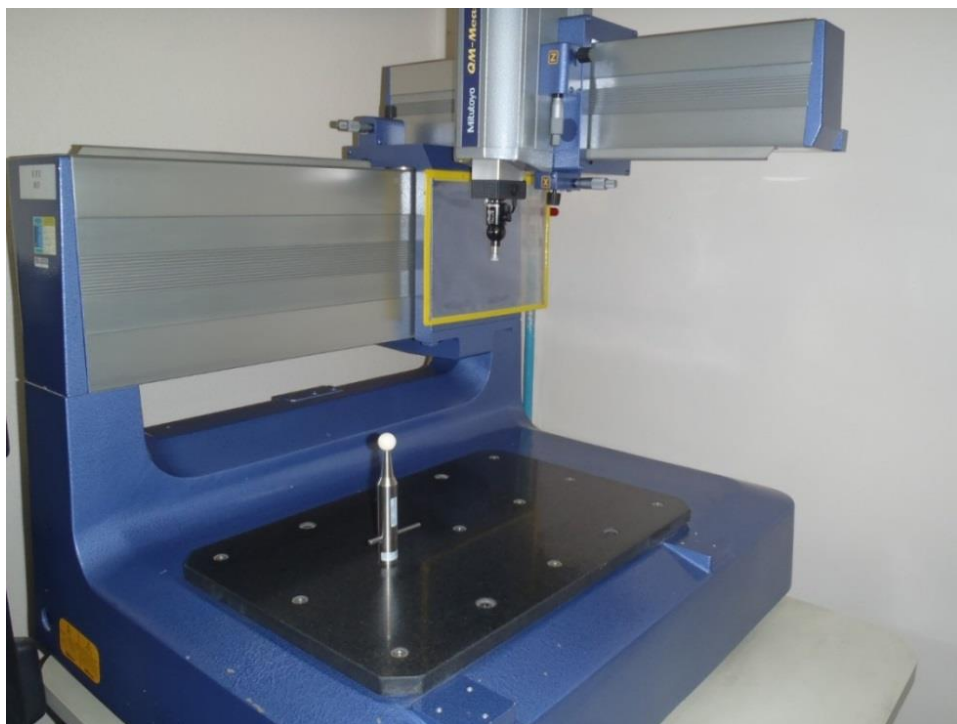


Figura 0.3 Máquina Tridimensional de Medição por coordenadas, modelo QM-353.

A Figura 3.4 ilustra referido, sequência de medição da peça padrão na MMC.

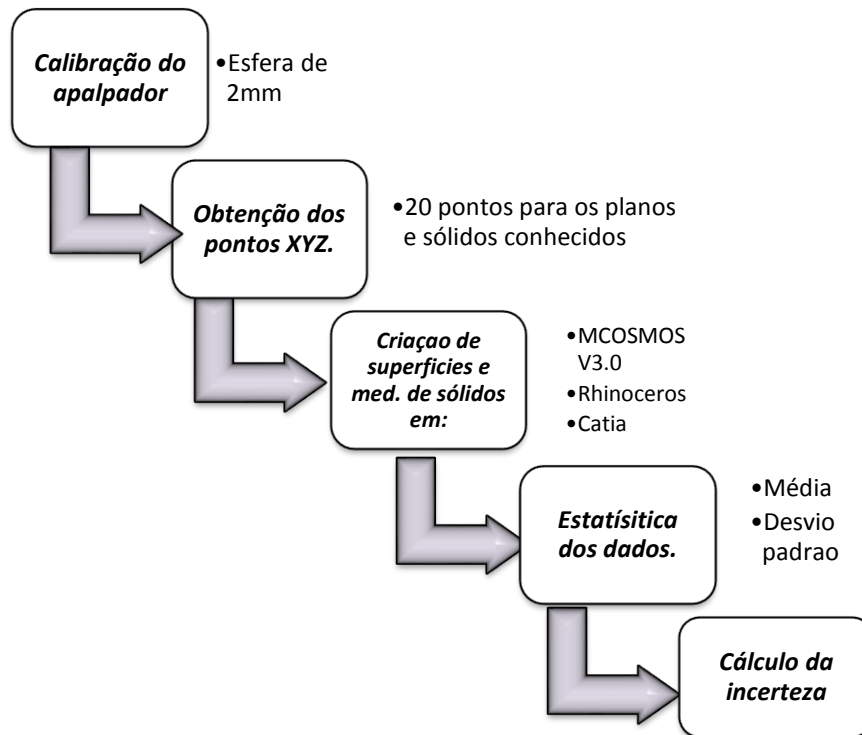


Figura 0.4 Sequência de medição da peça padrão

Foram obtidos planos e sólidos conhecidos (cone, esfera e cilindro) a partir de 20 pontos obtidos da superfície de cada uma das oito figuras geométricas independentes. A máquina forneceu um arquivo *IGES* contendo as informações das coordenadas X Y Z de cada ponto e plano digitalizado. Este arquivo *IGES* foi lido pelo MCOSMOS-Manual, o Catia e o Rhinoceros.

3.2.1 Calibração do apalpador da MMC

Depois de verificar a temperatura do laboratório reportada em 20, 8 °C, a humidade no intervalo de 30 a 40% e de limpar a esfera calibradora com número de identificação H0275, e diâmetro 19,9834 mm mostrada na figura 3.5, a peça foi posicionada na mesa da MMC, e o apalpador circular foi colocado na sonda de gatilhamento correspondente a 2 mm de diâmetro. Após é seguida a sequência de comandos *PONTA > GERENCIAMENTO DADOS PONTA > CALIBRAÇÃO > OK*. Foram capturados 20 pontos distribuídos uniformemente na superfície da esfera calibradora.



Figura 3.5 Esfera calibradora

3.2.2 Obtenção das coordenadas dos pontos (X, Y e Z)

Em razão da peça padrão após será medida no scanner laser tive se que considerar que a superfície desta apresenta uma superfície metálica, a reflexão do feixe laser do scanner laser é especular sendo assim, as reflexões especulares não são confiáveis devido a que uma pequena mudança do ângulo de incidência pode ocasionar o desaparecimento completo do feixe laser refletido em relação à câmera receptora do scanner. Por este motivo a peça foi pintada de branco fosco com o objetivo de fazer que a superfície seja o mais difusa possível. A figura 3.6 apresenta a peça padrão com o recobrimento feito usando um spray do fabricante Vonder com número de referência 10936.

As MMCs possuem um sistema de apalpação, quando o sistema faz contato na peça a ser medida, é adquirido um dado (X, Y, Z), que é processado no software M-COSMOS V.03.

Estas máquinas tem definido seu próprio origem das medições no ponto com coordenadas (0,0,0), e a partir desta origem é feita a medição, portanto foi necessário designar um ponto determinado da peça padrão como origem de sistema de coordenadas, transladando a origem das coordenadas da máquina ao ponto da peça mostrado na figura 3.6.

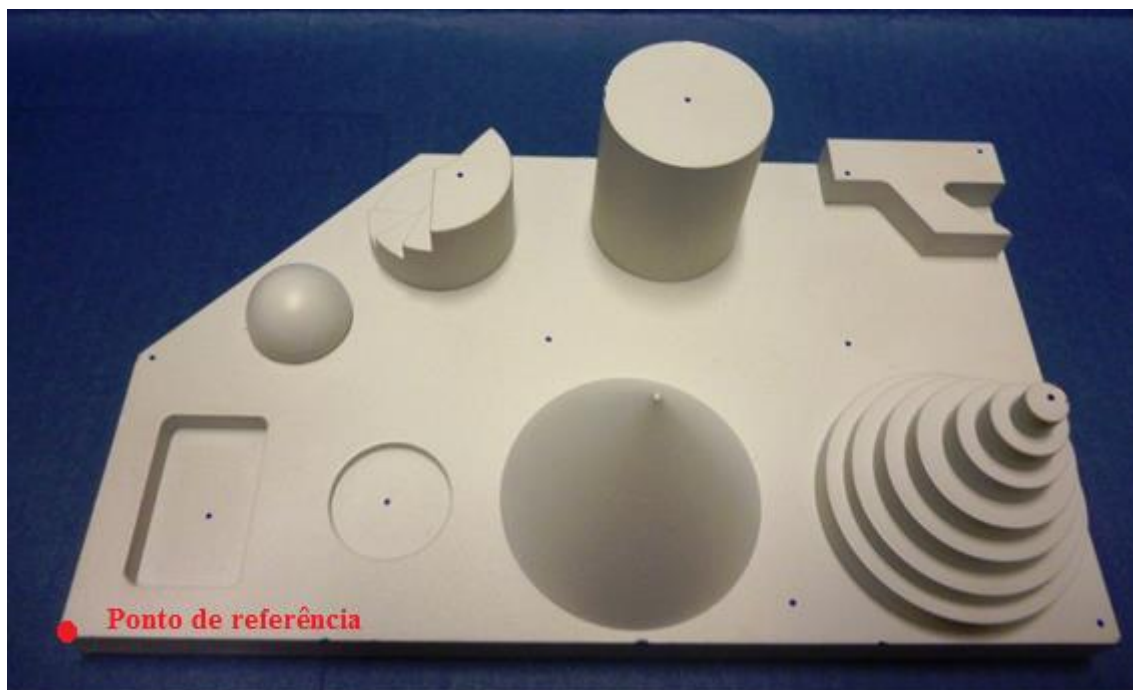


Figura 3.6 Ponto de referência da peça padrão.

AA peça foi fixada na mesa da máquina com plasticina branca. Ao colocar a peça na mesa, esta não fica perfeitamente paralela aos eixos de medição da MMC, assim ao medir um ponto da peça, será introduzido um erro de alinhamento. Portanto foi necessário alinhar o sistema de coordenadas da MMC. Este alinhamento foi feito selecionando o plano superior e os planos laterais ortogonais da base do padrão. A sequência de comandos para o alinhamento foi a seguinte: *SISTEMA DE COORDENADAS > ALINHAMENTO SISTEMA DE COORDENADAS > OK*.

A obtenção dos parâmetros medidos na peça padrão foi feita dependendo da figura geométrica. O software M-COSMOS V3.0 tem disponíveis oito tipos diferentes de elementos geométricos e dois tipos de medição de parâmetros, como mostra a figura 3.7.

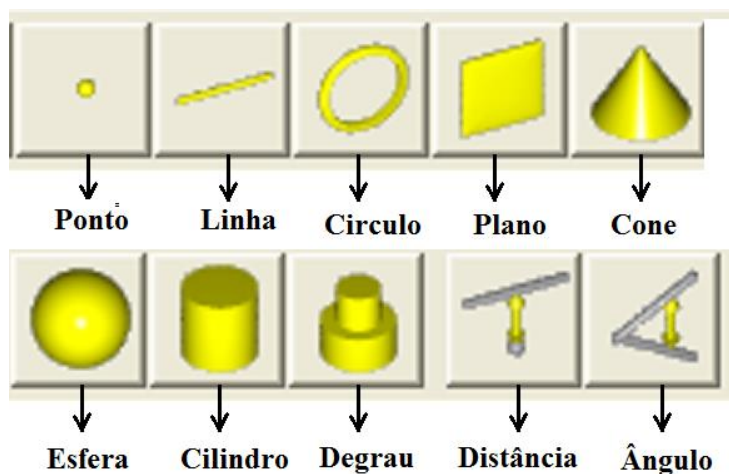


Figura 3.7. Elementos geométricos e tipo de medição de parâmetros no software M-COSMOS V3.0

A obtenção dos pontos, planos e sólidos conhecidos disponíveis no software M-COSMOS V3.0 foi feita 10 vezes para cada uma das figuras geométricas da peça padrão. Para a obtenção de planos, esfera, cilindro, cone, e círculo foram capturados 20 pontos com o apalpador. A sequência de comandos para a obtenção de pontos ou figuras geométricas foi a seguinte: *ELEMENTO > FIGURA GEOMÉTRICA OU PONTO > NO DE PONTOS (20) > OK*. A figura 3.8 mostra as coordenadas dos pontos XYZ e as figuras geométricas ajustadas.

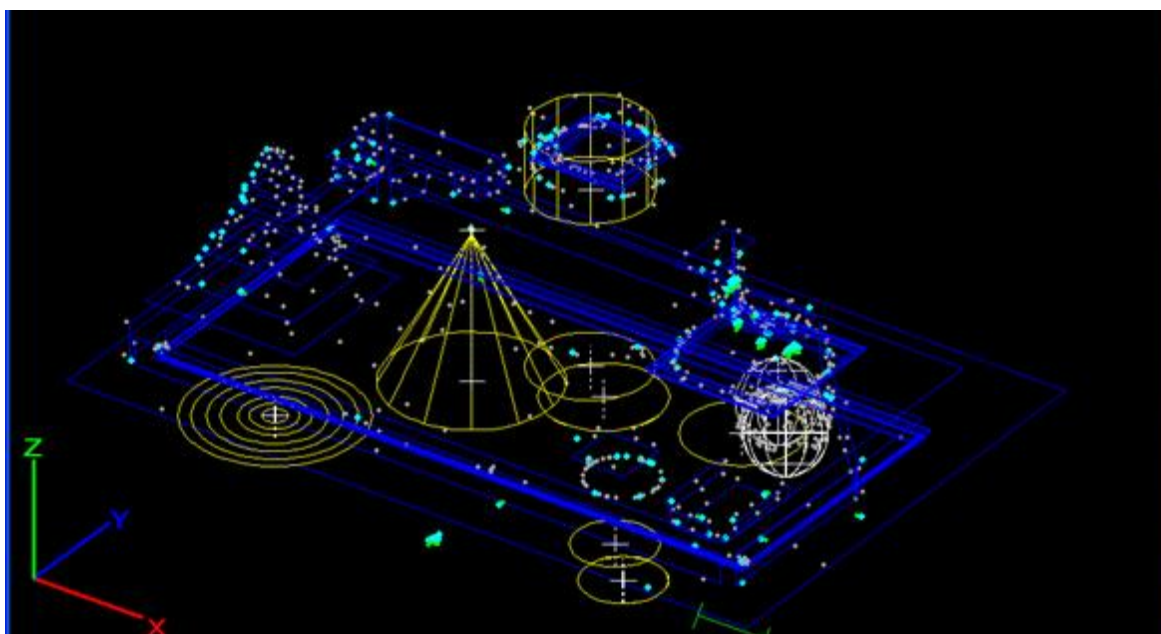


Figura 3.8. Pontos determinados na superfície da peça padrão usando MMC

3.2.3 Criação de superfícies e medição de sólidos

As superfícies do padrão foram criadas a partir de pontos medidos com a MMC. No caso do uso do software M-COSMOS da MMC, as dimensões são determinadas sem necessidade de construir o modelo CAD do padrão.

Os parâmetros medidos na peça foram comprimentos, alturas, diâmetros e ângulos. A determinação dos comprimentos foi feita medindo a distância entre os planos da figura geométrica. A determinação das alturas foi feita medindo a distância entre o plano superior da base de cor preto mostrado na figura 3.9 e o plano de cada uma das figuras. Para o cone a altura foi determinada medindo a distância entre o mesmo plano da base e o ponto superior do cone. A determinação dos diâmetros e ângulos foi feita usando a ferramenta disponível no software M-COSMOS. A figura 3.9 mostra os planos ajustados e pontos digitalizados na MMC. O comando usado para a medição de comprimentos, alturas e diâmetro foi *ELEMENTO DISTÂNCIA > SELEÇÃO DOS ELEMENTOS > OK* e para ângulos o comando usado foi *ÂNGULO > SELEÇÃO DOS ELEMENTOS > OK*.

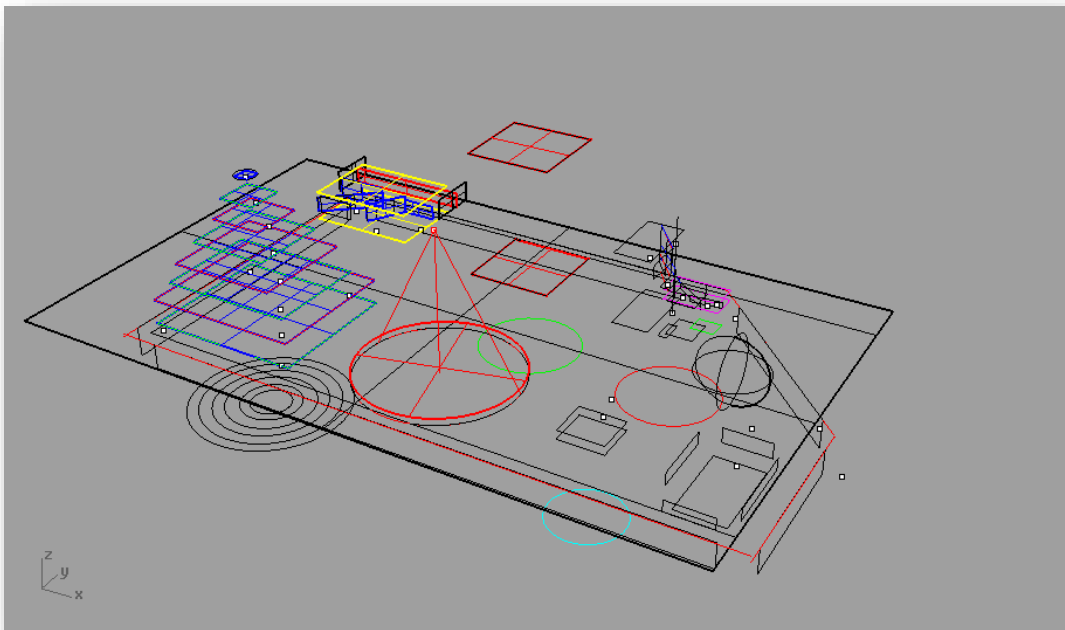


Figura 0.9 Curvas aproximadas dos pontos digitalizados.

