



**APLICAÇÃO DA FUSÃO DE DADOS NA MEDIÇÃO DE  
SUPERFÍCIES REGULARES E FORMA LIVRE**

**MIGUEL EDUARDO ORDOÑEZ MOSQUERA**

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

**FACULDADE DE TECNOLOGIA  
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**Faculdade de Tecnologia**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**APLICAÇÃO DA FUSÃO DE DADOS NA MEDIÇÃO DE  
SUPERFÍCIES REGULARES E FORMA LIVRE**

**MIGUEL EDUARDO ORDOÑEZ MOSQUERA**

**ORIENTADOR: Prof. Dr. ANTONIO PIRATELLI- FILHO**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM SISTEMAS  
MECATRÔNICOS**

**Publicação: ENM.DM-50A/12**

**Brasília-DF, 17 de Outubro de 2012**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**Faculdade de Tecnologia**

**Departamento de Engenharia Mecânica**

**APLICAÇÃO DA FUSÃO DE DADOS NA MEDIÇÃO DE  
SUPERFÍCIES REGULARES E FORMA LIVRE**

**MIGUEL EDUARDO ORDOÑEZ MOSQUERA**

*Dissertação de Mestrado submetida ao Departamento de Engenharia  
Mecânica da faculdade de Tecnologia da Universidade de Brasília  
como parte dos requisitos necessários para a obtenção  
do grau de Mestre em Sistemas Mecatrônicos*

**Banca Examinadora**

**Prof. Dr. ANTONIO PIRATELLI- FILHO,** \_\_\_\_\_

ENM/FT/UnB

Orientador

**Prof. Dr. CARLOS H. LLANOS QUINTERO,** \_\_\_\_\_

ENM/FT/UnB

Examinador interno

**Profa. Dra. ROSENDA VALDÉS ARENCIBIA,** \_\_\_\_\_

FEMEC/UFU

Examinador externo

**Brasília- DF, 17 de Outubro de 2012**

## FICHA CATALOGRÁFICA

ORDOÑEZ M., Miguel Eduardo.

Aplicação da fusão de dados na medição de superfícies regulares e forma livre. [Distrito Federal] 2012.

xvii, 111p. 210 x 297 mm (ENM/FT/UnB, Mestre, Sistemas Mecatrônicos, 2012).

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

Departamento de Engenharia Mecânica.

1. CAD

3. NURBS

I. ENM/FT/UnB

2. FUSÃO

4. INCERTEZA

II. Título (série)

## REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ORDOÑEZ M., Miguel Eduardo. (2012). Aplicação da fusão de dados na medição de superfícies regulares e forma livre. Dissertação de Mestrado em Sistemas Mecatrônicos, Publicação ENM.DM-50A/12, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 111p.

## CESSÃO DE DIREITOS

**AUTOR:** Miguel Eduardo Ordoñez Mosquera.

**TÍTULO:** Aplicação da fusão de dados na medição de superfícies regulares e forma livre.

**GRAU:** Mestre

**ANO:** 2012.

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.

---

Miguel Eduardo Ordoñez Mosquera

*“Graças vou dou, Senhor, por ser a fonte de que dimana todo o bem que me sucede. Os que esperam no Senhor renovam suas forças, sobem com asas de águias, correm e não se cansam, caminham e não se fatigam.”... Isaías 40:31*

Miguel Eduardo Ordoñez Mosquera

## **Agradecimentos**

*- Gostaria inicialmente de agradecer a Deus, pela vida, pela oportunidade desse estudo, pelas amizades formadas durante esses anos e pelo amor que constantemente tenho recebido de todos que me rodeiam.*

*- Aos meus pais Jaiver Adolfo e Melba Alina pela educação, amor, e cuidados dispensados em todos os momentos de minha vida;*

*-Aos meus irmãos Jaiver Hernan e Juliana Maria pelo amor e fortaleza e conselhos dados na minha vida*

*- À minha enamorada Beatriz Alejandra, pela paciência, fortaleza e esperar todo esse tempo para a realização do Mestrado;*

*- Ao Prof. Dr. Antonio Piratelli filho, pela orientação e apoio dados em diversos momentos da minha formação como mestre e, principalmente, como profissional.*

*- A todas as pessoas do LABORATÓRIO DE METROLOGIA da Universidade de Brasília, pela amizade e companheirismo.*

*- À Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia, ao professores do Programa de Pós-Graduação em Sistemas Mecatrônicos;*

*- À CAPES, pelo apoio financeiro durante meu curso de mestrado;*

Miguel Eduardo Ordoñez Mosquera

## **RESUMO**

### **APLICAÇÃO DA FUSÃO DE DADOS NA MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIES REGULARES E FORMA LIVRE.**

**Autor:** *Miguel Eduardo Ordoñez Mosquera.*

**Orientador:** *Prof. Dr. Antonio Piratelli- Filho, EME/FT/UnB*

**Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos**

**Brasília, 17 de Outubro de 2012.**

A reconstrução tridimensional é uma tarefa que envolve diferentes etapas como definição da estratégia de medição, aquisição de dados, registro, implementação, modelagem *Computer-Aided Design* (CAD) e ajuste e determinação da incerteza de medição. Nesta tarefa, as relações de conexão entre os pontos (coordenadas  $x$ ,  $y$  e  $z$ ) que compõem a amostra não são conhecidas, principalmente quando a nuvem de pontos está contaminada com interferências desconhecidas, inerentes ao processo de medição. Um aspecto que influencia a qualidade dos dados é a calibração do instrumento de medição, sendo que a determinação da incerteza permite estabelecer a qualidade do modelo representativo do objeto. O emprego de mais de um instrumento para a coleta dos dados de coordenadas permite obter uma precisão maior do modelo através de medições localizadas com instrumento de maior resolução e menor incerteza. Porém, isto exige uma atenção especial ao procedimento de fusão dos dados, antes do ajuste do modelo CAD. Esta dissertação aborda a técnica para modelar superfícies de objetos tridimensionais e executar o procedimento de fusão dos dados obtidos com dois diferentes instrumentos de medição. A avaliação do modelo foi feita através da determinação da incerteza de medição, associada às diferentes fontes de erros neste processo.

## **ABSTRACT**

### **APPLICATION OF DATA FUSION IN MEASUREMENT OF REGULAR SURFACES AND FREEFORM**

**Author:** *Miguel Eduardo Ordoñez Mosquera.*

**Supervisor:** *Prof. Dr. Antonio Piratelli-Filho, EME/FT/UnB*

**Programa de Pós-graduação em Sistemas Mecatrônicos**

**Brasília, 17 October of 2012**

Three-dimensional reconstruction is a task that involves different steps as the definition of measurement strategy, data acquisition, registration, implementation, modeling *Computer-Aided Design* (CAD), adjustment and determination of measurement uncertainty. In this task, the relations among data points (coordinates  $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) in the sample are not known, especially when the point cloud is contaminated with noise, inherent to the measurement process. One aspect that influences the quality of data is the calibration of the measuring instrument and the determination of the uncertainty allows the establishment of the quality of the model representing the object. The use of more than one instrument to coordinate data capture allows the increase of the model precision, as in the case of localized measurements with a higher resolution and reduced uncertainty instrument. However, this requires special attention to the data fusion procedure, before the adjustment of the CAD model. This work discusses the technique for three-dimensional modeling of object surfaces and the procedure for merging the data obtained with two different measuring instruments. The evaluation of the model was made by determining the uncertainty of the measurement, associated to the various sources of error in this process.



# SUMARIO

Lista de Figuras	xii
Lista de Tabelas	xv
1. Introdução	1
1.1 Contextualização	1
1.2 Objetivos do trabalho	3
1.3 Justificativas do trabalho	3
1.4 Apresentação do trabalho	4
2. Revisão Bibliográfica	5
2.1 Medição por coordenadas na indústria	5
2.2 Métodos de medição por coordenadas	5
2.2.1 Medição por contato	6
2.2.1.1 MMC – Máquinas de Medir por Coordenadas Cantilever	6
2.2.1.2 Braço Articulado	7
2.2.2 Medição óptica	7
2.3 Fontes de erro em medição por coordenadas	8
2.3.1 Influências da MMC e do apalpador	9
2.3.2 Influências do Ambiente	11
2.3.3 Influências da peça	13
2.3.4 Influência do operador	13
2.4 Modelos CAD	14
2.4.1 Curvas e superfícies paramétricas	15
2.4.2 B-Spline	16
2.4.2.1 Curvas B-Splines	16

2.4.2.2 Superfícies B-Splines	16
2.4.3 Non-Uniform Rational B-Splines NURBS	17
2.4.3.1 Curvas NURBS	18
2.4.3.2 Superfícies NURBS	18
2.5 Fusão de dados	18
2.6 Incertezas em medições por coordenadas	21
2.6.1 Incerteza	21
3. Procedimento Experimental	27
3.1 Descrição das peças utilizadas.	27
3.1.1 Esquadro de Granito	27
3.1.2 Pá da Hélice	29
3.2. Equipamentos de medição utilizados.	29
3.2.1 Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC)– Cantilever.	29
3.2.2 Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) – Braço Articulado	31
3.3. Preparação das Peças e Estratégia de Medição.	33
3.3.1. Limpeza de Peças.	33
3.3.2. Controle de Temperatura.	33
3.3.3. Estratégia de Medição.	34
3.3.3.1 Esquadro de Granito.	34
3.3.3.2 Pá da Hélice.	35
3.4 Medição	36
3.4.1 Medição do Plano do Esquadro com a MMC Cantilever.	36
3.4.2 Medição da Pá da Hélice com a MMC Cantilever.	36
3.4.3 Medição do Plano do Esquadro com MMC Braço Articulado.	37

3.4.4	Medição de Pá da Hélice com MMC Braço Articulado.	37
3.5	Construção dos Modelos CAD	38
3.5.1	Modelo CAD para o Plano do Esquadro.	38
3.5.2	Modelo CAD para a Pá da Hélice.	40
3.6	Determinação da Incerteza de Medição.	45
3.6.1	Cálculo da Incerteza para as curvas determinadas.	45
3.6.2	Cálculo da Incerteza na Fusão de Dados.	48
4.	Resultados Experimentais	49
4.1	Modelos CAD e Análise da Incerteza para Plano do Esquadro de Granito.	49
4.1.1.	Modelos CAD- Plano do Esquadro com apalpador de 3 mm e 6 mm.	49
4.1.2.	Análise da Incerteza padrão Combinada e Expandida para plano do Esquadro de Granito com apalpador de 3 mm e 6 mm.	53
4.1.3.	Modelos CADs do plano do Esquadro de Granito com sonda rígida apalpador Ponta seca.	58
4.1.4.	Análise da Incerteza padrão combinada e Expandida para o plano do Esquadro de Granito com apalpador rígido Ponta seca.	61
4.2	Modelos CADs e Análise da Incerteza para Pá da Hélice.	65
4.2.1.	Modelos CADs para Pá da Hélice com apalpador de sonda rígida Ponta seca.	65
4.2.2	Análise da Incerteza padrão combinada e Expandida para Pá da Hélice com apalpador de sonda rígida Ponta seca.	69
4.2.3.	Modelos CADs da Pá da Hélice com apalpador 3 mm e 6 mm.	73
4.2.4	Análise da Incerteza padrão Combinada e Expandida para Pá da Hélice com apalpador 3 mm e 6 mm.	76

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.	79
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.	81
APÊNDICE	84
A. BASE CIRCULAR	85
ANEXO 1 Certificado de calibração Máquina de Medir por Coordenada Cantilever.	94
ANEXO 2 Certificado de calibração Máquina de Medir por Coordenada braço articulado.	100
ANEXO 3 Certificado de calibração Esquadro de granito Mitutoyo.	105
ANEXO 4 Certificado de calibração Termómetro Digital.	108

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1	Máquina de Medir Coordenadas.	6
FIGURA 2.2	Braço articulado Romer multi-gage.	7
FIGURA 2.3	Exemplo de sonda ótica montada em uma MMC.	8
FIGURA 2.4	Diagrama principais fontes de erro.	9
FIGURA 2.5	Erros paramétricos do carro de MMC.	10
FIGURA 2.6	Erros de perpendicularidade da MMC.	10
FIGURA 2.7	Fontes de erros no ambiente de trabalho da MMC.	12
FIGURA 2.8	Distribuição Normal de Probabilidade.	24
FIGURA 2.9	Distribuição Retangular de Probabilidade.	25
FIGURA 2.10	Distribuição Triangular de Probabilidade.	25
FIGURA 3.1	Peças de estudo: (a) Esquadro de granito, (b) Pá da Hélice.	27
FIGURA 3.2	Esquadro de Granito MITUTOYO (a) Esquadro granito, (b) Forma de utilização.	28
FIGURA 3.3	Peça com forma livre	29
FIGURA 3.4	MMC Cantilever modelo QM-353 fabricante MITUTOYO	30
FIGURA 3.5	Apalpador comutado ou de gatilhamento - MMC Cantilever.	30
FIGURA 3.6	Calibração do Apalpador, (a) Esfera Padrão (b) Método de Calibração.	31
FIGURA 3.7	MMC Braço Articulado	32
FIGURA 3.8	Tipos de Apalpador na MMC Braço Articulado, (a) Sonda de medição, (b) apalpador Ponta seca, (c) Apalpador esférico com 6 mm de diâmetro.	32
FIGURA 3.9	Limpeza das peças: (a) Esquadro de Granito, (b) Pá Hélice	33
FIGURA 3.10	Instrumentos para monitoramento da Temperatura: (a)Termômetro Digital, (b) Termômetro de bulbo de mercúrio.	34
FIGURA 3.11	Estratégia de medição no Esquadro Mitutoyo	35
FIGURA 3.12	Estratégia de medição na hélice	35
FIGURA 3.13	Medição do plano do Esquadro com a MMC Cantilever.	36

FIGURA 3.14	Medição da Pá da Hélice com a MMC Cantilever.	36
FIGURA 3.15	Medição do Plano do Esquadro com MMC Braço Articulado (a) apalpador 6 mm, (b) apalpador Ponta seca.	37
FIGURA 3.16	Medição da Pá da Hélice com MMC Braço Articulado.	38
FIGURA 3.18	Janela para criar Plano com o programa Rhinoceros.	39
FIGURA 3.19	Janela para gerar Desvio de grupos de Pontos com a Superfície programa Rhinoceros.	39
FIGURA 3.20	Código para gerar Desvio Padrão e modelo CAD com programa Matlab.	40
FIGURA 3.21	Janela para gerar curva NURBS com o programa Rhinoceros.	41
FIGURA 3.22	Janela para gerar superfície NURBS com o programa Rhinoceros.	41
FIGURA 3.23	Fusão de dados através de planos guiados; Superfície vermelha: MMC Cantilever; Superfície Verde: MMC Braço Articulado.	42
FIGURA 3.24	Janela para alinhar dois planos para fazer fusão de pontos superfície.	42
FIGURA 3.25	Alinhamento das superfície mediante planos para fusão de dados, (a) superfície MMC Braço Articulado, (b) MMC Cantilever.	43
FIGURA 3.26	Planos fusionados, superfície sobre postas.	43
FIGURA 3.27	(a) Modelo para encontrar a curva média, (b) linha preta - curva média.	44
FIGURA 3.28	Janela para criar curva media NURBS.	45
FIGURA 4.1	(a) Plano Esquadro de Granito - MMC Cantilever, (b) Plano Esquadro de Granito - MMC Braço Articulado, (c) Plano de Fusão.	49
FIGURA 4.2	Análise dos desvios dos pontos em relação ao Plano Esquadro de Granito, (a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado.	50
FIGURA 4.3	Análise dos desvios dos pontos em relação com o Plano Esquadro de Granito para a Fusão de Dados	51
FIGURA 4.4	Gráfico dos pontos do Esquadro de Granito em Matlab (a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado.	52

FIGURA 4.5	Plano Esquadro de Granito com apalpador rígido Ponta seca (a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado, (c) Plano de Fusão.	58
FIGURA 4.6	Análise dos desvios dos pontos em relação ao Plano Esquadro de Granito com apalpador rígido Ponta seca, (a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado.	59
FIGURA 4.7	Análise dos desvios dos pontos em relação com o Plano Esquadro de Granito para a Fusão de Dados com apalpador rígido Ponta seca.	60
FIGURA 4.8	Modelo CAD Pá da Hélice com apalpador sonda rígida Ponta seca(a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado.	65
FIGURA 4.8c	Modelo CAD Pá da Hélice da fusão de dados com apalpador sonda rígida Ponta seca.	66
FIGURA 4.9a	Análise dos desvios do Modelo CAD da Pá da Hélice medido com apalpador rígido Ponta seca para a MMC Cantilever.	66
FIGURA 4.9b	Análise os desvios do Modelo CAD da Pá Hélice apalpador rígido Ponta seca medido com MMC Braço Articulado.	67
FIGURA 4.10	Análise dos desvios para o Modelo CAD da Pá da Hélice com apalpador sonda rígida Ponta seca na Fusão de Dados.	68
FIGURA 4.11	Modelo CAD da Pá da Hélice: (a) MMC Cantilever apalpador de gatilhamento 3 mm, (b) MMC Braço Articulado apalpador de sonda rígida de 6 mm, (c) Fusão de dados.	73
FIGURA 4.12	Análise de desvios do Modelo CAD da Pá da Hélice. (a) MMC Cantilever com apalpador de gatilhamento de 3 mm, (b) Braço Articulado com apalpador de sonda rígida de 6 mm.	74
FIGURA 4.13	Análise de desvios do Modelo CAD da Pá da Hélice apalpador 3 mm e 6 mm de Fusão de Dados.	75

## LISTA DE TABELAS

TABELA 3.1	Fontes de incerteza padrão envolvidas na medição MMC- Cantilever.	47
TABELA 3.2	Fontes de incerteza padrão envolvidas na medição MMC Braço Articulado.	47
TABELA 4.1	Resumo de Análise dos desvios para modelo CAD do plano do Esquadro de Granito.	52
TABELA 4.2	Análise dos desvios dos pontos em relação com o plano em Matlab.	53
TABELA 4.3	Valor de cada parâmetro e cálculo da incerteza de temperatura para o plano do Esquadro de Granito.	54
TABELA 4.4	Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição, para plano do esquadro de granito medido na MMC-Cantilever com apalpador de 3 mm.	55
TABELA 4.5	Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição, para plano do Esquadro de Granito medido com MMC Braço Articulado com apalpador de 6 mm.	56
TABELA 4.6	Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição, da fusão de dados do plano do Esquadro de Granito medidos com as MMCs Cantilever apalpador de 3 mm e Braço Articulado com apalpador de 6 mm.	57
TABELA 4.7	Resumo de Análise dos desvios para modelo CAD do plano do Esquadro de Granito apalpador rígido Ponta seca	61
TABELA 4.8	Dados (mm) de calibração de apalpador rígido Ponta seca para o plano do Esquadro de Granito medido com a MMC Cantilever.	62
TABELA 4.9	Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição para o plano do Esquadro de Granito medido com a MMC-Cantilever com apalpador rígido Ponta seca.	62
TABELA 4.10	Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição para o plano do Esquadro de Granito medido com a MMC Braço Articulado com apalpador rígido Ponta seca.	63



TABELA 4.11	Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição da fusão de dados para o plano do Esquadro de Granito medido com as MMCs Cantilever e Braço Articulado com apalpador rígido Ponta seca.	64
TABELA 4.12	Resumo de Análise de desvios para modelo CAD Pá da Hélice com apalpador de sonda rígida Ponta seca.	68
TABELA 4.13	Valor de cada parâmetro para o cálculo da incerteza padrão da temperatura para a Pá da Hélice com apalpador sonda rígida Ponta seca.	69
TABELA 4.14	Dados (mm) de calibração de apalpador de sonda rígida Ponta seca para a MMC Cantilever.	70
TABELA 4.15	Incerteza padrão combinada e incerteza expandida para Pá da Hélice medido com a MMC Cantilever com apalpador sonda rígida Ponta seca.	71
TABELA 4.16	Incerteza padrão combinada e incerteza expandida para Pá da Hélice medido com a MMC Braço Articulado com apalpador sonda rígida Ponta seca.	71
TABELA 4.17	Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição da fusão de dados da Pá da Hélice medidos com as MMCs Cantilever e Braço Articulado com apalpador de sonda rígida Ponta seca.	72
TABELA 4.18	Resumo de Análise de desvios para modelo CAD Pá da Hélice com apalpador 3 mm e 6 mm.	76
TABELA 4.19	Incerteza padrão Combinada e incerteza Expandida para Pá da Hélice medido com a MMC Cantilever com apalpador de gatilhamento de 3mm.	76
TABELA 4.20	Incerteza padrão Combinada e incerteza Expandida para Pá da Hélice medido com a MMC Braço Articulado com apalpador de sonda rígida de 6 mm.	77
TABELA 4.21	Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição de dados da fusão da Pá da Hélice medido com a MMCs Cantilever e Braço Articulado com apalpador de 3mm e 6 mm respectivamente.	78

## LISTA DE ABREVIACÕES E SIMBOLOS

CAD	<i>Computer Aided Design- projeto assistido por computador</i>
CAM	<i>Computer Aided Manufacture - fabricação assistida por computador</i>
NURBS	<i>Non-Uniform Rational B-spline</i>
MMC	<i>Máquinas de Medir por Coordenadas</i>
CAA	<i>Computer Aided Accuracy</i>
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
IGES	<i>Initial Graphics Exchange Specification</i>
AI	<i>Inteligência Artificial</i>
MMCS	<i>Máquinas de Medição de Coordenadas Multisensores</i>
CNC	<i>Controle Numérico Computadorizado</i>
$k$	<i>Fator de abrangência</i>
U	<i>Incerteza Expandida</i>
$\nu_{eff}$	<i>Graus de liberdade efetivo</i>
$u_c$	<i>Incerteza combinada</i>

# 1. INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

A mecatrônica é um novo conceito que enfatiza a necessidade de integração e de uma intensiva interação entre diferentes ramos da engenharia. É uma tendência relevante no projeto e tem uma influência no processo de desenvolvimento do produto. Ela envolve a implementação das últimas técnicas de engenharia, como a mecânica de precisão, a teoria de controle, a ciência da computação e a eletrônica, para o processo de projeto, com o fim de criar produtos mais funcionais e adaptáveis (Arbeláez e Mendoza, 2007).

Atualmente, para ter um bom projeto, deve-se incluir a eletrônica e o controle por computador, enquanto são definidas as funções e as propriedades básicas do produto. Os componentes mecânicos são projetados de forma isolada a partir do controlador eletrônico, e assim, a eletrônica e a parte elétrica devem ser projetadas e ajustadas para coincidir com a parte mecânica. Para esta atividade pessoas com habilidades de engenharia nestas duas áreas são requeridas para a integração das equipes, cujos membros trazem uma visão da amplitude do campo tecnológico, bem como o seu próprio campo de especialização.

O objetivo do projeto de sistemas mecatrônicos é a melhoria, a simplificação e a inovação de produtos. Nas duas primeiras categorias acima, melhoria e simplificação, o engenheiro procura resolver os problemas da indústria de uma forma simples, integrando as engenharias, desenvolvendo máquinas para melhorar os processos e obter produção flexível e confiável.

Uma das características mais importantes relacionada aos sistemas mecatrônicos é a necessidade de precisão, o que exige a sua avaliação técnicas de metrologia. A metrologia é definida como "a ciência da medição, abrangendo tanto as determinações experimentais e teóricas em qualquer nível de incerteza, em qualquer campo da ciência e da tecnologia " [International Bureau of Weights and Measures (BIPM)]. A garantia da qualidade de produtos e serviços é feita através da calibração de instrumentos de medição, e da realização de ensaios, sendo a base fundamental para a competitividade das empresas.

Os conceitos de metrologia podem ser aplicados à área de projetos auxiliados por computador (CAD) para avaliar a exatidão e a repetitividade dos modelos gerados a partir dos dados das medições. *Computer-Aided Design* (CAD) ou desenho assistido por computador é o nome genérico de sistemas computacionais utilizados pela engenharia, arquitetura, e outras áreas, para facilitar o projeto e desenho técnicos. Envolve todo o espectro de desenho com a ajuda de FIGURAs geométricas em computador e animação personalizada, com a facilidade de fazer modelagem em duas ou três dimensões. Existem basicamente dois tipos de modelagem 3D: por polígonos e por *non-uniform rational B-spline* NURBS.

Os sistemas CAD são uma parte importante no ciclo de vida do produto típico. Que consiste em uma fase de concepção e uma fase de execução. A fase de concepção inclui a identificação das necessidades ou requisitos e especificações de projeto, documentação, avaliação, análise e otimização da realização de um estudo de viabilidade. A fase de execução inclui o planejamento de processos, planejamento de produção, controle de qualidade, embalagem, comercialização e transporte. Os erros e a incerteza do modelo gerado são parte do projeto de fabricação de peças, mais quando se trabalha técnicas de fabricação auxiliada por computador (CAM) os erros podem ser maiores.

Para melhorar os erros e as incertezas se pretende trabalhar com a fusão de dados multi-sensor em metrologia dimensional onde permite obter informação, holística mais precisa e confiável sobre uma peça de trabalho com base em valores de medição a partir de um ou mais sensores. As características de vários sensores influenciam no processo de fusão de dados e determinam o ganho de informação em comparação com a aplicação de um único sensor.

A Fusão de dados multi-sensor em metrologia dimensional pode ser definida como o processo de combinação de dados de várias fontes de informação (sensores) para um formato comum de representação, a fim de que a avaliação metrológica possa beneficiar toda a informação do sensor e dados disponíveis. Isto significa que os resultados das medições podem favorecer mais o modelo CAD quando se trabalha com dois sensores que com um só sensor. A motivação básica para a fusão sensorial de dados é a melhoria da qualidade e usabilidade da medição resultado para o modelo CAD.

## **1.2 Objetivos do trabalho**

O objetivo deste trabalho é estudar e analisar a técnica de fusão de dados, utilizando Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) para aquisição dos pontos de peças com superfícies regulares e de forma livre. Para isto, devem ser feitas medições de peças com duas Máquinas de Medir por Coordenadas. Em seguida, deve ser feita a análise dos erros e da incerteza das medições efetuadas utilizando um *software* CAD. Finalmente, deve ser feita a fusão dos dados obtidos e a análise da incerteza de medição.

## **1.3 Justificativa do trabalho**

A Precisão dimensional de peças fabricadas hoje em dia, é de extrema importância em muitas aplicações, incluindo a construção naval, indústria automotiva e aeroespacial. O projeto de uma peça nova é muitas vezes realizado com técnicas de engenharia reversa, feitas a partir da medição de um protótipo, do projeto assistido por computador (CAD) e da fabricação de moldes ou peças com auxiliado do computador (CAM). Existem alguns tipos de superfícies com formas livres que podem apresentar detalhes que exigem dois ou mais instrumentos de medição, como scanner a laser (medição sem contato) e máquinas de medição por coordenadas (MMC, sondas com ou sem contato). Os dados das medições com estes instrumentos, para a mesma peça, devem ser agrupados para a construção do modelo de CAD, representado a superfície completa com precisão melhorada em relação à medição com apenas um instrumento. A técnica de modelagem CAD mais utilizado aplica NURBS (*não-uniforme Rational B-Splines*) para representar as curvas e superfícies e os parâmetros como o número de pontos de controle e grau da curva afetam a exatidão e a repetitividade da superfície modelada.

O estudo das fontes de erros e da incerteza das curvas e superfícies obtidas neste processo de fusão de dados requer um estudo mais apropriado, conhecendo a fontes que mais contribuem para a precisão.

#### **1.4 Apresentação do trabalho**

Com o propósito de conhecer e entender o problema e assim alcançar os objetivos propostos nesta pesquisa, o trabalho foi dividido nas seguintes partes: no capítulo 2 é apresentada uma revisão teórica dos temas centrais da pesquisa, relacionados com a medição, modelagem CAD, engenharia reversa, fontes de incerteza, e determinação da incerteza de medição. No capítulo 3, encontra-se a metodologia, para a coleta de dados com a Máquina de Medição por Coordenadas Cantilever e Braço Articulado. O capítulo 4 relata os resultados obtidos na pesquisa, tanto os resultados na área de modelamento CAD para cada MMC e fusão de dados com o programa Rhinoceros, como também o processo de cálculo de incerteza. As conclusões e as perspectivas para trabalhos futuros são apresentadas no capítulo 5.

## **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 Medição por coordenadas na indústria**

Engenharia reversa é um processo de duplicação de uma parte existente, de um subconjunto, ou de um produto, sem desenhos, documentação, ou um modelo de computador. O objetivo da engenharia reversa é construir um produto por meio da compilação de todos os dados técnicos e instruções de como o produto funciona. Cada componente de um produto se relaciona com os demais, sendo que ele deve ter um material com características específicas, possuindo propriedades mecânicas e físicas, e forma definida.

Este componente deve ser fabricado de forma a reduzir o custo, obedecendo às dimensões e tolerâncias de projeto, que são influenciados pelos requisitos funcionais de fabricação. A engenharia reversa é hoje amplamente utilizada em inúmeras aplicações, tais como na indústria aeroespacial, automobilística, entre outras.

Um processo de engenharia reversa começa com a medição da peça modelo. Os dados obtidos são usados para a reconstrução 3D num computador, dos chamados modelos CAD (*Computer Aided Design*). A seguir, a peça é fabricada usando técnicas de manufatura auxiliada por computador (CAM) e finalmente esta é medida na inspeção final. As medições são feitas em geral com Máquinas de Medir por Coordenadas.