Os dados da medição podem ser exportados em arquivo IGS para determinação das dimensões no software Rhinoceros versão 0.0 em espanhol. O arquivo IGS foi importado

no software mediante o comando *ABRIR* no menu *ARCHIVO*, depois foram criadas as superfícies mediante o menu *SUPERFÍCIE > CURVAS PLANAS*.

Após de obter a superfície, existe a necessidade de transformá-la em sólido. Esse procedimento será apresentado mais detalhadamente, pois várias podem ser as maneiras de se obter o modelo sólido da peça amostrado na figura 3.10. Para as diferentes figuras geométricas da peça os procedimentos adotados foram: para a geração do eixo escalonado, escadas irregulares o furo circular e o furo retangular foi usado o comando *SÓLIDO > CAJA > DE TRES PUNTOS Y ALTURA* obtido a partir de 3 pontos do plano e a altura determinada pelo plano da base da peça mostrado na figura 3.9. Para a geração da esfera foi usado o comando *SÓLIDO > ESFERA > DESDE CENTRO Y RADIO* obtido a partir de o centro e o radio da esfera dado pelo solido obtido da MMC. Para a geração do cilindro foi usado o comando *SÓLIDO > CILINDRO* e finalmente para a obtenção do cone foi usado o comando *SÓLIDO > CONE*.

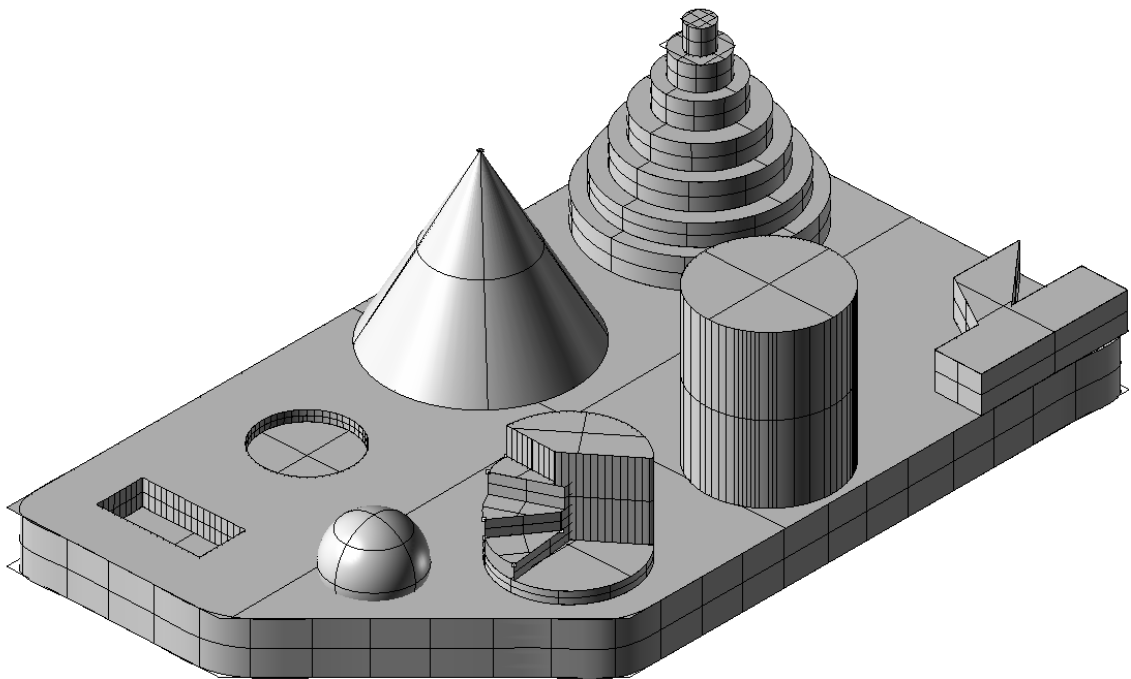


Figura 0.10 Peça modelada em Rhinoceros.

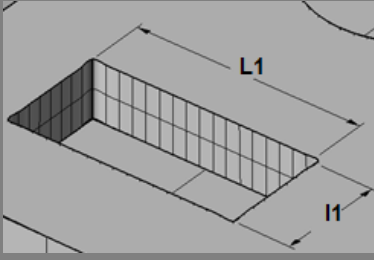
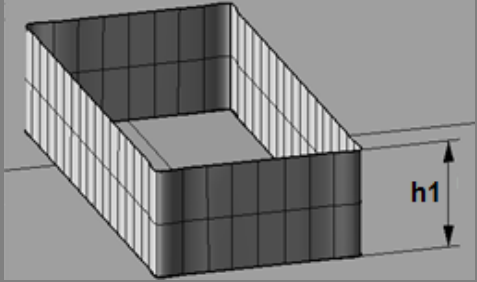
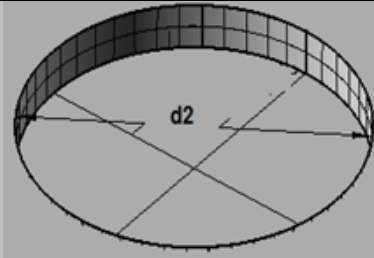
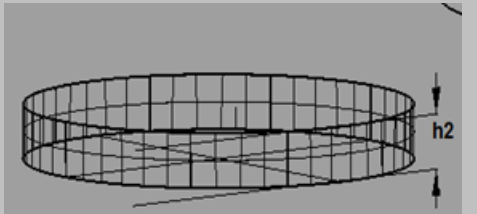
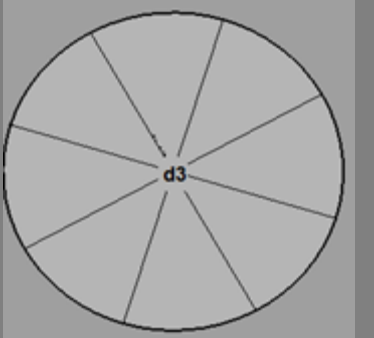
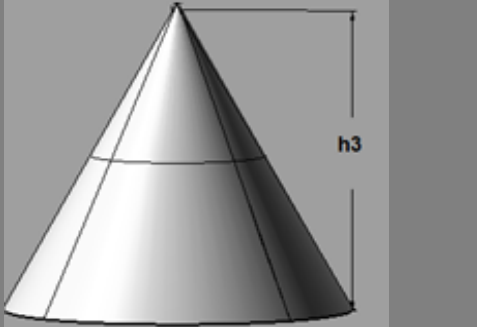
Depois de obtida a superfície dos pontos obtidos pela MMC foram medidas as alturas, comprimentos, ângulos e diâmetros das oito figuras geométricas em Rhinoceros. Para cada uma destas figuras foi usado um comando diferente dependendo do parâmetro a ser medido. Para a medição de comprimentos e alturas foi usado o comando *ACOTACIÓN > COTA LINEAL* (medidas ponto a ponto). Para a medição dos diâmetros foi usado o

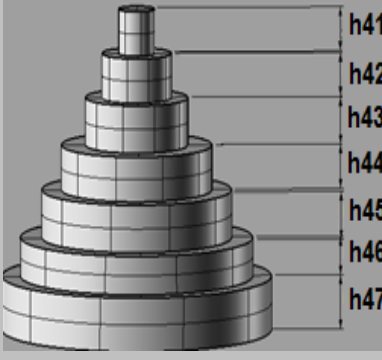
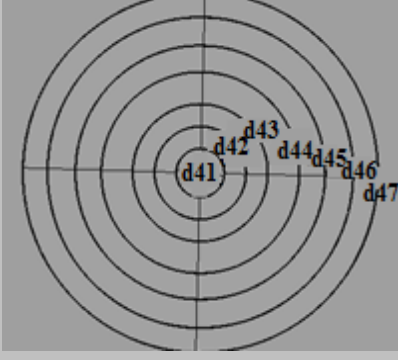

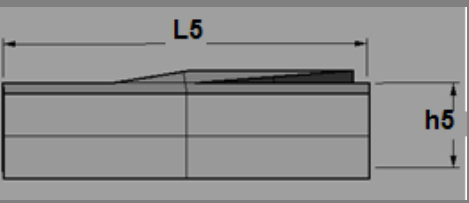
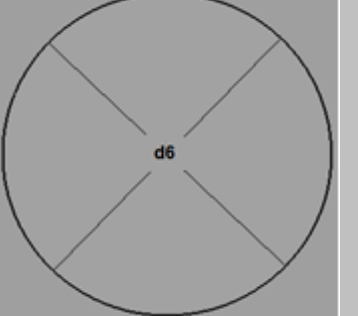
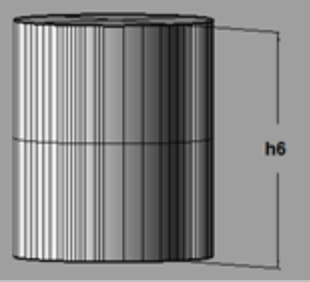
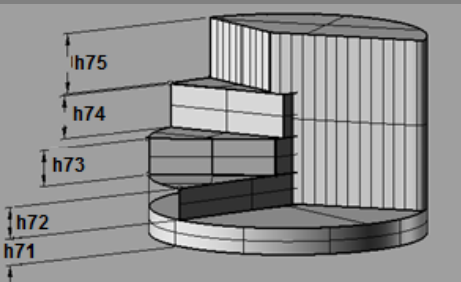
comando *ACOTACIÓN > COTA DE DIÁMETRO*. Para a medição dos ângulos *ACOTACIÓN > COTA DE ÂNGULO*.

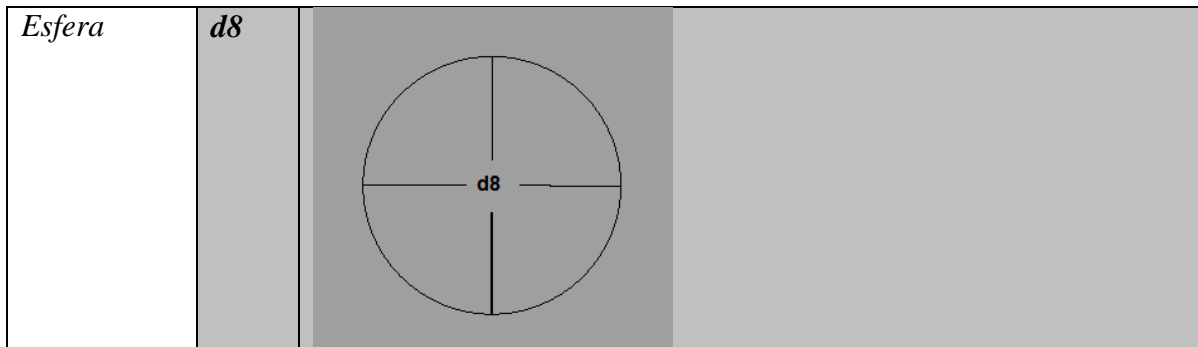
3.2.4 Parâmetros medidos

Os parâmetros medidos na peça estão apresentados na Tabela 3.1, onde a letra inicial h significa altura, a letra inicial d, diâmetro, e o símbolo α , ângulo; as letras iniciais L e l, comprimentos.

Tabela 0.1 Parâmetros medidos da peça

<i>Figura Geométrica</i>	<i>Parâmetros</i>		
<i>Furo retangular</i>	L1, l1, h1		
<i>Furo circular</i>	d2, h2		
<i>Cone</i>	d3, h3		

<p><i>Eixo escalonado</i></p>	<p>h41, h42, h43, h44, h45, h46, h47, d41, d42, d43, d44, d45, d46, d47.</p>		
<p><i>Forma angular</i></p>	<p>$\alpha 51$, $\alpha 52$, L5, h5</p>		
<p><i>Cilindro</i></p>	<p>d6, h6</p>		
<p><i>Escadas irregulares</i></p>	<p>h71, h72, h73, h74, h75, d7</p>		



3.2.5 Cálculo da incerteza dos parâmetros

A incerteza da medição dos parâmetros do padrão foi determinada considerando a repetitividade das medidas tomadas e as fontes de incerteza associadas à MMC e ao ambiente do laboratório. Assim, foram determinadas as contribuições da repetitividade das medidas u_{RPT} , do apalpador u_{AP} , da determinação do comprimento do apalpador MMC u_{CMM} , da resolução da MMC u_{RES} , da temperatura da peça em relação a temperatura do ambiente tomando como referência uma temperatura de 20°C $u^2_{\Delta T20}$, a temperatura da peça em relação com a temperatura da MMC u^2_{TDIF} . A avaliação das incertezas foi feita usando a guia para a expressão de incerteza de medição –GUM 2008 (BIPM, 2008).

- Para a avaliação da incerteza Tipo A relativa às repetições das medições ou repetitividade, foram feitas 10 medições nas mesmas condições, tais como o mesmo operador, o mesmo laboratório, mesma máquina.

$$u_{RPT} = \frac{s}{\sqrt{n}} \mu\text{m} \quad \text{Eq (3.1)}$$

Para a estimativa da incerteza Tipo B, deve-se levar em conta fatores externos que podem contribuir para o erro. Foram destacados os seguintes fatores que podem ser relevantes.

- Incerteza associada ao apalpador, determinado a partir do erro de apalpação, dado no certificado de calibração da MMC (Anexo 1).

$$u_{AP} = 3,2 \mu\text{m} \quad \text{Eq (3.2)}$$

- Incerteza padrão associada às medições de comprimentos e ângulos da MMC. Este valor foi obtido a partir do certificado de calibração da MMC (Anexo 1).

$$U_{CMM} = 1,2 + \frac{L}{600} \mu\text{m} \quad \text{Eq (3.3)}$$

Onde L é o comprimento ou o valor do parâmetro em mm.

- Incerteza associada à resolução da MMC. Este valor foi calculado a partir de uma distribuição de probabilidade retangular simétrica, como mostrado na figura 2.7.

$$u_{Res} = 0144 \mu\text{m} \quad \text{Eq (3.4)}$$

- Incerteza associada ao afastamento da temperatura ambiente em relação à temperatura de referência (20 °C).

$$u^2_{\Delta T_{20}} = \left(\frac{1000 * L * \Delta\alpha * \Delta T_1}{2 * \sqrt{3}} \right)^2 + (1000 * L * \Delta\alpha * u_T)^2 + (1000 * L * \Delta T_1 * u_\alpha)^2 \quad \text{Eq (3.5)}$$

- Incerteza associada ao afastamento da temperatura da MMC em relação à temperatura de da peça.

$$u^2_{TDIF} = \left(\frac{1000 * L * \Delta\alpha * \Delta T_2}{2 * \sqrt{3}} \right)^2 + (1000 * L * \Delta\alpha * u_T)^2 + (1000 * L * \Delta T_2 * u_\alpha)^2 \quad \text{Eq (3.6)}$$

Identificadas às incertezas dos fatores que influenciam a medição do padrão, é usada a equação 2.6 para calcular a incerteza para cada um dos parâmetros, ficando como na expressão 3.7.

$$U_c^2 = u_{RPT}^2 + u_{AP}^2 + u_{CMM}^2 + u_{\Delta T20}^2 + u_{TDIF}^2 + u_{Res}^2 \quad \text{Eq (3.7)}$$

3.3 TESTE DE DESEMPENHO DO SCANNER LASER.

Com o padrão calibrado, foi escolhido um *scanner laser* do fabricante NEXTENGINE para verificar o desempenho da medição. Foram feitas 3 medições das superfícies da peça padrão, sendo que a quantidade de pontos determinados depende da resolução de medição escolhida que pode ser rápida, média ou alta.

As dimensões da peça padrão foram determinadas com o software *ScanStudio*.

3.3.1 Scanner laser

Um *scanner laser 3D* do fabricante NEXTENGINE, modelo 2020i foi usado para determinar pontos das repetições da peça padrão. Este possui quatro fontes de feixes laser com 0,650 μm de comprimento de onda, e uma potência de 10 mW. A velocidade de digitalização é de 50000 pontos por segundo. Os modos disponíveis do scanner são: *Macro* e *Wide*. As configurações destes modos são mostradas na tabela 3.2.

Tabela 0.2 Configurações do modo *Macro* e *Wide* do scanner laser.

	Modo <i>Macro</i>	Modo <i>Wide</i>
Campo de visão	130 x 96 mm	343 x 256 mm
Resolução	200 DPI	75 DPI
Densidade de textura	400 DPI	150 DPI
Exatidão dimensional	0,127 mm	0,381 mm

A figura 3.6 mostra os componentes do *Scanner*. Este instrumento tem uma unidade para emissão de feixes de laser (figura 3.11 A), com câmaras CCD para a captação do feixe de luz refletido. Também apresenta uma base para o posicionamento da peça (Figura 3.11 B) com um movimento de rotação em relação ao eixo horizontal. A base apresenta uma haste com dos suportes para fixar a peça (Figura 3.11 C).

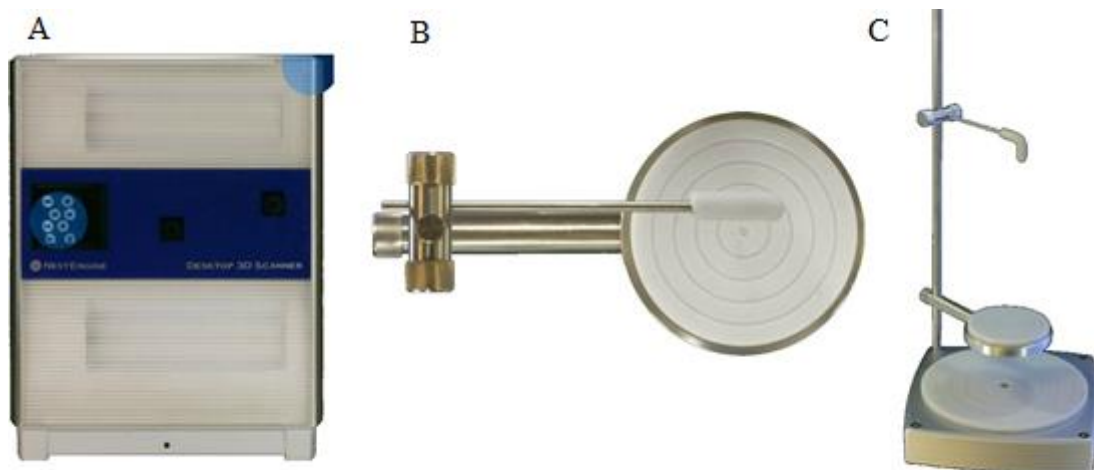


Figura 0.11 Componentes do Scanner. (A) Unidade para emissão de feixes de laser. (B) base para o posicionamento (C) haste com dos suportes.

Este instrumento é operado pelo software ScanStudio HD, instalado em um computador indicado.

3.3.2 Método de medição

A realização das medições com o *scanner* deve obedecer a sequência das etapas mostradas na figura 3.12.

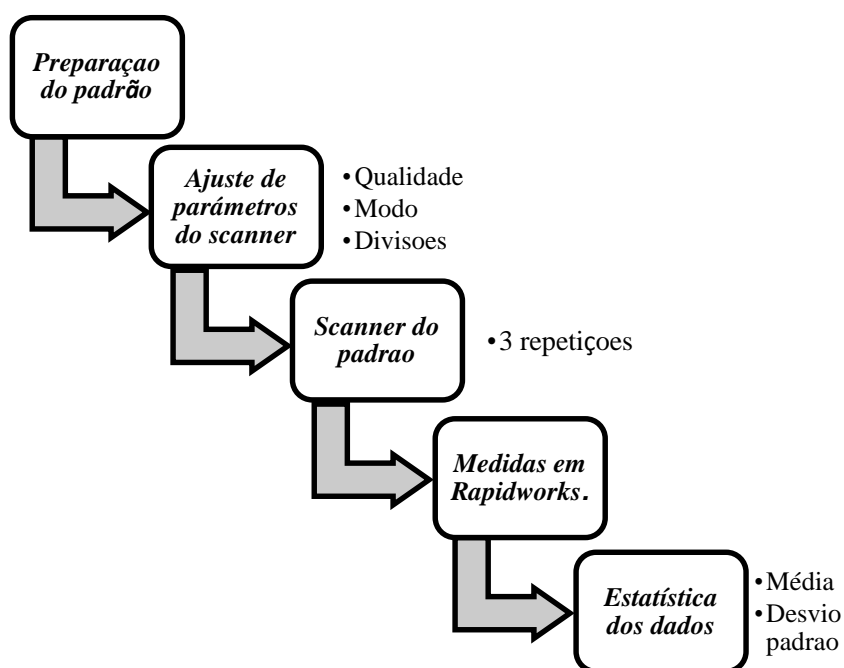


Figura 0.12 Estrutura de medição com Scanner laser.

A preparação da peça padrão envolve o posicionamento na base, fixando de forma a evitar deslocamentos durante a medição. Antes, porém, é importante observar o aspecto visual das superfícies.

Os ajustes usados para a obtenção da nuvem de pontos são mostrados na figura 3.13. São quatro os parâmetros a escolher no processo de digitalização, que devem ser considerados são eles:

1. *POSITIONING*: no qual estão as seguintes opções:
 - 360: para digitalizar o objeto em todos os ângulos.
 - *Bracket*: para digitalizar três ângulos consecutivos.
 - *Single*: única digitalização a partir de um ângulo. Este foi o parâmetro escolhido para evitar pontos não necessários na hora das rotações e respectivas digitalizações obtidas.
2. *DIVISIONS*: controla o grau de rotação entre as verificações.
3. *POINTS/IN²*: resolução desejada (*Quick*, *SD*, *HD*). Nas digitalizações trabalho- se com resolução HD.
4. *RANGE*: Opções de distância *MACRO* ou *WIDE* baseado no tamanho do objeto. Nas digitalizações trabalho- se em modo *MACRO*.



Figura 0.13 Tela de parâmetros do scanner laser pelo software ScanStudio sendo single; 17 divisões; 2000 pontos/polegada²; modo wide

Para o escaneamento do padrão foi adotada a estratégia de fazer três digitalizações a partir de três ângulos diferentes com a finalidade de obter o maior número dos pontos das superfícies dos cantos das oito figuras geométricas, como mostrado na figura 3.14. Com o auxílio do *software* *SCANSTUDIO*, obtém-se o arquivo de nuvem de pontos.

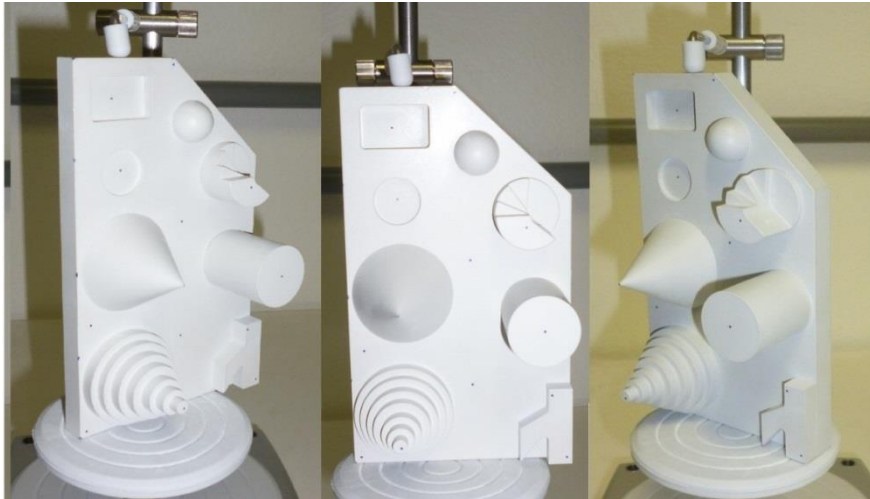


Figura 0.14 Vistas da peça padrão, montadas na base do scanner NextEngine.

Ainda no software ScanStudio, após a digitalização das três vistas, foi feito o alinhamento dos resultados obtidos. Este alinhamento foi realizado com os pontos marcados com uma caneta de tinta azul sobre a superfície chamada de pontos indicadores da superfície. O alinhamento, foi feito com o comando *ALIGN* selecionando o mesmo ponto indicador em cada uma das digitalizações (*START > REFINE ALIGNMENT*). Foram adotados seis pontos de alinhamento, localizados o mais espalhados possíveis em toda a superfície, conforme mostrado na Figura 3.15

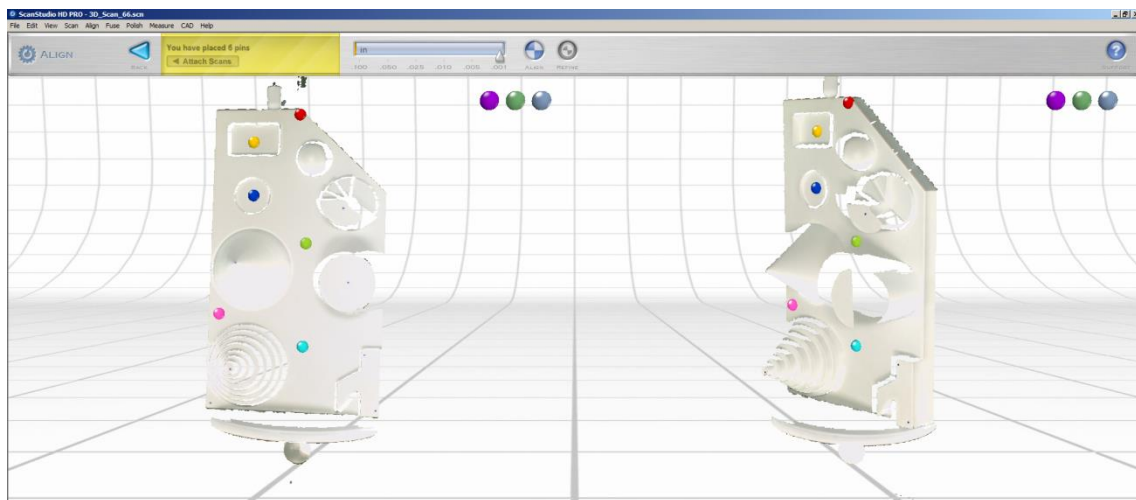


Figura 0.15 Pontos de alinhamento

A seguir, foi necessário eliminar os pontos que não são pertencentes ao padrão, como os pontos da base do scanner. Para este fim, foi usado o comando *TRIM*, sendo selecionadas as áreas a eliminar, (*SELETOR>TRIM*).

Os pontos da peça padrão foram com comando *OUTPUT>RAPIDWORKS* tem em formato *rwl*, para ser aberto no software Rapidworks.

Tendo os pontos das 3 digitalizações alinhados foi usado o comando *TOOLS > SCAN TOOLS > MESH BUILDUP WIZARD > APPLY* o qual cria uma malha otimizada das 3 digitalizações feitas. Esse comando emprega 5 diferentes passos:

- Preparação dos dados: analisa o estado dos dados e define o seguinte processo de acordo ao tipo de objeto digitalizado.
- Edição dos dados: eliminação do ruído e de pontos redundantes.
- Pre-alinhamento dos dados: alinhamento dos dados digitalizados com o algoritmo de melhor ajuste de alinhamento (método dos mínimos quadrados, onde a soma dos quadrados das distâncias entre os pares de amostras são minimizados sobre todos os movimentos rígidos que poderia realinhar as duas vistas).
- Fusão dos dados: fusão dos dados alinhados obtendo assim a malha.

As configurações adotadas para o malhado das digitalizações foram:

- *Set scanner type: small/ médium size object scanner.*
- *Set data condition: is pre-aligned.*

A malha obtida é mostrada na figura 3.16.

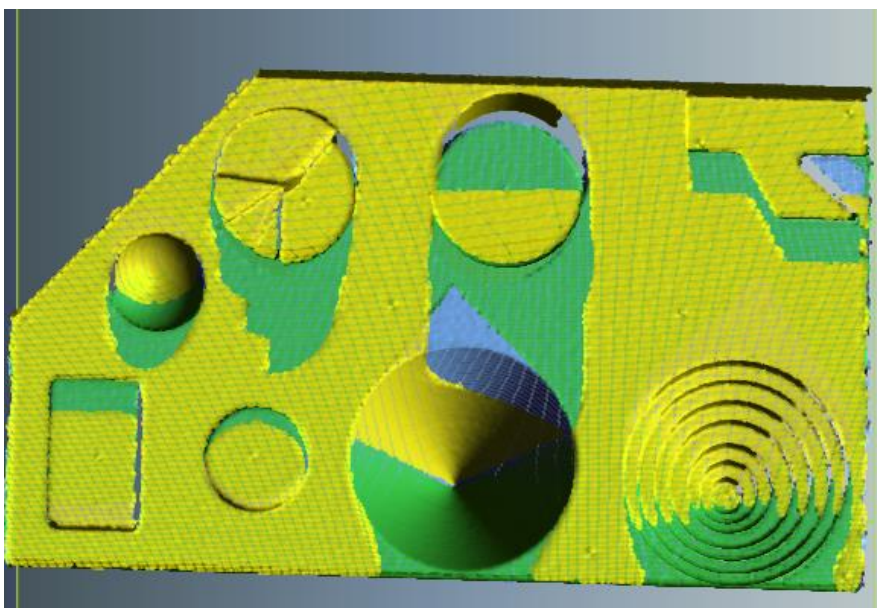


Figura 0.16 Resultado do processo de obtenção da malha.

O processo de criação de uma malha é feito ligando três pontos mais próximos, sendo empregados os métodos de diagramas de Vorrinói e triangulação de DELANUNAY. Este processo é mostrado na figura 3.17.

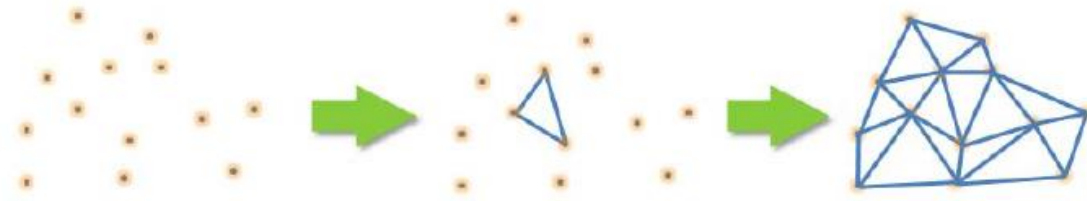


Figura 0.17 Processo de criação de malha (NextEngine, 2009).

A malha representa a superfície por meio dos triângulos interligados. Porém triângulos incorretos não podem fazer uma malha completa, pois contribuem para o erro. Diferentes tipos de triângulos incorretos são mostrados na figura 3.18 em função das suas características, podem ser:

- Triângulo não múltiplo: uma única borda é compartilhada por três ou mais triângulos (Figura 3.18a).
- Triângulo redundante: um ponto deve ter um número idêntico de triângulos e bordas de conexão. (Figura 3.18b).
- Triângulo de Cruzamento: as bordas compartilham um poly- vértice com um no outro. (Figura 3.18c).
- Triângulo reverso: oposição da direção normal aos triângulos vizinhos. (Figura 3.18d).

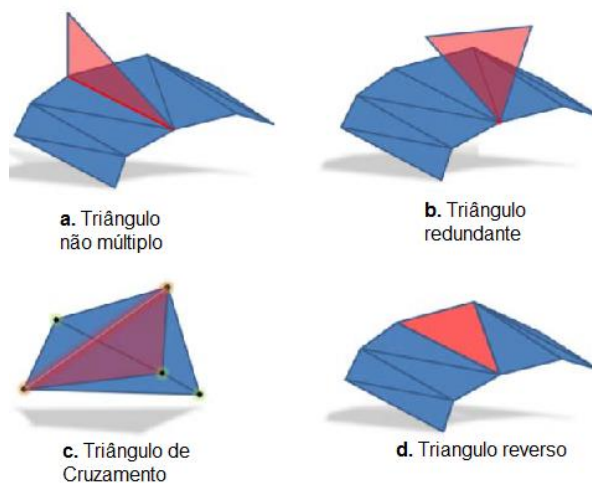


Figura 0.18 Tipos de erro na criação de malhas.

O passo seguinte é a classificação automática de regiões. O comando *AUTOSEGMENT* (*REGION GROUP > AUTOSEGMENT > APPLY*) classifica regiões da digitalização conforme suas características geométricas tais como planos, cilindros, cones e esferas; para a classificação das regiões foi necessário, sendo que a figura 3.19 mostra a segmentação dos pontos da peça digitalizada.

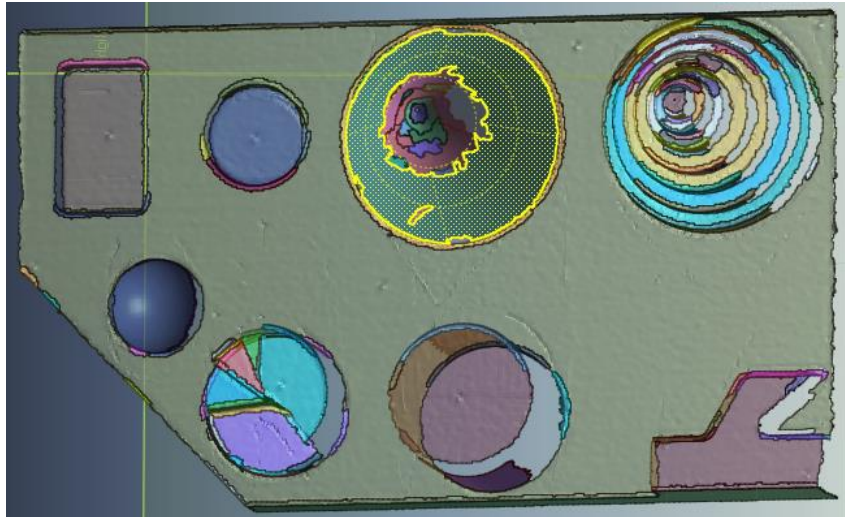


Figura 0.19 Segmentação da peça digitalizada.