### **2.2 Métodos de medição por coordenadas**

As Máquinas de Medir por Coordenadas, são um dos mais poderosos instrumentos metrológicos, amplamente usado para examinar a conformidade das peças produzidas. Seu emprego auxilia o desenho no projeto de produtos, para atender as necessidades dos clientes relacionadas à maior variedade e maior qualidade. Os métodos de medição e programas usados variam frequentemente de acordo com o tipo de peças e características funcionais (Chen et al.,2004).

## 2.2.1 Medição com contato.

### 2.2.1.1 MMC – Máquinas de Medir por Coordenadas Cantilever

Uma Máquina de Medir por Coordenada pode ser definida como uma máquina que utiliza três componentes que se movem ao longo de guias com caminhos ortogonais para medir uma peça e determinar as coordenadas X, Y e Z. Os pontos deste produto são obtidos com uma sonda de contato. As medições são representadas no sistema tridimensional.

Através de uma Máquina de Medir por Coordenadas (FIGURA 2.1) determinam-se, de forma universal, com um mínimo de dispositivos e instrumentos específicos, as coordenadas de certos pontos sobre as peças a controlar. Tais pontos convenientemente processados pelo computador associado resultam nos parâmetros geométricos da peça. O desenvolvimento das Máquinas de Medir por Coordenadas foi favorecido ainda pela evolução dos sistemas de medição de deslocamento eletrônicos, que permitem elevar a sua qualidade e viabilizaram a sua integração com sistemas automatizados de fabricação. As MMCs têm em comum com tais sistemas a característica de grande flexibilidade (Linares, 2003).

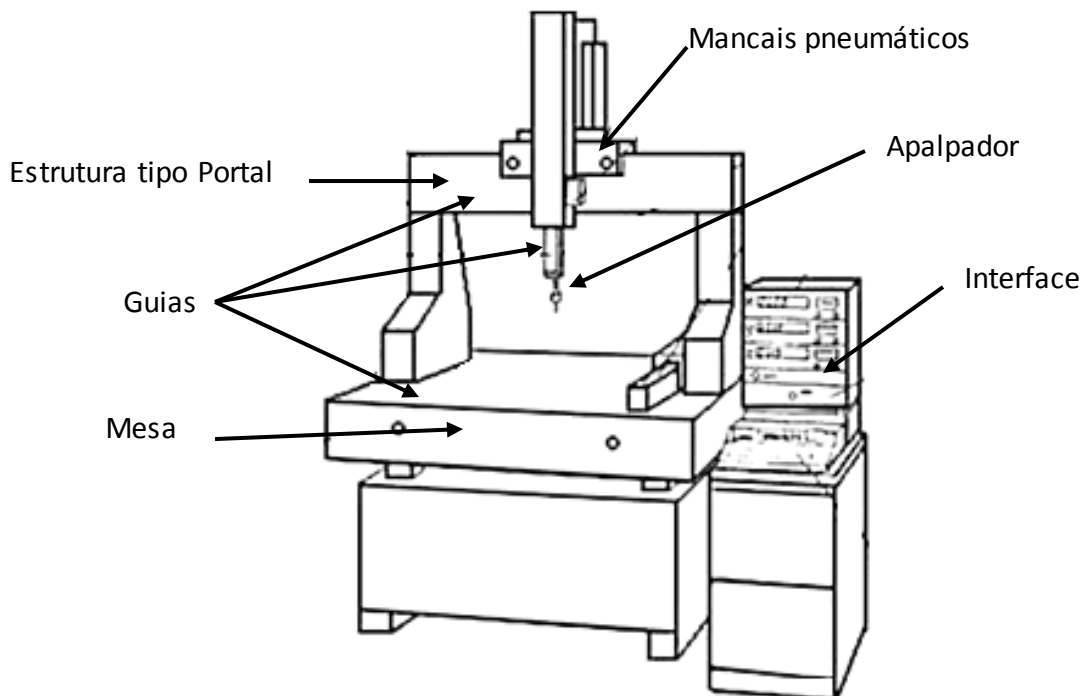


FIGURA 2.1. Máquina de Medir Coordenadas (Linares, 2003)



### 2.2.1.2. Braço Articulado

A MMC braço articulado fabricado pela Romer encontra suas origens no início dos anos 1970. As MMC modelo braço articulado usam uma série de articulações compondo 5, 6 ou 7 graus de liberdade e medidores angulares (*encoders*) para determinar a posição de um apalpador no espaço tridimensional. O posicionamento do apalpador na superfície da peça é feito manualmente e o volume de medição é esférico (Gonçalves, 2006). A FIGURA 2.2 apresenta um braço articulado marca Romer.



FIGURA 2.2 Braço articulado Romer multi-gage (Romer,2009).

### 2.2.2 Medição óptica

Os sistemas de medição sem contato têm como principal objetivo a aquisição de coordenadas de pontos localizados em superfícies onde a medição por contato não pode ser feita.

Uma vez que na indústria atual, muitas peças apresentam grande complexidade geométrica, frequentemente é impossível fazer medições com apalpadores com contato. Por este motivo os principais fabricantes de MMCs desenvolveram novos equipamentos e apalpadores para as máquinas de forma a substituir, em medições muito específicas, os habituais apalpadores com contato. Entre esses equipamentos destacam-se pela sua capacidade e versatilidade (Ferreira, 2007). A FIGURA 2.3 mostra um exemplo de sonda sem contato montada em uma MMC.

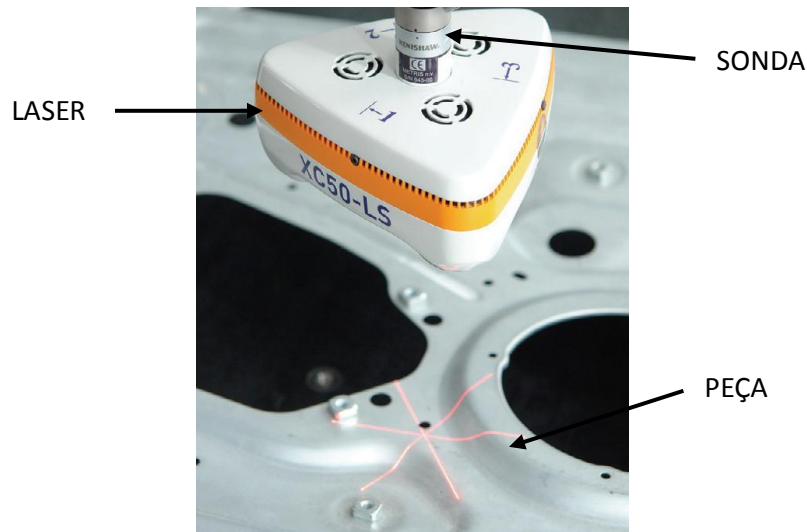


Figure 2.3 Exemplo de sonda ótica montada em uma MMC (Savio et al., 2007).

O método de medição sem contato, tem se mostrado como uma solução atrativa na medição de peças e apresenta como principais vantagens (Ferreira, 2007):

- Total ausência de contato com a superfície a medir;
- Não provoca deformação das peças ao medir;
- Boa riqueza de detalhes, o que permite efetuar medições de cotas com dimensões muito reduzidas onde o contato é muitas vezes impossível;
- Permite digitalização dos modelos;
- Permite efetuar a reconstrução de peças pela técnica de engenharia reversa.

### 2.3 Fontes de erro em medição por coordenadas

Uma MMC moderna se caracteriza por ser um sistema complexo, com vários subsistemas que interagem entre si, contribuindo para que a MMC desempenhe eficientemente sua função de medir geometrias diversas, mas também contribuindo à incerteza de medição (Pizzetti, 2007).

Há diversas abordagens para classificar as fontes de incerteza de medição em MMCs. A mais representativa delas, que divide as causas de incerteza segundo sua origem, pode ser encontrada na FIGURA 2.4. Esta classificação identifica quatro grandes grupos de fatores: máquina, ambiente, peça e operador (Pizzetti, 2007).



FIGURA 2.4 – Diagrama principais fontes de erro (Hamburg-Piekar, 2006).

### 2.3.1 Influências da MMC e do apalpador

Dentro da categoria dos erros da máquina, observam-se primeiro das imperfeições da geometria da máquina. Estes erros são basicamente de quatro fontes: processos de fabricação dos componentes da MMC, desgaste pelo tempo de uso, montagem do conjunto e do sistema de apalpação e peso dos componentes da MMC (Orrego et al., 2000).

Em MMCs que apresentam uma estrutura com os elementos moveis que compoem um sistema cartesiano de coordenadas, os erros paramétricos são provocados pelos desvios geométricos das guias, associados ao movimento das mesmas (posição, translação, e rotação) e pela orientação entre elas. A natureza da parcela sistemática aliada a tais erros pode ser compensada via *software*, dando origem ao conceito de CAA (*Computer Aided Accuracy*) (Pizzetti, 2007).

A FIGURA 2.5 apresenta os erros de uma guia que desloca na direção Y: um (01) erro associado ao posicionamento no eixo Y da MMC; dois (02) erros associados à retitude do deslocamento em Y da MMC, medidos nas direções dos eixos X e Z; e três (03) erros associados à rotação em cada um dos eixos (neste caso em X rolamento, em Y tombamento e em Z guinamento) (Pizzetti, 2007).

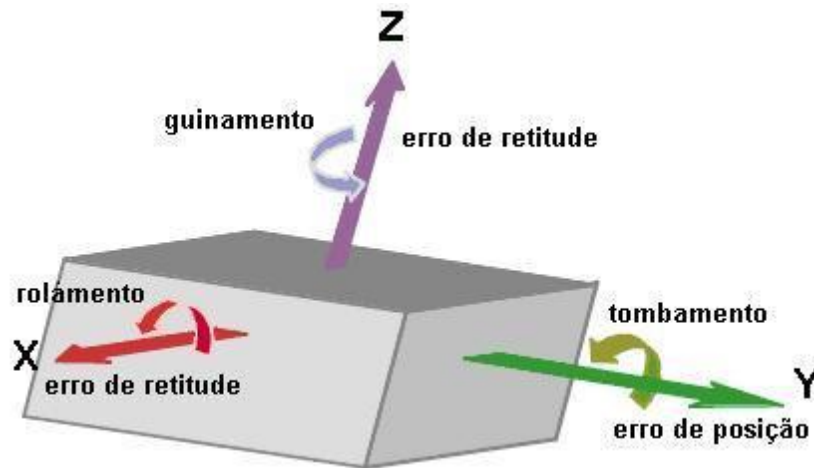


FIGURA 2.5 - Erros paramétricos do carro de MMC (Orrego et al., 2000).

Como para cada um dos eixos têm-se seis erros paramétricos, multiplicando-se pelos três eixos da MMC tem-se um total de 18 erros. Os outros três erros remanescentes estão relacionados à não ortogonalidade entre os eixos da máquina, ou seja, o ângulo entre os eixos não é exatamente  $90^\circ$ . A descrição destes erros encontra-se na FIGURA 2.6 (Pizzetti, 2007).

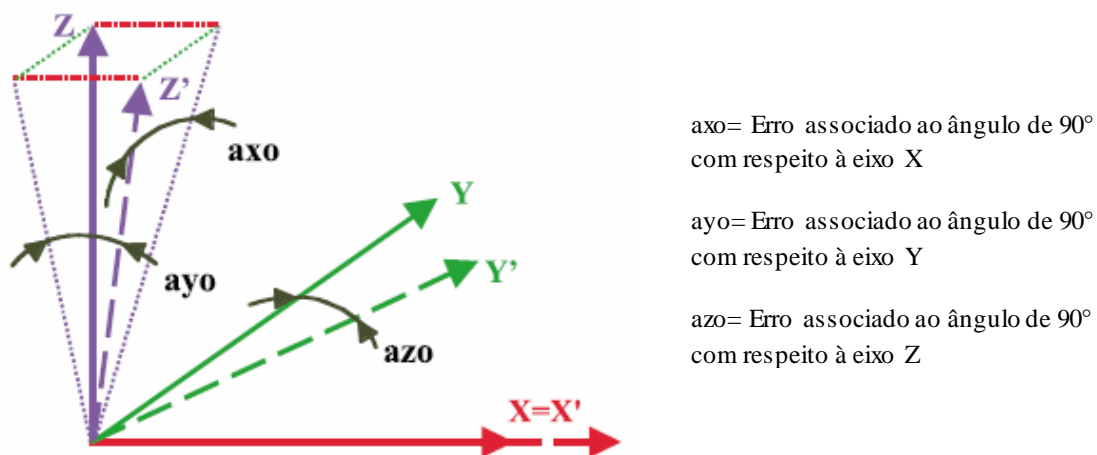


FIGURA 2.6 - Erros de perpendicularidade da MMC (Orrego et al., 2000).

Como consequência, os erros sistemáticos não corrigidos possuem influência nos resultados e por sua vez, no cálculo de incerteza. Estes erros devem ser levados em consideração quando se avalia a incerteza de medições específicas realizadas com a MMC (Pizzetti, 2007).

Com relação ao sistema de apalpação, basicamente pode-se dividir em dois tipos básicos: com contato e sem contato. Neste trabalho, será dada ênfase para apalpadores com

contato. Os sistemas de apalpação com contato podem ser divididos ainda em apalpadores comutadores e apalpadores analógicos ou “medidores” (Pizzetti, 2007).

Os apalpadores comutadores o de gatilhamento (*touch trigger*) enviam um sinal binário quando o mesmo faz contato com a superfície da peça em questão. Este sinal é gerado pela abertura de um dos contatos elétricos no seu interior, devido à força que a peça faz no apalpador quando este tem contato (Pizzetti, 2007).

Já os apalpadores analógicos viabilizam a medição em modo *scanning*. O deslocamento do mesmo desde o momento que realiza o toque na peça, até o momento da obtenção do ponto é levado em consideração no cálculo da posição do ponto apalpado, no volume de medição da MMC (Pizzetti, 2007).

Os principais fatores relativos ao sistema de apalpação que influenciam a incerteza de medição em MMC são: o processo de qualificação do apalpador, a pressão das molas internas, o comprimento da haste, a direção de apalpação, a velocidade de aproximação, ângulo de apalpação com referência à superfície da peça, erros de forma do próprio sensor, a distância percorrida (Pizzetti, 2007).

### 2.3.2 Influências do Ambiente

O ambiente de trabalho de uma MMC deve ser levado em consideração, analisando fatores como a variação temporal e espacial da temperatura de operação, a umidade do ar, as vibrações externas transmitidas à MMC, a presença de impurezas na peça e/ou na MMC, entre outros (FIGURA 2.7). Quanto mais desfavoráveis forem as condições ambientais, maiores serão os erros e, por consequência, suas contribuições para a incerteza das medições (Pizzetti, 2007).

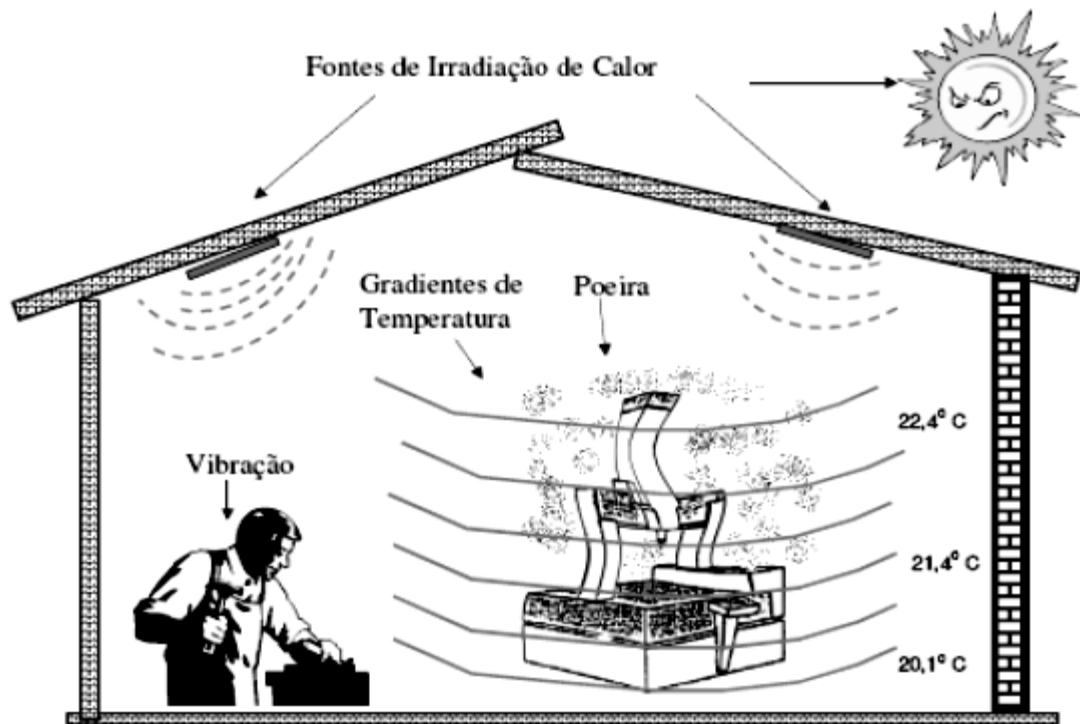


FIGURA 2.7 - Fontes de erros no ambiente de trabalho da MMC (Pizzetti, 2007).

O ambiente de medição ideal pode ser analisado em três dimensões. A primeira se relaciona com a temperatura de referência especificada pela NBR NM-ISSO (1997), que é de 20°C; a segunda é a condição de estabilidade da temperatura com o tempo; e a terceira é a ausência de gradientes espaciais de temperatura ( $^{\circ}\text{C}/\text{m}$ ) (Pizzetti, 2007).

Mesmo quando se possui um regime de temperatura estável, no entanto diferente da temperatura de referência, existe o problema relacionado à incerteza do valor do coeficiente de expansão térmica da peça. Caso tenha-se uma liga, tem-se ainda mais dificuldade de obter-se tal valor, não desmerecendo também a influência sobre a máquina, que sofre dilatações/contrações (Pizzetti, 2007).

Pode-se ter ainda um regime de flutuação da temperatura, assim como também gradientes espaciais de temperatura. Estes acabam por distorcer tanto a peça quanto a máquina de modo não uniforme. Outro ponto de relevância é que nem todas as partes da MMC e da peça em questão, têm a mesma dinâmica térmica (Pizzetti, 2007).

Alguns fabricantes projetam a máquina, tentando reduzir tais distorções. Existe uma tendência de se utilizar materiais de reduzida massa e com alta condutividade térmica de

forma a evitar gradientes de temperatura na estrutura da mesma. O auxílio via *software* da MMC é utilizado para redução de tais efeitos em alguns casos (Pizzetti, 2007).

### 2.3.3 Influências da peça

As peças medidas em MMC podem possuir os mais variados formatos, tamanhos e massas. Deformações da peça podem acontecer pelo próprio peso e pelas forças de fixação quando esta não é apoiada de forma adequada (Pizzetti, 2007).

Um exemplo desta situação é a medição de peças plásticas, que embora sejam mais leves, também apresentam, em geral, menor rigidez que as peças metálicas. Estas peças deformam com aplicação de pequenas forças, inclusive com a força de contato do sensor de medição. Desta forma, torna-se necessário utilizar sistemas de fixação que não venham a interferir nos elementos funcionais da peça, assim como também realizar as medições em locais da peça que sejam menos flexíveis (Pizzetti, 2007).

Uma fonte de incertezas associada à massa da peça e do sistema de fixação diz respeito às deformações na estrutura da MMC. Essas deformações alteram a forma das guias que materializam o sistema coordenado, mudando os erros paramétricos. A importância dessa influência depende da forma como o dispositivo se apoia na MMC, assim como também do tipo e do tamanho da própria MMC (Pizzetti, 2007).

As irregularidades da superfície da peça a ser medida também afetam os resultados das medições. Esta influência aparece na medição ponto a ponto, mas afeta em maior grau a medição por *scanning*. A influência da rugosidade da superfície das peças pode ser diminuída pelo uso de um diâmetro adequado do sensor. Assim, o conhecimento do processo de fabricação é de grande valia, para que erros devido a tais características possam ser evitados (Pizzetti, 2007).

### 2.3.4 Influência do operador.

Para operar uma máquina de elevado nível de automatização, a primeira impressão é que o operador da MMC pouco pode influenciar nos resultados. Porém, a experiência mostra que o operador é uma das mais preponderantes de todas as fontes de erros. Uma comparação qualitativa entre o operador, juntamente com a estratégia de medição adotada, a própria MMC, e o seu ambiente de trabalho (Pizzetti, 2007).

Antes de se realizar medições em MMC, para que sejam alcançados resultados confiáveis, é de grande importância a elaboração de um planejamento da medição adequado e consistente com a tarefa de medição. Assim sendo, uma vasta gama de conhecimentos é necessária para realizar tal planejamento (Pizzetti, 2007):

- ✓ Tecnologia de fabricação;
- ✓ Estatística aplicada;
- ✓ Geometria;
- ✓ Normas técnicas;
- ✓ Interpretação de desenho técnico;
- ✓ Computação;
- ✓ Metrologia (geral);
- ✓ Tecnologia de medição por coordenadas.

A estratégia de medição é sempre uma solução de compromisso donde o metrologista deve criar as condições para obter resultados com a menor incerteza possível. Para isso, estratégias com grande número de pontos apalpados são de praxe. O segundo ponto é realizar as medições de maneira econômica. Desta forma, o operador da MMC deve ter, além de conhecimento técnico, bom senso com a relação custo-benefício. Como consequência natural, a capacitação do profissional que irá operar a MMC deve ser condizente com a complexidade de suas tarefas, de modo a garantir a qualidade das operações (Pizzetti, 2007).

## **2.4 Modelos CAD**

A modelagem por computador, conhecidas como modelagem CAD (*computer aided design*) é amplamente utilizada em muitas aplicações, incluindo a construção naval, automóvel, aeroespacial, projeto arquitetônico e próteses. Um desenho CAD pode ser representado por vários elementos geométricos, tais como linhas, círculos, arcos e polígonos, incluindo os blocos de construção de vértices, ângulos, raios, etc.

Existem vários programas para a construção de modelos CAD que permitem criar modelos facilmente compreendidos e modificados. Estes programas geralmente representam curvas e superfícies através de *B-splines* não uniformes e racionais, conhecidas como NURBS.



#### 2.4.1 Curvas e superfícies paramétricas

As *B-Splines* racionais não uniformes NURBS (*Non Uniform Rational B-Spline*) são frequentemente usadas para a parametrização de superfícies de forma livre e geometrias comuns, pois permitem gerar representações robustas e flexíveis das mesmas. As curvas e superfícies NURBS tornaram-se de fato padrão de indústria para representação, projeto e troca de informações de dados geométricos processados por computadores. Muitos padrões internacionais como *IGES*, *STEP*, *PHIGS* e *OpenGL*, reconhecem as NURBS como ferramentas poderosas para projeto geométrico. O sucesso enorme atrás das NURBS deve-se, em grande parte, aos seguintes fatos (Pizo, 2009):

- ✓ Provém de uma base matemática unificada para representar formas analíticas, como seções cônicas e superfícies quádricas, além de entidades de forma livre, como corpos de carros de navios ou aviões;
- ✓ Suas curvas permitem representar formas arbitrárias enquanto mantém exatidão e independência de resolução matemática;
- ✓ Seus algoritmos são rápidos e numericamente estáveis;
- ✓ Suas curvas e superfícies são invariantes sob transformações geométricas comuns, como translação, rotação e projeções de perspectiva;
- ✓ São generalizações de curvas e superfícies *B-Splines* racionais e não racionais e de Curvas e Superfícies de Bezier não racionais.
- ✓ São capazes de proporcionar grande controle sobre a forma de uma curva, usando um conjunto de pontos de controle e de nós, para guiar a forma da curva, podendo ser diretamente manipulada para controlar sua suavidade e curvatura;
- ✓ Podem representar formas complexas através de poucos dados, por exemplo, substituindo a técnica de aproximação de um círculo que usa uma sequência de segmentos de reta e exige dezenas de milhares de segmentos por uma representação NURBS com somente sete pontos de controle.

## 2.4.2 B-Spline

As curvas e superfícies NURBS surgem a partir de uma combinação das funções-base *Splines* e dos pontos de controle. As propriedades das funções-base  $N_{i,p_{grau}}(u)$  transferem-se às curvas e superfícies paramétricas *B-splines* com as quais essa representação soluciona vários dos problemas que tem aproximação com funções de *Bezier*.

### 2.4.2.1 Curvas B-Splines

Uma curva *B-Spline* de grau  $p$  é definida pela equação 2.1:

$$C_{(u)} = \sum_{i=0}^n N_{i,p_{grau}}(u) p_i \quad (2.1)$$

Nesta equação  $p_i$  são os pontos de controle e  $N_{i,p_{grau}}(u)$  são as funções-base B-splines de grau  $p_{grau}$ . As B-Splines são uma generalização das funções de Bezier, já que se  $p_{grau} = n$  e  $u = \{0, \dots, 0, 1, \dots, 1\}$  então,  $C_{(u)}$  é uma Curva de *Bezier*.

$C_{(u)}$  tem um esquema de modificação local de forma tal que ao movimentar o ponto de controle  $p_i$ , a curva mudará só no intervalo  $[u_i, u_{i+p_{grau}+1}]$ , o qual permite que as B-spline tenham um ajuste mais fino sob aproximação do que as Curvas de Bezier. As propriedades de continuidade e derivação das funções B-Splines estão presentes em  $C_{(u)}$  já que esta é uma combinação linear de  $N_{i,p_{grau}}(u)$ . Dessa maneira,  $C_{(u)}$  é infinitivamente diferenciável dentro dos intervalos definidos pelo vetor de nós  $u$  e tem pelo menos  $p_{grau} - k$  derivadas contínuas num nó de multiplicidade  $k$  (Pizo, 2009).

### 2.4.2.2 Superfícies B-Splines

Uma superfície *B-Spline* é obtida pela combinação linear de uma rede bidirecional de pontos de controle  $p_{i,j}$  e dos produtos das funções B-Spline  $N_{i,p_{grau}}(u)$  e  $N_{j,p_{grau}}(v)$  definidas nos vetores nó  $U$  e  $V$ , respectivamente. (Pizo, 2009) como mostra a equação 2.2.

$$C_{(u)} = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p_{grau}}(u) N_{j,p_{grau}}(v) p_{i,j} \quad (2.2)$$

As superfícies *B-splines* conformam uma representação unificada que têm todas as propriedades de continuidade e derivação das funções *B-Splines* em ambas as direções paramétricas. Nas superfícies *B-Splines* é gerado um produto tensor das funções-base que apresentam capacidade de ajuste local e alta continuidade. O produto tensor das funções-base  $N_{i,p_{grau}(u)} N_{j,p_{grau}(v)}$  com ordem  $p_{grau}$  na direção U e  $q_{grau}$  na direção V é definido pelos vetores de nós normalizados.

$$U = \{0, \dots, 0, u_{p+1}, \dots, u_{n-1}, 1, \dots, 1\}$$

$$V = \{0, \dots, 0, v_{p+1}, \dots, v_{m-1}, 1, \dots, 1\}$$

#### 2.4.3 *Non-Uniform Rational B-Splines* NURBS

NURBS, *Non-Uniform Rational B-Splines*, são representações matemáticas da geometria 3-D que podem descrever com precisão qualquer forma de uma linha 2-D simples, círculo, arco ou curva em 3-D, de igual forma pode fazer em superfície complexas de forma livre ou sólida. Devido à sua flexibilidade e precisão, os modelos NURBS podem ser utilizados em qualquer processo de ilustração e animação para a fabricação (Rhino3d, 2010).

Geometria NURBS tem cinco qualidades importantes que o tornam a escolha ideal para modelagem assistida por computador (Rhino3d, 2012).

NURBS têm uma definição precisa e bem conhecida. A matemática e a ciência da computação da geometria NURBS são ensinados nas universidades mais importantes. Isto significa que os fornecedores especializados de *software*, equipes de engenharia, empresas de desenho industrial, e casas de animação que precisam para criar aplicativos de *software* personalizados, podem encontrar programadores treinados que são capazes de trabalhar com geometria NURBS (Rhino3d, 2012).

NURBS podem representar com precisão os objetos padrão geométricos como linhas, círculos, elipses, esferas e de forma livre de geometria como carrocerias de automóveis e órgãos humanos (Rhino3d, 2012).

### 2.4.3.1 Curvas NURBS

Uma curva NURBS de grau  $p$  é definida pela equação 2.3.

$$C(u) = \frac{\sum_{i=0}^n N_{i,p_{grau}(u)} w_i p_i}{\sum_{i=0}^n N_{i,p_{grau}(u)} w_i} \quad (2.3)$$

Onde  $N_{i,p_{grau}(u)}$  são as funções-base Splines de grau  $p_{grau}$ ,  $p_i$  são os pontos de controle e  $w_i$  são os pesos associados a cada ponto de controle (Pizo, 2009).

### 2.4.3.2 Superfícies NURBS

A equação geral para as superfícies paramétricas NURBS é dada pela equação 2.4.

$$S(u,v) = \frac{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p_{grau}(u)} N_{j,p_{grau}(v)} w_{i,j} p_{i,j}}{\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m N_{i,p_{grau}(u)} N_{j,p_{grau}(v)} w_{i,j}} \quad (2.4)$$

Onde  $N_{i,p_{grau}(u)} N_{j,p_{grau}(v)}$  é o produto tensor das funções-base B-splines com grau  $p$  na direção paramétrica  $U$  e de grau  $q_{grau}$  na direção  $V$ ,  $p_{i,j}$  é a malha de pontos de controle e  $w_{i,j}$  são os pesos associados a cada ponto de controle (Pizo, 2009).