Assim, a nuvem de pontos é segmentada e identificada em regiões conforme as características geométricas locais. O passo seguinte é ajustar aos pontos, em locais específicos como a base e regiões do cilindro e retângulo do padrão admitindo uma resolução definida pelo comando *By Allowable Deviation* do software Rapidworks. Nesta opção deve ser especificada a tolerância entre a malha e a superfície do sólido ajustada como mostrado na figura 3.20. A tolerância adotada foi de 0,100 mm.

Para as medidas das alturas foram selecionados os planos superior e inferior, igualmente para as medidas para comprimentos e ângulos foram pegos os planos que se interceptavam.



Figura 0.20 Desvios adotados entre a malha gerada e a superfície ajustada
(NEXTENGINE, 2009)

3.3.3 Análise de desempenho

Para a realização desta etapa foi calculado o erro das medições dos parâmetros medidos; o erro é calculado fazendo a diferença entre o valor medido (scanner) e o valor verdadeiro (calibrado) obtido como os dados fornecidos pela MMC cantilever. Portanto tem-se erros nos valores dos ângulos, erro nos diâmetros e erro nas alturas determinadas. O cálculo dos erros foi feito como mostrado na figura 3.21

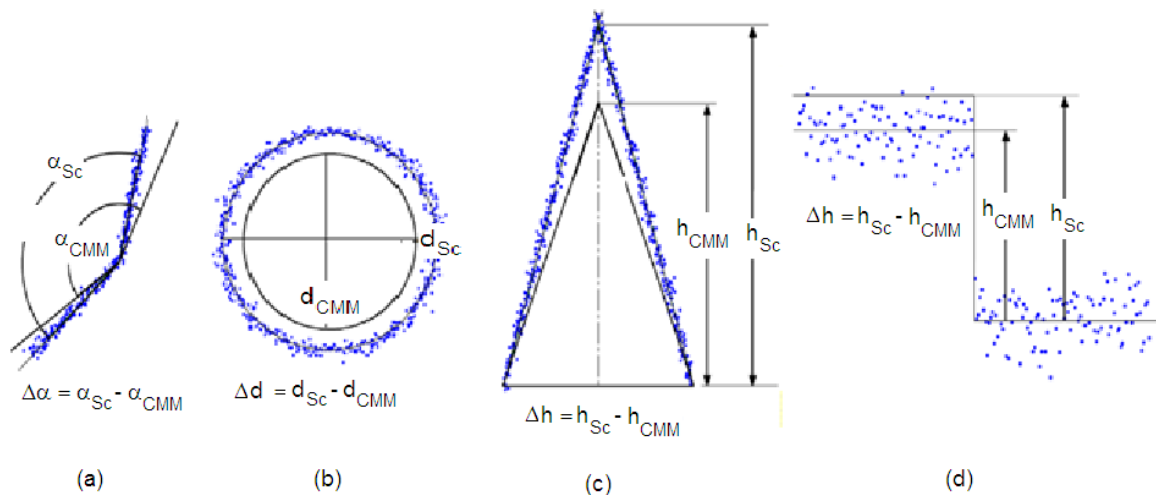


Figura 0.21 Cálculo de erros para ângulos (a), diâmetros(b), alturas (c,e d.).
(modificado-Guidi *et al.*, 2010)

3.4 ANÁLISE DO DESEMPENHO, GRÁFICOS E TESTES R&R

O desempenho foi verificado através de gráficos da média e amplitude dos erros e testes de repetitividade e reprodutividade R&R, através da análise da variância (ANOVA).

Foram feitos gráficos onde o valor do erro sistemático obtido é comparado com o erro máximo dado pelo fabricante correspondente a um valor de erro máximo de 0,381 mm no modo *wide*. Estas comparações foram feitas para cada um dos parâmetros medidos na peça, cone, cilindro, etc. Depois foi feita uma análise para o plano XY e o plano Z.

A segunda análise foi feita usando *Measurement Systems Analysis*, AIAG (2002), o método da ANOVA foi aplicado com o emprego de um planejamento hierárquico, no qual foram avaliados o efeito dos parâmetros e figuras geométricas no erro de medição. A figura 3.22 amostra o planejamento hierárquico, foram selecionadas seis figuras geométricas: cone, furo circular, furo retangular, cilindro, escada circular e escada

irregular. Para cada um dos parâmetros escolhidos na figura geométrica foram medidas as alturas, os diâmetros, e o comprimento (apenas o furo retangular) sendo medidas três vezes.

Assim, os fatores adotados deste planejamento foram:

G (geometria) =6 P(parâmetros) =2 M (medições) =3

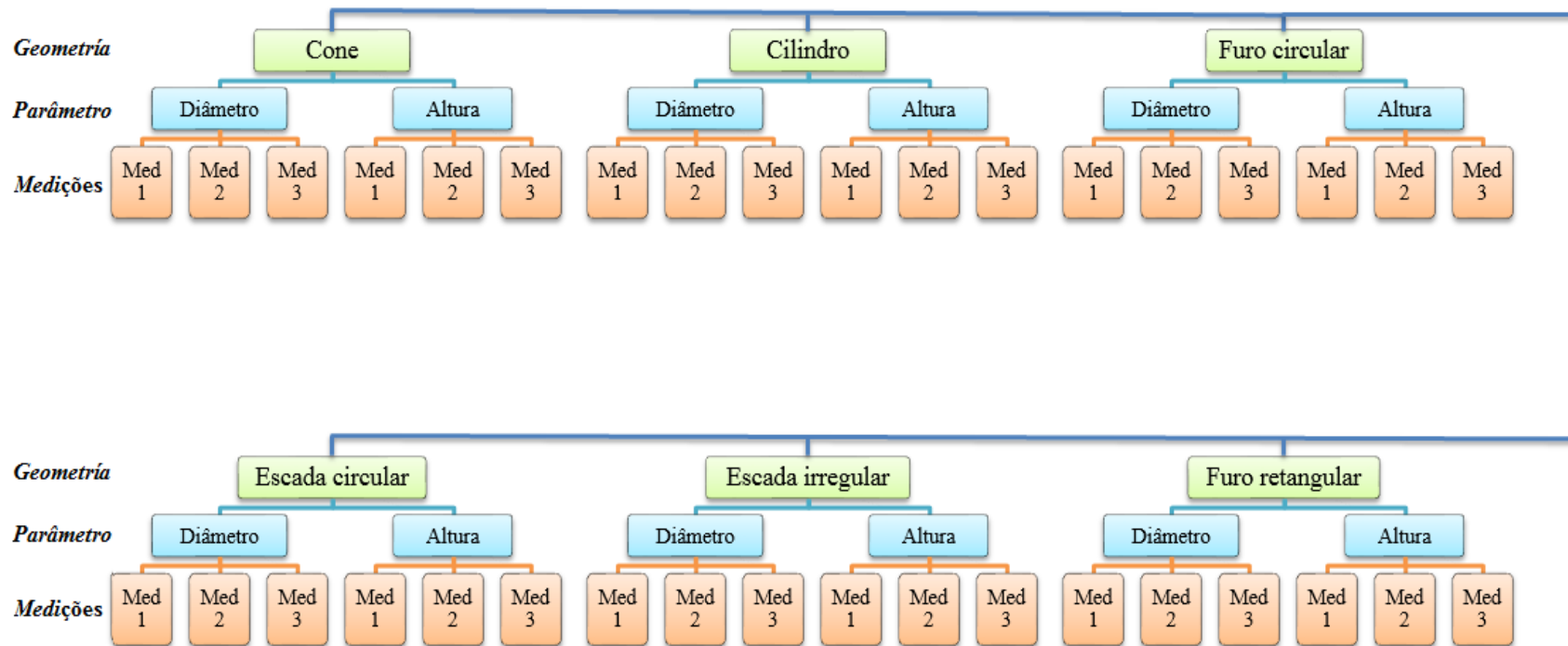


Figura 3.22 Planejamento hierárquico

A análise dos efeitos destas variáveis pode ser feita conforme mostrado na tabela 3.3, onde a análise da variância permite determinar as estimativas das variâncias de cada variável (Box *et al.*, 2008).

Tabela 3.3. Tabela ANOVA para fatores com efeitos aleatórios, planejamento hierárquico.

Fator variável	Soma de quadrados	g.l	Quadrados médios	Valor esperado dos quadrados médios
Média	$GPM\bar{y}^2$	1		
Figuras	$PM \sum_g^G (\bar{y}_g - \bar{y})^2$	$G - 1$	QMG	$PM\sigma_g^2 + M\sigma_p^2 + \sigma_m^2$
Parâmetros	$M \sum_g^G \sum_p^P (\bar{y}_{gp} - \bar{y}_g)^2$	$G(P - 1)$	QMP	$M\sigma_p^2 + \sigma_m^2$
Medições	$\sum_g^G \sum_p^P \sum_m^M (\bar{y}_{gpm} - \bar{y}_{gp})^2$	$GP(M - 1)$	QMM	σ_m^2
Total	$\sum_g^G \sum_p^P \sum_m^M y_{gpm}^2$	GPM		

Onde

$$QMG = \frac{PM \sum_g^G (\bar{y}_g - \bar{y})^2}{G - 1} \quad (3.11)$$

$$QMP = \frac{M \sum_g^G \sum_p^P (\bar{y}_{gp} - \bar{y}_g)^2}{G(P - 1)} \quad (3.12)$$

$$QMM = \frac{\sum_g^G \sum_p^P \sum_m^M (\bar{y}_{gpm} - \bar{y}_{gp})^2}{n - 1} \quad (3.13)$$

Obtidos os valores da variância dos fatores, mediante as análises de variância (ANOVA), foi calculado um estimador da variância combinando a repetitividade e a reprodutividade, somando as variâncias como mostrado apresentado por *Measurement Systems Analysis* AIAG (2002), mostrado na expressão 3.14. Nesta expressão, as variâncias da geometria σ_g^2 e dos parâmetros σ_p^2 correspondem, a repetitividade do sistema de medição e a variância das medições σ_m^2 corresponde a reprodutividade do sistema de medição.

$$\sigma_{GRR}^2 = \sigma_{Reprodutividade}^2 + \sigma_{Repetitividade}^2 \quad (3.14)$$

4. RESULTADOS

Nesse capítulo são apresentados os resultados do teste proposto. As 3 digitalizações realizadas no scanner laser 3D são mostradas aqui, junto com as 10 medições com o *software* M-Cosmos para os parâmetros e geometrias definidas no padrão.

Um teste de validação foi realizado e o desempenho do scanner é apresentado em um teste de repetitividade e reprodutividade (R&R).

4.1 CALIBRAÇÃO DA PEÇA PADRÃO.

A calibração do padrão foi realizada na temperatura de $20\pm 1^{\circ}\text{C}$, temperatura medida no termohigometro digital com certificado de calibração número 1582/07, e umidade 40-60%, controladas no laboratório. A calibração do diâmetro da esfera do apalpador da MMC cantilever foi feita usando um artefato calibrado, uma esfera padrão conforme mostrado na figura 4.1. O valor nominal do diâmetro do apalpador é de 2 mm, o diâmetro da esfera do apalpador foi de 1,997 mm. Na calibração da esfera foram obtidos 20 pontos, levando a sonda de gatilamento até a superfície da esfera padrão de cerâmica, onde o apalpador obteve as coordenadas cartesianas dos pontos mediante a esfera de rubi como é mostrado na figura 4.1

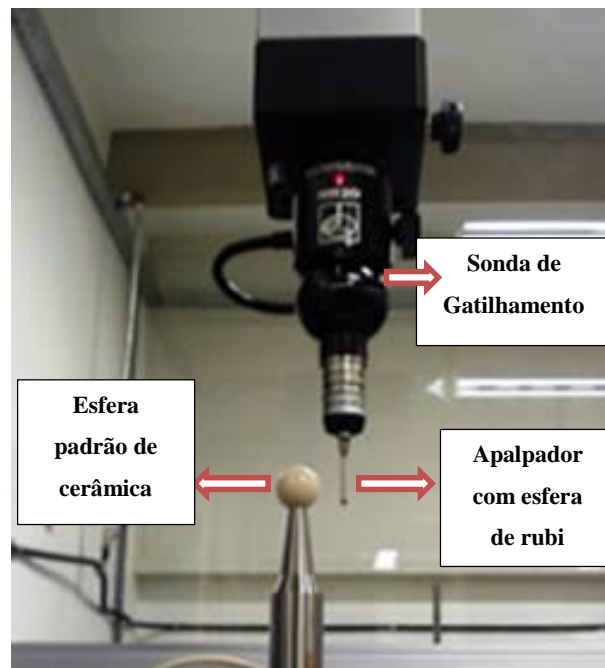


Figura 4.1 Calibração da esfera do apalpador

4.1.1 Resultados da medição dos parâmetros.

O passo a seguir foi posicionar e fixar a peça padrão na mesa da MMC, alinhando o mais perpendicular possível em relação ao apalpador. Aplicando o procedimento mencionado no capítulo três, são apresentados na tabela 4.1 a média e o desvio padrão dos resultados da medição dos parâmetros em M-COSMOS.

Tabela 4.1 Valor das parâmetros medidos.

		<i>M-Cosmos</i> (MMC)				<i>M-Cosmos</i> (MMC)	
<i>Figura Geométrica</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Média</i> (mm)	<i>Desvio padrão</i> (mm)	<i>Figura Geométrica</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Média</i> (mm)	<i>Desvio padrão</i> (mm)
<i>Furo Retangular</i>	<i>h1</i>	4,940	0,001	<i>Cilindro</i>	<i>h6</i>	29,029	0,028
	<i>L1</i>	25,017	0,010		<i>d6</i>	24,922	0,006
	<i>l1</i>	15,685	0,011	<i>Escadas irregulares</i>	<i>d7</i>	23,985	0,014
<i>Furo Circular</i>	<i>h2</i>	2,030	0,003		<i>h71</i>	16,532	0,04
	<i>d2</i>	17,261	0,016		<i>h72</i>	11,451	0,043
<i>Cone</i>	<i>h3</i>	32,455	0,007		<i>h73</i>	7,7	0,043
	<i>d3</i>	34,950	0,413		<i>h74</i>	4,659	0,042
<i>Eixo escalonado</i>	<i>d41</i>	36,8454	0,003	<i>Esfera</i>	<i>h75</i>	1,993	0,044
	<i>d42</i>	31,745	0,004		<i>d8</i>	16,072	0,008
	<i>d43</i>	25,911	0,006				
	<i>d44</i>	20,558	0,006				
	<i>d45</i>	14,002	0,003				
	<i>d46</i>	9,474	0,004				
	<i>d47</i>	4,998	0,003				
	<i>h41</i>	4,766	0,300				
	<i>h42</i>	4,616	0,340				
	<i>h43</i>	5,023	0,339				
	<i>h44</i>	4,724	0,089				
	<i>h45</i>	4,799	0,349				
	<i>h46</i>	4,250	0,400				
	<i>h47</i>	5,660	0,005				
<i>Forma Livre</i>	<i>h5</i>	7,200	0,298				
	<i>α51</i>	120,383°	0.149°				
	<i>α52</i>	39,904°	0.118°				

4.1.2 Cálculos da incerteza expandida $U_{95\%}$ dos parâmetros.

Os cálculos da incerteza expandida associada a medição dos parâmetros foram feitos com as equações 3.1 até 3.7. A tabela 4.2 mostra a incerteza expandida para o parâmetro $h1$, Altura do furo retangular. A incerteza expandida dos demais parâmetros foi determinada e as tabelas estão no apêndice B.

Tabela 4.2 Cálculo da incerteza expandida para $h1$.

Fonte de incerteza	Tipo de incerteza	Distribuição de probabilidade	G.L	$u(i)$ (μm)	Coefficiente de sensibilidade	Contribuição (μm)
u_{RPT}	A	Normal	10	0,400	1	0,400
u_{AP}	B	Retangular	∞	3,200	1	3,200
u_{RES}	B	Retangular	∞	0,144	1	0,144
u_{CMM}	B	Normal	∞	1,208	1	1,208
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	∞	0,035	1	0,035
u^2_{TDIF}	B	Retangular	∞	0,010	1	0,010

Incerteza padrão combinada $u_c = 3,450 \mu\text{m}$

Grau de liberdade efetiva $\nu_{eff} = 49808$

Fator de expansão $k = 1,96$

Incerteza expandida $U_{95\%} = 6,8 \mu\text{m}$

Deste jeito foi calculada a incerteza padrão de cada um dos parâmetros, a incerteza expandida para 95% de probabilidade tem a contribuição das incertezas devidas à repetitividade dos dados, ao apalpador, à resolução da MMC, à incerteza de medição da MMC, tomada do certificado de calibração adjunto a este trabalho, a incerteza de medição foi tomada como a pior possível, denotada no certificado como E4. Também as incertezas das diferenças das temperaturas entre a peça, a MMC e o ambiente contribuíram a incerteza expandida calculada.

A tabela 4.3 mostra as incertezas expandidas calculadas aos 95% de probabilidade, para cada uma dos parâmetros calibrados.

Tabela 4.3 Valores das incertezas calculadas para os parâmetros

<i>Figura geométrica</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Incerteza expandida $U_{95\%}$ (μm)</i>	<i>Figura geométrica</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Incerteza expandida $U_{95\%}$ ($^{\circ}$)</i>
Furo Retangular	<i>h1</i>	6,8	Forma angular	<i>a51</i>	107,2°
	<i>L1</i>	9,3		<i>a52</i>	84,6°
	<i>l1</i>	10,0			
Furo Circular	<i>h2</i>	7,0			
	<i>d2</i>	13,1			
Cone	<i>h3</i>	8,1			
	<i>d3</i>	295,5			
Eixo escalonado	<i>d41</i>	7,1			
	<i>d42</i>	7,2			
	<i>d43</i>	7,7			
	<i>d44</i>	7,7			
	<i>d45</i>	7,1			
	<i>d46</i>	7,2			
	<i>d47</i>	6,9			
	<i>h41</i>	214,7			
	<i>h42</i>	64,1			
	<i>h43</i>	249,4			
	<i>h44</i>	286,1			
	<i>h45</i>	7,3			
	<i>h46</i>	243,6			
	<i>h47</i>	242,7			
Forma Angular	<i>h5</i>	213,3			
Cilindro	<i>h6</i>	21,2			
	<i>d6</i>	7,9			
Escadas irregulares	<i>h71</i>	32,0			
	<i>h72</i>	30,3			
	<i>h73</i>	30,0			
	<i>h74</i>	31,5			
	<i>h75</i>	29,2			
Esfera	<i>d8</i>	8,3			

4.2 TESTE DO DESEMPENHO DO SCANNER LASER 3D NEXTENGINE.

4.2.1 Resultados das medições com scanner.

Seguindo o processo descrito no capítulo três, foram obtidos os resultados mostrados na tabela 4.4, com os resultados das três medições feitas para cada parâmetro, foram calculadas as respectivas médias e desvios padrão, também foi calculado o intervalo de confiança para cada parâmetro com fator de expansão aos 95 % de probabilidade igual a 4,303 correspondente a dois graus de liberdade na distribuição T student bicaudal (Box, 2008).

Tabela 4.4 Medições feitas no *Scanner Laser*.

<i>Figura geométrica</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>Medição 1 (mm)</i>	<i>Medição 2 (mm)</i>	<i>Medição 3 (mm)</i>	<i>Média (mm)</i>	<i>Desvio padrão (mm)</i>	<i>Intervalo de confiança (95%) mm</i>
<i>Furo Retangular</i>	<i>h1</i>	4,995	4,986	5,056	5,012	0,038	0,164
	<i>L1</i>	25,588	25,838	25,527	25,651	0,165	0,710
	<i>l1</i>	15,842	15,958	15,804	15,868	0,080	0,344
<i>Furo Circular</i>	<i>h2</i>	2,057	2,049	2,050	2,052	0,005	0,022
	<i>d2</i>	17,212	17,319	17,281	17,271	0,055	0,237
<i>Cone</i>	<i>h3</i>	32,979	33,059	33,097	33,045	0,060	0,258
	<i>d3</i>	35,276	35,276	34,020	34,857	0,725	3,120
<i>Eixo escalonado</i>	<i>d41</i>	37,052	37,455	37,024	37,177	0,241	1,037
	<i>d42</i>	31,784	32,146	32,320	32,083	0,273	1,175
	<i>d43</i>	26,038	26,439	26,593	26,357	0,287	1,235
	<i>d44</i>	20,335	20,969	21,268	20,857	0,477	2,053
	<i>d45</i>	14,047	14,182	14,318	14,182	0,135	0,581
	<i>d46</i>	9,543	9,791	9,723	9,686	0,128	0,551
	<i>d47</i>	5,280	5,339	5,254	5,291	0,043	0,185
	<i>h41</i>	5,754	5,702	5,784	5,747	0,041	0,176
	<i>h42</i>	4,162	4,107	4,130	4,133	0,028	0,120
	<i>h43</i>	5,045	5,040	5,089	5,058	0,027	0,116
	<i>h44</i>	4,835	4,801	4,834	4,823	0,019	0,082
	<i>h45</i>	5,061	5,045	5,069	5,058	0,012	0,052
	<i>h46</i>	4,769	4,751	4,694	4,738	0,039	0,168
<i>h47</i>	4,749	4,731	4,774	4,751	0,022	0,095	

<i>Forma Angular</i>	<i>h5</i>	7,101	7,119	7,081	7,100	0,019	0,082
<i>Cilindro</i>	<i>h6</i>	30,157	30,326	30,302	30,261	0,091	0,392
	<i>d6</i>	25,185	25,281	25,315	25,260	0,067	0,288
<i>Escadas irregulares</i>	<i>d7</i>	24,388	25,124	24,284	24,599	0,458	1,971
	<i>h71</i>	17,201	17,126	17,235	17,187	0,056	0,241
	<i>h72</i>	11,964	11,925	11,998	11,962	0,037	0,159
	<i>h73</i>	8,739	8,135	8,204	8,359	0,331	1,424
	<i>h74</i>	5,089	5,062	5,104	5,085	0,021	0,090
	<i>h75</i>	2,399	2,371	2,411	2,393	0,020	0,086
<i>Esfera</i>	<i>d8</i>	16,218	16,228	16,254	16,234	0,010	0,043

	<i>Parâmetro</i>	<i>Medição 1 (°)</i>	<i>Medição 2 (°)</i>	<i>Medição 3 (°)</i>	<i>Média (°)</i>	<i>Desvio padrão (°)</i>	<i>Intervalo de confiança (95%)</i>
<i>Forma Angular</i>	<i>α51</i>	119,446	119,261	119,375	119,361	0,093	0,400
	<i>α52</i>	39,018	38,818	38,957	38,931	0,102	0,439

Obtidas as medições com a MMC e com o scanner, foi executado o teste de avaliação do scanner, iniciando com o cálculo de erro sistemático entre as médias resultantes das medições efetuadas pelas duas máquinas. Assim procedendo, o erro foi calculado fazendo a diferença entre o valor medido pelo scanner (V.m) e o valor convencional pela MMC (V.c) obtido como os dados fornecidos pela MMC cantilever. A tabela 4.7 mostra os erros obtidos.

Tabela 4.5 Erro calculado sistemático para os parâmetros e geometrias do padrão.

<i>Figura geométrica</i>	<i>Parâmetro</i>	<i>V.m (mm)</i>	<i>V.c (mm)</i>	<i>Erro Sistemático V.m-V.c (mm)</i>
<i>Furo Retangular</i>	<i>h1</i>	5,012	4,940	0,072
	<i>L1</i>	25,651	25,017	0,634
	<i>l1</i>	15,868	15,685	0,183
<i>Furo Circular</i>	<i>h2</i>	2,052	2,030	0,022
	<i>d2</i>	17,271	17,261	0,01
<i>Cone</i>	<i>h3</i>	33,045	32,455	0,59
	<i>d3</i>	34,857	34,950	-0,093
<i>Eixo escalonado</i>	<i>d41</i>	37,177	36,8454	0,3316
	<i>d42</i>	32,083	31,745	0,338
<i>Eixo escalonado</i>	<i>d43</i>	26,357	25,911	0,446

	<i>d44</i>	20,857	20,558	0,299
<i>Eixo escalonado</i>	<i>d45</i>	14,182	14,002	0,18
	<i>d46</i>	9,686	9,474	0,212
	<i>d47</i>	5,291	4,998	0,293
	<i>h41</i>	5,747	4,766	0,981
	<i>h42</i>	4,133	4,616	-0,483
	<i>h43</i>	5,058	5,023	0,035
	<i>h44</i>	4,823	4,724	0,099
	<i>h45</i>	5,058	4,799	0,259
	<i>h46</i>	4,738	4,250	0,488
	<i>h47</i>	4,751	5,660	-0,909
<i>Forma Angular</i>	<i>h5</i>	7,100	7,200	-0,1
<i>Cilindro</i>	<i>h6</i>	30,261	29,029	1,232
	<i>d6</i>	25,260	24,922	0,338
<i>Escadas irregulares</i>	<i>d7</i>	24,599	23,985	0,614
	<i>h71</i>	17,187	16,532	0,655
	<i>h72</i>	11,962	11,451	0,511
<i>Escadas irregulares</i>	<i>h73</i>	8,359	7,7	0,659
	<i>h74</i>	5,085	4,659	0,426
	<i>h75</i>	2,393	1,993	0,4
<i>Esfera</i>	<i>d8</i>	16,234	16,072	0,162
<i>Forma Angular</i>	<i>α51</i>	119,361	120,383	-1,022
	<i>α52</i>	38,931	39,904	-0,973

Nesta tabela, pode-se observar que os erros apresentam variação entre -0,909 mm e 1,232 mm e para ângulos de -1,022° e -0,973°.

4.2.2 Teste de Repetitividade e Reprodutividade (R&R)

- Gráficos de amplitude e dispersão.

A Análise de erros e variabilidade foi desenvolvido no intervalo de confiança (95%) para as medições feitas no scanner (barras vermelhas). Os gráficos também contêm os valores estabelecidos de erro máximo e mínimo, fornecidos pelo fabricante, correspondente a um máximo de 0,381 mm e a um mínimo de -0,381 no modo *wide*, representados pelas linhas azuis. Estes gráficos dos erros são apresentadas para cada uma das figuras geométricas com suas respectivas análises seguinte na sequência.

A figura 4.1 mostra os valores dos erros associados à medição dos parâmetros do furo retangular, $h1$, $L1$, $l1$. Neste gráfico foi observado que o erro e a variabilidade é maior quanto maior é o comprimento do furo retangular. O parâmetro $l1$ está fora dos limites fornecidos pelo fabricante e apresenta o desvio padrão maior.

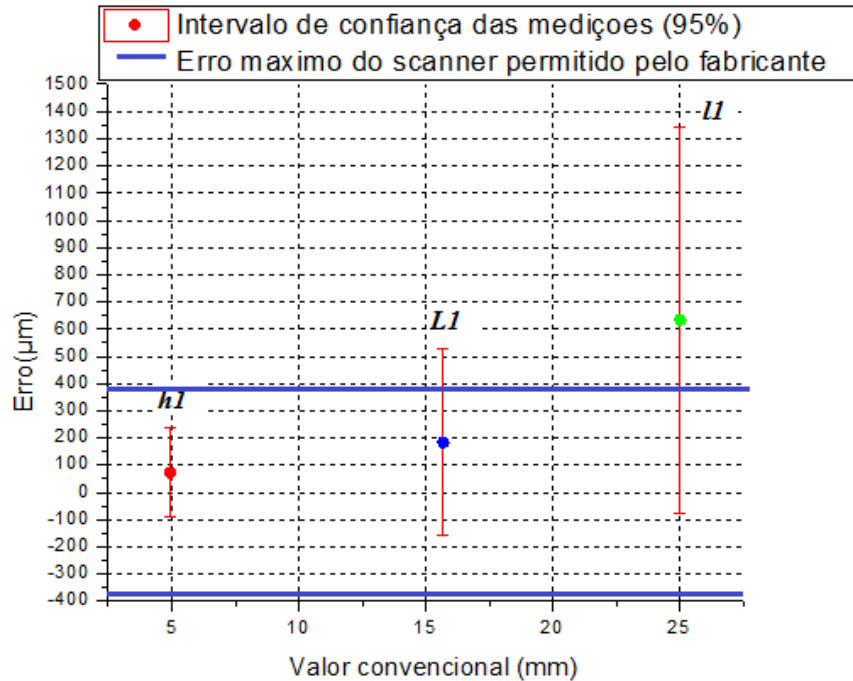


Figura 4.1 Gráfico de erros para o furo retangular

A figura 4.2 mostra os erros nos parâmetros associados ao furo circular. Foi observado que o diâmetro apresentou uma maior variabilidade que a altura, e ambos erros ficaram dentro dos limites fornecidos pelo fabricante.

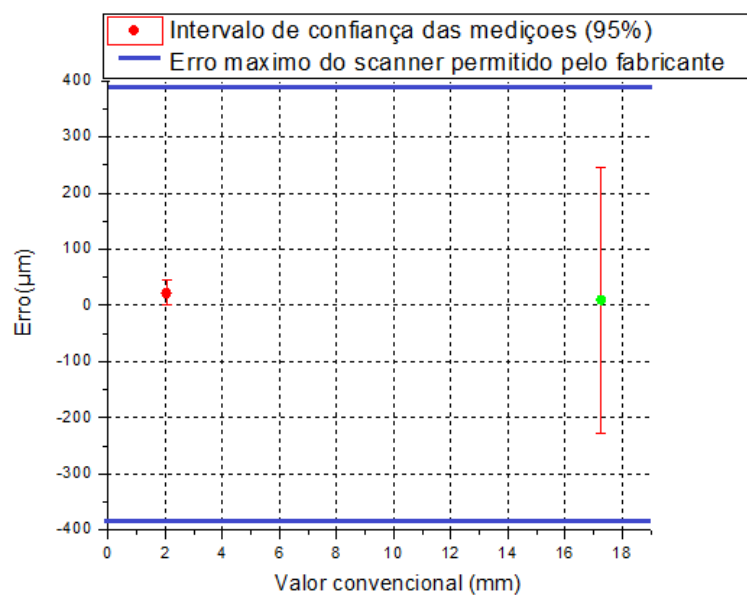


Figura 4.2 Gráfico de erros para o furo circular

A figura 4.3 apresenta os resultados associados ao cone. Foi observado que a variabilidade do diâmetro é grande, mas fica dentro dos limites. Para a altura, o erro fica fora dos limites com uma variabilidade muito menor

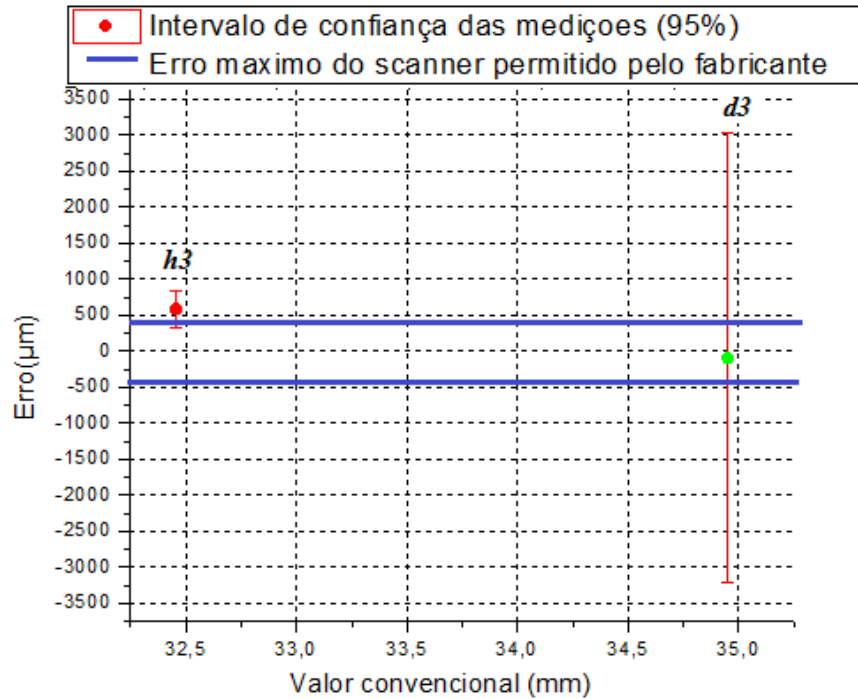


Figura 4.3 Gráfico de erros para o cone.

A figura 4.4 e 4.5 mostra os erros nas alturas e nos diâmetros do eixo escalonado. Foi observado que para as alturas, exceto para as alturas h41, e h45 e h43, os erros ficam fora dos limites do fabricante com uma variabilidade pequena. Para dimensões maiores, onde foram determinados os diâmetros, foi observado um incremento na variabilidade, sendo que todos os diâmetros, exceto para o diâmetro d43, ficam dentro dos limites fornecidos pelo fabricante. O diâmetro d44 apresenta uma variabilidade muito maior em comparação com os demais erros de diâmetro do eixo escalonado.

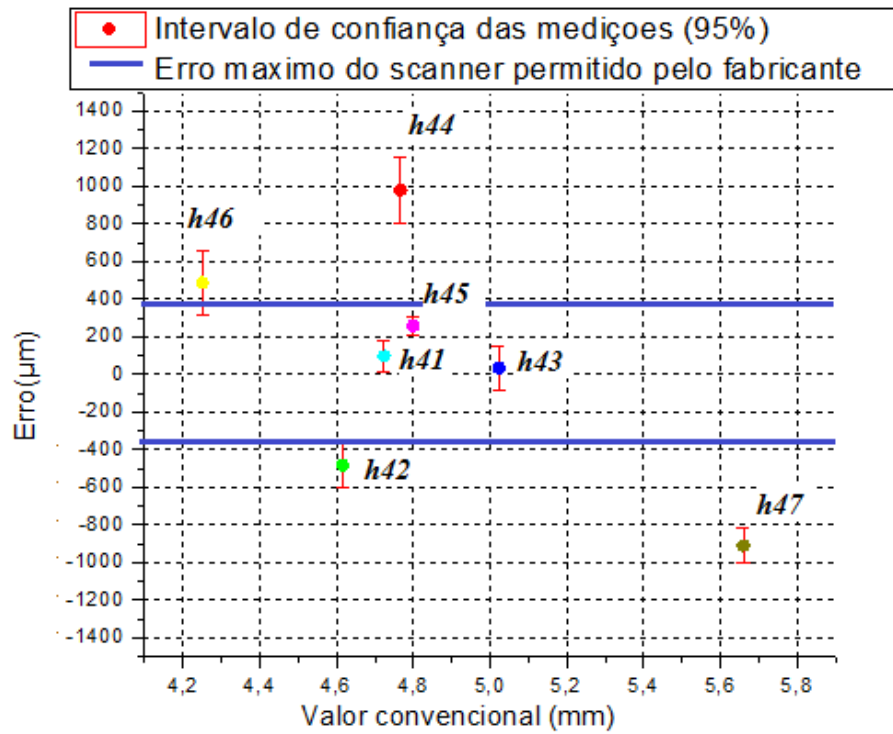


Figura 4.4 Gráfico de erros para o eixo escalonado, alturas.