## 2.5 Fusão de dados

Nos últimos anos, a fusão de dados multi-sensor recebeu uma importância significativa em nossas vidas diárias. Os humanos e animais têm desenvolvido a capacidade de usar múltiplos sentidos para poder sobreviver. As técnicas de fusão de dados são utilizadas para combinar dados de múltiplos sensores, relacionar informações com o fim de obter melhor precisão e mais inferências específicas do objeto em estudo, onde a utilização de um único sensor não é viável (Hall, Llinas, 1997).

A fusão de dados multi-sensores em metrologia dimensional é utilizada a fim de obter informação, holística, mais precisa e confiável, sobre uma peça de trabalho com base em valores de medição a partir de um ou mais sensores. O marco teórico se origina na matemática clássica e estatística, em métodos de inteligência artificial (AI) e na abordagem de fusão bayesiana. As características dos vários sensores influenciam no processo de

fusão de dados e determinam o ganho de informação em comparação com a aplicação de um único sensor. Configurações de sensores homogêneos e não homogêneos levam à integração de informações complementares, de forma competitiva e cooperativa, com vantagens específicas, dependendo da aplicação (Weckenmann et al., 2009).

Os sensores podem ser classificados de acordo com a funcionalidade e sua configuração, seguem as categorias competitivas, integração complementar e integração cooperativa (Weckenmann et al., 2009).

Uma configuração é competitiva se cada sensor proporciona uma medição independente da mesma propriedade. O objetivo da fusão competitiva é reduzir a incerteza da medição e para evitar medições incorretas (Weckenmann et al., 2009).

Uma configuração cooperativa usa a informação fornecida por dois, ou mais sensores independentes (não homogêneos) para derivar informação que não estaria disponível a partir dos sensores individuais. A avaliação leva a uma maior informação dos detalhes do objeto e uma eliminação de ambiguidades. Um exemplo prático seria o caso de Máquinas de Medição de Coordenadas Multi-Sensores (MMCS) integrando diferentes sensores de alta precisão, tais como sensores ópticos e tácteis (Weckenmann et al., 2009).

Uma configuração é chamada complementar se os sensores não dependem diretamente uns dos outros, mas podem ser combinados a fim de dar uma imagem mais completa do fenómeno sob observação. Sensores complementares ajudam a resolver o problema de imperfeição (Weckenmann et al., 2009).

Outra classificação da fusão de dados pode ser feita de acordo com o aspecto de como os dados são fundidos, podendo ser fusão de dados entre sensores, entre atributos, entre domínios e ao longo do tempo.

A fusão entre sensores é quando certo número de sensores nominalmente medem a mesma propriedade; A fusão entre atributos é quando um número de sensores mede quantidades diferentes associadas com a mesma situação experimental. A fusão entre domínios consiste em uma série de sensores que medem o mesmo atributo mais em diversas gamas ou domínio, e por ultimo, a fusão ao longo do tempo (filtragem) equivale a fusão de dados de medições recentes a dados históricos sendo usadas quando a informação atual não é suficiente para fornecer a precisão requerida (Weckenmann et al., 2009).

A fusão de dados baseada em diferentes fontes de informação compreende as seguintes operações: pré-processamento, registro, otimização e fusão de dados (Weckenmann et al., 2009).

O Pré-processamento corresponde ao tratamento inicial dos dados obtidos dos sensores, fornecidos pelos sensores múltiplos, feitos através de uma interpretação matemática. Diferentes níveis de abstração podem ser diferenciados: nível de sinal, nível de matéria, e nível de símbolo (Weckenmann et al., 2009).

Em nível de sinal (também chamado de nível de pixel em registro de imagens); os dados dos sensores são diretamente combinados. Os requisitos são a comparabilidade dos dados de medição e seus registros (Weckenmann et al., 2009).

No nível Matéria, os sinais são fundidos para obter melhores valores estimados da sinal característica. A fusão pode ser aplicada se tem coerência espacial ou temporal entre os dados do sensor (Weckenmann et al., 2009).

No nível de símbolo, os resultados são combinados para tomar uma decisão baseada em uma função de densidade de probabilidade. A fusão em um maior nível de abstração é geralmente mais eficiente (Weckenmann et al., 2009).

O registro é um dos passos mais importantes e decisivos de fusão de dados multi-sensores. O processo de registro é o passo prévio antes da fusão de dados, durante o qual os dados de medição capturadas no sistema do respectivo sensor de coordenadas estão alinhados e transformados para um sistema de coordenadas comum. Os parâmetros de transformação podem incluir três rotações e deslocamento lateral 3D (Weckenmann et al., 2009).

Geralmente o critério para determinar os parâmetros de transformação é o critério de mínimos quadrados. Isto envolve a minimização da variância das distâncias de pontos correspondentes dos dados do sensor ou de pontos correspondentes em áreas sobrepostas (Weckenmann et al., 2009).

Às vezes, o processo de registro pode ser feito em duas etapas: registro grosso e fino. Nestes casos, os dados dos conjuntos que serão sobrepostos podem apresentar diferentes resoluções ou serem adquiridos em diferentes ângulos de posição. Em tais casos

a incerteza de medição adicional é significativa em comparação com a incerteza dos dados do sensor (Weckenmann et al., 2009).

Na otimização existem métodos para os conjuntos de dados tridimensionais que utilizam as posições dos sensores para transformar os conjuntos de dados num sistema de coordenadas comum. Uma de essas aplicações pode ser o métodos numéricos, que são divididas em processos de registro grosso e fino. Durante o registro grosso, os conjuntos de dados é feito através de estratégias baseadas em funções. No registro fino a técnicas de otimização é tentar encontrar um valor extremo com o fim de tomar todos os dados (Weckenmann et al., 2009).

A fusão de dados equivale à integração dos dados de medição em um conjunto de dados combinados. Em regiões que contêm dados redundantes, o critérios para definir qualidade, tal como a incerteza de medição, tem de ser levados em conta. Esta etapa pode ser feita por estimativa, inferência, métodos fuzzy ou redes neuronais (Weckenmann et al., 2009).

## **2.6 Incertezas em medição por coordenadas**

Quando se deseja expressar o resultado de uma medição de uma quantidade física, deve dar uma indicação quantitativa da qualidade do resultado, de modo que aqueles que usam este resultado podam avaliar sua adequação. Sem essa informação, as medições não podem ser comparadas umas com as outras ou com outros valores de referência dadas em especificações ou normas. Por conseguinte, é necessário estabelecer um método abrangente e universal para caracterizar a qualidade do resultado de uma medição, isto é, para avaliar e expressar a incerteza (ISO TAG 4WG-3, 2008).

### **2.6.1 Incerteza.**

A palavra "incerteza" significa dúvida. Assim, no seu sentido mais amplo, "incerteza de medição" significa dúvida sobre a validade do resultado de uma medição (ISO TAG 4WG-3, 2008).

A incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. O resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é ainda somente uma estimativa do valor do mensurando, por causa da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para

efeitos sistemáticos. Na prática, existem muitas fontes possíveis de incerteza, tais: definição incompleta do mensurando, realização imperfeita da definição do mensurando, amostragem não representativa - a amostra medida pode não representar o mensurando definido, conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais, erro de tendência pessoal na leitura de instrumentos analógicos, resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade, valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência, aproximações e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição (Russman,1998).

A incerteza de medição é um parâmetro não negativo, associado ao resultado de uma medição, caracterizando a dispersão dos valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2012).

A incerteza padrão é o resultado de uma medição expressa como um desvio padrão (INMETRO, 2012).

A incerteza padrão do tipo A é determinada pela análise estatística dos resultados, a incerteza padrão do tipo B é determinada por outros meios, como experiência anterior, laudos de calibração de padrões, etc. (INMETRO, 2012).

O objetivo da classificação como tipo A e tipo B é para indicar as duas formas diferentes de avaliação dos componentes de incerteza, o propósito exclusivo de análise; Os dois tipos de avaliação são baseados em distribuições de probabilidade, e os componentes resultantes tanto do ponto de como os outros comentários são quantificados por variâncias ou desvios padrão (ISO TAG 4WG-3, 2008).

A incerteza padrão combinada é quando este resultado é obtido por meio de valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas (INMETRO, 2012).

A incerteza expandida é uma grandeza definida em torno ao resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (INMETRO, 2012).



### Estabelecer o modelo matemático da medição

Na maioria dos casos, um mensurando  $Y$  não é medida diretamente, mas é determinada a partir de  $N$  variáveis  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , por meio de uma relação funcional  $f$  da equação 2.5 (ISO TAG 4WG-3, 2008).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.5)$$

Quantidades de entrada  $X_1, X_2, \dots, X_N$ , dos quais depende da variável de saída  $Y$  podem ser consideradas como os mensurados que podem depender de outras variáveis, juntamente com fatores de correção para efeitos sistemáticos, atingindo assim uma complexa relação funcional  $f$ , a qual pode ser difícil de escrever explicitamente (ISO TAG 4WG-3, 2008).

### *Determinação da incerteza padrão Tipo A*

A variância estimada  $u^2$  que caracteriza uma componente de incerteza obtida é calculada a partir de uma série de observações repetidas e é a variância estimada  $s^2$ . O desvio padrão estimado  $u$ , é raiz quadrada positiva  $u^2$  (ISO TAG 4WG-3, 2008).

Assim, a incerteza tipo A é obtido a partir de uma função densidade de probabilidade derivado de uma distribuição de frequência observada, em quanto que uma incerteza tipo B é obtida a partir de uma função de densidade de probabilidade assumida, com base à grau de desconfiança ocorreu do evento (ISO TAG 4WG-3, 2008).

Na grande maioria dos casos, a melhor estimativa para o valor esperado de uma quantidade que varia aleatoriamente e para o qual temos  $n$  leituras independentes  $k$  obtidas sob condições de repetitividade, corresponde a média aritmética (ISO TAG 4WG-3, 2008).

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (2.6)$$

Assim, quando a estimativa de uma grandeza de entrada  $x_i$  tem sido obtida de  $n$  medidas sob condições de repetitividade, a incerteza padrão  $u(x_i)$  é obtida pela estimativa da variância da média. Esta é dada por (ISO TAG 4WG-3, 2008):

$$s_{\bar{x}} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.7)$$

### *Determinação da incerteza padrão Tipo B*

Para um componente de incerteza obtido a partir de uma avaliação do Tipo B, a estimativa de variância  $u^2$  é avaliada com base nas informações existentes e a estimativa do desvio padrão.

O conjunto da informação pode ser:

- ✓ Resultados de medição obtidos anteriormente;
- ✓ Experiência ou conhecimentos geral sobre o comportamento e as propriedades dos materiais e instrumentos utilizados;
- ✓ Especificações do fabricante;
- ✓ Dados fornecidos por certificados de calibração ou outros tipos de certificados;
- ✓ Incerteza dos valores de referência procedentes de livros e manuais.

Para estimar a incerteza do tipo B é necessário levar em consideração todas as informações disponíveis que estejam relacionadas à qualidade do resultado da medição. Uma maneira de se fazer isso é propor a priori uma distribuição de probabilidades, por exemplo, gaussiana, retangular, triangular, que seja adequada para descrever a distribuição dos resultados de medição em torno do valor verdadeiro do mensurando ou do conjunto de valores verdadeiros que podem ser atribuídos a esse mensurando. Essa distribuição de probabilidades deve possuir pelo menos duas propriedades: (1) ela deve ser ajustável às informações prévias relevantes à determinação da qualidade do resultado da medição; (2) ela deve permitir a tradução dessas informações relevantes em uma quantidade que possa ser interpretada como desvio padrão (Junior et.al 2011).

### *Incerteza padrão Distribuição Normal de Probabilidade*

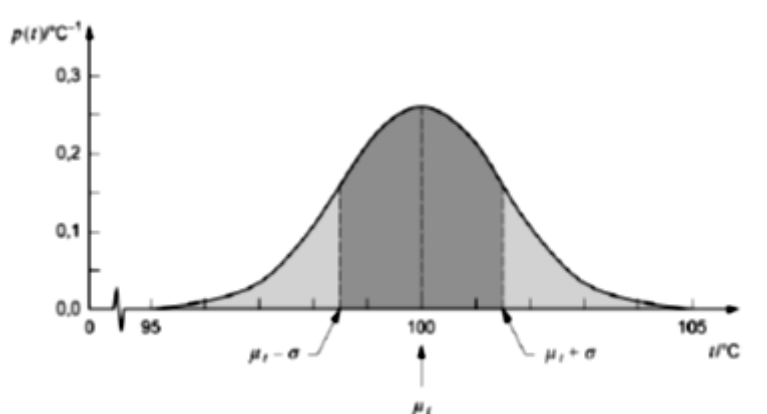


FIGURA 2.8 - Distribuição Normal de Probabilidade (ISO TAG 4WG-3, 2008).

A Incerteza padrão tipo A que tem graus de liberdade  $GL = n - 1$  para uma distribuição normal esta definida pela equação 2.8:

$$u_{A_i} = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2.8)$$

A Incerteza padrão tipo B que tem graus de liberdade  $GL = \infty$  para uma distribuição normal esta definida pela equação 2.9:

$$u_{B_i} = \frac{a}{k} \quad (2.9)$$

Distribuição Retangular de probabilidade

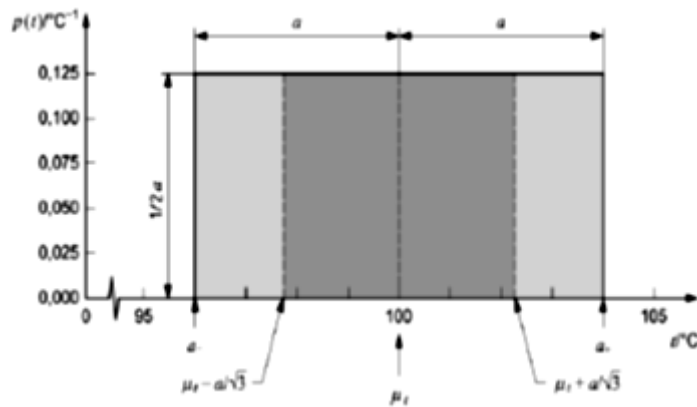


FIGURA 2.9 - Distribuição Retangular de Probabilidade (ISO TAG 4WG-3, 2008).

A Incerteza padrão tipo B que ter graus de liberdade  $GL = \infty$  para uma distribuição Retangular esta definida pela equação 2.10:

$$u_{B_i} = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.10)$$

Distribuição Triangular de probabilidade

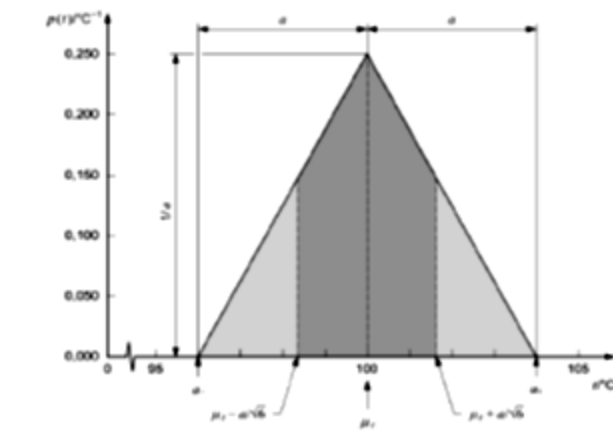


FIGURA 2.10 - Distribuição Triangular de Probabilidade (ISO TAG 4WG-3, 2008).

A Incerteza padrão tipo B que ter graus de liberdade  $GL = \infty$  para uma distribuição triangular esta definida pela equação 2.11:

$$u_{B_i} = \frac{a}{\sqrt{6}} \quad (2.11)$$

Determinação da Incerteza padrão combinada ( $u_c$ )

A incerteza padrão do resultado de uma medição, quando este resultado é obtido por meio de valores de várias outras grandezas, sendo igual à raiz quadrada positiva de uma soma de termos, sendo estes as variâncias ou covariâncias destas outras grandezas, ponderadas de acordo com quanto o resultado da medição varia com mudanças nestas grandezas (Piratelli, 2012).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[ \frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (2.12)$$

Donde  $f$  é a função dada na equação (2.5). Cada  $u(x_i)$  é avaliada como incerteza Tipo A ou Tipo B. A incerteza padrão combinada  $u_c(y)$  é estimada e um desvio padrão caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando  $Y$ .

Determinação da incerteza expandida ( $U$ )

Definida como a grandeza definindo um intervalo em torno do resultado de uma medição com o qual se espera abranger uma grande fração da distribuição dos valores que possam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (Piratelli, 2012).

Definindo um intervalo para um nível de confiança ou probabilidade de abrangência ( $p$ ) (95- 99%), a incerteza expandida está dada pela equação 2.13.

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (2.13)$$

Onde  $k$  é definida como fator de abrangência e é determinado com base na probabilidade de abrangência ( $p$ ), usando a distribuição  $t$  de Student considerando o número de graus de liberdade efetivo ( $v_{eff}$ ) definidos pela equação 2.14. (Piratelli, 2012).

$$v_{eff} = \frac{u_c(y)^4}{\sum_{i=1}^N \frac{u_{xi}^4}{v_i}} \quad (2.14)$$

### 3. Procedimento Experimental

O estudo da fusão de dados foi inicialmente realizado comparando uma superfície plana com uma superfície de forma livre. Para a peça de forma geométrica regular, trabalhou-se com um esquadro fabricado pela MITUTOYO (FIGURA 3.1a). A segunda peça foi uma Pá da Hélice que tem forma livre (FIGURA 3.1b).

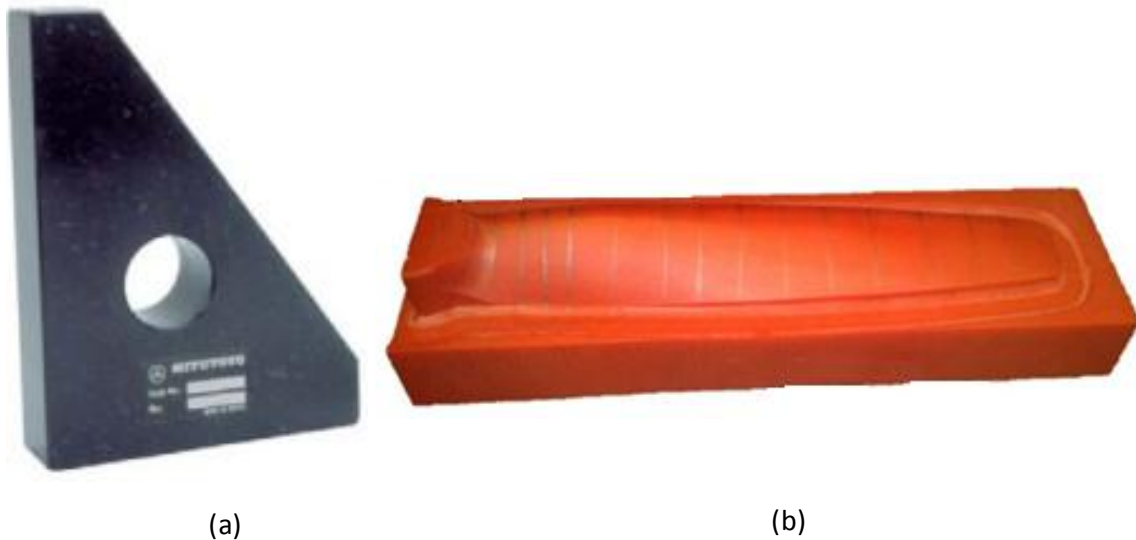


FIGURA 3.1 Peças de estudo: (a) Esquadro de granito, (b) Pá da Hélice.

#### 3.1 Descrição das peças utilizadas.

##### 3.1.1 ESQUADRO DE GRANITO

O esquadro de granito é um padrão com duas superfícies planas formando ângulo reto entre si, construído em granito preto. Este padrão é usado para verificação de superfícies em ângulo de  $90^\circ$ . A FIGURA 3.2 apresenta este esquadro (3.2a) e sua aplicação (3.2b).

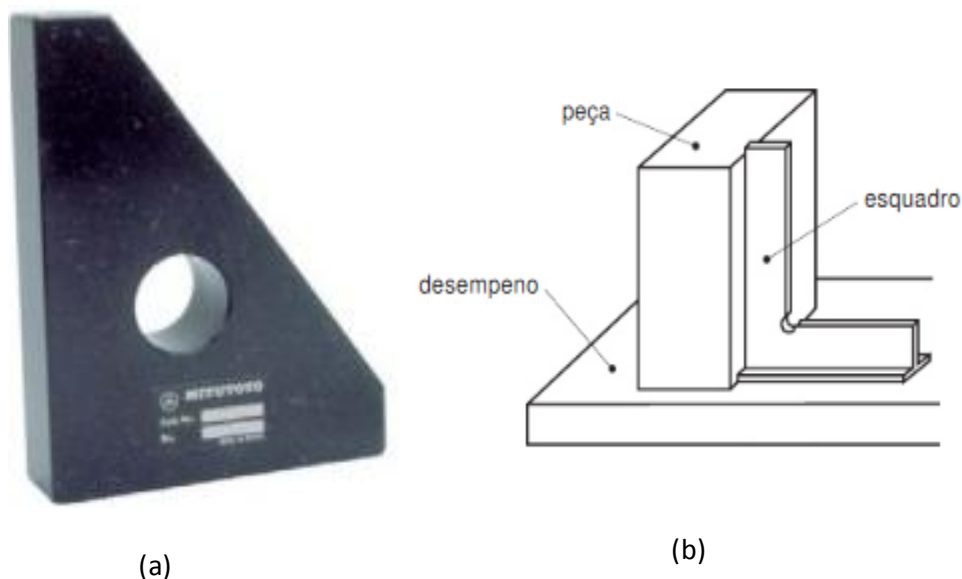


FIGURA 3.2 Esquadro de Granito MITUTOYO (a) Esquadro granito, (b) Forma de utilização.

O Esquadro de Granito pode ser considerado como padrão econômico para verificação dos eixos X-Y-Z de máquinas operatrizes com comandos numéricos (CNC) e Máquinas de Medir por Coordenadas. Assentado na posição horizontal, um sensor indicador pode ser acoplado ao cabeçote da máquina, para a verificação do desvio de perpendicularidade de  $90^\circ$  entre os eixos X e Y. Com o esquadro na posição vertical, a perpendicularidade de X ou Y em relação ao eixo Z pode ser inspecionada, deslizando o sensor indicador ao longo da face vertical (SENAI, 2012)

As características do esquadro de granito, fabricado pela MITUTOYO, estão especificadas na folha de calibração e informam que o esquadro tem dimensões de 200 x 150 x 50 mm, tem uma incerteza expandida de medição de perpendicularidade  $1,5 \mu\text{m}$  e uma incerteza expandida de planeza de  $1,0 \mu\text{m}$  em qualquer face. Estas incertezas foram calculadas com um fator de abrangência  $k = 2$ , para um nível de confiança de 95%. O granito tem propriedades físicas como densidade  $2,54\text{-}2,66 \text{ g/cm}^3$ , resistência à tração  $7,00\text{-}25,0 \text{ MPa}$ , módulo de elasticidade  $20,0\text{-}60,0 \text{ GPa}$ , resistência à compressão  $96,5 - 310 \text{ MPa}$ , e propriedades térmicas Coeficiente de expansão térmica  $11,0 \mu\text{m/m}^\circ\text{C}$  (Matweb, 2012).

### 3.1.2 PÁ DA HÉLICE

Como elemento de forma livre foi usado uma Pá da Hélice de helicóptero esculpida em um centro de usinagem CNC mostrada na FIGURA 3.3 (Piratelli, et al., 2011). Este protótipo de Pá da Hélice tem cerca de 15,3 cm de comprimento por 2,5 cm de largura, tendo sido fabricada com um material a base de resina epoxy chamado compósito RenShape 5179 ou Cibatool. Como propriedades físicas, tem densidade 1,17 g/cm<sup>3</sup>, resistência à tração 68,9 MPa, módulo à flexão 2,82 GPa, resistência à flexão 108 MPa, resistência à compressão 87,6 MPa, módulo à compressão 2,24 GPa, e propriedades térmicas como temperatura de Transição Vítrea (T<sub>g</sub>) 115 °C (Matweb, 2012).



FIGURA 3.3. Peça com forma livre (Piratelli, et al., 2011).

## 3.2 Equipamentos de medição utilizados.

Para fazer a coleta de dados foram utilizadas uma MMC Cantilever e uma MMC Braço Articulado.

### 3.2.1 Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC)– Cantilever.

A MMC Cantilever (FIGURA 3.4) modelo QM-353 foi fabricada pela empresa MITUTOYO e apresenta uma resolução de 0,001 mm, conforme manual do fabricante. Utiliza três componentes que se movem sobre mancais aerostáticos ao longo de guias ortogonais para determinar as coordenadas X, Y e Z.

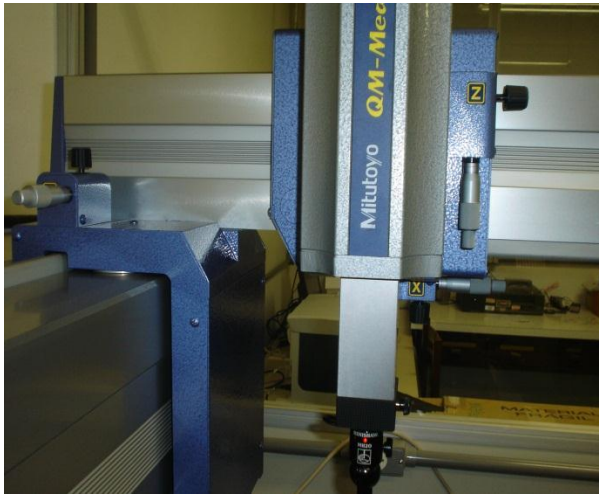


FIGURA 3.4 MMC Cantilever modelo QM-353 fabricante MITUTOYO

A MMC Cantilever tem um apalpador comutado (FIGURA 3.5) ou de gatilhamento (*touch trigger*), com erro de apalpamento de 3,2  $\mu\text{m}$ , conforme certificado de calibração. Na medida em que o apalpador faz contato com a superfície da peça, envia um sinal para o computador, como resultado da abertura de um dos contatos elétricos do seu interior pela ação da força no contato do apalpador com a peça.



FIGURA 3.5 Apalpador comutado ou de gatilhamento - MMC Cantilever.



Antes de começar a medir com a MMC Cantilever, a primeira etapa é a calibração do apalpador. Este processo deve ser feito com uma esfera de material cerâmico que tem uma incerteza de  $0,3 \mu\text{m}$  (FIGURA 3.6a). A esfera deve ser tocada pelo apalpador da MMC em 15 pontos para determinar o diâmetro da esfera do apalpador (FIGURA 3.7b).



(a)



(b)

FIGURA 3.6 Calibração do Apalpador, (a) Esfera Padrão (b) Método de Calibração.

A MMC Cantilever opera com o *software* MCOSMOS- Manual V.3.0R16, fornecido pelo fabricante MITUTOYO. O programa gera arquivos IGES que contém toda a informação das coordenadas dos pontos medidos. Também permite a elaboração de relatórios em formato EXCEL que podem ser utilizados em programas como Matlab.

### 3.2.2 Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) – Braço Articulado

A MMC Braço Articulado (FIGURA 3.7) modelo Arm 100, fabricado pela Romer, apresenta uma incerteza expandida a uma probabilidade de abrangência de 95% de  $60 \mu\text{m}$  com um fator de abrangência  $k= 2,28$ , fornecida pelo manual de fabricante. Esta máquina tem 6 articulações, compondo 6 graus de liberdade, com medidores angulares (*encoders*) em cada uma para determinar a posição de um apalpador no espaço tridimensional.



FIGURA 3.7 MMC Braço Articulado

O posicionamento do apalpador na superfície da peça é feito manualmente. Na medida em que o apalpador faz contato com a superfície da peça, o operário pressiona um botão na sonda, enviando um sinal para o computador armazenado as coordenadas da posição (FIGURA 3.8a). Esta MMC tem uma incerteza (95%) de apalpação de  $16\ \mu\text{m}$ , com  $k=2,07$ . A MMC Braço Articulado trabalha com dois tipos de apalpador, uma chamada de Ponta seca (FIGURA 3.8b) e outro, uma esfera de rubi de 6 mm de diâmetro (FIGURA 3.8c).