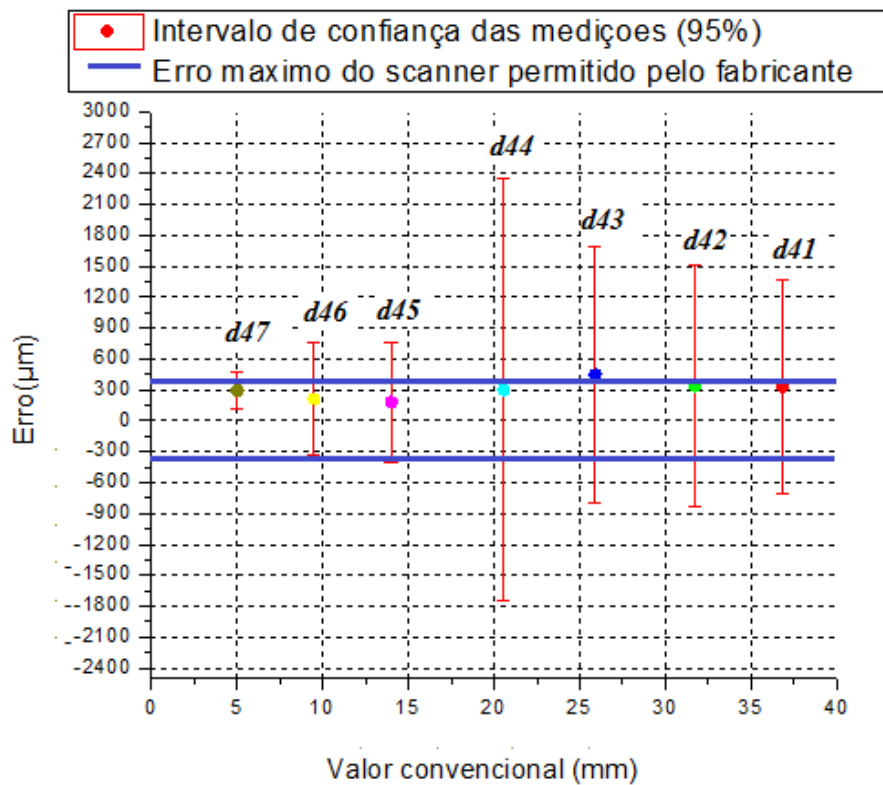


Figura 4.5 Gráfico de erros para o eixo escalonado, diâmetros.

A figura 4.6 mostra os erros na altura para a figura de forma angular. Este erro apresenta uma tendência negativa com baixa variabilidade e fica dentro dos limites do fabricante.

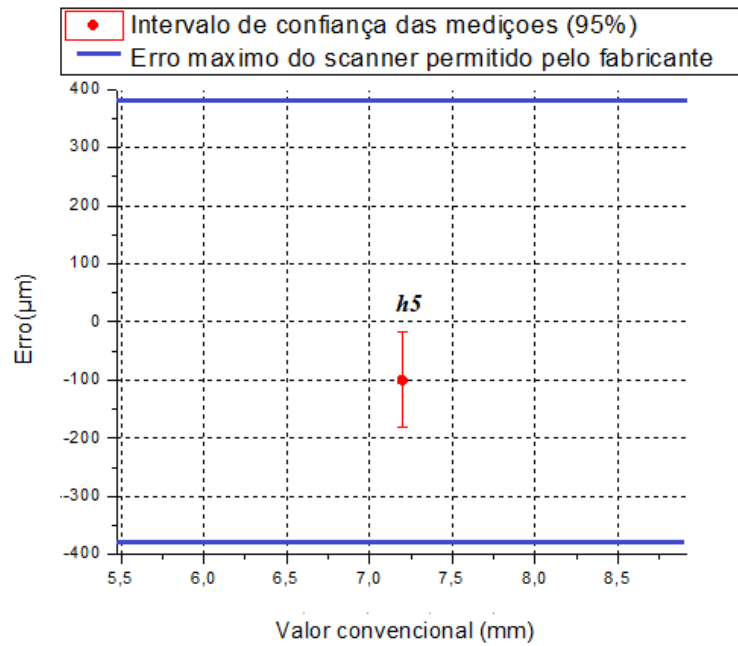


Figura 4.6 Gráfico de erros para figura de forma angular.

A figura 4.7 mostra o erro da altura e do diâmetro do cilindro. Pode ser observado que o erro do diâmetro está fora dos limites do fabricante. A variabilidade em ambos os casos é próxima.

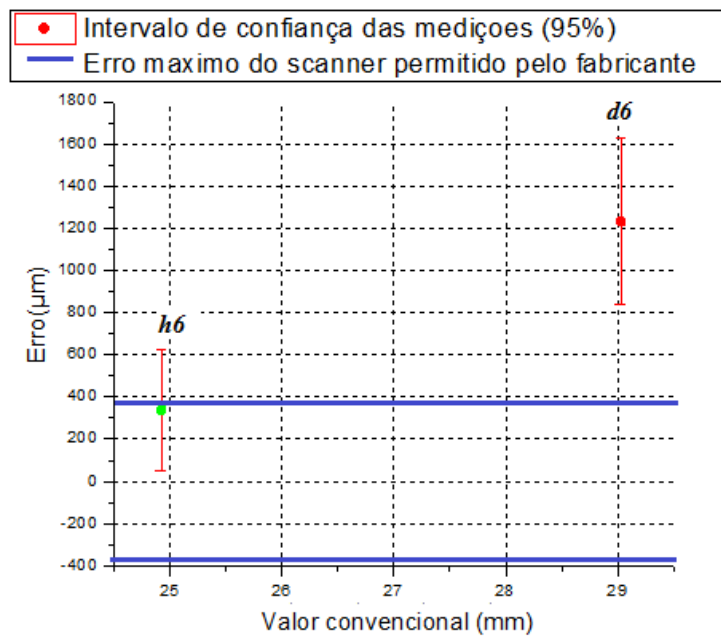


Figura 4.7 Gráfico de erros para o cilindro.

A figura 4.8 mostra os erros dos parâmetros medidos nas escadas irregulares. Para a altura h_{73} e para o diâmetro d_7 temos uma variabilidade maior que para os outros parâmetros medidos. Todos os parâmetros medidos no *scanner* ficam fora dos limites do *scanner*.

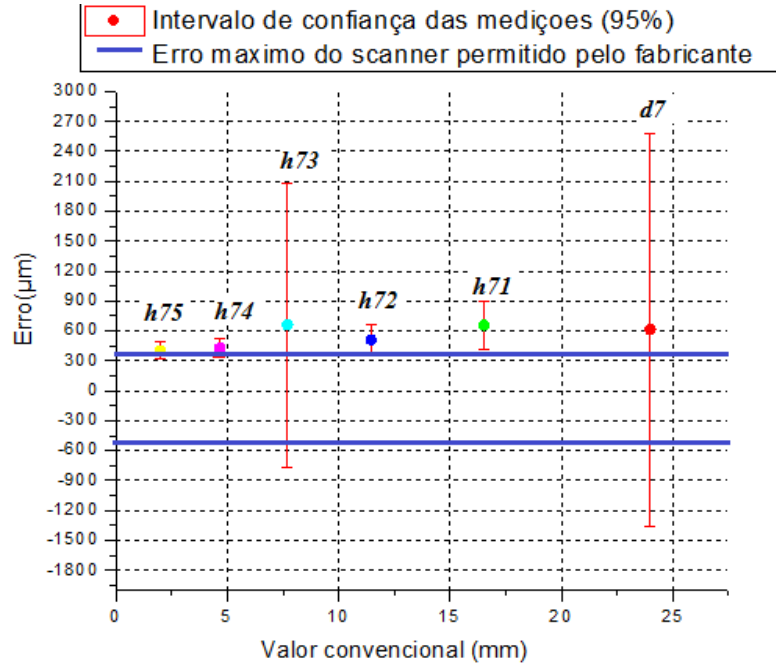


Figura 4.8 Gráfico de erros para as escadas irregulares.

A figura 4.9 mostra os erros no diâmetro da esfera. O erro obtido fica dentro dos limites do fabricante do scanner com uma variabilidade pequena para esta geometria.

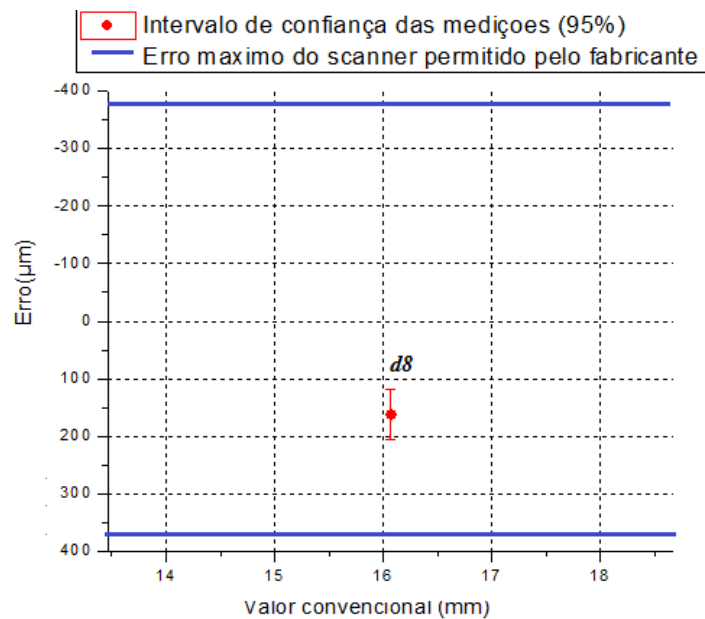


Figura 4.9 Gráficos de erro para a esfera

Uma outra análise foi feita em função do plano XY e o plano Z. A média das três medições realizadas está apresentada das figuras 4.12 até 4.13. No eixo Y temos o erro calculado com respeito ao valor do parâmetro calibrado com a MMC e no eixo X temos o valor convencional do parâmetro medido com a MMC.

Na figura 4.10 pode ser observado que os valores de alturas menores a 6 mm não apresentam erro constante. Observando-se baixa variabilidade nos erro obtidos sendo que para alturas maiores a variabilidade aumentou, tendo como variabilidade máxima 1424 μm para um valor de altura de 22 mm.

A dispersão destes erros possivelmente foi causada pelo método usado para calcular a altura sendo que no software do scanner foram determinadas as distâncias entre o plano superior da figura geométrica e o plano da base, exceto para o cone, já que a altura foi obtida medindo a distância entre o ponto superior do cone e o plano base. Pelo contrário no software da MMC, o valor da altura foi obtido pela distância entre o plano da base e um ponto no plano superior da figura geométrica. A maioria dos erros obtidos para as alturas ficam fora dos limites fornecidos pelo fabricante.

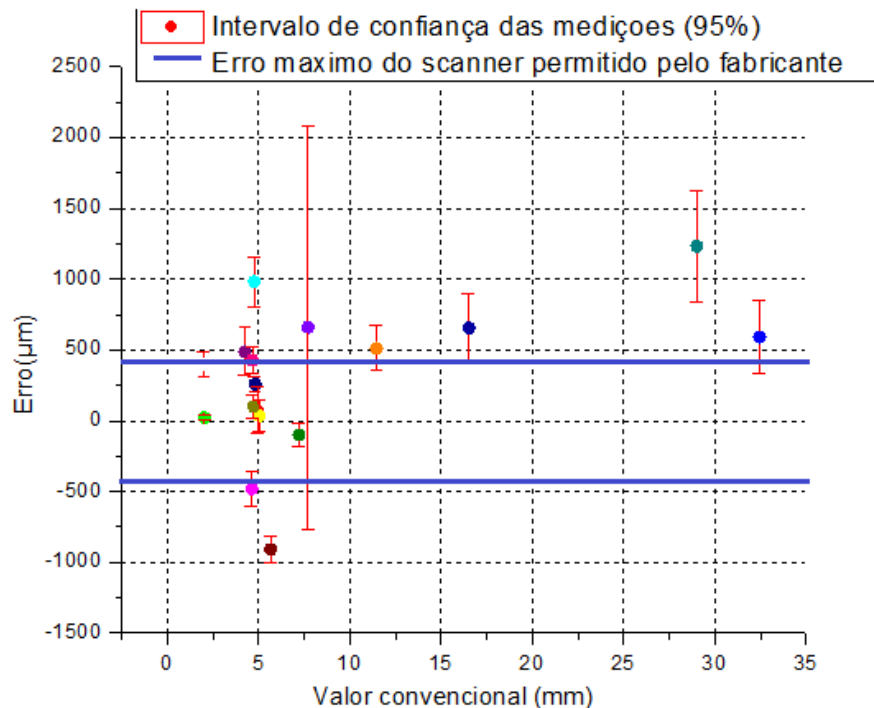


Figura 4.10 Gráfico de erros para as alturas.

Na figura 4.11 pode ser observado que a maioria dos erros dos diâmetros e comprimentos ficam dentro dos limites do fabricante, obtendo maior variabilidade nos parâmetros maiores que 20 mm. Tendo como variabilidade máxima 3120 μm para um valor de 35 mm.

A variabilidade destes erros possivelmente foi causada pelo método usado para ajustar os sólidos no software Rapidworks, sendo que no ajuste entre a malha e o sólido gerado foi alterada a nuvem de pontos obtida no scanner laser.

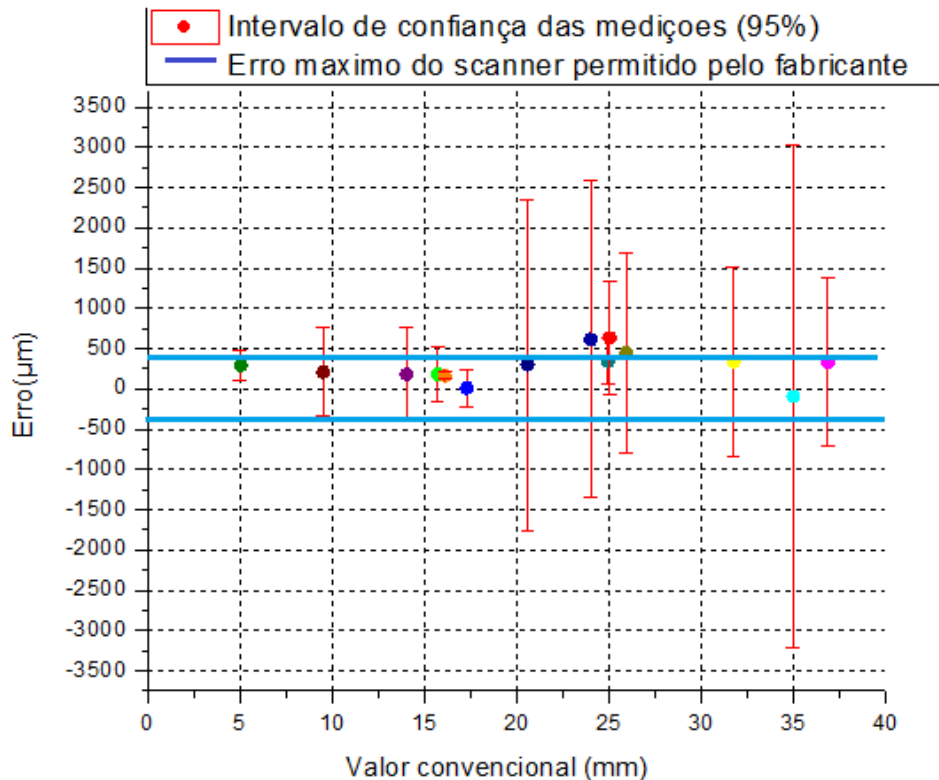


Figura 4.11 Gráfico de erros para os diâmetros e comprimentos.

Analisando os resultados, a repetitividade foi determinada como a máxima variabilidade dos erros observados em todos os parâmetros medidos, sendo igual a 3120 μm correspondente ao diâmetro do cone (d_3).

A tendência é uma medida associada à exatidão do sistema de medição tendo como valor máximo 1232 μm correspondente à altura do cilindro.

Na análise das alturas (Plano Z), considerando a medição de alturas dada pelo scanner, pode-se afirmar que a repetitividade equivale a uma variabilidade máxima correspondente a 1424 μm e a tendência associada a exatidão do sistema de medição tem um valor de 1232 μm correspondente à altura do cilindro.

Para os diâmetros e comprimentos (plano XY) foi encontrada uma repetitividade equivalente a máxima variabilidade dos erros observados sendo igual a 3120 µm, com um valor máximo de tendência igual a 634 µm.

No caso da medição dos ângulos e comprimentos a avaliação foi simplificada, com dois pontos (parâmetros) em cada.

- ANOVA - Cálculo do índice de R&R

O método usado neste estudo foi à análise de variância (ANOVA), como descrito no capítulo 3.3. Os três fatores aleatórios utilizados no planejamento hierárquico foram a geometria (G), e seis níveis, os parâmetros (P), em dois níveis e as medições (M), em três níveis.