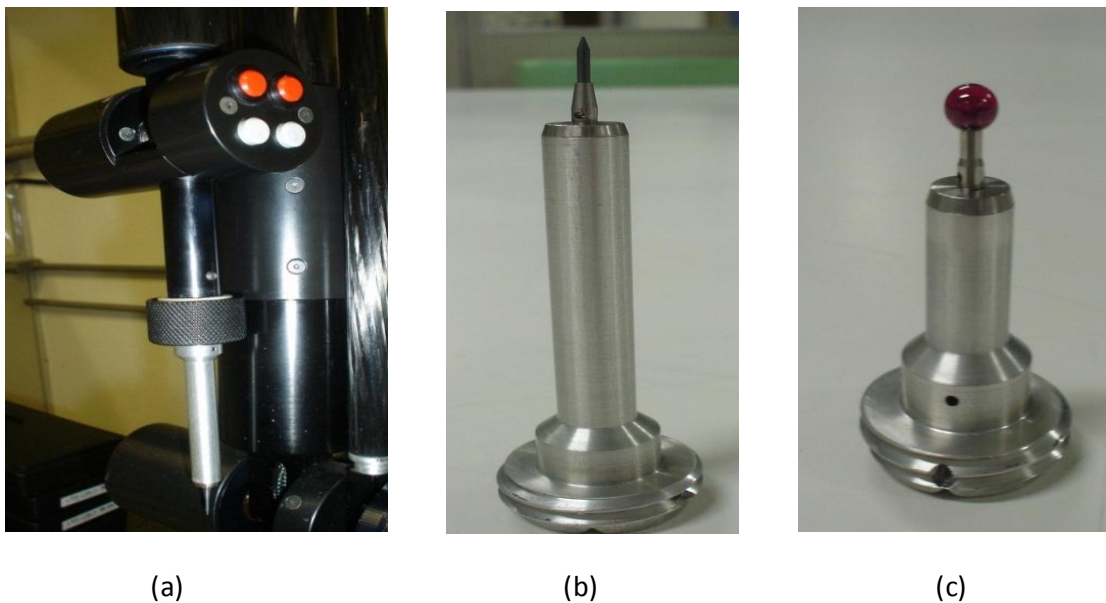


FIGURA 3.8 Tipos de Apalpador na MMC Braço Articulado, (a) Sonda de medição, (b) apalpador Ponta seca, (c) Apalpador esférico com 6 mm de diâmetro.

A MMC Braço Articulado trabalha com um *software* GPad fornecido pelo fabricante Romer. Este programa gera um arquivo IGES que contém toda a informação das coordenadas dos pontos que são usados para construir o modelo CAD.

### 3.3 Preparação das Peças e Estratégia de Medição.

#### 3.3.1. Limpeza de Peças.

A limpeza das peças é um procedimento obrigatório e deve ser feito de uma forma muito cuidadosa. A presença de óleo ou de partículas pode afetar significativamente o resultado e proporcionar erros, especialmente quando mede-se com Máquina de Medir por Coordenadas, que tem uma resolução do ordem de micrometros. Entre a superfície da peça e a superfície do instrumento de medição, pode haver a deposição de minúsculas partículas consideradas corpos estranhos que alteram os resultados da medição. A limpeza foi feita com uma flanela e álcool etílico, aplicados sobre as superfícies de medição (FIGURA 3.9).



(a)



(b)

FIGURA 3.9. Limpeza das peças: (a) Esquadro de Granito, (b) Pá Hélice.

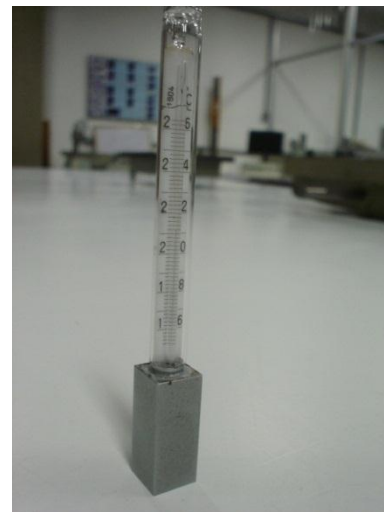
#### 3.3.2. Controle de Temperatura.

É importante assegurar que a sala de metrologia tenha a temperatura e umidade adequadas e que as peças e instrumentos de medição sejam mantidos a uma temperatura estável e controlada. Para certificar-se de que isso acontece, as peças devem ser colocadas algumas horas antes na sala de medição.

A dilatação térmica das peças é uma fonte importante de erro que deve ser levada em conta no estudo da incerteza de medição, portanto, é muito importante controlar a temperatura ambiente entre  $20^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ . O Laboratório de Metrologia da UnB dispõe de um termômetro digital (FIGURA 3.10a) que permite registrar o valor da temperatura da sala, o qual apresenta uma incerteza expandida de  $0,6^{\circ}\text{C}$ , com um fator de abrangência de  $k=2$  a uma probabilidade de 95% (Certificado de Calibração). Também foi utilizado um termômetro de bulbo de mercúrio (FIGURA 3.10b) Série 1804 para medir a temperatura das peças, o qual apresenta uma incerteza expandida de  $0,1^{\circ}\text{C}$  com um fator de abrangência de  $k=2$  a uma probabilidade de 95% (Certificado de Calibração).



(a)



(b)

FIGURA 3.10 Instrumentos para monitoramento da Temperatura: (a)Termômetro Digital, (b) Termômetro de bulbo de mercúrio.

### 3.3.3. Estratégia de Medição.

#### 3.3.3.1 Esquadro de Granito.

A Estratégia de medição que foi adotada para a medição do esquadro de granito envolveu a marcação de linhas e pontos na superfície da peça, para ajustar um plano a partir dos pontos medidos. Esta metodologia é normalmente aplicada quando se usa medição com contato com Máquinas de Medir por Coordenadas (Piratelli et al.,2011). Sobre a superfície plana de maior dimensões do esquadro, dentre as duas que compõem o ângulo de  $90^{\circ}$ , foram marcadas linhas em duas direções formando uma rede com 23 linhas na direção transversal e 6 linhas na direção longitudinal, permitindo a determinação das

coordenadas de 138 pontos. A FIGURA 3.11 mostra a malha formada pela superposição das linhas.

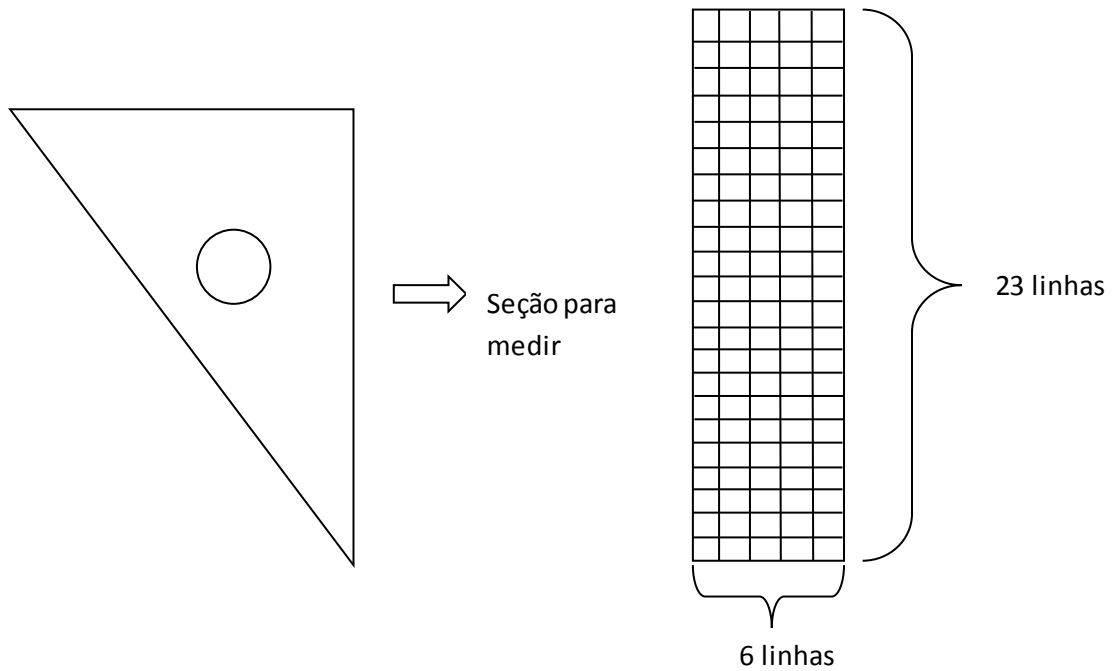


FIGURA 3.11. Estratégia de medição no Esquadro Mitutoyo

### 3.3.3.2 Pá da Hélice.

O procedimento de medição da pá da hélice foi o mesmo adotado no esquadro, medindo pontos sobre linhas pré-definidas na superfície da peça, para construir curvas NURBS e depois ajustar uma superfície NURBS. Assim foram marcadas linhas em duas direções na superfície da pá da hélice, formando uma rede com 21 linhas na direção transversal e 8 linhas na direção longitudinal. Desta forma, devem ser determinadas coordenadas de 168 pontos na superfície. A FIGURA 3.12 mostra esta malha formada pela superposição das linhas.

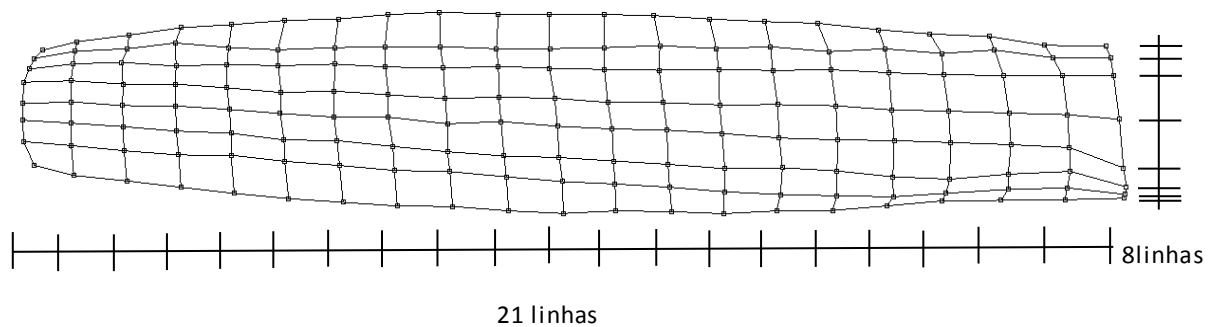


FIGURA 3.12. Estratégia de medição na hélice

### 3.4 Medição

#### 3.4.1 Medição do Plano do Esquadro com a MMC Cantilever.

Uma vez calibrado o apalpador da MMC Cantilever e tendo clara a estratégia para a medição foi realizada a medição do plano do esquadro (FIGURA 3.13). Deve-se notar que o apalpador precisa ser calibrado e posicionado em uma direção perpendicular à superfície medida, para minimizar os erros da medição.

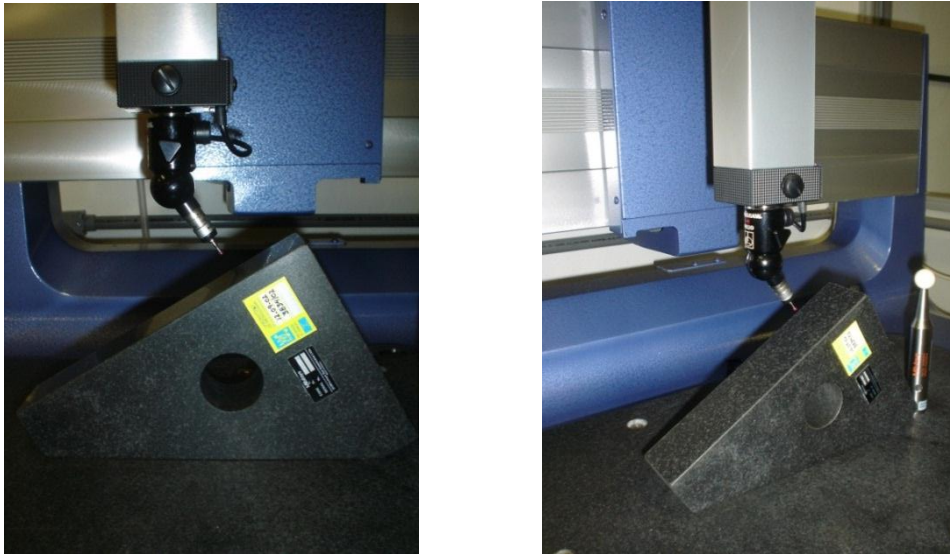


FIGURA 3.13 Medição do plano do Esquadro com a MMC Cantilever.

#### 3.4.2 Medição da Pá da hélice com a MMC Cantilever.

Observando a condição de direcionar o apalpador perpendicularmente à superfície, a medição da Pá da hélice (FIGURA 3.14) foi feita seguindo a estratégia de medição estabelecida para capturar os pontos, a fim de executar a reconstrução da superfície NURBS.

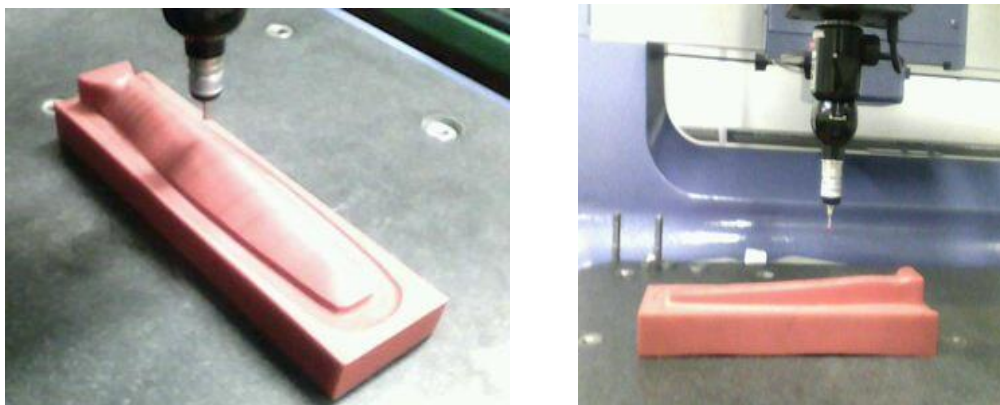


FIGURA 3.14 Medição da Pá da hélice com a MMC Cantilever.

### 3.4.3 Medição do Plano do Esquadro com MMC Braço Articulado.

O processo para a medição e obtenção de dados com a MMC Braço Articulado é muito semelhante ao realizado na MMC Cantilever, quanto à tomada dos pontos, deve-se notar que o processo é mais rápido porque a MMC Braço Articulado tem mais graus de liberdade, o que torna a determinação dos pontos mais rápida (FIGURA 3.15). A estratégia estabelecida para a coleta de pontos foi a mesma, sendo gerado um arquivo de extensão “IGES” e também um arquivo “EXCEL”, (xls).



(a)



(b)

FIGURA 3.15 Medição do Plano do Esquadro com MMC Braço Articulado (a) apalpador 6 mm, (b) apalpador Ponta seca.

### 3.4.4 Medição de Pá da Hélice com MMC Braço Articulado.

Para a medição da pá da hélice com a MMC Braço Articulado (FIGURA 3.16), foi empregada a estratégia definida para a captura dos pontos, usando um apalpador Ponta seca e um apalpador esférico de diâmetro de 6 mm. Deve-se observar que apalpador deve ser colocado perpendicularmente em relação à superfície da peça, reduzindo o erro e a incerteza das coordenadas de cada ponto obtido.

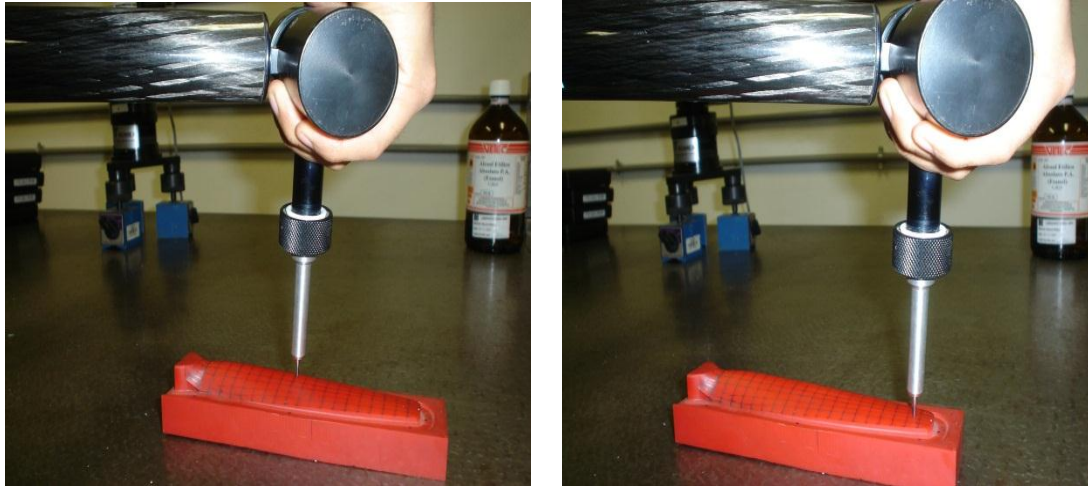


FIGURA 3.16 Medição da Pá da Hélice com MMC Braço Articulado.

### 3.5 Construção dos Modelos CAD

Após a obtenção dos arquivos IGES com os resultados das medições nas duas máquinas, devem-se construir os modelos CAD das peças. Esta etapa foi feita com o programa Rhinoceros o qual permite construir superfícies de forma livre, além das superfícies regulares. As superfícies ajustadas são obtidas por aproximação e correspondem a modelos NURBS.

O roteiro para fazer o modelo CAD no programa Rhinoceros é apresentado em sequência:

#### 3.5.1 Modelo CAD para o Plano do Esquadro.

- ✓ No comando *Superfície*, selecione *Plano*, e depois selecione *Através de Pontos* como se mostra na (FIGURA 3.18).
- ✓ Depois Selecione os pontos para criar o Plano, selecione os pontos medidos com as MMCs.
- ✓ O programa gera o Plano com todos os pontos obtidos com as MMCs.



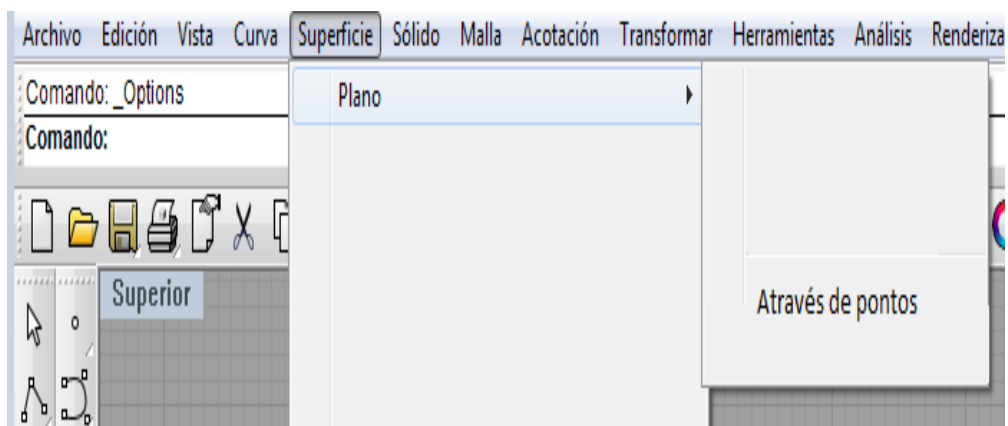


FIGURA 3.18 Janela para criar Plano com o programa Rhinoceros.

Para fazer uma análise e verificar o comportamento dos pontos com respeito à superfície gerada, apresenta-se o seguinte roteiro:

- ✓ No comando *Análise (Análisis)*, selecione *Superfície*, e depois selecione *Desvio de grupos de Pontos (Desvio de grupo de puntos)* como se mostra na (FIGURA 3.19).

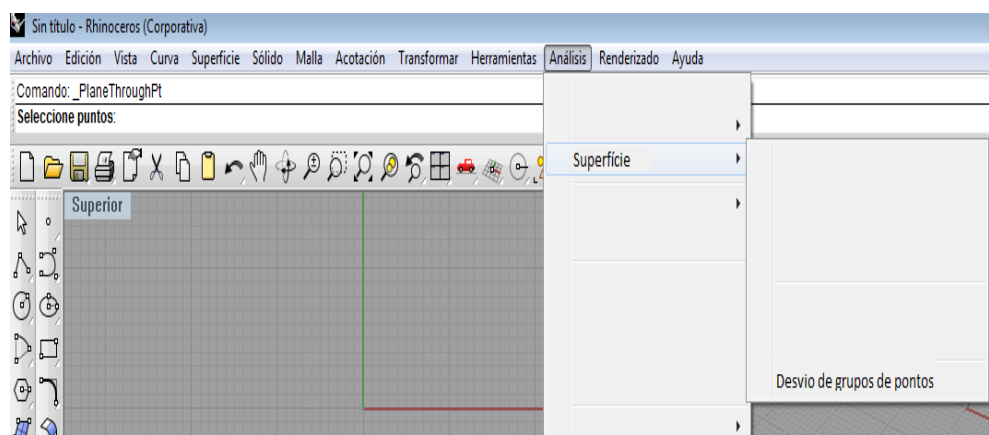


FIGURA 3.19 Janela para gerar Desvio de grupos de Pontos com a Superfície programa Rhinoceros.

Uma análise complementar foi feita ajustando o plano com um algoritmo construído no programa Matlab. Neste algoritmo, um plano foi ajustado pelo método dos mínimos quadrados e os desvios dos pontos em relação ao plano foram determinados. O algoritmo permite o cálculo do desvio padrão e da média dos desvios. O código construído está mostrado na FIGURA 3.20.

```

clc;clear all;close all
load cant
XYZplano=cant;
x=XYZplano(:,1);
y=XYZplano(:,2);
z=XYZplano(:,3);
uno=ones(129,1);
A=[y,z,uno];
[U,S,V] = svd(A,'econ');
Aqinv=V*S^-1*U';
t=Aqinv*x;
dt=A*t;
d_pto_p=abs(1*x-t(1)*y-t(2)*z-t(3)*uno)/(1+(t(1)^2)+(t(2)^2))^0.5;
d_pto_p2=(1*x-t(1)*y-t(2)*z-t(3)*uno)/(1+(t(1)^2)+(t(2)^2))^0.5;
M=max(d_pto_p2)
m=min(d_pto_p2)
dif=M-m
medial=mean(d_pto_p);
S1=std(d_pto_p);

```

FIGURA 3.20 Código para gerar Desvio Padrão e modelo CAD com programa Matlab.

### 3.5.2 Modelo CAD para a Pá da Hélice.

Para gerar as curvas com os pontos obtidos com as Máquinas de Medir por Coordenadas, devem ser executados os seguintes comandos no *software* Rhinoceros:

- ✓ No comando *Curva*, selecione *Poli-linha (Polilínea)*, e depois *Através de Pontos (Através de pontos)* como se mostra na FIGURA 3.21.
- ✓ Depois, use a opção *Selecione os pontos através dos quais será criada uma curva (Seleccione los puntos para crear curva)*, selecionando os pontos medidos com a MMC.
- ✓ Fazer o mesmo para os conjuntos de pontos de cada peça, gerando as curvas NURBS.
- ✓ As curvas geradas são ajustadas com faixa de tolerância de 0,01 mm, adotando grau 4.

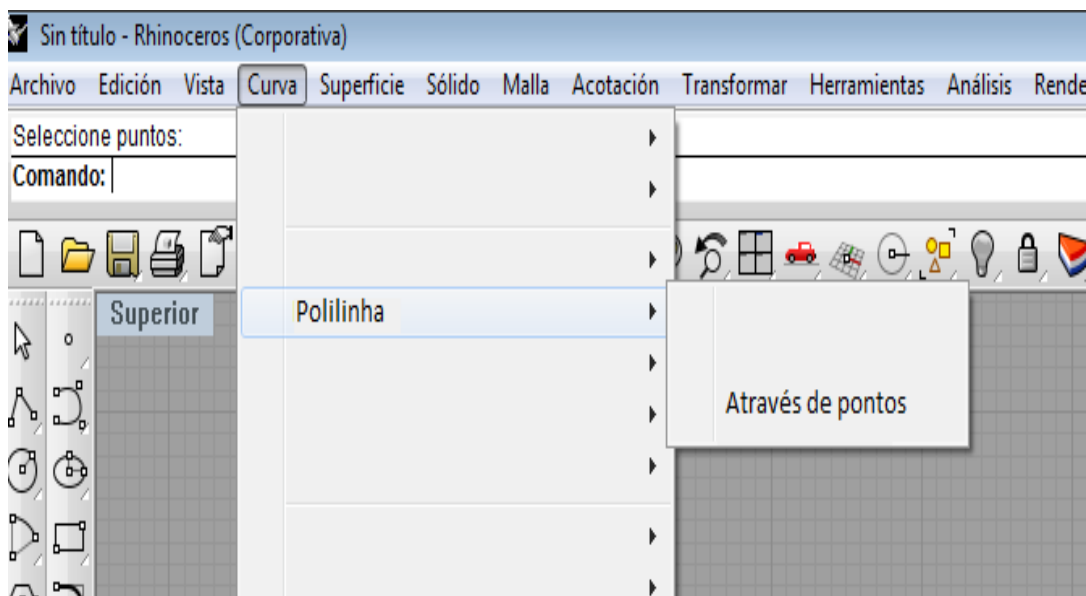


FIGURA 3.21 Janela para gerar curva NURBS com o programa Rhinoceros.

Depois de criar as curvas NURBS, o processo para gerar a superfície NURBS, foi realizado da seguinte forma:

- ✓ No comando *Superficie*, selecione transição (*loft*) (FIGURA 3.22).
- ✓ O programa solicita as curvas NURBS geradas anteriormente para poder gerar a SUPERFÍCIE NURBS.

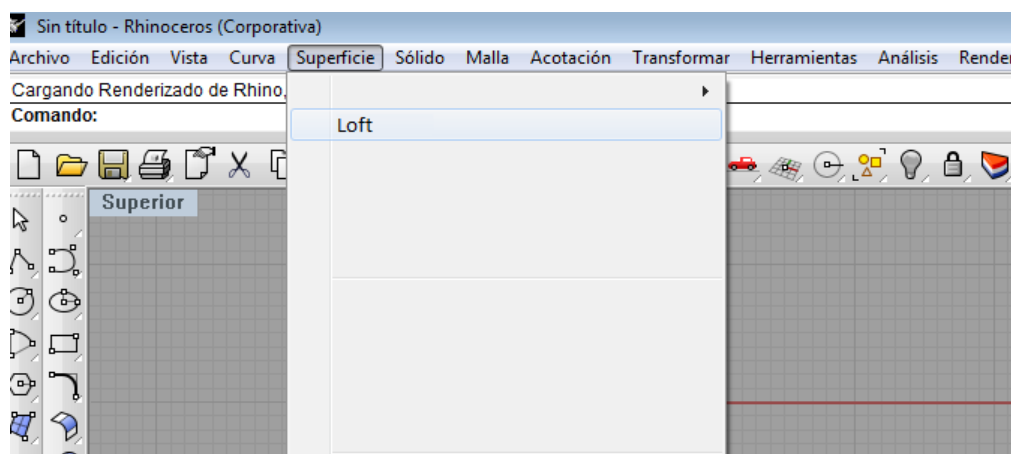


FIGURA 3.22 Janela para gerar superfície NURBS com o programa Rhinoceros.

A análise dos desvios dos pontos medidos em relação a superfícies NURBS ajustados foi realizada conforme descrito na seção 3.5.1.

Uma vez construídas as superfícies com os resultados de cada MMC, com seus respectivos desvios padrões, foi realizada a fusão de dados, para isto, foi criado um plano com cada nuvem de pontos de cada máquina como é mostrado na FIGURA 3.23.

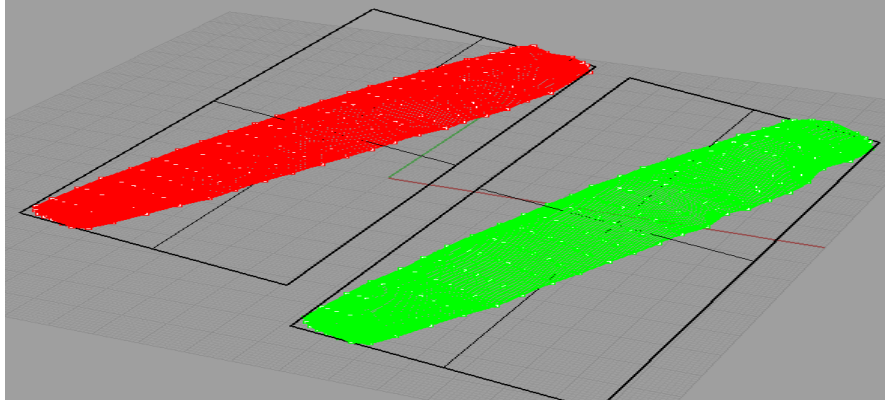


FIGURA 3.23 Fusão de dados através de planos guiados; Superfície vermelha: MMC Cantilever; Superfície Verde: MMC Braço Articulado.

A fusão das superfícies geradas foi feita usando comandos do *software* Rhinoceros de acordo com o seguinte roteiro:

- ✓ No comando *Transformar*, selecione *Orientar* (FIGURA 3.24).
- ✓ Depois o comando *Orientar*, selecione a opção *A partir de 3 pontos* (*A partir de 3 pontos*).

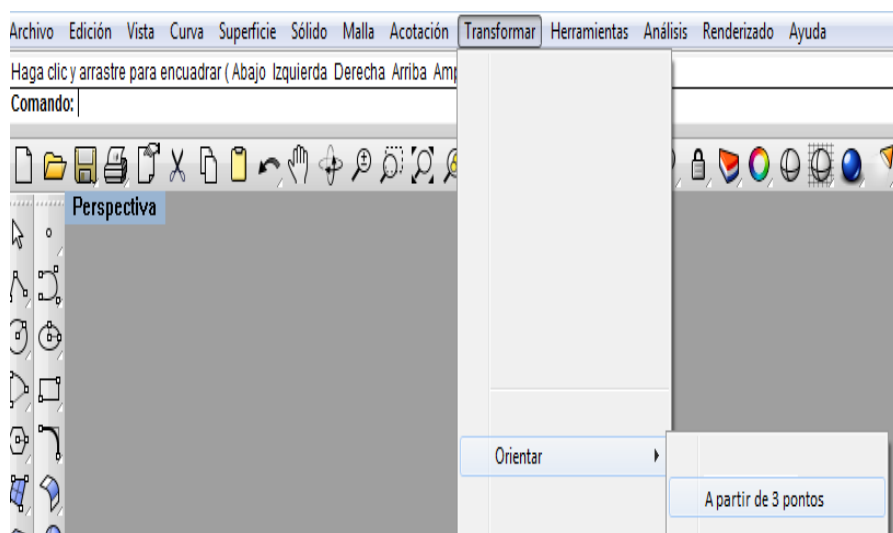


FIGURA 3.24 Janela para alinhar dois planos para fazer fusão de pontos superfície.

- ✓ Selecione a superfície que você quer mover (*após selecionado fica em cor amarela*), clicando em três pontos de referência nos vértices do plano construído (FIGURA 3.25a), depois selecione três pontos nos mesmos vértices do plano da outra superfície construída (FIGURA 3.25b).

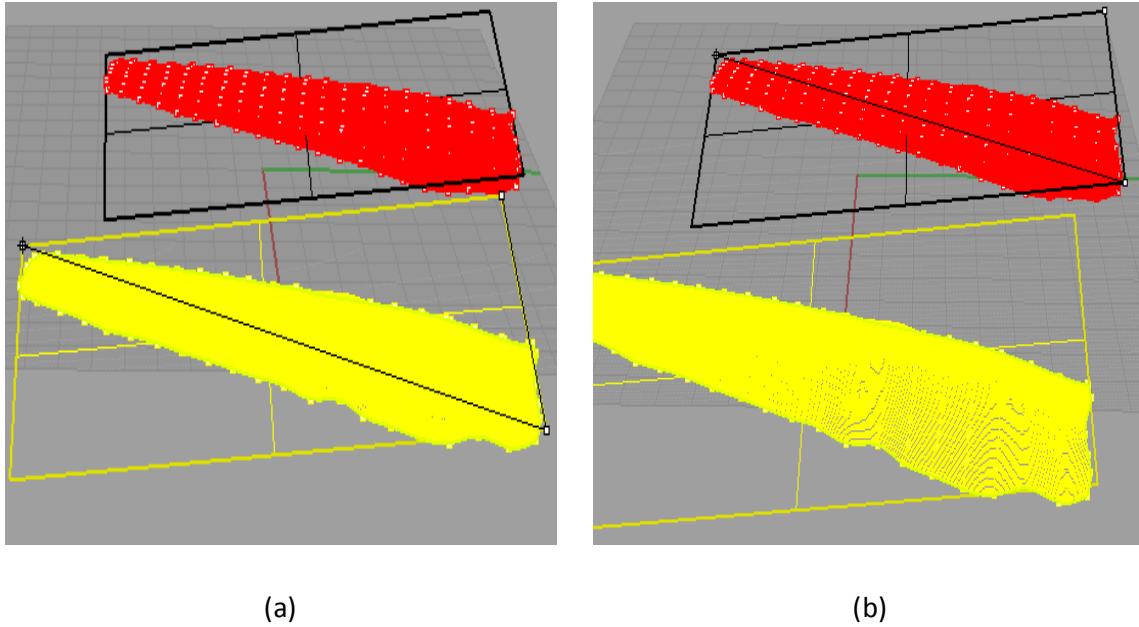


FIGURA 3.25 Alinhamento das superfícies mediante planos para a fusão de dados, (a) superfície MMC Braço Articulado, (b) MMC Cantilever.

O resultado final da orientação das duas superfícies está mostrado FIGURA 3.26, onde as curvas e as superfícies encontram-se visualmente próximas umas das outras.

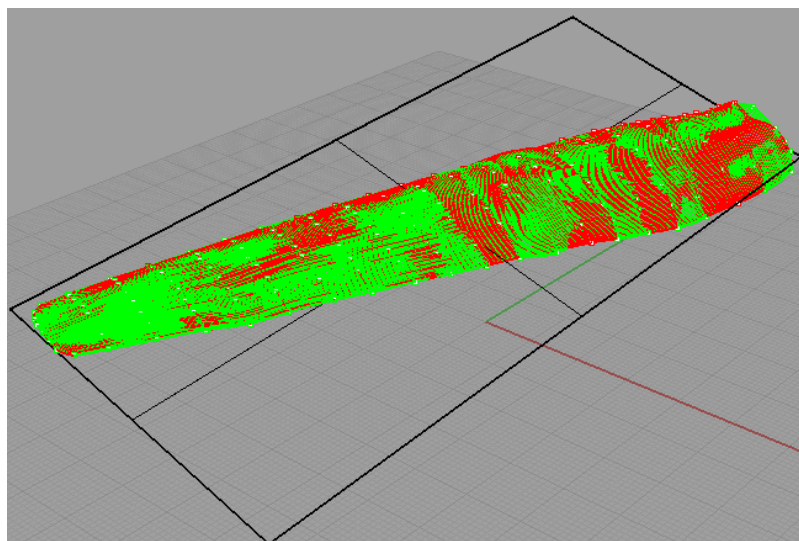


FIGURA 3.26 Planos fusionados, superfícies sobrepostas.

A próxima etapa é determinar a superfície média, a qual corresponde à superfície de fusão de dados. O programa Rhinoceros foi usado para esta tarefa que permite gerar curvas médias a partir das curvas das superfícies originais com a finalidade de gerar a curva NURBS média (FIGURA 3.27).

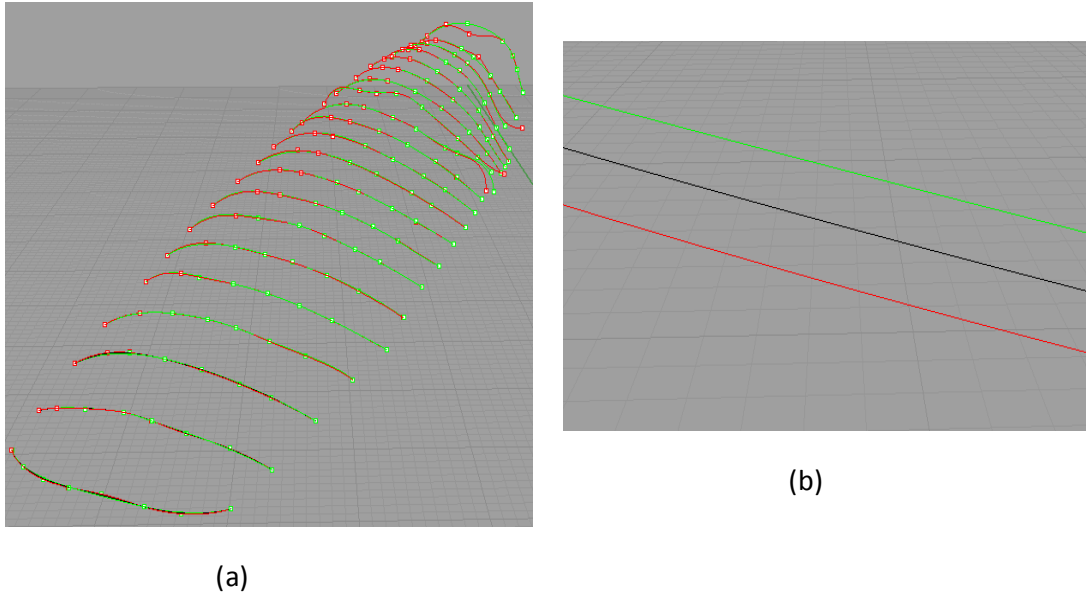


FIGURA 3.27 (a) Modelo para encontrar a curva média, (b) linha preta - curva média.

Para gerar as curvas médias com as curvas obtidas nas duas MMCs, devem ser executados os seguintes comandos no *software* Rhinoceros:

- ✓ No comando *Curva*, selecione *Curva média* como se mostra na FIGURA 3.28.
- ✓ Depois, selecione cada curva de cada MMC, para que o programa calcule a curva média NURBS.

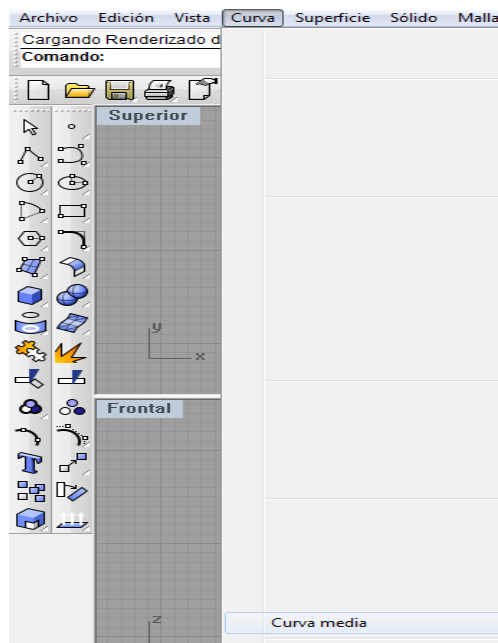


FIGURA 3.28 Janela para criar curva média NURBS.

Finalmente a superfície é ajustada conforme a o explicado anteriormente, e é feita a análise dos desvios de todos os pontos em relação à superfície média criada como foi descrito na seção 3.5.1.

### 3.6 Determinação da Incerteza de Medição

A determinação da incerteza de medição foi feita para a superfície plana ao esquadro e para a superfície de forma livre da pá da hélice, com os dados obtidos na medição com as MMCs Braço Articulado e Cantilever.

#### 3.6.1 Cálculo da Incerteza para as curvas determinadas.

O cálculo de incerteza padrão associada às curvas determinadas com os dados obtidos nas MMCs Braço articulado e Cantilever, foi feito considerando a função empregada para o ajuste do modelo. Como já explicado, os pontos determinados na referida MMC foram ajustados a modelos NURBS (curvas), com o emprego do *software* Rhinoceros. Assim, a expressão 3.1 apresenta o valor de uma curva ( $c_i$ ) em função dos pontos medidos  $p_i$ .

$$c_i = f(p_i) \quad (3.1)$$

A determinação dos parâmetros do modelo NURBS é tarefa complexa, e a aplicação da lei da propagação das incertezas é dificultada pela complexidade destes modelos. Assim, optou-se por considerar um modelo aditivo para as incertezas propagadas, ou seja, a incerteza dos pontos  $c_i$  da curva ajustada ( $u_{c_i}$ ) é determinada em função das incertezas dos pontos medidos na MMC ( $u_{p_i}$ ) e da curva ajustada ( $u_{NURBS_i}$ ), conforme mostra a equação 3.2.

$$u_{c_i}^2 = u_{p_i}^2 + u_{NURBS_i}^2 \quad (3.2)$$

A incerteza ( $u_{p_i}$ ) do ponto medido na MMC<sub>i</sub> forma-se  $u_{p_{MMC1}}$  para a MMC Cantilever, e  $u_{p_{MMC2}}$  para a MMC Braço Articulado, sendo um valor determinado em função das incertezas de apalpação  $u_{apal_i}$  e de incerteza da MMC  $u_{MMC_i}$ , além as incertezas associadas à variação de temperatura ( $u_{\Delta T20}$  e  $u_{\Delta Tdif}$ ). A incerteza  $u_{\Delta T20}$  equivale a incerteza associada à diferença da temperatura ambiente na sala de medição e 20°C, enquanto que a incerteza  $u_{\Delta Tdif}$  corresponde à incerteza associada à diferença entre as temperaturas da MMC e da peça medida. As expressões 3.3, 3.4 e 3.5 apresentam as equações de cálculo destas incertezas.

$$u_{p_i}^2 = u_{MMC_i}^2 + u_{apal_i}^2 + u_{\Delta T20}^2 + u_{\Delta Tdif}^2 \quad (3.3)$$

$$u_{\Delta T20}^2 = \left( \frac{1000 \cdot L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T1}{2 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 + (1000 \cdot L \cdot \Delta\alpha \cdot u_T)^2 + (1000 \cdot L \cdot \Delta T1 \cdot u_\alpha)^2 \quad (3.4)$$

$$u_{\Delta Tdif}^2 = \left( \frac{1000 \cdot L \cdot \Delta\alpha \cdot \Delta T2}{2 \cdot \sqrt{3}} \right)^2 + (1000 \cdot L \cdot \Delta\alpha \cdot u_T)^2 + (1000 \cdot L \cdot \Delta T2 \cdot u_\alpha)^2 \quad (3.5)$$

Nas equações 3.4 e 3.5, o valor de L equivale ao deslocamento do apalpador da MMC desde a origem do sistema de coordenadas até o ponto medido,  $\Delta\alpha$  é a diferença entre os coeficientes de expansão térmica da peça e da MMC,  $\Delta T1$  é a diferença entre a temperatura ambiente e 20°C, ( $T_{amb}-20^\circ C$ ),  $\Delta T2$  é a diferença de temperatura entre a MMC e a peça, ( $T_{MMC}-T_{peça}$ ), ainda  $u_T$  é a incerteza padrão na determinação das temperaturas e  $u_\alpha$  é a incerteza padrão associado com o coeficiente de expansão térmica.



Para a MMC Cantilever a expressão 3.3 fica como mostrado na expressão 3.6, enquanto que para a MMC Braço Articulado fica como mostra a expressão 3.8.

$$u_{c_{MMC1}}^2 = u_{\Delta T20}^2 + u_{\Delta T dif}^2 + u_{MMC1}^2 + u_{apal1}^2 + u_{NURBS1}^2 \quad (3.6)$$

$$u_{c_{MMC2}}^2 = u_{\Delta T20}^2 + u_{\Delta T dif}^2 + u_{MMC2}^2 + u_{apal2}^2 + u_{NURBS2}^2 \quad (3.7)$$

As tabelas 3.1 e 3.2 apresentam informações para a determinação das incertezas padrão, como distribuição de probabilidade, tipo de incerteza padrão considerada, símbolo e número de graus de liberdade. A incerteza associada às curvas ajustadas foi determinado a partir da análise dos desvios feita no programa Rhinoceros,  $\mu_{NURBS_i}$ , sendo considerada como desvios padrão das média dos desvios, e determinada dividindo o desvio padrão dos desvios pela raiz quadrada do número de pontos medidos (incerteza tipo A).

**TABELA 3.1 Fontes de incerteza padrão envolvidas na medição MMC-Cantilever.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DE INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$
$u_{\Delta T dif}$	B	Retangular	$\infty$
$u_{MMC1}$	B	Normal	$\infty$
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$
$u_{NURBS}$	A	Normal	n-1

**TABELA 3.2 Fontes de incerteza padrão envolvidas na medição MMC Braço Articulado.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DE INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$
$u_{\Delta T dif}$	B	Retangular	$\infty$
$u_{MMC2}$	B	Normal	$\infty$
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$
$u_{NURBS}$	A	Normal	n-1

Para o estudo do plano com o Esquadro de granito, a peça tem uma incerteza padrão especificada na folha de calibração, onde é considerada como uma fonte de erro tipo B com distribuição normal, que deve ser levado em conta para o cálculo geral da incerteza combinada para a medição para as duas MMCs, a expressão 3.6 fica como mostrado na expressão 3.8 para a MMC Cantilever, enquanto que para a MMC Braço Articulado fica como mostra a expressão 3.9.

$$u_{c_1}^2 = u_{\Delta T20}^2 + u_{\Delta Tdif}^2 + u_{MMC1}^2 + u_{apal_1}^2 + u_{Esqu}^2 + u_{NURBS_1}^2 \quad (3.8)$$

$$u_{c_2}^2 = u_{\Delta T20}^2 + u_{\Delta Tdif}^2 + u_{MMC2}^2 + u_{apal_2}^2 + u_{Esqu}^2 + u_{NURBS_2}^2 \quad (3.9)$$

### 3.6.2 Cálculo da Incerteza na Fusão de Dados.

A incerteza padrão combinada de um ponto na curva de fusão de dados ( $c_i$ ) pode ser determinada considerando o método aplicado. Neste trabalho, as curvas de fusão foram determinadas pela média das curvas obtidas com dados das MMCs Braço articulado e Cantilever. A equação 3.8 apresenta a expressão de obtenção destas curvas da fusão  $c_i$ , onde o termo  $\Delta A$  equivale ao alinhamento antes do ajuste dos modelos NURBS. A equação 3.9 apresenta o cálculo da incerteza, aplicando propagação de incertezas em 3.8.

$$c_f = \frac{c_{MMC1} + c_{MMC2}}{2} + \Delta A \quad (3.10)$$

$$u_{c_f}^2 = \left( \frac{\partial c_f}{\partial c_{MMC1}} \right)^2 u_{MMC1}^2 + \left( \frac{\partial c_f}{\partial c_{MMC2}} \right)^2 u_{MMC2}^2 + \left( \frac{\partial c_f}{\partial \Delta A} \right)^2 u_{\Delta A}^2$$

$$u_{c_f}^2 = \frac{1}{4} u_{MMC1}^2 + \frac{1}{4} u_{MMC2}^2 + u_{\Delta A}^2$$

$$u_{c_f}^2 = \frac{1}{4} (u_{MMC1}^2 + u_{MMC2}^2) + u_{\Delta A}^2 \quad (3.11)$$

## 4. Resultados Experimentais

### 4.1 Modelos CAD e Análise da Incerteza para o Plano do Esquadro de Granito.

#### 4.1.1. Modelos CAD- Plano do Esquadro com apalpador de 3 mm e 6 mm.

Neste item são apresentados os planos gerados com as nuvens de pontos determinados com as duas MMCs, primeiro para a Cantilever (FIGURA 4.1a), depois para o Braço Articulado (FIGURA 4.1b). Por último, o modelo de fusão de dados é apresentado (FIGURA 4.1c) com os pontos obtidos nas duas máquinas. A localização dos pontos medidos foi a mesma, de acordo com a marcação na superfície plana do esquadro. A diferença na localização dos pontos, observada na FIGURA 4.1c, foi devida à variação quando da localização do apalpador sobre a superfície plana.

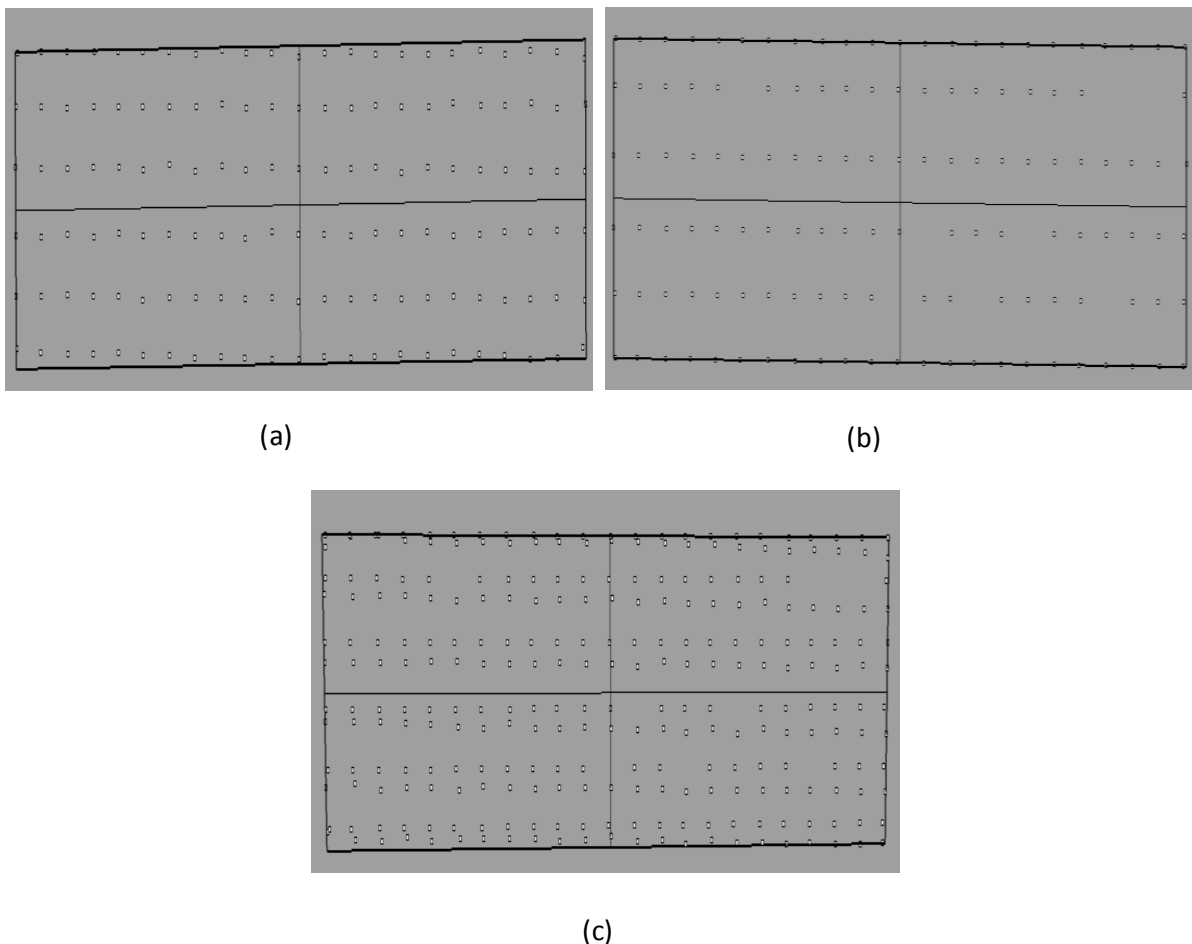


FIGURA 4.1 (a) Plano Esquadro de Granito - MMC Cantilever, (b) Plano Esquadro de Granito - MMC Braço Articulado, (c) Plano de Fusão.

A avaliação dos desvios entre os pontos medidos e os planos gerados está apresentada na FIGURA 4.2, para as medições executadas com as MMCs Cantilever (a) e Braço articulado (b). Os pontos determinados na MMC Cantilever foram obtidos usando uma sonda de gatilhamento com apalpador esférico de diâmetro 3 mm, enquanto que uma sonda rígida com apalpador esférico de 6 mm de diâmetro foi usada na MMC Braço articulado.

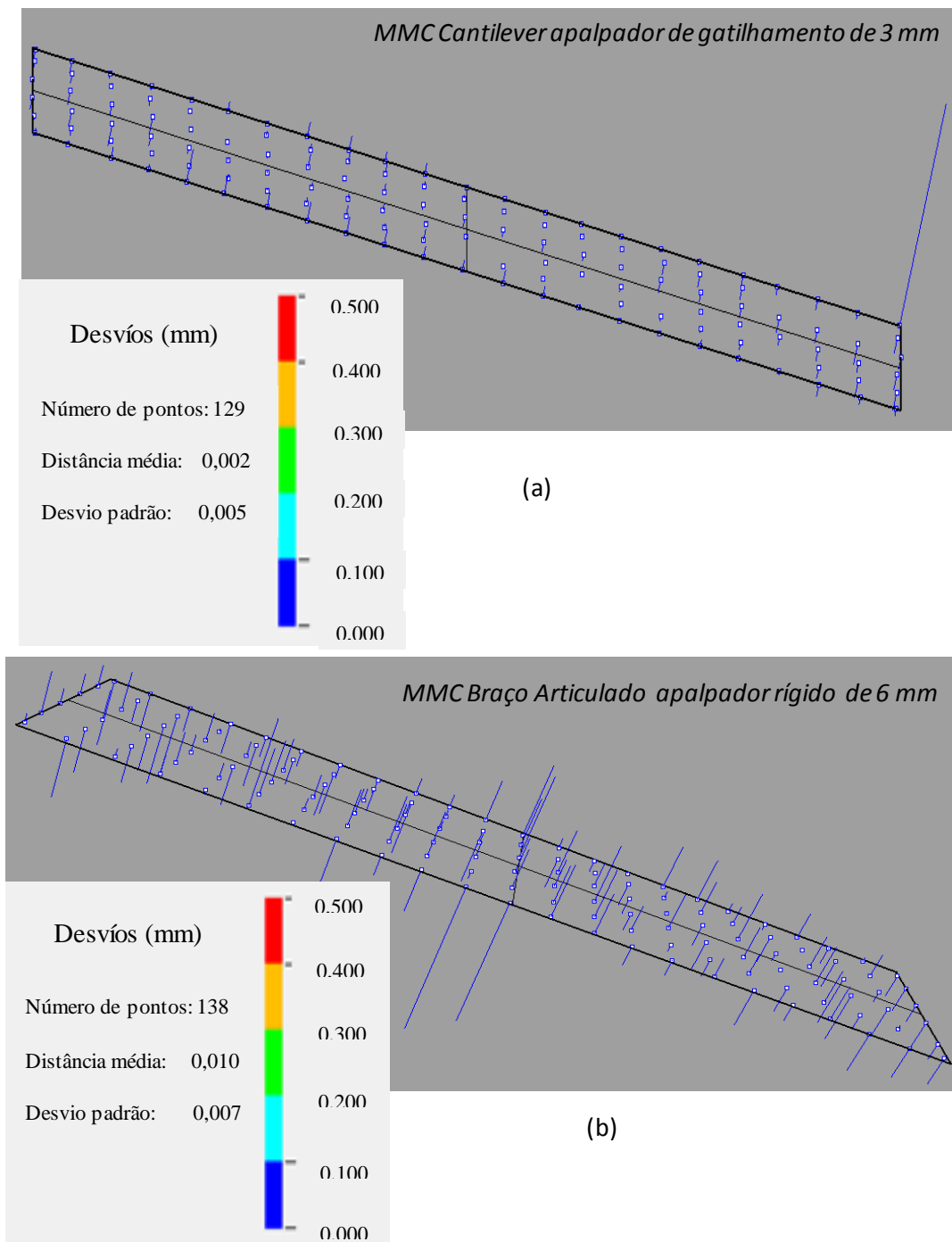


FIGURA 4.2 Análise dos desvios dos pontos em relação ao Plano Esquadro de Granito, (a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado.

Nas figuras anteriores pode-se observar que há uma grande quantidade de desvios entre 0 e 0,1 mm, denotado pelos traços de cor azul. Pode-se observar que os pontos no plano gerado com os dados da MMC Braço articulado apresentam desvios similares aos da MMC Cantilever o que pode ser quantitativamente representado pelos desvios padrões de 0,007 mm e 0,005 mm, respectivamente, e enquanto as distancia médias também foram próximas 0,010 mm e 0,002 mm respetivamente.

A avaliação dos desvios entre os pontos medidos e o plano de fusão de dados está mostrada na FIGURA 4.3. Esta análise foi feita utilizando comandos do programa Rhinoceros, sendo que o plano de fusão foi obtido a partir de três pontos de referência retirados de cada plano.

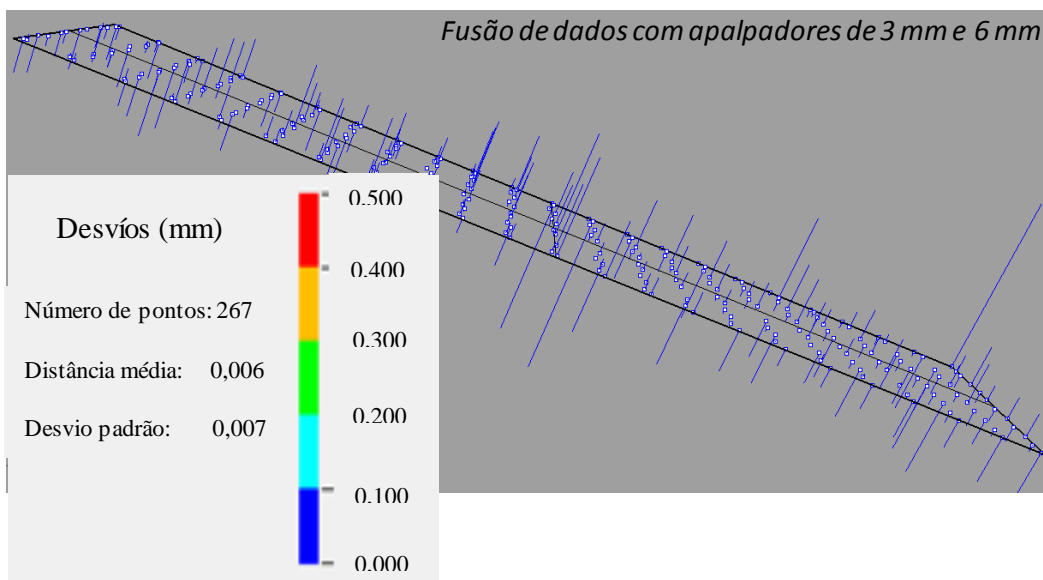


FIGURA 4.3 Análise dos desvios dos pontos em relação com o Plano Esquadro de Granito para a Fusão de Dados

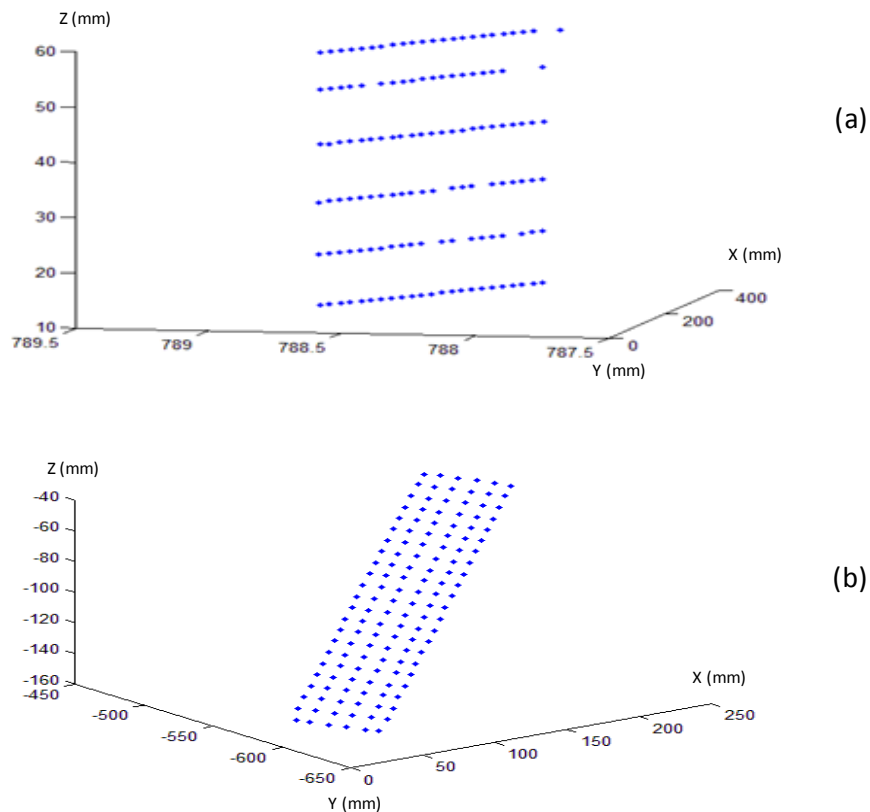
Nesta figura pode-se observar que o comportamento foi o mesmo com respeito às duas MMCs, sendo observado uma grande quantidade de desvios entre 0 e 0,1 mm, denotado pelos traços de cor azul. Observou-se que os pontos no plano de fusão apresentam desvios iguais aos da MMC Braço articulado, o que pode ser quantitativamente representado pelos desvios padrões de 0,007 mm, e enquanto as médias foram de 0,010 mm para a MMC Braço articulado e 0,006 mm e fusão.