A tabela 4.6 apresenta o quadro de análises de variância (ANOVA), calculado em função dos erros determinados. Os valores das somas de quadrados (SQ) e quadrados médios (QM), bem como dos valores esperados, foram determinados pela tabela 3.3 e as equações 3.11 até 3.13.

Tabela 4.6 Tabela ANOVA para fatores com efeitos aleatórios, planejamento hierárquico.

Fator variável	Soma de quadrados (SQ)	gl	Quadrados médios (QM)	Valor esperado dos quadrados médios
Fator G	468,3485	1		
Geometria	2,199266	5	0,4398532	0,04148
Parâmetros	1,749899	6	0,29164983	0,01425
Medições	1,026026667	24	0,042751	0,04275
Total	328,7196	36		

O cálculo das estimativas das variâncias destes três fatores ($\sigma_g^2, \sigma_p^2, \sigma_m^2$) foi feito conforme as equações abaixo.

$$QMG = \sigma_g^2 + \frac{\sigma_p^2}{2} + \frac{\sigma_m^2}{6} = 0,4398532 \quad (4.1)$$

$$QMP = \sigma_p^2 + \frac{\sigma_m^2}{2} = 0,2916498 \quad (4.2)$$

$$QMM = \sigma_m^2 = 0,042751 \quad (4.3)$$

Obtendo assim os valores das estimativas das variâncias para a geometria, parâmetro e para as medições, respectivamente.

$$\sigma_g^2 = 0,024701$$

$$\sigma_p^2 = 0,082966$$

$$\sigma_m^2 = 0,042751$$

O índice de repetitividade e reprodutividade (GRR) calculado para o modo *wide* com um valor de

$$GRR = \sqrt{\sigma_g^2 + \sigma_p^2 + \sigma_m^2} = 0,39 \quad (4.4)$$

O índice GRR combina a repetitividade e a reprodutividade do sistema de medição. Identificado como estimativa da reprodutividade a variância associada às medições σ_m^2 , e a repetitividade como as variâncias associadas à geometria σ_g^2 e ao parâmetro medido σ_p^2 . Maior variância no processo de medição corresponde a variância devida aos parâmetros escolhidos.

5. CONCLUSÕES

Um novo método usando m padrão com elementos geométricos conhecidos como círculos, esfera, planos, cone e cilindro foi desenvolvido para testar o desempenho de um scanner tridimensional do fabricante Next Engine. O método foi baseado em testes de repetitividade e reprodutividade. O padrão desenvolvido foi calibrado e a sua incerteza expandida, referente aos parâmetros geométricos foi determinada. As análises foram feitas em função da figura geométrica medida e do parâmetro escolhido, para calcular parâmetros que caracterizem o desempenho destes instrumentos.

Uma peça padrão foi construída e calibrada e foram obtidas as incertezas padrão combinadas e as incertezas padrão expandidas (95%) dos parâmetros. Os resultados das incertezas expandidas mostram grandes diferenças nos valores de 6,8 μm até 295,5 μm , obtendo uma maior incerteza para as alturas, associada ao procedimento de medição. Os valores dos parâmetros dos elementos geométricos foram determinados e os erros de medição com o scanner foram calculados, tendo valores dentro da faixa de -0,909 mm até 1,232 mm.

O desempenho do scanner laser NextEngine foi determinado a partir dos valores dos erros na medição no padra. Valores de variabilidade das medições foram obtidos pelos gráficos de amplitude e dispersão e método de análises e variância (ANOVA). No método de gráficos de amplitude e dispersão, foi feita uma análise para cada figura geométrica e para os planos XY e Z, obtendo uma repetitividade associada ao intervalo de confiança aos 95% de probabilidade, de acordo a uma distribuição de probabilidade t student, equivalente a máxima variabilidade dos erros observados sendo igual a 3120 μm . Para o método de análises e variância (ANOVA), foi obtido um valor do índice de repetitividade e reprodutividade calculado, a partir das variâncias associadas a geometria escolhida, ao parâmetro medido e ao número de medições feitas. O valor da repetitividade obtido do parâmetro GRR foi de 0,328, enquanto que a reprodutividade foi de 0,2067. O método de variância (ANOVA) permite uma análise mais detalhada da variabilidade do instrumento sendo assim recomendado para ser empregado nos testes de desempenho deste tipo de sistemas de medição. Assim, a repetitividade do scanner laser 3D NextEngine, no modo *wide*, apresentou os valores mencionados anteriormente, representados pelo índice GRR com valo 0,39 mm.

Como sugestão de futuros trabalhos, pode ser investigada a aplicação do método em outros instrumentos de medição sem contato, como outros modelos de scanner laser seguindo a metodologia proposta neste trabalho. Um estudo mais aprofundado das variáveis de mediação, como as opções dos softwares ScanStudio HD, e RapidWorks, geometrias de padrão usadas e métodos de ajuste e cálculo dos parâmetros podem ser avaliadas de forma mais detalhada.

Outra sugestão é fazer um número maior de repetições de medição no scanner laser para obter uma amostra representativa dos dados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.

ABNT/INMETRO. (2012). Guia Para a Expressão da Incerteza de Medição. 3a. ed. Brasileira. Campinas: SERIFA Comunicação.

AIAG (2002), “Measurement Systems Analysis”. Editor AIAG. 3a. ed, 239 p. AMERICAN SOCIETY OF MECHANICAL ENGINEERS. ASME B.89.4.22-2004, Methods for Performance Evaluation of Articulated Arm Coordinate Measuring Machines, (2004).

Associação Brasileira de Normas Técnicas – NBR/ISO/IEC 17025, (2005), “Requisitos Técnicos para a Competência Técnica de Laboratórios de Ensaios e Calibração”, Rio de Janeiro.

Barbero B. R., Ureta E. S.(2011), “Comparative study of different digitization techniques and their accuracy”, Computer-Aided Design, Volume 43, Issue 2, Pages 188-206.

Beraldin, J.-A., Gaiani, M. (2005), “Evaluating the Performance of Close-Range 3D ActiveVision Systems for Industrial Design Applications”, Videometrics VIII - SPIE Electronic Imaging, vol.5665, pág 67-77.

Box, G., Hunter J, and Hunter W. (2008), “Statistics for Experimenters”. Segunda ed, pág 639.

BUREAU INTERNATIONAL DES POIDS ET MESURES (BIPM). “Evaluation of measurement data – Guide to expression of uncertainty in measurement”, JCGM 100:2008, Gum 1995 with minor corrections, first edition September 2008.

Crescenzo F., Fantini M. (2011), “Experimental analysis for error compensation of laser scanner data”. In International conference on Innovative Methods in Product Design, Venice, Italy.

Feng S, Y., Liu, Y., Xi, F., (2001), “Analysis of digitizing errors of a laser scanning system”, Precision Engineering, vol 25, Pág 185-191.

Ferneda, A. (1999), "Integração metrologia, CAD e CAM: uma contribuição ao estudo de engenharia reversa" [online], dissertação de mestrado. São Carlos. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Gestel N. V., Cuypers S., Bleys P., Kruth J. P. (2009), "A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs", *Optics and Lasers in Engineering*, vol 47, Issues 3–4, Pág 336-342.

Godin, G., Rioux, M., Beraldin, J.-A., Levoy, M., Cournoyer, L., (2001). "An Assessment of Laser Measurement Techniques", pág. 49-56, Vienna, Austria.

Guidi G., Remondino F., Morlando G., Del Mastio A. (2007), Ucheddu F., Pelagotti A., "Performances evaluation of a low cost active sensor for cultural heritage documentation", *Structured Light and Laser Scanning*, Pág 59-69.

Guidi G., Russo M., Magrassi G., Bordegoni M., (2010), "Performance evaluation of triangulation based range sensors", 2010, *Sensors* [1424-8220] vol: 10, pág: 7192 -215.

INMETRO. Vocabulário Internacional de Metrologia. Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados. (2012). (Tradução autorizada pelo BIPM da terceira edição internacional do VIM 2012). 1a edição brasileira. Rio de Janeiro: INMETRO.

Jiménez, E., Reyes, L., e García, A. (2006). "Algunas consideraciones sobre la Ingeniería Inversa." Informe Interno de Investigación, Centro de Tecnología Avanzada de ITESCA, Red Alfa, Sonora, México.

Lartigue, C., Contri, C., Bourdet, P.,(2002). "Digitised point quality in relation with point exploitation", *Measurement*, vol 32, Pág 193-203.

Lima, C.R.G. (2012). "Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte." Dissertação de mestrado, Florianópolis, Brasil.

Martinez S, Cuesta E, Barreiro S, Álvarez B. (2010) "Methodology for comparison of laser digitizing versus contact systems in dimensional control". *Optics and laser in Engineering*, vol 48, pág 1238-1246.

Montgomery, Douglas C. (2008). "Design and analysis of experiments". Editora LTC. Quinta ed., 699 pág.

NextEngine user's guide, novembro 2005.

Pérez M. O., (2011), "Análisis estadístico en geografía física", dissertação de mestrado. Departamento de matemáticas. Universidad de la coruña.

Piratelli-Filho A., Tavares F.H., Arencibia, R.V. (2012), "Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs evaluation", *Precision Engineering*, vol 36, Issue 2, Pág 349-355.

Polo, M. E, Felicísimo A. M (2012), "Analysis of Uncertainty and Repeatability of a Low-Cost 3D Laser Scanner", *Sensors*, vol 12, Issue7, pages 9046 -9054.

Qing Wang, Nick Zissler, Roger Holden (2013), "Evaluate error sources and uncertainty in large scale measurement systems", *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol 29, Issue 1, Pág 1-11.

Sansoni, G.; Docchio, F., (2005), "3-D optical measurements in the field of cultural heritage: the case of the Vittoria Alata of Brescia," *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol.54, no.1, pág.359, 368.

Sansoni, G.; Trebeschi, M.; Docchio (2009), "F. State-of-The-Art and Applications of 3D Imaging Sensors in Industry, Cultural Heritage, Medicine, and Criminal Investigation". *Sensors*, vol 9, pág 568-601.



Van G. N, Cuypers S., Bleys P., Kruth J. P., (2009), "A performance evaluation test for laser line scanners on CMMs, *Optics and Lasers in Engineering*", vol 47, Pág 336-342.

APÊNDICE A. CÁLCULO DA INCERTEZA EXPANDIDA PARA OS PARÂMETROS.

PARÂMETRO	$u_{RPT}(\mu m)$	$u_{MMC}(\mu m)$	$u_{res}(\mu m)$	$u_{\Delta T20}(\mu m)$	$u_{Tdif}(\mu m)$	Incerteza padrão combinada $u_c(\mu m)$	Grau de liberdade efetiva ν_{eff}	Fator de expansão k	Incerteza expandida $U_{95\%}(\mu m)$
<i>h1</i>	0,4	1,2	0,1	0,0	0,0	3,5	50157,4	2,0	6,8
<i>L1</i>	3,1	1,2	0,1	0,2	0,1	4,6	45,5	2,0	9,3
<i>l1</i>	3,5	1,2	0,1	0,1	0,0	4,9	34,3	2,0	10,0
<i>h2</i>	0,9	1,2	0,1	0,0	0,0	3,6	1784,1	2,0	7,0
<i>d2</i>	5,2	1,2	0,1	0,1	0,0	6,2	18,6	2,1	13,1
<i>h3</i>	2,2	1,3	0,1	0,2	0,1	4,1	106,5	2,0	8,1
<i>d3</i>	130,6	1,3	0,1	0,2	0,1	130,6	9,0	2,3	295,5
<i>d41</i>	1,0	1,3	0,1	0,3	0,1	3,6	1553,9	2,0	7,1
<i>d42</i>	1,3	1,3	0,1	0,2	0,1	3,7	580,6	2,0	7,2
<i>d43</i>	1,8	1,2	0,1	0,2	0,1	3,9	180,9	2,0	7,7
<i>d44</i>	1,9	1,2	0,1	0,1	0,0	3,9	168,3	2,0	7,7
<i>d45</i>	1,1	1,2	0,1	0,1	0,0	3,6	1049,2	2,0	7,1
<i>d46</i>	1,3	1,2	0,1	0,1	0,0	3,7	604,4	2,0	7,2
<i>d47</i>	0,9	1,2	0,1	0,0	0,0	3,5	2481,9	2,0	6,9
<i>h42</i>	94,9	1,2	0,1	0,0	0,0	94,9	9,0	2,3	214,7
<i>h43</i>	107,6	1,2	0,1	0,0	0,0	107,7	9,0	2,3	64,1
<i>h44</i>	107,2	1,2	0,1	0,0	0,0	107,3	9,0	2,3	249,4
<i>h45</i>	28,1	1,2	0,1	0,0	0,0	28,3	9,3	2,3	286,1

PARÂMETRO	$u_{RPT}(\mu m)$	$u_{MMC}(\mu m)$	$u_{res}(\mu m)$	$u_{\Delta T20}(\mu m)$	$u_{Tdif}(\mu m)$	Incerteza padrão combinada $u_c(\mu m)$	Grau de liberdade efetiva $veff$	Fator de expansão k	Incerteza expandida $U_{95\%}(\mu m)$
<i>h46</i>	110,2	1,2	0,1	0,0	0,0	110,3	9,0	2,3	7,3
<i>h47</i>	126,4	1,2	0,1	0,0	0,0	126,5	9,0	2,3	243,6
<i>h48</i>	1,5	1,2	0,1	0,0	0,0	3,7	359,4	2,0	242,7
<i>h5</i>	94,2	1,2	0,1	0,1	0,0	94,3	9,0	2,3	213,3
<i>a51</i>	47,2	1,4	0,1	0,8	0,2	47,4	9,1	2,3	107,2
<i>a52</i>	37,3	1,3	0,1	0,3	0,1	37,4	9,2	2,3	84,6
<i>h6</i>	9,0	1,2	0,1	0,2	0,1	9,6	11,8	2,2	21,2
<i>d6</i>	2,0	1,2	0,1	0,2	0,0	4,0	142,2	2,0	7,9
<i>d7</i>	4,6	1,2	0,1	0,2	0,0	5,7	22,1	2,1	11,9
<i>h71</i>	13,9	1,2	0,1	0,0	0,0	14,4	10,1	2,2	32,0
<i>h72</i>	13,2	1,2	0,1	0,0	0,0	13,6	10,3	2,2	30,3
<i>h73</i>	13,5	1,2	0,1	0,1	0,0	13,9	10,2	2,2	31,0
<i>h74</i>	13,7	1,2	0,1	0,1	0,0	14,1	10,2	2,2	31,5
<i>h75</i>	12,7	1,2	0,1	0,1	0,0	13,1	10,4	2,2	29,2
<i>d8</i>	2,4	1,2	0,1	0,1	0,0	4,2	85,6	2,0	8,3

ANEXO 1. MODELO E CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MMC MITUTOYO

			
SWIP		SAPHIRWERK INDUSTRIEPRODUKTE AG BRUNNENSTRASSE 16 Tel. +41 (0)32 374 25 85 E-mail: info@saphirwerk.com CH-2552 BRUGG SWITZERLAND Fax: +41 (0)32 374 25 97 Internet: www.saphirwerk.com	
Proprietary certificate according to ISO 17025			
Order no:	1037542	Date:	29.01.2008
Identification no:	H0275	Material:	Al2O3
Object:	1 calibration ball		
Roundness and diameter measurement: The measuring equipments and the references used to calibrate our equipment are periodically checked by the Metas (Swiss Federal Office of Metrology and Accreditation).			
Diameter in mm:	19.9834	Roundness in μm :	0.036
Uncertainty of measurement	$\pm 0.3\mu\text{m}$	Uncertainty of measurement	$< 0.08 \mu\text{m}$
Both values, diameter and roundness, describe the equator of the calibration ball which is perpendicular to the stem's axis.			
For measurements:	K.Hänzi, Measurement laboratory		
			OS-FO-03.01-33
<small>To determine the diameter of the ball we took care of the thermal expansion. The reported expanded uncertainty of measurement is stated as the standard uncertainty of measurement multiplied by the coverage factor $k=2$, which for a normal distribution corresponds to a coverage probability of approximately 95%.</small>			



LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO
Laboratório de Calibração Acreditado pela CGCRE/INMETRO
de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob No. 031



CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Pag.: 1 / 4

Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

Endereço : UNB - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte - Brasília, DF.

Local da calibração: UNB - Campus Universitário Darcy Ribeiro - Asa Norte - Brasília, DF.