A Tabela 4.1 apresenta um resumo dos resultados obtidos para as duas máquinas e também os resultados de fusão. Os resultados foram obtidos seguindo o roteiro explicado no Capítulo 3.

**TABELA 4.1** Resumo de Análise dos desvios para modelo CAD do Plano do Esquadro de Granito

	Cálculo de desvios com software Rhinoceros		
	<i>Cantilever</i>	<i>Braço Articulado</i>	<i>Fusão de Dados</i>
<b>Número de pontos</b>	129	138	267
<b>Distância média (mm)</b>	0,002	0,010	0,006
<b>Desvio Padrão (mm)</b>	0,005	0,007	0,007

Uma verificação do método de ajuste dos pontos medidos foi feita para os dados da MMC Cantilever e da MMC Braço Articulado. Foi elaborado um algoritmo Matlab para fazer o ajuste dos pontos medidos do plano, usando o método de mínimos quadrados, para comparar com os resultados obtidos no programa Rhinoceros (NURBS). O algoritmo possibilitou a construção dos gráficos para a MMC Cantilever (FIGURA 4.4a) e MMC Braço Articulado (FIGURA 4.4b), além dos valores da medida e desvios padrão dos desvios ponto-plano Tabela 4.2.



**FIGURA 4.4** Gráfico dos pontos do Esquadro de Granito em Matlab (a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado.

**TABELA 4.2 Análise dos desvios dos pontos em relação com o plano em Matlab.**

	<b>Cálculo de desvios com software Matlab</b>	
	<i>Cantilever</i>	<i>Braço Articulado</i>
<b>Número de pontos</b>	129	138
<b>Distância média (mm)</b>	0,003	0,010
<b>Desvio Padrão (mm)</b>	0,005	0,008

Observando as FIGURAs 4.4a e 4.4b, pode-se observar que a origem e orientação dos eixos diferem de uma MMC para outra, sendo que o método de fusão de dados deve proporcionar translação e rotação necessárias para o alinhamento. A Tabela 4.2 mostra os resultados dos desvios de pontos com respeito à superfície, obtidos com o programa Matlab, usando o método dos mínimos quadrados. Estes resultados foram muito próximos dos obtidos com o *software* Rhinoceros que emprega ajuste de curvas NURBS, como pode ser observado pelos valores do desvio padrão e da média em cada MMC.

#### **4.1.2. Análise da Incerteza padrão combinada e Expandida para o plano do Esquadro de Granito com apalpador de 3 mm e 6 mm.**

Para a determinação da incerteza padrão combinada, foram obtidas as incertezas padrão associadas às variáveis de influência. Uma variável relacionada às duas máquinas é a temperatura, considerada como uma fonte de erro e incerteza que afeta a medição. Para as incertezas relacionadas com a mudança da temperatura em relação à temperatura de referência foi trabalhado com as equações 3.4 onde relaciona a temperatura do ambiente com a temperatura de referência ( $u_{\Delta T20}$ ), e equação 3.5 que relaciona a diferença de temperatura entre a peça e a MMC ( $u_{\Delta Tdif}$ ).

Nestas expressões, têm-se os valores de: L 200 mm, que equivale ao comprimento do plano de esquadro de granito;  $\Delta\alpha$  é a diferença de coeficiente de expansão térmica da material da peça que é granito ( $\alpha= 11 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ), com o coeficiente de dilatação térmica da material da máquina que foi considerado de alumínio ( $\alpha=24 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) (Matweb, 2012);  $\Delta T1$  é a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de referência 20  $^\circ\text{C}$ ;  $u_T$  é a incerteza padrão do termômetro utilizado (indicado por certificados de calibração);  $u_\alpha$  é a incerteza padrão associada ao coeficiente térmico linear da peça;  $\Delta T2$  é a diferença entre MMC (20,8 $^\circ\text{C}$ ) e temperatura da peça (20,4 $^\circ\text{C}$ ).

O termômetro usado tem uma resolução 0,1 °C, com incerteza padrão 0,05 °C, indicada no seu certificado calibração. A Tabela 4.3 mostra todos os valores de entrada nesta equação.

**TABELA 4.3 Valor de cada parâmetro e cálculo da incerteza de temperatura para o plano do Esquadro de Granito.**

PARÂMETRO	VALOR
$L$ (mm)	200
$\Delta\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	$13 \times 10^{-6}$
$\Delta T1$ (°C)	1
$u_T$ (°C)	0,05
$u_\alpha$ (°C <sup>-1</sup> )	$1,1 \times 10^{-6}$
$\Delta T2$ (°C)	0,4
$u_{\Delta T20}$ ( $\mu m$ )	0,8
$u_{\Delta Tdif}$ ( $\mu m$ )	0,3

Para calcular a incerteza padrão do modelo CAD, foi usada a equação 4.1, onde o desvio padrão ( $\mu m$ ) foi obtido com o programa Rhinoceros para os desvios ponto-superfície no ajuste do modelo NURBS, sendo no número de pontos obtidos no modelo CAD.

$$u_{NURBS} = s / \sqrt{n} \quad (4.1)$$

Para o valor de  $u_{NURBS_1}$ , com a MMC Cantilever, este valor é obtido por:

$$u_{NURBS_1} = 5 / \sqrt{129}$$

$$\mathbf{u_{NURBS_1} = 0,4 \mu m}$$

A incerteza padrão da MMC Cantilever foi obtida a partir do certificado de calibração, conforme mostra a equação (4.2), para o cálculo da incerteza expandida (fator de abrangência  $k=2,1$  para um nível de confiança de 95%). Nesta expressão, o valor  $L$  é comprimento do esquadro de 200 milímetros.

$$U_{MMC1} = 1,2 + \frac{L}{600} (\mu m) \quad (4.2)$$

$$U_{MMC1} = 1,2 + \frac{200}{600} (\mu m)$$

$$\mathbf{U_{MMC1} = 1,5 (\mu m)}$$



Para calcular a incerteza padrão combinada das MMCs foi utilizada a equação 4.3

$$u_c = U/k \quad (4.3)$$

Para o cálculo da incerteza padrão da MMC Cantilever; têm-se os seguintes cálculos:

$$u_{MMC1} = U_{MMC1}/k$$

$$u_{MMC1} = 1,5/2,1$$

$$u_{MMC1} = 0,7 \text{ (}\mu\text{m)}$$

A equação 3.8 foi aplicada para calcular a incerteza padrão combinada da máquina MMC – Cantilever, para o plano do Esquadro de granito. A Tabela 4.4 mostra os valores obtidos de todas as fontes de incerteza padrão envolvidas no cálculo da incerteza padrão combinada e também mostra da incerteza expandida (probabilidade de 95%) para o esquadro de granito medido com a MMC Cantilever.

A incerteza padrão de apalpação da MMC Cantilever, usando apalpador de 3 mm de diâmetro e sonda de gatilhamento, foi obtida do certificado de calibração, equivalente a 3,2  $\mu\text{m}$ .

A incerteza padrão  $u_{Esqu}$ , referente à planeza da face medida do esquadro, foi determinada pelo certificado de calibração é igual a 0,5  $\mu\text{m}$ .

**TABELA 4.4 Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição, para plano do esquadro de granito medido na MMC-Cantilever com apalpador de 3 mm.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	0,8
$u_{\Delta T dif}$	B	Retangular	$\infty$	0,3
$u_{MMC1}$	B	Normal	$\infty$	0,7
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$	3,2
$u_{Esqu}$	B	Normal	$\infty$	0,5
$u_{NURBS1}$	A	Normal	128	0,4
Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )			$u_{c1}$	3,4
Grau de liberdade efetivo			$v_{\text{eff}}$	$6,7 \times 10^5$
Fator de abrangência			$k$	1,96
Incerteza expandida 95% ( $\mu\text{m}$ )			$U$	6,7

Nesta tabela, pode ser verificado que a fonte de incerteza que tem maior influência é a incerteza de apalpação, com um valor de 3,2  $\mu\text{m}$ .

A incerteza padrão do modelo CAD obtido com o Braço Articulado foi determinada usando a equação 4.1.

$$u_{NURBS2} = 7 / \sqrt{138}$$

$$u_{NURBS2} = 0,6 \mu\text{m}$$

A Tabela 4.5 mostra os dados das incertezas padrão combinada e expandida para o Esquadro de Granito medido com a MMC Braço Articulado. Nesta tabela temos que os valores  $u_{MMC2}$  e  $u_{apal}$  foram obtidos no certificado de calibração da MMC, sendo equivalente a 26,3  $\mu\text{m}$  e 7,7  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

**TABELA 4.5 Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição, para plano de Esquadro de Granito medido com MMC Braço Articulado com apalpador de 6 mm.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	0,8
$u_{\Delta T dif}$	B	Retangular	$\infty$	0,3
$u_{MMC2}$	B	Normal	$\infty$	26,3
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$	7,7
$u_{Esqu}$	B	Normal	$\infty$	0,5
$u_{NURBS2}$	A	Normal	137	0,6
Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )			$u_{c2}$	27,4
Grau de liberdade efetivo			$v_{\text{eff}}$	$5,9 \times 10^8$
Fator de abrangência			$k$	2,18
Incerteza expandida 95% ( $\mu\text{m}$ )			$U$	53,7

A fonte de incerteza que teve maior influência foi a incerteza da máquina, representada pelo valor de 26,3  $\mu\text{m}$ .

A incerteza padrão do modelo CAD  $u_{\Delta A}$ , para a fusão de dados das duas máquinas de medir por coordenadas, pode ser calculada a partir da equação 4.4, como mostra na sequência.

$$u_{\Delta A} = s / \sqrt{n} \quad (4.4)$$

$$u_{\Delta A} = 7 / \sqrt{267}$$

$$u_{\Delta A} = 0,4 \mu m$$

Para calcular a incerteza padrão combinada da fusão e a incerteza expandida a um nível de 95% de confiança deve ser aplicada a equação 3.11. Nesta equação, os valores  $u_{c1}$  e  $u_{c2}$  correspondem às incertezas padrões combinadas das MMCs Cantilever e Braço articulado, respectivamente. Os calculos estão apresentados na Tabela 4.6.

**TABELA 4.6 Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição, da fusão de dados do plano do Esquadro de Granito medidos com as MMCs Cantilever apalpador de 3 mm e Braço Articulado com apalpador de 6 mm.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu m$ )
$u_{c1}$	A	Normal	$6,7 \times 10^5$	3,4
$u_{c2}$	A	Normal	$5,9 \times 10^8$	27,4
$u_{\Delta A}$	A	Normal	266	0,4
	Incerteza padrão combinada ( $\mu m$ )		$u_c$	13,8
	<i>Grau de liberdade efetivo</i>		$v_{eff}$	$2,9 \times 10^7$
	<i>Fator de abrangência</i>		$k$	1,96
	<i>Incerteza expandida 95% (<math>\mu m</math>)</i>		$U$	27

O valor da incerteza padrão combinada que apresenta maior influência nestes resultados foi a incerteza da MMC Braço Articulado.

O valor da incerteza padrão combinada da fusão de dados para o plano do esquadro de granito, usando as MMCs Cantilever e Braço articulado, foi de 13,8  $\mu m$ . A incerteza expandida (95%) foi de 27,0  $\mu m$

#### 4.1.3. Modelos CADs do plano do Esquadro de Granito com sonda rígida e apalpador Ponta seca.

Os pontos da superfície plana do esquadro de granito, obtidos com as duas MMCs com sonda rígida e apalpador Ponta seca, foram usados para ajustar planos com *software* Rhinoceros. Os dados e plano obtidos nas MMCs Cantilever e Braço articulado estão mostrados nas FIGURAs 4.5a e 4.5b. A FIGURA 4.5c mostra os dados das duas MMCs após alinhamento e o plano de fusão.

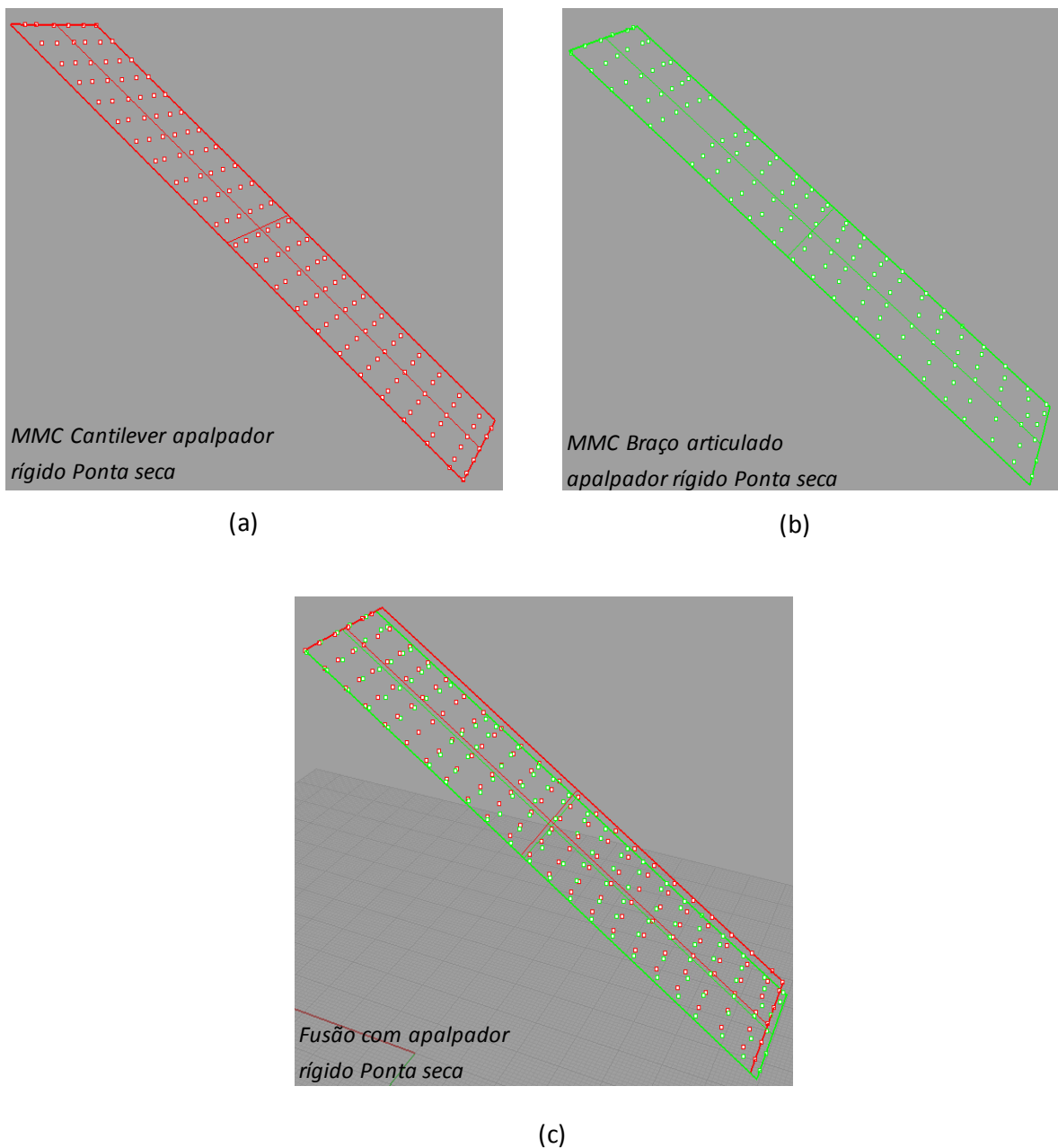


FIGURA 4.5 Plano Esquadro de Granito com apalpador rígido Ponta seca(a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado, (c) Plano de Fusão.

A análise dos desvios entre os pontos e os planos guiados está apresentada na FIGURA 4.6, relativo às MMCs Cantilever e Braço articulado, respectivamente.

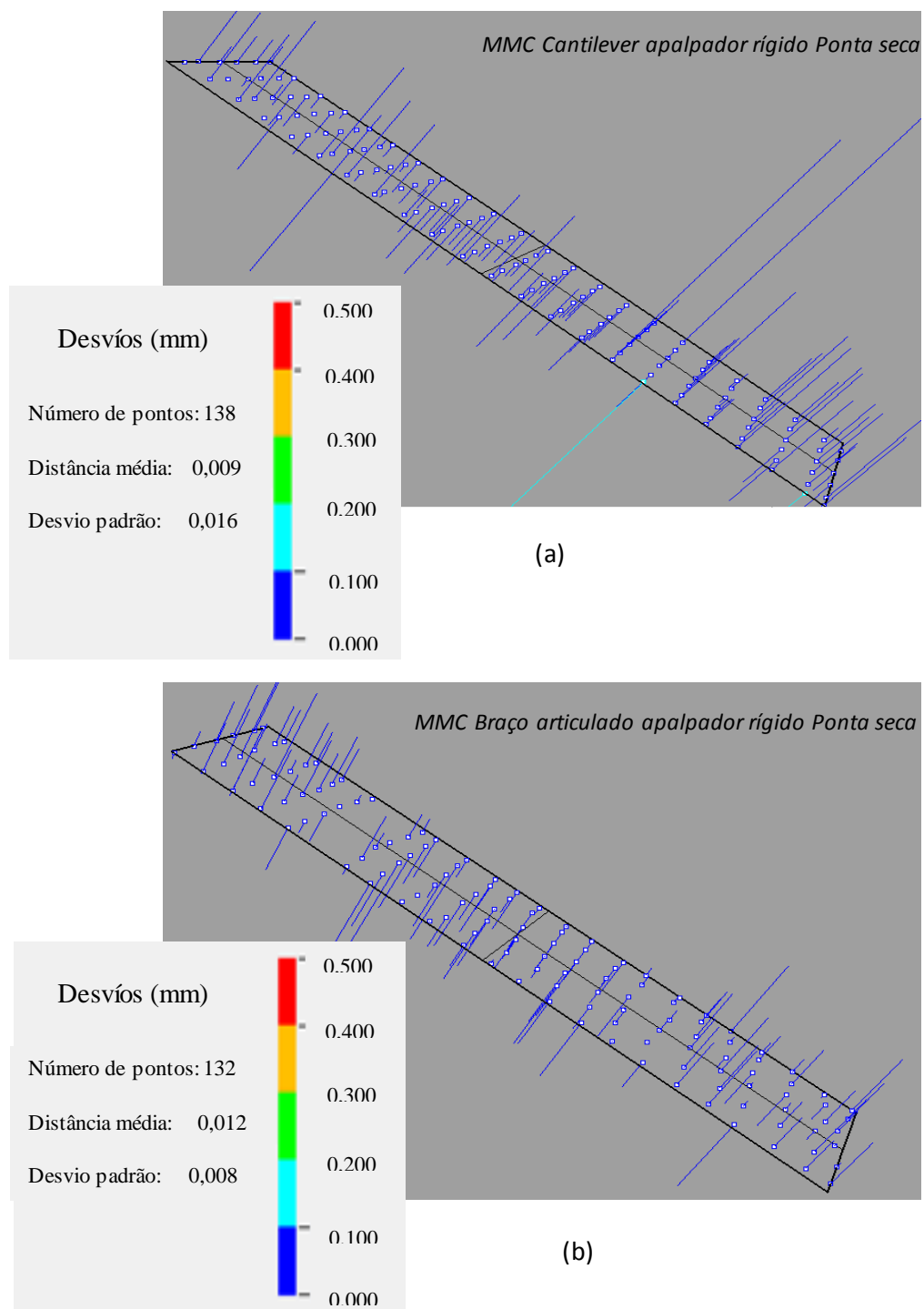


FIGURA 4.6 Análise dos desvios dos pontos em relação ao Plano Esquadro de Granito com apalpador rígido Ponta seca, (a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado.

Comparando a FIGURA 4.2a com a FIGURA 4.6a, que corresponde à MMC Cantilever com apalpador de gatilamento de 3 mm e apalpador rígido de Ponta seca, respectivamente, pode-se observar que o desvio padrão com apalpador rígido de Ponta seca é muito grande com respeito ao obtidos com apalpador de 3 mm representado quantitativamente por 0,016 mm e 0,005 mm. Isto aconteceu porque o apalpador rígido de Ponta seca não foi projetado para ser usado na MMC Cantilever, embora possa ser adaptado e usado com auxílio de um pedal para aquisição de dados. Seu uso na condição estática resultou em maiores erros e incerteza na medição. Analisando as FIGURAS 4.6a e 4.6b, pode-se observar que há uma grande quantidade de desvios entre 0 e 0,1 mm, denotada pelos traços de cor azul. Para a MMC Braço articulado o desvio padrão é de 0,008 mm e para a MMC Cantilever o desvio foi de 0,016 mm, o que demonstra uma diferença grande quando o apalpador é adaptado à máquina MMC Cantilever.

A FIGURA 4.7 apresenta a análise dos desvios da fusão de dados, onde se observa o plano gerado com os pontos determinados nas duas máquinas.

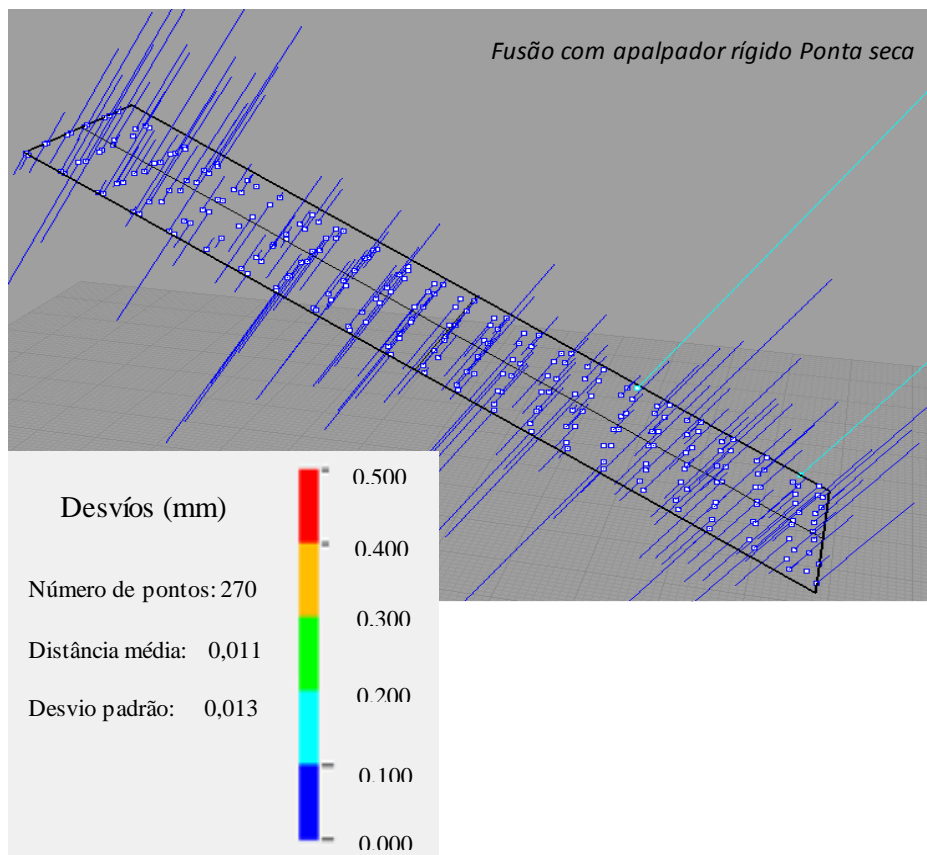


FIGURA 4.7 Análise dos desvios dos pontos em relação com o Plano Esquadro de Granito para a Fusão de Dados com apalpador rígido Ponta seca

Nesta figura, pode-se observar que o desvio padrão foi de 0,013  $\mu\text{m}$  mostrando um comportamento similar à MMC Cantilever. Foram também observados muitos desvios entre 0 e 0,1 mm, denotado pelos traços de cor azul. A Tabela 4.7 mostra o resumo dos resultados obtidos para as duas máquinas como também para a fusão de dados com apalpador rígido Ponta seca.

**TABELA 4.7 Resumo da Análise dos desvios em relação ao modelo CAD do plano do Esquadro de Granito medido com apalpador rígido Ponta seca**

	<b>Máquina de Medir por Coordenadas</b>		
	<i>Cantilever</i>	<i>Braço Articulado</i>	<i>Fusão de Dados</i>
<b>Número de pontos</b>	138	132	270
<b>Distância média (mm)</b>	0,009	0,012	0,011
<b>Desvio Padrão (mm)</b>	0,016	0,008	0,013

Nesta tabela, pode-se observar uma pequena variação nos valores da distância média e também no desvio padrão, comparando com os respectivos valores para o apalpador 3 mm, mostrados na tabela 4.1, nota-se um aumento significativo do valor de distância média e do desvio padrão para a MMC Cantilever e para os resultados de fusão de dados.

#### **4.1.4. Análise da Incerteza padrão combinada e Expandida para o plano do Esquadro de Granito com apalpador rígido Ponta seca.**

Os parâmetros são os mesmos utilizados para o cálculo da incerteza da temperatura, para calcular a incerteza padrão do modelo CAD foi aplicada a equação 4.1, o valor de  $u_{NURBS1}$  com a MMC Cantilever é:

$$u_{NURBS1} = 16 / \sqrt{138}$$

$$u_{NURBS1} = 1,4 \mu\text{m}$$

Como o apalpador rígido Ponta seca não foi calibrado previamente na MMC Cantilever, esta calibração foi feita tomando 18 pontos sobre uma esfera calibrada, medindo o diâmetro desta. A Tabela 4.8 apresenta os valores do erro de calibração do apalpador Ponta seca, como resultado da média e do desvio padrão. Este valor de desvio padrão foi utilizado para o cálculo da incerteza de apalpação associada ao apalpador Ponta secasusado.

**TABELA 4.8 Dados (mm) de calibração de apalpador rígido Ponta seca para o plano do esquadro de granito medido com a MMC Cantilever.**

0,274	0,255	0,258	0,273	0,353	0,395	0,190	0,128	0,123
0,311	0,086	0,354	0,340	0,123	0,184	0,336	0,334	0,180
<i>MÉDIA (mm)</i>							0,249	
<i>DESVIO PADRÃO (mm)</i>							0,096	

A incerteza de apalpação com a Ponta secapara a MMC Cantilever foi determinada com a equação 4.5, relacionando o desvio padrão calculado na calibração e a incerteza da esfera padrão utilizada para sua calibração. O valor corresponde ao número de leituras tomadas e a incerteza da esfera padrão ( $u_{esfera}$ ), foi obtida no certificado de calibração da MMC

$$u_{apal} = s/\sqrt{n} + u_{esfera} \quad (4.5)$$

$$u_{apal} = 96/\sqrt{18} + 0.3$$

$$u_{apal} = 22,9 \mu m$$

A equação 3.8 foi empregada para calcular a incerteza padrão combinada da MMC Cantilever, para o plano do esquadro de granito determinado com o apalpador rígido Ponta seca. A Tabela 4.9 mostra os valores obtidos de todas as fontes de incerteza padrão envolvidas no cálculo da incerteza padrão combinada, mostrando também o cálculo da incerteza expandida para uma probabilidade de 95%.

**TABELA 4.9 Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição para o plano do Esquadro de Granito medido com a MMC-Cantilever com apalpador rígido Ponta seca**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu m$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	0,8
$u_{\Delta Tdif}$	B	Retangular	$\infty$	0,3
$u_{MMC1}$	B	Normal	$\infty$	0,7
$u_{apal}$	A	Normal	17	22,9
$u_{Esqu}$	B	Normal	$\infty$	0,5
$u_{NURBS1}$	A	Normal	137	1,4
Incerteza padrão combinada ( $\mu m$ )			$u_{c1}$	22,9
Grau de liberdade efetivo			$v_{eff}$	17
Fator de abrangência			$k$	2,11
Incerteza expandida 95% ( $\mu m$ )			$U$	48,3



Na Tabela 4.9 pode-se observar que a variável que mais influencia na incerteza padrão combinada é a incerteza de apalpação, com um valor de 22,9  $\mu\text{m}$ . Isto ocorreu porque o apalpador rígido Ponta seca proporciona um aumento na incerteza da MMC Cantilever associada as folgas e erros geométricos.

Para o Braço Articulado, os parâmetros de incerteza de temperatura são os mesmos que foram utilizados para o apalpador de 6 mm, devendo-se determinar a incerteza padrão do modelo CAD para complementar os cálculos. Aplica-se a equação 4.1, e os dados são mostrados na Tabela 4.10 para as incertezas padrão combinada e expandida do Esquadro de Granito com apalpador rígido Ponta seca.

$$u_{NURBS2} = 8 / \sqrt{132}$$

$$u_{NURBS2} = 0,7 \mu\text{m}$$

A equação 3.9 foi aplicada para calcular as incertezas padrão combinada e expandida para a máquina MMC Braço articulado, para o plano do esquadro de granito com apalpador rígido Ponta seca. A Tabela 4.10 mostra os valores obtidos de todas as fontes de incerteza padrão envolvidas no cálculo da incerteza padrão combinada e incerteza expandida.

**TABELA 4.10 Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição para o plano do Esquadro de Granito medido com a MMC Braço Articulado com apalpador rígido Ponta seca.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	0,8
$u_{\Delta T dif}$	B	Retangular	$\infty$	0,3
$u_{MMC2}$	B	Normal	$\infty$	26,3
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$	7,7
$u_{Esqu}$	B	Normal	$\infty$	0,5
$u_{NURBS2}$	A	Normal	131	0,7
Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )			$u_{c2}$	27,4
Grau de liberdade efetivo			$\nu_{eff}$	$3,1 \times 10^8$
Fator de abrangência			$k$	1,96
Incerteza expandida 95% ( $\mu\text{m}$ )			$U$	53,7

Nesta tabela, observa-se que o comportamento foi similar ao obtido com o apalpador de 3 mm, sendo que a fonte de incerteza que teve maior influência foi a incerteza da MMC com um valor de 26,3  $\mu\text{m}$ .

A equação 4.4 foi aplicada para calcular a incerteza padrão do modelo CAD da fusão de dados com duas Máquinas de Medir por Coordenadas. Os dados das incertezas padrão combinadas são apresentados na Tabela 4.11.

$$u_{\Delta A} = 13 / \sqrt{270}$$

$$u_{\Delta A} = 0,8 \mu\text{m}$$

A equação 3.11 foi usada para calcular a incerteza padrão combinada para a fusão de dados, para o plano do esquadro de granito com apalpador Ponta seca e sonda rígida. A Tabela 4.11 mostra os valores obtidos de todas as incertezas padrão envolvidas, da incerteza padrão combinada e da incerteza expandida para uma nível de confiança do 95%.

**TABELA 4.11 Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição da fusão de dados para o plano do Esquadro de Granito medido com as MMCs Cantilever e Braço Articulado com apalpador rígido Ponta seca.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{c1}$	A	Normal	17	22,9
$u_{c2}$	A	Normal	$3,1 \times 10^8$	27,4
$u_{NURBS}$	A	Normal	269	0,8
Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )			$u_{cf}$	17,9
<i>Grau de liberdade efetivo</i>			$\nu_{eff}$	$2,5 \times 10^6$
<i>Fator de abrangência</i>			$k$	1,96
<i>Incerteza expandida 95% (<math>\mu\text{m}</math>)</i>			$U$	35,1

Como mostra a tabela 4.11, o valor da incerteza padrão combinada da MMC Cantilever foi similar com respeito à incerteza da MMC Braço Articulado, de 22,9  $\mu\text{m}$  e de 27,4  $\mu\text{m}$  respectivamente, e isso afetou o resultado da incerteza da fusão de dados. A incerteza padrão combinada foi de 17,9  $\mu\text{m}$ , em quanto que a incerteza expandida (95%) foi de 35,1  $\mu\text{m}$ .

Comparando os resultados obtidos com cada máquina MMC, a incerteza expandida para a MMC Cantilever com apalpador de gatilhamento de 3 mm teve comportamento melhor com um valor de 6,7  $\mu\text{m}$ , em relação ao apalpador rígido Ponta seca que teve uma

incerteza expandida de 48,3  $\mu\text{m}$ . Para MMC Braço Articulado, a incerteza expandida com apalpador rígido de 3 mm e apalpador rígido Ponta seca foi o mesmo, com um valor de 53,7  $\mu\text{m}$ . O método de fusão de dados apresentou uma incerteza expandida com apalpador de 3 mm com um valor de 27  $\mu\text{m}$ , valor menor em relação ao usado do apalpador rígido Ponta seca, com uma incerteza expandida de 35,1  $\mu\text{m}$ .

## 4.2 Modelos CADs e Análise da Incerteza para Pá da Hélice.

### 4.2.1. Modelos CADs para Pá da Hélice com apalpador de sonda rígida Ponta seca.

Os modelos CAD para a pá hélice obtidos a partir dos pontos determinados com duas Máquinas de Medir por Coordenada, são apresentados neste item. Os primeiros dados foram obtidos com apalpador rígido Ponta secapara a máquina MMC Cantilever (FIGURA 4.8a), e para a máquina MMC Braço Articulado (FIGURA 4.8b), além do modelo CAD para Fusão de dados (FIGURA 4.8c). O aspecto dos modelos foi similar, do ponto de vista qualitativo.

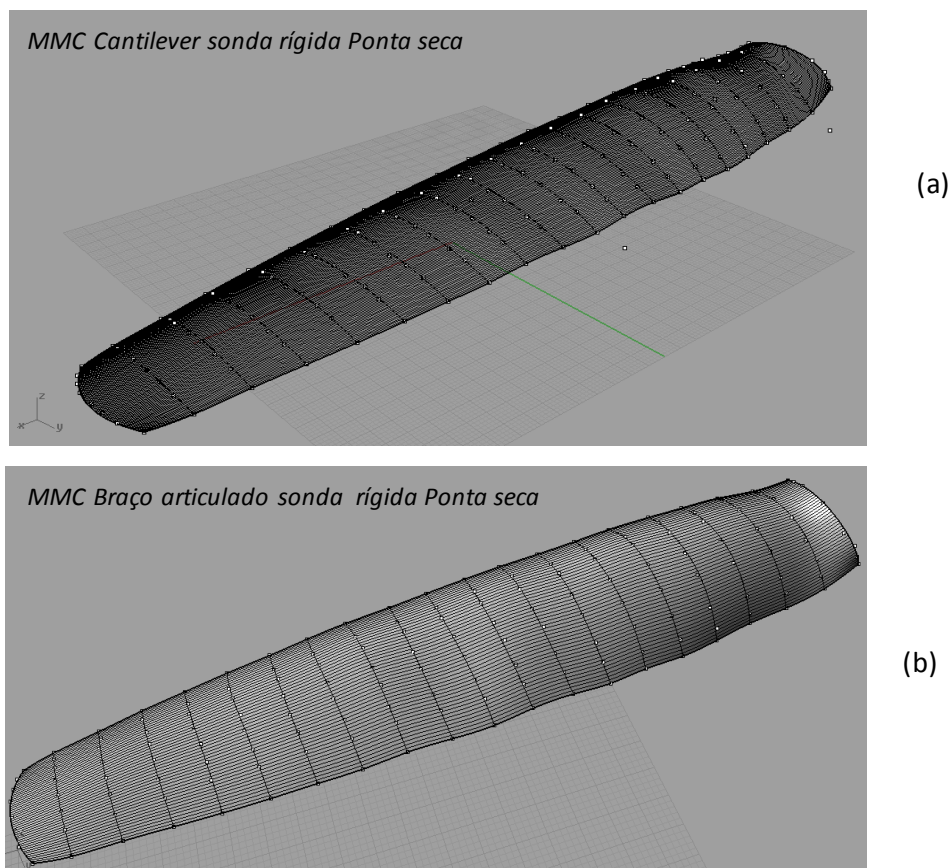


FIGURA 4.8 Modelo CAD Pá da Hélice com apalpador sonda rígida Ponta seca(a) MMC Cantilever, (b) MMC Braço Articulado.

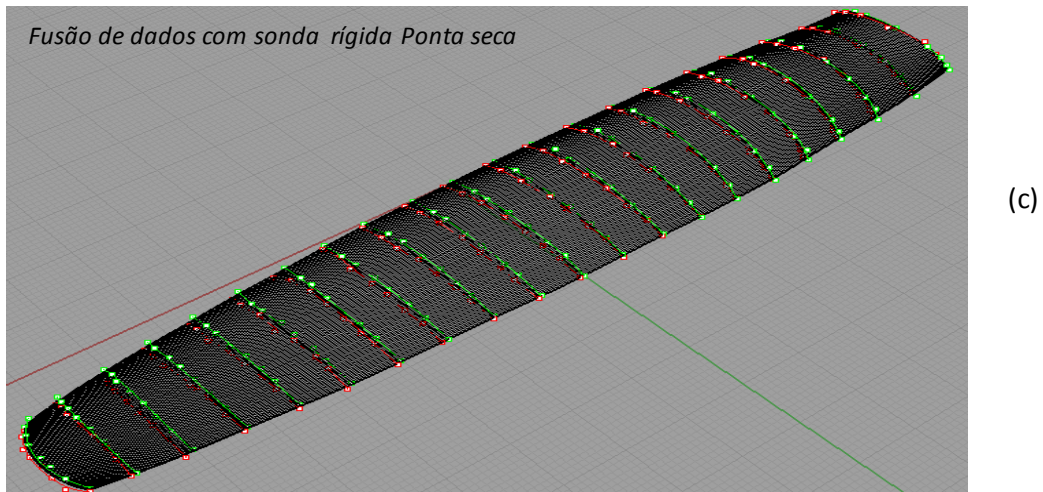


FIGURA 4.8c Modelo CAD Pá da Hélice da fusão de dados com apalpador sonda rígida Ponta seca.

Uma análise quantitativa foi feita pela determinação dos desvios dos pontos medidos em relação ao modelo CAD encontrados na FIGURA 4.9 para as MMCs Cantilever (4.9a) e Braço articulado (4.9b).

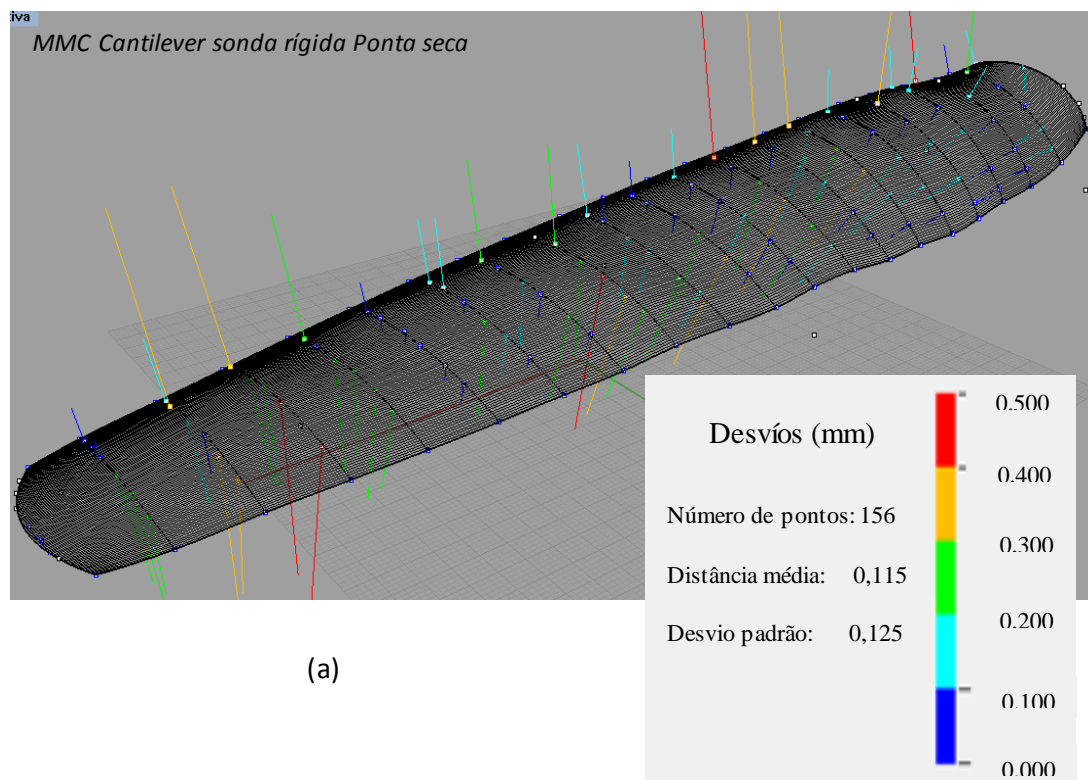
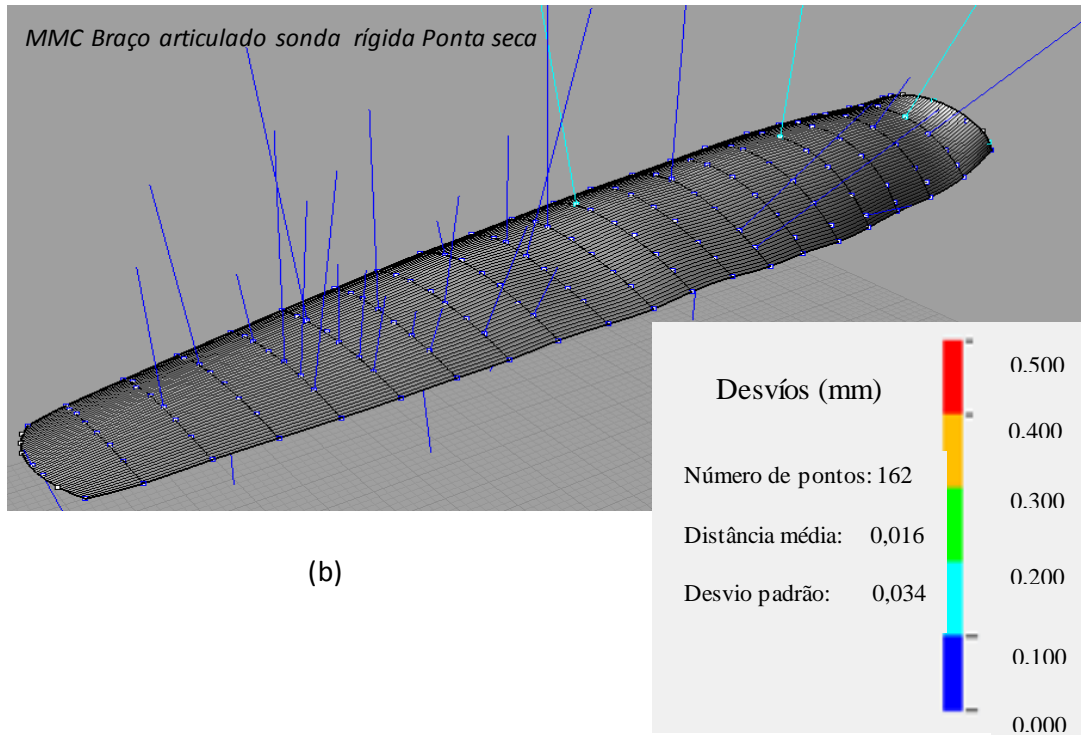


FIGURA 4.9a Análise dos desvios do Modelo CAD da Pá da Hélice medido com apalpador rígido Ponta para a MMC Cantilever.



(b)

FIGURA 4.9b Análise dos desvíos do Modelo CAD da Pá da Hélice apalpador rígido Ponta seca medido com MMC Braço Articulado.

Analisando estas figuras, pode-se observar que o desvio padrão foi de 0,125 mm, para a MMC Cantilever e apalpador Ponta seca sonda rígida, havendo alguns desvíos entre 0,5 e 0,4 mm (cor vermelha), mas com a maioria destes desvíos ficando entre 0 e 0,1 mm, (traços de cor azul). Na FIGURA 4.9b, para a MMC Braço articulado o desvio padrão foi de 0,034 mm, pode-se observar que há uma grande quantidade de desvíos entre 0 e 0,1 mm, denotado pelos traços de cor azul.

A fusão de dados foi feita da mesma maneira implementada para o esquadro de granito o alinhamento dos dados foi feito construindo um plano CAD para cada máquina MMC, depois estes planos foram alinhando tomando três pontos de cada plano com ajuda do *software* Rhinoceros. O *software* faz o alinhamento das duas superfícies através destes pontos e depois determina as curvas médias entre as curvas da Cantilever e as curvas obtidas com o Braço articulado. Assim, a superfície média é obtida com as curvas médias, sendo que a análise dos desvíos para o modelo CAD da fusão de dados está apresentada na FIGURA 4.10.

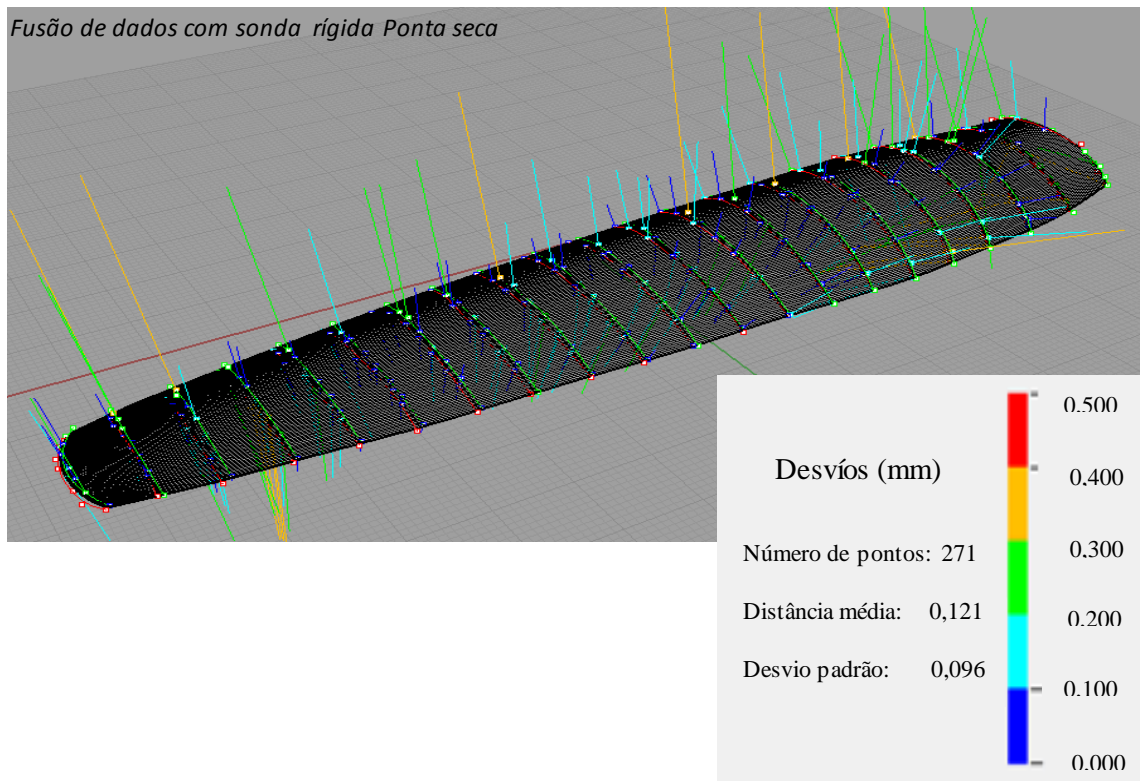


FIGURA 4.10 Análise dos desvios para o Modelo CAD da Pá da Hélice com apalpador sonda rígida Ponta seca na Fusão de Dados.

Nesta figura observa-se que o desvio padrão obtido com o apalpador rígido de Ponta seca para a fusão de dados foi de 0,096 mm, havendo uma grande quantidade de desvios entre 0,2 e 0,3 mm denotados pela cor verde, e alguns entre 0,3 e 0,4 mm (cor laranja).

A Tabela 4.12 mostra um resumo dos dados obtidos para a Pá Hélice para as duas máquinas com apalpador sonda rígida Ponta seca, como também mostram os dados de fusão.

TABELA 4.12 Resumo de Análise de desvios para modelo CAD Pá da Hélice com apalpador de sonda rígida Ponta seca.

	Máquina de Medir por Coordenada		Fusão de Dados
	Cantilever	Braço Articulado	
Número de pontos	156	162	271
Distância média (mm)	0,115	0,016	0,121
Desvio Padrão (mm)	0,125	0,034	0,096

#### 4.2.2 Análise da Incerteza padrão combinada e Expandida para Pá da Hélice com apalpador de sonda rígida Ponta seca.

As mesmas equações anteriormente descritas para o cálculo da incerteza padrão da temperatura devem ser aplicadas para determinação da incerteza padrão combinada e expandida da pá da hélice. Nestas expressões,  $L$  é 153 mm,  $\Delta\alpha$  é a diferença de coeficiente de expansão térmica do material da peça RenShape ( $63,7 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) com o coeficiente de expansão térmica do material da máquina que foi considerado de alumínio ( $24 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) (Matweb, 2012),  $\Delta T1$  é a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de referência  $20^\circ\text{C}$ ,  $u_T$  é a incerteza padrão do termômetro utilizado (indicado no certificado de calibração),  $u_\alpha$  a incerteza padrão associada ao coeficiente térmico linear da peça, e  $\Delta T2$  a diferença entre a temperatura da MMC ( $20,8^\circ\text{C}$ ) e a temperatura da peça ( $20,4^\circ\text{C}$ ). Os dados e os cálculos são mostrados na Tabela 4.13.

**TABELA 4.13 Valor de cada parâmetro para o cálculo da incerteza padrão da temperatura para a Pá da Hélice com apalpador sonda rígida Ponta seca.**

PARÂMETRO	VALOR
$L$ (mm)	153
$\Delta\alpha$ ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	$39,7 \times 10^{-6}$
$\Delta T1$ ( $^\circ\text{C}$ )	1
$u_T$ ( $^\circ\text{C}$ )	0,05
$u_\alpha$ ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	$6,37 \times 10^{-6}$
$\Delta T2$ ( $^\circ\text{C}$ )	0,4

$\mu_{\Delta T20}$ ( $\mu\text{m}$ )	2,0
$\mu_{\Delta Tdif}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,8

Como apalpador de sonda rígido Ponta seca não se encontrava ajustado para a MMC Cantilever, o mesmo procedimento de calibração foi adotado antes da medição da pá da hélice, tomando 18 medidas de uma esfera calibrada a fim de observar o comportamento do desvio padrão. A Tabela 4.14 mostra os resultados obtidos e o desvio padrão encontrado na calibração do apalpador de sonda rígida Ponta seca.

**TABELA 4.14 Dados (mm) de calibração de apalpador de sonda rígida Ponta seca para a MMC Cantilever**

0,417	0,354	0,453	0,443	0,352	0,31	0,37	0,272	0,457
0,370	0,656	0,362	0,504	0,347	0,284	0,236	0,275	0,468
<i>MÉDIA (mm)</i>							0,385	
<i>DESVIO PADRÃO (mm)</i>							0,101	

Para a incerteza padrão de apalpamento  $u_{apal}$ , feita com apalpador de sonda rígida Ponta seca para a MMC Cantilever, foi aplicada a equação 4.5. Assim:

$$u_{apal} = 101/\sqrt{18} + 0,3$$

$$u_{apal} = 24,1 \mu m$$

Para o cálculo da incerteza padrão do modelo CAD, foi aplicada a equação 4.1. Assim:

$$u_{NURBS1} = 125/\sqrt{156}$$

$$u_{NURBS1} = 10 \mu m$$

Para o cálculo de incerteza padrão da MMC Cantilever, aplica-se a equação (4.2) que corresponde o cálculo de incerteza expandida com um fator de abrangência  $k= 2,1$  para uma probabilidade de abrangência de 95%, onde  $L$  é comprimento da pá da hélice. Assim:

$$U_{MMC1} = 1,2 + \frac{153}{600} (\mu m)$$

$$U_{MMC1} = 1,5 (\mu m)$$

Para calcular a incerteza padrão combinada foi utilizada a equação 4.3:

$$u_{MMC1} = 1,5/2,1$$

$$u_{MMC1} = 0,7$$

A equação 3.6 foi utilizada para calcular a incerteza padrão combinada da MMC Cantilever para a pá da hélice com apalpador rígido Ponta seca. A Tabela 4.15 mostra os valores obtidos das incertezas padrão envolvidas no cálculo da incerteza padrão combinada, sendo calculada a incerteza expandida para uma probabilidade de abrangência de 95%.



**TABELA 4.15 Incerteza padrão combinada e incerteza expandida para Pá da Hélice medido com a MMC Cantilever com apalpador sonda rígida Ponta seca.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	2,0
$u_{\Delta Tdif}$	B	Retangular	$\infty$	0,8
$u_{MMC1}$	B	Normal	$\infty$	0,7
$u_{apal}$	A	Normal	17	24,1
$u_{NURBS1}$	A	Normal	155	10,0
Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )			$u_{c1}$	26,2
Grau de liberdade efetivo			$\nu_{eff}$	24
Fator de abrangência			$k$	2,1
Incerteza expandida 95% ( $\mu\text{m}$ )			$U$	55,0

Na Tabela 4.15 pode-se observar que o desvio padrão que mais influencia na incerteza padrão combinada é a incerteza de apalpação com um valor de 24,1  $\mu\text{m}$ .

Para MMC Braço Articulado, a incerteza padrão associada ao modelo CAD foi determinada aplicando a equação 4.1. Assim:

$$u_{NURBS2} = 34 / \sqrt{162}$$

$$u_{NURBS2} = 2,7 \mu\text{m}$$

A equações 3.7 foi usada para calcular a incerteza padrão combinada da MMC Braço articulado, para a pá da hélice com apalpador rígido Ponta seca. A Tabela 4.16 mostra os valores obtidos de todas as incertezas padrões envolvidas neste cálculo da incerteza padrão combinada, e da incerteza expandida.

**TABELA 4.16 Incerteza padrão Combinada e incerteza Expandida para Pá da Hélice medido com a MMC Braço Articulado com apalpador sonda rígida Ponta seca.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	2,0
$u_{\Delta Tdif}$	B	Retangular	$\infty$	0,8
$u_{MMC2}$	B	Normal	$\infty$	26,3
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$	7,7
$u_{NURBS2}$	A	Normal	161	2,7
Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )			$u_{c2}$	27,6
Grau de liberdade efetivo			$\nu_{eff}$	$1,7 \times 10^6$
Fator de abrangência			$k$	1,96
Incerteza expandida 95% ( $\mu\text{m}$ )			$U$	54,1

Na Tabela 4.16 mostra os resultados da incerteza padrão combinada e da incerteza expandida para a MMC Braço Articulado. A fonte de incerteza que tem maior influência é a incerteza da máquina, com um valor de 26,3  $\mu\text{m}$ .

Para calcular a incerteza da fusão dos dados para a Pá da Hélice com apalpador de sonda rígida Ponta seca, foi utilizada a equação 4.4. Assim:

$$u_{\Delta A} = 96 / \sqrt{271}$$

$$u_{\Delta A} = 5,8 \mu\text{m}$$

A equação 3.11 foi empregada para calcular a incerteza padrão combinada para fusão de dados para a pá da hélice com apalpador sonda rígida Ponta seca. A Tabela 4.17 mostra os valores obtidos de todas as incertezas padrão envolvidas, o valor da incerteza padrão combinada e o valor da incerteza expandida para uma probabilidade de abrangência de 95%.

**TABELA 4.17 Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição da fusão de dados da Pá da Hélice medidos com as MMCs Cantilever e Braço Articulado com apalpador de sonda rígida Ponta seca.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{c1}$	A	Normal	24	26,2
$u_{c2}$	A	Normal	$1,7 \times 10^6$	27,6
$u_{\Delta A}$	A	Normal	270	5,8
Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )			$u_c$	19,9
<i>Grau de liberdade efetivo</i>			$\nu_{eff}$	8
<i>Fator de abrangência</i>			$k$	2,3
<i>Incerteza expandida 95% (<math>\mu\text{m}</math>)</i>			$U$	45,7

Como se mostra na tabela 4.17 o cálculo de incerteza combinada para a MMC Cantilever é similar com respeito à incerteza da MMC Braço Articulado com um valor de 26,2  $\mu\text{m}$  e de 27,6  $\mu\text{m}$  respectivamente. A análise da incerteza padrão combinada e incerteza expandida na fusão de dados com apalpador rígido Ponta seca, foram obtidos valores de 19,9  $\mu\text{m}$  e 45,7  $\mu\text{m}$ , respectivamente.