Ordem de Serviço : 024.012/001

I. Identificação do Equipamento Calibrado :

Máquina Tridimensional de Medição por Coordenadas

Fabricante : Mitutoyo

MMC Modelo : QM-353

No de Série : .0072807 / Código : 198-314

Identif. do Cliente : N/C

Faixa Nominal : 300 x 500 x 300 mm

Contador Digital / Controlador

Modelo : UD1-VC

No Série : N/C

Resolução : 0,0005 mm

Cabeçote

Modelo : MH20

No Série : 5L7792

Probe

Modelo : TP20-SF

No Série : 7K0621

Rack

Modelo : -

No Série : -

Programa de Medição

Programa : MCOSMOS-Manual

Versão : V3.0R16

Dongle No. : 10-10248519

II. Notas:

1. A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padrão combinada multiplicada por um fator de abrangência $k=2,1$, para um nível de confiança de aproximadamente 95%.
2. Erro = Valor indicado - Valor Verdadeiro Convencional.
3. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
4. A máquina foi verificada conforme Procedimento PML-0030 na sua versão 1/2.
5. Condição ambiental: Temperatura : $20,1 \pm 0,5^{\circ}\text{C}$

III. Padrões utilizados :

Padrão Escalonado

No Série : 9211320

Certificado No : 2824/08

Emitido em : 5/4/2008

Validade : 10/2008

Termohigrômetro

No Série : T1F7008

Certificado No : LV9362/06

Emitido em : 8/9/2006

Validade : 09/2008

Esfera Padrão

No Série : D2455

Certificado No : 2909/07

Emitido em : 13/4/2007

Validade : 04/2009

Data da Calibração : 8/8/2008

Carlos Kazuo Suetake
Chefe Laboratório de Metrologia
Emissão: 9/08/08

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

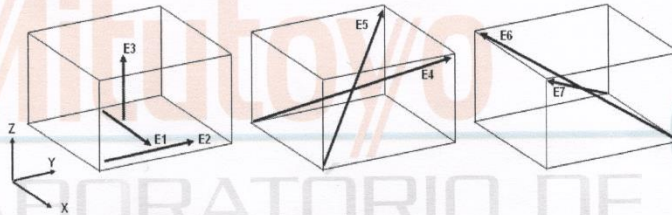
Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

IV. Resultado das Medições :

4.1. Verificações iniciais do equipamento :

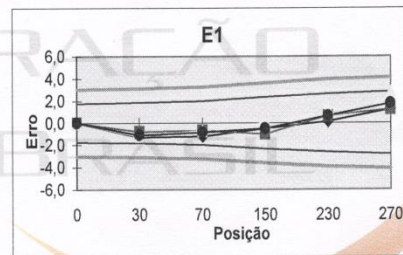
- a. Movimento da Máquina : OK
- b. Condições da área de Medição : OK
- c. Avaliação do Sist. Pneumático : OK
- d. Limpeza das superfície de ref. : OK

4.2. Verificação do equipamento:



4.2.1. Exatidão de medição Posição E1 - unidade : μm

Posição (L) (mm)	Erro (μm)			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-1,3	-0,8	-1,2	-1,1
70	-1,2	-0,7	-0,7	-0,9
150	-0,5	-1,0	0,0	-0,5
230	0,1	0,6	1,2	0,6
270	1,2	1,2	2,8	1,7

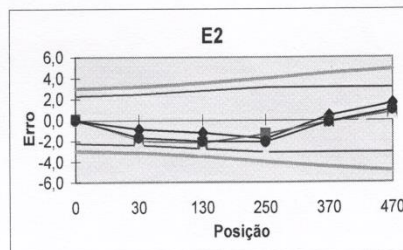


$$U = 1,2 + L/900 \quad \mu\text{m}$$

, onde: L = posição em " mm ".

4.2.2. Exatidão de medição Posição E2 - unidade : μm

Posição (L) (mm)	Erro (μm)			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,9	-2,0	-2,1	-1,7
130	-1,2	-2,2	-2,8	-2,1
250	-1,8	-1,4	-3,1	-2,1
370	0,4	-0,2	-0,7	-0,2
470	1,6	0,7	0,6	1,0



$$U = 1,2 + L/800 \quad \mu\text{m}$$

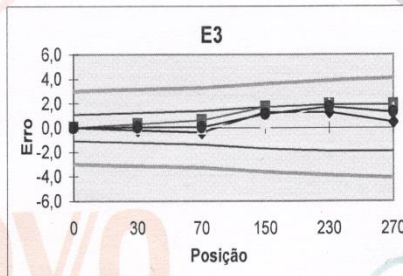
, onde: L = posição em " mm ".

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

4.2.3. Exatidão de medição Posição E3 - unidade : μm

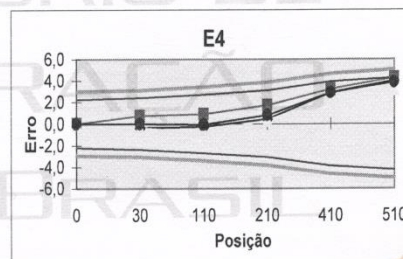
Posição (L) (mm)	Erro (μm)			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,2	0,3	0,0	0,0
70	-0,4	0,6	0,0	0,1
150	1,3	1,7	0,5	1,2
230	1,3	1,9	1,9	1,7
270	0,5	1,9	1,5	1,3



$U = 1,2 + L/700 \mu\text{m}$, onde: L = posição em " mm ".

4.2.4. Exatidão de medição Posição E4 - unidade : μm

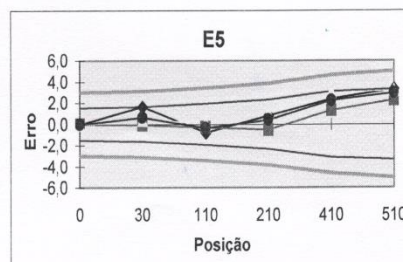
Posição (L) (mm)	Erro (μm)			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,4	0,7	-0,4	0,0
110	-0,3	0,9	-0,8	-0,1
210	0,4	1,7	0,3	0,8
410	2,9	3,2	2,5	2,9
510	4,0	4,3	3,2	3,8



$U = 1,2 + L/600 \mu\text{m}$, onde: L = posição em " mm ".

4.2.5. Exatidão de medição Posição E5 - unidade : μm

Posição (L) (mm)	Erro (μm)			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	1,6	-0,1	0,4	0,6
110	-0,8	-0,3	0,1	-0,3
210	0,8	-0,5	1,0	0,4
410	2,4	1,3	3,0	2,2
510	3,3	2,3	3,2	2,9



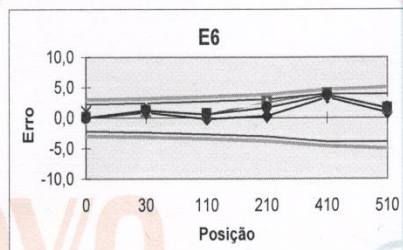
$U = 1,2 + L/700 \mu\text{m}$, onde: L = posição em " mm ".

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

4.2.6. Exatidão de medição Posição E6 - unidade : μm

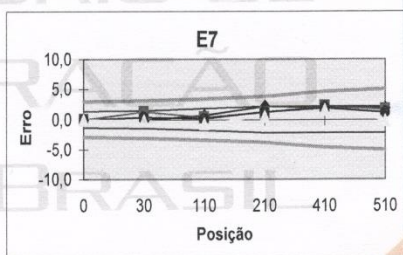
Posição (L) (mm)	Erro (μm)			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,8	1,1	1,6	1,2
110	-0,2	0,6	1,2	0,5
210	0,3	2,5	2,2	1,7
410	3,3	3,9	3,8	3,7
510	0,8	1,5	2,3	1,5



$U = 1,2 + L/700 \mu\text{m}$, onde: L = posição em " mm ".

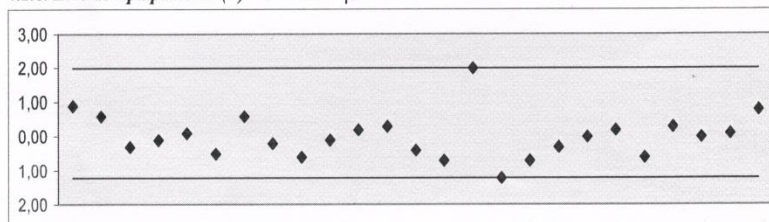
4.2.7. Exatidão de medição Posição E7 - unidade : μm

Posição (L) (mm)	Erro (μm)			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,1	1,3	-0,1	0,4
110	0,7	0,3	-0,7	0,1
210	2,2	1,2	0,5	1,3
410	2,0	2,2	1,6	1,9
510	1,9	1,6	-0,1	1,1



$U = 1,2 + L/700 \mu\text{m}$, onde: L = posição em " mm ".




4.2.8. Erro de Apalamento (P) - unidade : μm



Erro de Apalamento (μm)	3,2
-----------------------------------------	-----

V. Observações Gerais :

ANEXO 2. CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMO HIGRÔMETRO DIGITAL

	Laboratório de TEMPERATURA E UMIDADE REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO	
<h1>Certificado de Calibração</h1>		CAL 0320
Data da Calibração: 25/04/07	n. 1582/07	
Data da Emissão: 26/04/07		
Página: 1 de 3		
1. CONTRATANTE:	FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS Av. L3 Norte - Campus da UNB, - Brasília - DF	
2. SOLICITANTE:	O mesmo	
3. TERMOHIGRÔMETRO DIGITAL CALIBRADO [SMC]:		
Fabricante:	Tfa	Faixa de Medição: -10 a 60°C / 10 a 99 %ur
n. Série (fabricante):	Não consta	Faixa de Medição Calibrada: 18 a 22°C / 35 a 65 %ur
n. Identif. (solicitante):	06	Incremento Digital: 0,1°C / 1 %ur
Tipo/Modelo	Não Consta	
<hr/>		
4. PADRÃO UTILIZADO (SMP):	5. PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO	
4.1 TERM. DIGITAL COM SENSOR TERMORRESISTIVO	Temperatura: PC-265, revisão 008 ; PC-266, revisão 008	
n. Registro (CERTI): 002352	O SMC foi montado junto ao termômetro padrão (SMP), em um meio termicamente controlado. Após o sistema atingir a temperatura desejada aguardou-se 10 minutos para garantir a estabilidade térmica do mesmo e iniciou-se a calibração. Foram realizados 10 ciclos de medição, com intervalos de 1 minuto entre as leituras.	
Incerteza: 0,06 °C		
Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 2230/06, de 26/05/06, válido até 05/07.		
4.2 HIGRÔMETRO DE PONTO DE ORVALHO	Umidade: PC-265, revisão 008	
n. Registro (CERTI): 000975	Utilizou-se para gerar as condições ambientais uma câmara climática, sendo os sensores do SMP montados junto ao SMC dentro da mesma. Após a montagem atingir a estabilidade, aguardou-se 10 minutos para garantir a estabilidade da mesma e iniciou-se a calibração. Foram realizados, pelo menos, 10 ciclos de medição, com intervalos de 1 minuto entre as leituras.	
Incerteza: 0,2 °C		
Rastreabilidade: Certificado de Calibração INMETRO DIMCI 0888/2006, de 23/05/06, válido até 05/09.		
		
<small>Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.</small>		
Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI		
Comunidade Universidade Federal do	Seter C	Tel.: +48 3239 2121 Fundação CERTI



Laboratório de
TEMPERATURA E UMIDADE
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Certificado de Calibração

Data da Calibração: 25/04/07

n. 1582/07

Data da Emissão: 26/04/07

Página: 2 de 3

6. OBSERVAÇÕES:

6.1 A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (v_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e v_{eff} são apresentados na tabela de resultados.

6.2 Condições ambientais durante a calibração: Temperatura Ambiente: [23 +/- 5] °C; Umidade Relativa do Ar: [60 +/- 20] %ur; Pressão Atmosférica: [1020 +/- 20] mbar.

6.3 Correção = $-\{Média das Indicações no SMC - Média das Indicações no SMP\}$.

6.4 Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990 - ITS 90.

6.5 A calibração é válida somente para os pontos calibrados, sendo estes selecionados em comum acordo com o cliente.

6.6 Os resultados apresentados no item 7 deste certificado são válidos exclusivamente para a temperatura de referência informada.

7. RESULTADOS

7.1 Escala de Temperatura

TABELA DE RESULTADOS

Média das Indic. no SMP [°C]	Média das Indic. no SMC [°C]	Correção [°C]	Incerteza U [°C]	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade v_{eff}	Meio Termostático
18,0	17,8	0,2	0,6	2,00	Infinito	Ar com circ.
20,1	19,9	0,2	0,6	2,00	Infinito	Ar com circ.
22,0	21,8	0,2	0,6	2,00	Infinito	Ar com circ.

Observação: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação do SMC.



Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.



Laboratório de
TEMPERATURA E UMIDADE
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Certificado de Calibração

Data da Calibração: 25/04/07

n. 1582/07

Data da Emissão: 26/04/07

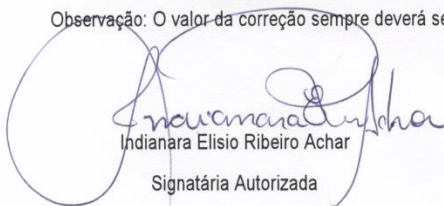
Página: 3 de 3

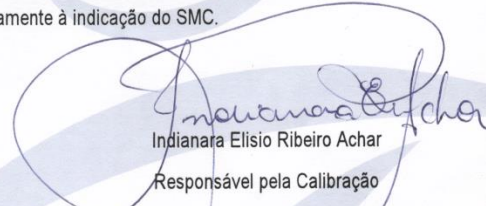
7.2 Escala de Umidade

TABELA DE RESULTADOS

Temperatura de Referência SMP [°C]	Média das Indic. no SMP [%ur]	Média das Indic. no SMC [%ur]	Correção [%ur]	Incerteza U [%ur]	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade V_{eff}
25	35,3	38,0	-2,7	4,5	2,00	Infinito
25	49,8	56,1	-6,3	4,7	2,00	Infinito
25	65,5	63,0	2,5	4,9	2,00	Infinito

Observação: O valor da correção sempre deverá ser somado algebricamente à indicação do SMC.


Indianara Elísio Ribeiro Achar
Signatária Autorizada


Indianara Elísio Ribeiro Achar
Responsável pela Calibração

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgpre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgpre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

ANEXO 3. CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DO TERMÔMETRO DE LÍQUIDO EM VIDRO



Laboratório de
TEMPERATURA E UMIDADE
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Certificado de Calibração

Data da Calibração: 26/04/07

Data da Emissão: 26/04/07

n. 1580/07

Página: 1 de 2

1. CONTRATANTE: FUNDAÇÃO DE EMPREENDIMENTOS CIENTÍFICOS E TECNOLÓGICOS
Av. L3 Norte - Campus da UNB, - Brasília - DF

2. SOLICITANTE: O mesmo

3. TERMÔMETRO DE LÍQUIDO EM VIDRO CALIBRADO (SMC):

n. Série (fabricante): 1804

n. Identif. (solicitante): 02

Faixa de Indicação: [15,2 a 26,4]°C

Faixa de Calibração: [18 a 22]°C

Valor de Uma Divisão [de Escala]: 0,2°C

Resolução Adotada: 0,1°C

Fabricante: Não Consta

Tipo de Imersão: Total

Tipo de Escala: Interna

Líquido Termométrico: Mercúrio

4. PADRÃO UTILIZADO (SMP):

4.1 TERM. DIGITAL COM SENSOR TERMORRESISTIVO

n. Registro (CERTI): 002352

Incerteza: [0,06]°C

Rastreabilidade: Certificado de Calibração CERTI 2230/06, de 26/05/06, válido até 05/07.

5. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO

PC-268, revisão 008

O termômetro a calibrar (SMC) foi montado junto ao termômetro padrão (SMP), em um meio termicamente controlado. Após o sistema atingir a temperatura desejada foram aguardados 10 minutos para garantir a estabilidade térmica do sistema e então iniciada a calibração. Foram realizados, pelo menos, 6 ciclos de medição com intervalos de 1 minuto entre cada ciclo.

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.

Fundação Centros de Referência em Tecnologias Inovadoras - CERTI

Comunidade Universitária Federal de

Sator C

Tel.: +48 3239 2121

Fundação CERTI



Laboratório de
TEMPERATURA E UMIDADE
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO



Certificado de Calibração

Data da Calibração: 26/04/07

n. 1580/07

Data da Emissão: 26/04/07

Página: 2 de 2

6. OBSERVAÇÕES:

6.1 A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão de medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com graus de liberdade efetivos (V_{eff}) corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza de medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02 (1999). Os valores de k e V_{eff} são apresentados na tabela de resultados.

6.2 Condições ambientais durante a calibração: Temperatura Ambiente: [23 +/- 5] °C ; Umidade Relativa do Ar: [60 +/- 20] %ur

6.3 Correção = [Média das Indicações no SMP - Média das Indicações no SMC]. O valor da correção deverá sempre ser somado algebricamente à indicação do SMC.

6.4 Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990 - ITS 90.

7. RESULTADOS

TABELA DE RESULTADOS					
Média das Indic. no SMP [°C]	Média das Indic. no SMC [°C]	Correção [°C]	Incerteza U [°C]	Fator de Abrangência k	Graus de Liberdade V_{eff}
18,0	16,2	1,8	0,1	2,00	Infinito
20,0	18,2	1,8	0,1	2,00	Infinito
22,0	20,4	1,6	0,1	2,00	Infinito

Indianara Elisio Ribeiro Achar
Signatária Autorizada

Indianara Elisio Ribeiro Achar
Responsável pela Calibração

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela Cgcre/Inmetro, que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo da ILAC - International Laboratory Accreditation Cooperation, e do Acordo Bilateral de Reconhecimento Mútuo com a EA - European Cooperation for Accreditation. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração, nas condições específicas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. Esta calibração não isenta o instrumento do controle metrológico estabelecido na regulamentação metrológica. A CERTI autoriza a reprodução deste certificado, desde que qualquer cópia sempre apresente seu conteúdo integral. O ajuste de instrumentos, quando realizado, não faz parte do escopo de acreditação do laboratório.