### 4.2.3. Modelos CADs da Pá da Hélice com apalpador 3 mm e 6 mm.

Um modelo CAD para a MMC Cantilever com apalpador de sonda de gatilhamento de 3 mm esta mostrado na FIGURA 4.11 (a) e para MMC Braço Articulado com apalpador de sonda rigida de 6 mm está mostrado na FIGURA 4.11(b). Para o modelo CAD da fusão de dados foi feito da mesma maneira como foi implementado para o apalpador de sonda rigida Ponta seca. Foi construido um plano modelo CAD para cada máquina MMC, depois foram alinhados três pontos de cada plano com ajuda do *software* Rhinoceros, o *software* faz o alinhamento das duas superfícies com seus respectivos pontos. Depois foram calculadas a curva média entre a curva da Cantilever e a curva obtida com o Braço articulado. Logo foi construída a superfície média com as curvas médias obtidas, na FIGURA 4.11 (c) se apresenta o modelo CAD para a fusão de dados.

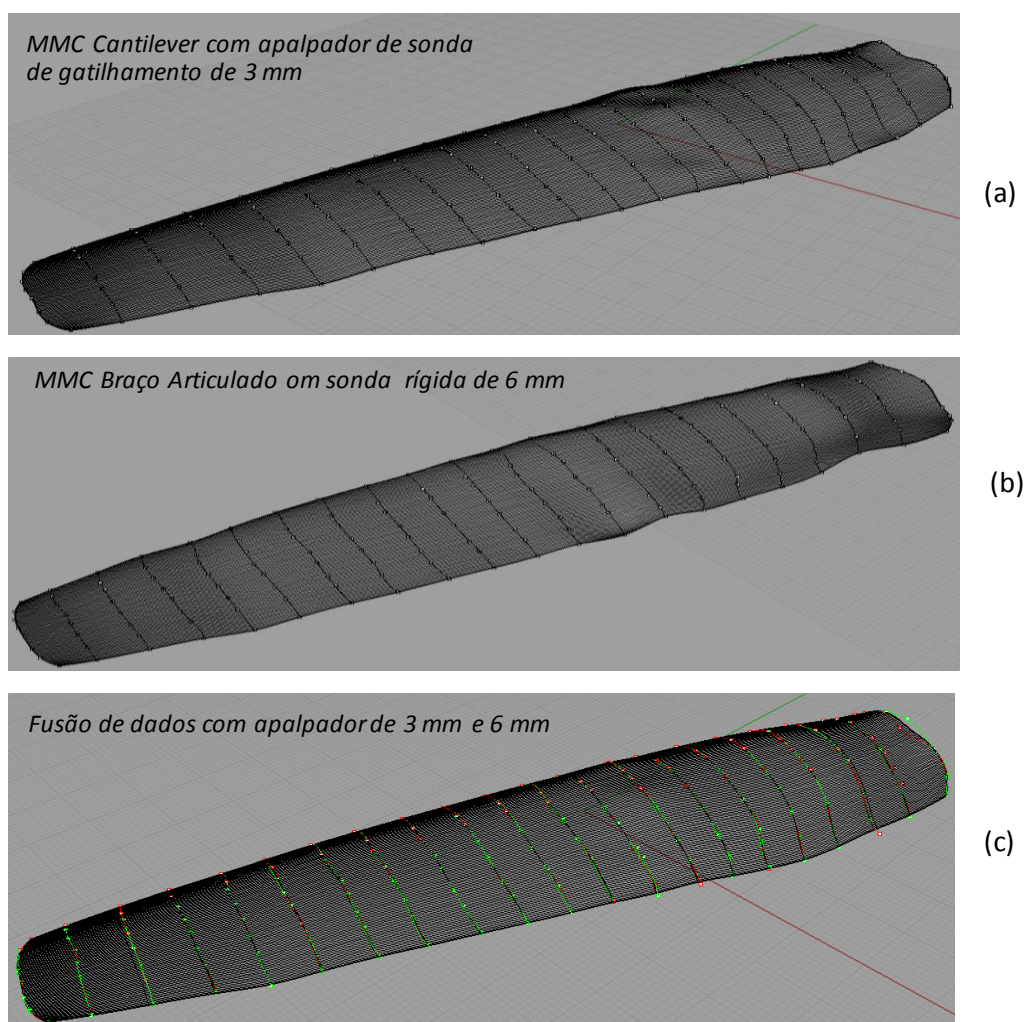


FIGURA 4.11 Modelo CAD da Pá da Hélice: (a) MMC Cantilever apalpador de gatilhamento 3 mm, (b) MMC Braço Articulado apalpador de sonda rígida de 6 mm (c) Fusão de dados. .

Os desvios dos pontos com relação às superfícies NURBS estão apresentados na FIGURA 4.12a, MMC Cantilever e FIGURA 4.12b a MMC Braço Articulado. Algumas irregularidades podem ser visualizadas na FIGURA 4.11b, na parte inferior direita (contorno da pá).

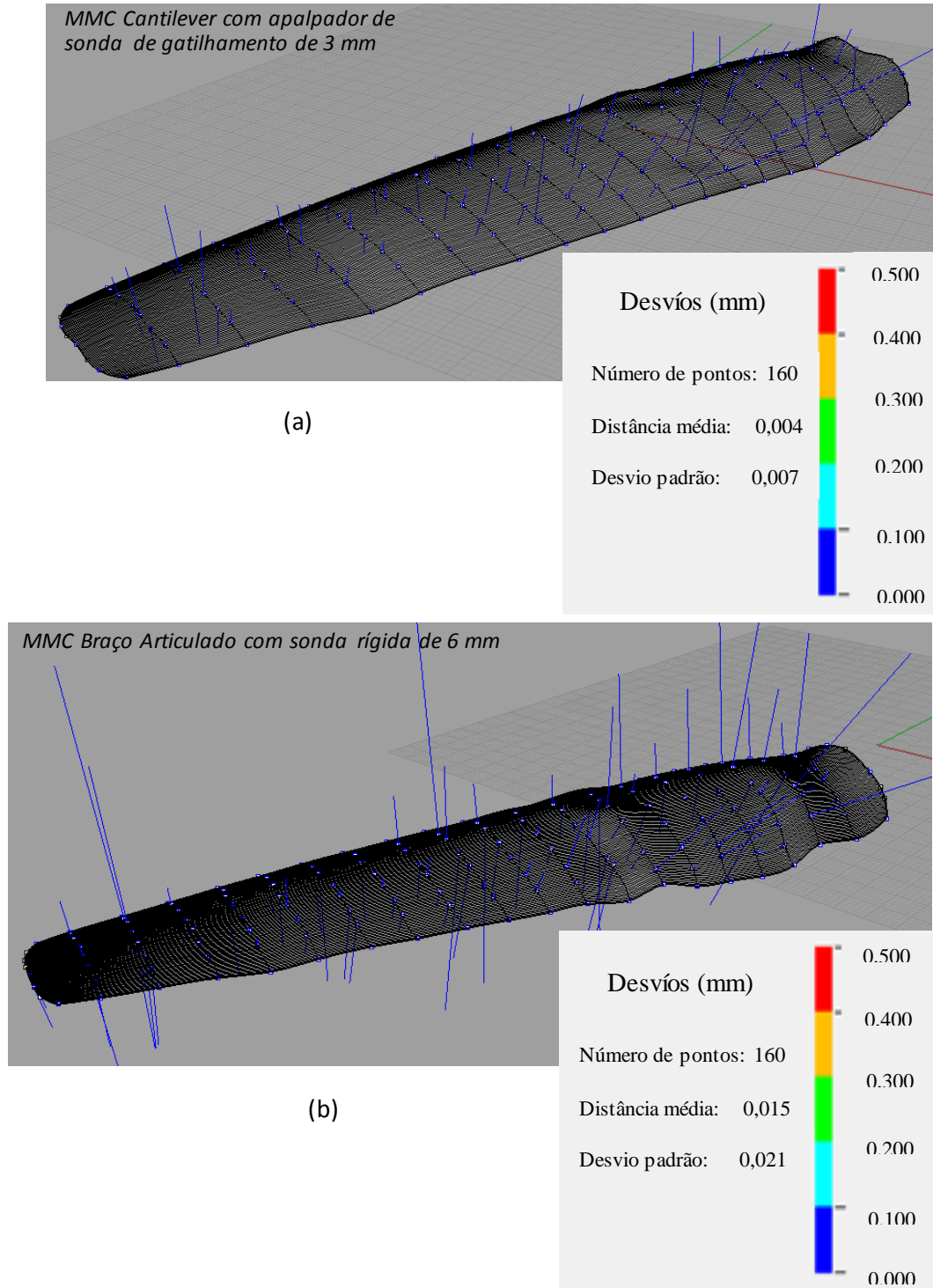


FIGURA 4.12 Análise de desvios do Modelo CAD da Pá da Hélice. (a) MMC Cantilever com apalpador de gatilhamento de 3 mm, (b) Braço Articulado com apalpador de sonda rígida de 6 mm.

Analisando a FIGURA 4.12(a) o desvio padrão obtido com o apalpador de gatilhamento de 3 mm para a MMC Cantilever tem um valor de 0,007 mm, sendo que há grande quantidade de desvios entre 0 e 0,1 mm denotados pelos traços de cor azul. Mesmo comportamento acontece com o modelo CAD para MMC Braço articulado FIGURA 4.12(b), porém com o desvio padrão de 0,021 mm.

Os estudos de desvios para o modelo CAD para a fusão de dados obtidos com duas máquinas MMCs estão apresentados na FIGURA 4.13.

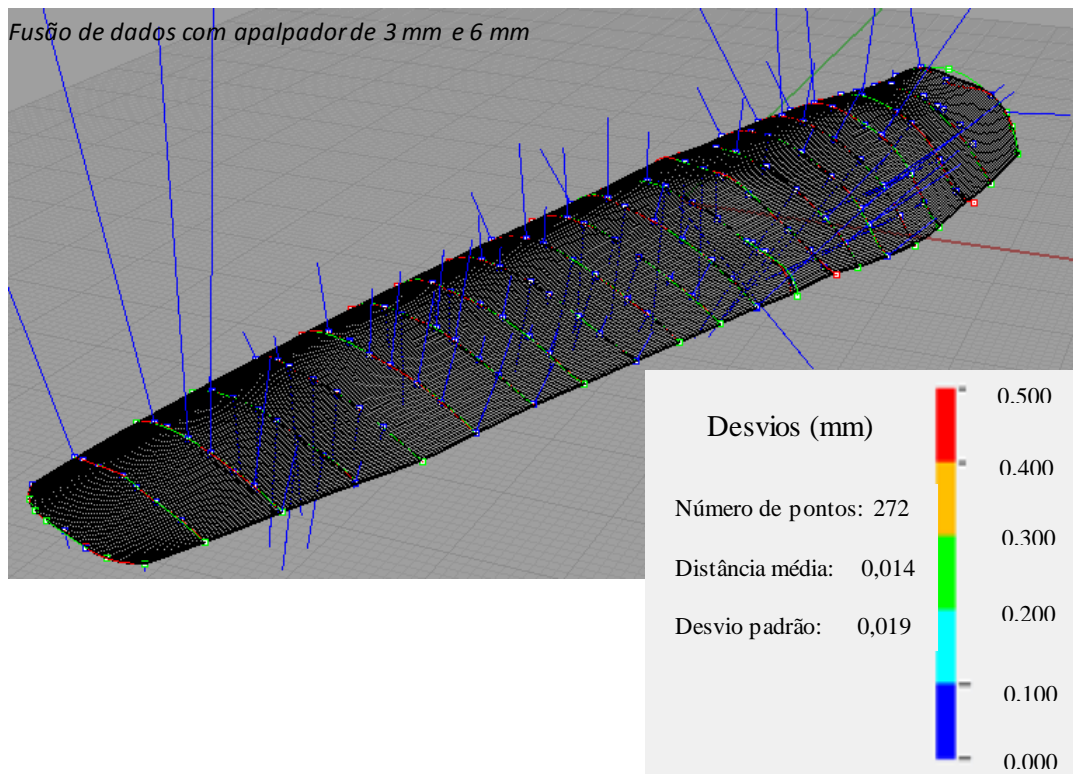


FIGURA 4.13 Análise de desvios do Modelo CAD da Pá da Hélice apalpador 3 mm e 6 mm de Fusão de Dados.

Analisando estes resultados, observa-se um desvio padrão de 0,019 mm, sendo que há grande quantidade de desvios entre 0 e 0,1 mm denotados pelos traços de cor azul. A distancia média dos pontos foi de 0,014 mm.

A Tabela 4.18 mostra um resumo dos dados obtidos para a Pá Hélice para as duas máquinas com apalpador 3 mm e 6 mm , como também para a fusão de dados.

**TABELA 4.18** Resumo de Análise de desvios para modelo CAD Pá da Hélice com apalpador 3 mm e 6 mm.

	Máquina de Medir por Coordenada		
	<i>Cantilever</i>	<i>Braço Articulado</i>	<i>Fusão de Dados</i>
<b>Número de pontos</b>	160	160	272
<b>Distância média (mm)</b>	0,004	0,015	0,014
<b>Desvio Padrão (mm)</b>	0,007	0,021	0,019

#### 4.2.4 Análise da Incerteza padrão combinada e expandida para Pá da Hélice com apalpador 3 mm e 6 mm.

Os parâmetros são os mesmos utilizados para o cálculo da incerteza da temperatura, com apalpador de sonda rígida Ponta seca. Para calcular a incerteza padrão  $u_{NURBS1}$  do modelo CAD, foi aplicada a equação 4.1. A Tabela 4.19 mostra os valores das incertezas padrão envolvidas no cálculo da incerteza padrão combinada para a medição feita com a MMC Cantilever com sonda de gatilhamento e apalpador de 3 mm.

$$u_{NURBS1} = \frac{7}{\sqrt{160}}$$

$$u_{NURBS1} = 0,6 \mu m$$

**TABELA 4.19** Incerteza padrão Combinada e incerteza Expandida para Pá da Hélice medido com a MMC Cantilever com apalpador de gatilhamento de 3mm.

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu m$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	2,0
$u_{\Delta T dif}$	B	Retangular	$\infty$	0,8
$u_{MMC1}$	B	Normal	$\infty$	0,7
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$	3,2
$u_{NURBS1}$	A	Normal	159	0,6
Incerteza padrão combinada ( $\mu m$ )			$u_{c1}$	4
Grau de liberdade efetivo			$\nu_{eff}$	$3,1 \times 10^6$
Fator de abrangência			$k$	1,96
Incerteza expandida 95% ( $\mu m$ )			$U$	7,8

A Tabela 4.19 mostra os resultados da incerteza padrão combinada e expandida para a MMC Cantilever. A fonte de incerteza que tem maior influência é a incerteza padrão de apalpação com um valor de 3,2  $\mu\text{m}$ .

Para a MMC Braço Articulado com apalpador rígido de 6 mm, a equação 4.1 foi empregada para o cálculo de  $u_{NURBS2}$ . Assim:

$$u_{NURBS2} = 21 / \sqrt{160}$$

$$u_{NURBS2} = 1,7 \mu\text{m}$$

Depois, a equação 3.7 foi usada para calcular a incerteza combinada para a máquina MMC Braço articulado para a pá da hélice com apalpador rígido Ponta seca. A Tabela 4.20 mostra os valores obtidos de todas as incertezas padrões envolvidas no cálculo da incerteza padrão combinada e incerteza expandida.

**TABELA 4.20 Incerteza padrão Combinada e incerteza Expandida para Pá da Hélice medido com a MMC Braço Articulado com apalpador de sonda rígida de 6 mm.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	2,0
$u_{\Delta T dif}$	B	Retangular	$\infty$	0,8
$u_{MMC2}$	B	Normal	$\infty$	26,3
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$	7,7
$u_{NURBS}$	A	Normal	159	1,7
Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )			$u_{c2}$	27,5
Grau de liberdade efetivo			$\nu_{eff}$	$1,1 \times 10^7$
Fator de abrangência			$k$	1,96
Incerteza expandida 95% ( $\mu\text{m}$ )			$U$	53,9

Nesta Tabela a fonte de incerteza que tem maior influencia é a incerteza padrão da máquina com um valor de 26,3  $\mu\text{m}$ .

Para calcular a incerteza padrão  $u_{\Delta A}$  do modelo CAD da fusão dos dados para a Pá da Hélice com apalpador 6 mm, foi usada a equação 4.1.

$$u_{\Delta A} = 19 / \sqrt{272}$$

$$u_{\Delta A} = 1,2 \mu\text{m}$$

A equação 3.11 foi empregada para calcular a incerteza padrão combinada para fusão de dados, para a pá da hélice com apalpador de 6 mm. A Tabela 4.21 mostra os valores obtidos das incertezas padrões combinadas da MMC Cantilever e MMC Braço articulado.

**TABELA 4.21 Incerteza padrão Combinada e Expandida de medição de dados da fusão da Pá da Hélice medido com a MMCs Cantilever e Braço Articulado com apalpador de 3mm e 6 mm respectivamente .**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{c1}$	A	Normal	$3,1 \times 10^6$	4
$u_{c2}$	A	Normal	$1,1 \times 10^7$	27,5
$u_{\Delta A}$	A	Normal	271	1,2
	Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )		$u_c$	13,9
	<i>Grau de liberdade efetivo</i>		$\nu_{eff}$	$6,3 \times 10^5$
	<i>Fator de abrangência</i>		$k$	1,96
	<i>Incerteza expandida 95% (<math>\mu\text{m}</math>)</i>		$U$	27,2

Como e mostrado na tabela 4.21, a incerteza padrão combinada para a MMC Braço Articulado teve mais influencia, com um valor de 27,5  $\mu\text{m}$ . A análise da incerteza expandida para a fusão de dados com apalpador de 3 mm e 6 mm foi de 27,2  $\mu\text{m}$ , com probabilidade de 95%.



## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES DE TRABALHOS FUTUROS.

Neste trabalho, o estudo da fusão de dados obtidos na medição de peças com superfícies de forma regular e forma livre foi realizado, empregando duas Máquinas de Medir por Coordenadas (MMCs), uma modelo Cantilever e outra modelo Braço articulado. O estudo foi conduzido medindo superfícies de duas peças: o plano de um esquadro de granito e uma Pá da Hélice. As etapas do processo de fusão de dados foram investigadas com os resultados destas medições, sendo que a fusão foi feita pela determinação das curvas médias a partir de curvas ajustadas com pontos obtidos nas MMCs.

A incerteza de medição foi determinada para comparar os resultados da fusão de dados com os resultados obtidos nas MMCs utilizadas. Seu cálculo foi feito levando em conta as incertezas padrão das respectivas MMCs e a incerteza padrão do ajuste NURBS, além dos efeitos da temperatura na medição. Os valores obtidos permitiram a comparação dos resultados no estudo de fusão de dados.

O *software* utilizado na fusão de dados, Rhinoceros, facilitou a tarefa de alinhamento, através da translação e rotação dos dados provenientes dos instrumentos de medição, usando comandos disponíveis. As análises dos desvios e os cálculos estatísticos como média e desvio padrão foram feitas com funções pré-definidas neste *software*. Também foi feita uma comparação dos desvios determinados para um plano, usando o *software* Matlab, o qual mostrou valores similares.

A sonda rígida com apalpador Ponta seca resultou numa incerteza expandida maior para a MMC Cantilever, para a mesma peça (plano ou forma livre), representado pelos valores de 48,3  $\mu\text{m}$  e 55  $\mu\text{m}$ , respectivamente, em relação à sonda de gatilhamento e apalpador esférico.

A incerteza obtida na fusão de dados apresentou um comportamento similar para peças com superfície regular e de forma livre. Conforme foi observado, os valores de incerteza expandida (95%), para os resultados da MMC Cantilever, MMC Braço articulado e fusão de dados foram respectivamente 6,7  $\mu\text{m}$ , 53,7  $\mu\text{m}$  e 27  $\mu\text{m}$  (medição do plano) e 7,8  $\mu\text{m}$ , 53,9  $\mu\text{m}$  e 27,2  $\mu\text{m}$  (medição de superfície de forma livre). O valor da incerteza da fusão de dados ficou entre os valores das incertezas obtidas para os instrumentos de medição, sendo que isto foi associado ao método empregado na fusão de dados.

Como sugestões de trabalhos futuros podem ser mencionadas:

- ✓ Utilizar outro *software* de modelagem CAD ou algum *software* para programação dos cálculos dos desvios.
- ✓ Utilizar outro método para a fusão de dados, como filtro Kalman.
- ✓ Implementar um *software* em Matlab para utilizar os arquivos de excel.xls gerados pelas MMCs para fazer uma fusão de dados e construção do modelo CAD.
- ✓ Usar outros instrumentos para coleta de dados, de forma a reduzir os tempos de medição.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Arbeláez S.O.; Mendoza J. V, The Mechatronic Engineering by Cycles in Colombia, Scientia et Technica, Año XIII, No 35, pp 421-426, Agosto de 2007, ISSN 0122-1701.

Arenhart F.A, Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro, Trabalho submetido à ABCM para participação do Prêmio ABCM-Yehan Numata, Florianópolis, maio de 2007.

Chen Y.H. et al., Towards a haptic virtual coordinate measuring machine, Department of Mechanical Engineering, The University of Hong Kong, et al. March 2004.

Hamburg-Piekar D. S., Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 14 de Junho de 2006.

Ferreira F., Medição por contato versus medição óptica em máquinas de medir por coordenadas (3d), CATIM – Centro de Apoio Tecnológico à Indústria Metalomecânica, 2007.

Gonçalves C. R., Um estudo comparativo de sistemas de medição aplicáveis ao controle dimensional de superfícies livres em peças de médio e grande porte. Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

Hall D.L.; Llinas J., An Introduction to Multisensor Data Fusion, Proceedings of the IEEE, vol. 85, no. 1, january 1997.

INMETRO – (VIM)Vocabulário Internacional de Metrologia, 2012.

ISO TAG 4WG-3. Guide to the expression of uncertainty in measurements. Geneva:International Organization for Standardization – ISO; 2008.

Junior P. L.; Lang da Silveira F.; Sobre as incertezas do tipo A e B e sua propagação sem derivadas: uma contribuição para a incorporação da metrologia contemporânea aos laboratórios de física básica superior. Revista Brasileira de Ensino de Física, v.33, n.2, 2011.

Linhares de Oliveira A, Validação de processos de medição por coordenadas em operações de controle de qualidade, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

Matweb – Material Property Data. Search for “Renshape 5179”, 2012. Available from: <http://www.matweb.com>

Orrego Roxana M. Martinez; Giacomo, Benedito Di; Abackerli, Alvaro J. Error sources in coordinate metrology: general considerations. Revista de Ciência & Tecnologia, pag 43, Volume 8 n° 16 2000.

Piratelli-Filho A, aulas de Metrologia Dimensional, Universidade de Brasília, 2012

Piratelli-Filho A.; Tavares F. H.; Arencibia V. R., Application of Virtual Spheres Plate for AACMMs evaluation, Precision Engineering, v 36, pp. 349– 355, (2012)

Piratelli-Filho A, Jobim S. P, Junior G. W, Arencibia V. R., Study of Cad/Cam Processing of Freeform Surfaces, Brazilian Congress of Mechanical Engineering COBEM 2011, October 24-28, 2011, Natal, RN, Brazil

Pizo G. A, Sistema computacional para tratamento de nuvens de pontos e reconstrução tridimensional de superfícies baseadas em modelos deformáveis, Dissertação (Mestrado) Universidade de Brasília, Faculdade de Tecnologia. Departamento de Engenharia Mecânica 2009.

Pizzetti M. F, Incertezas na medição por coordenadas com ênfase na contribuição da forma da peça e da estratégia de medição, Dissertação (Mestrado), Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

Savio E.; Chiffre L.; Schmitt R., Metrology of freeform shaped parts, Laboratory of Industrial and Geometrical Metrology, Annals of the CIRP ,Vol. 56, pp. 810-835, 2007.

SENAI- Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, aula 14-Verificadores.2012 Available from: <http://www.scribd.com/doc/16192748/Metrologia-metr14#p'age=5> z

Rhinoceros-Nurbs modeling for Windows-, What is NURBS?,2012, Available from: <http://www.rhino3d.com/nurbs.htm>

Russman G. M., Incerteza de Medição, Texto baseado na Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, 1998.

Weckenmann A; Jiang X; Sommer K.-D; Neuschaefer-Rube U.; Seewig J.; Shaw L.; Estler T., Multisensor data fusion in dimensional metrology, University Erlangen-Nuremberg, Germany, CIRP Annals - Manufacturing Technology, v58, pp 701–721, 2009.

## **APÊNDICE**

## A. BASE CIRCULAR

### A.1 DESCRIÇÃO DA PEÇA UTILIZADA.

Um estudo complementar foi feito com uma base circular que apresenta na parte superior uma forma geométrica conhecida (plano), e na parte inferior alguns detalhes com forma livre (pés) (FIGURA A1). Esta base pertence a um comparador de amplificação pneumática, pertencente ao Laboratório de Metrologia da UnB. Como aspectos gerais, a base foi feita em aço, e apresenta dimensões como um diâmetro externo de 280,07 mm e uma altura de 127 mm.



FIGURA A.1 Base para comparação de amplificação pneumática

### A.2 PREPARAÇÃO DA PEÇA E ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO.

#### A.2.1. Limpeza de Peça.

A limpeza da peça foi feita do mesmo jeito como foi executado para o plano do esquadro de granito e a pá da hélice. A limpeza foi feita com uma flanela e álcool etílico, aplicados sobre as superfícies de medição (FIGURA A2).



FIGURA A.2 Limpeza da Base Circular.

### A.3 ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO.

A base apresenta superfícies com formas regulares como planos, círculos e cilindros, bem como superfícies com forma livre, caso dos pés de suporte. As superfícies regulares foram medidas adotando a mesma estratégia de medição do plano do esquadro, o qual foi marca origem no centro da parte superior. Depois fazer linhas em direção transversal e em direção longitudinal, para ter uma ótima medição foi recomendada remover os pés da base, de modo que fique firmemente apoiada acima da base MMCs. Os pontos foram tomados ao longo do diâmetro da superfície, o programa ajuda à calcular a planeza da base. Para as superfícies de forma livre foram medidas a partir de determinação do contorno, tomando nuvens de pontos, para posteriormente ajustar a superfície.

### A.4 MEDIÇÃO

#### A.4.1 Medição da Base Circular com a MMC Cantilever.

A medição da base circular (FIGURA A.3), com a MMC Cantilever apresentou a particularidade de demandar um tempo longo, devido à dificuldade de acessar todas as superfícies em uma única posição da peça sobre a mesa da MMC. O programa da MMC Cantilever tem formas geométricas pré-definidas o que permite medir de forma rápida, sem necessitar muitos pontos, especialmente a parte plana e cilíndrica. Para na parte inferior é necessário determinar o perfil dos pés de apoio, bem como os detalhes internos.

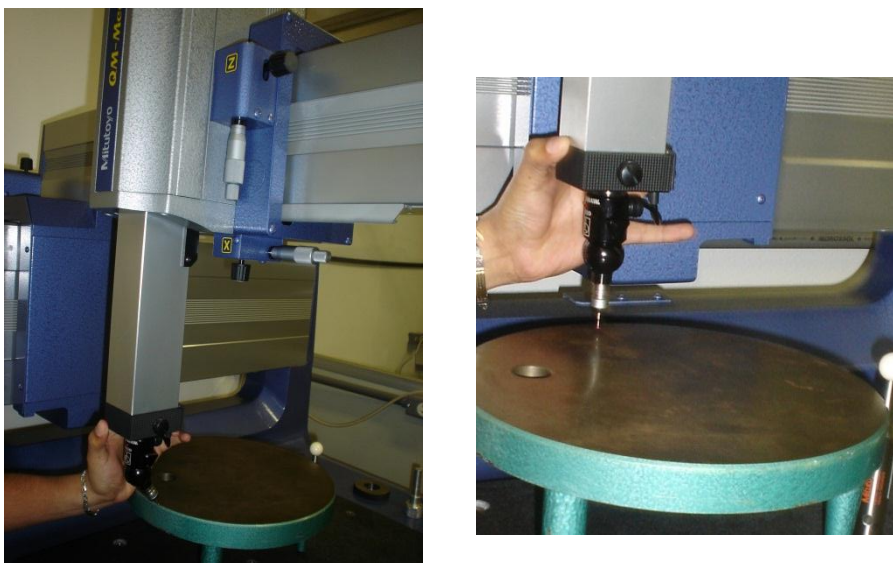


FIGURA A.3 Medição da Base Circular com a MMC Cantilever.



#### A.4.2 Medição da Base Circular com MMC Braço Articulado.

A medição da Base Circular com a MMC Braço Articulado (FIGURA A.4) foi mais fácil do que com a MMC Cantilever, uma vez que esta MMC tem uma flexibilidade maior no posicionamento do apalpador, e assim permite maior rapidez no processo de tomada de pontos. Inicialmente o ponto de referência foi transladado para o centro da base circular, em seguida foram tomados os pontos na parte inferior seguido pelo conjunto de pontos para obter os detalhes da base.



(a)



(b)

FIGURA A.4 Medição da Base Circular com MMC Braço Articulado. (a) Parte Inferior, (b) Pé da Base.

#### A.4.3 Modelo CAD para a Base Circular.

Para construir o modelo CAD da base circular, foi necessário um conhecimento prévio dos recursos do *software* de modo a escolher os comandos para fazer as formas geométricas, os furos e a projeção de superfícies. Alguns comandos do *software* Rhinoceros são mostrados na sequência (FIGURA A.5) empregados para construir os modelos CAD de FIGURAS geométricas.

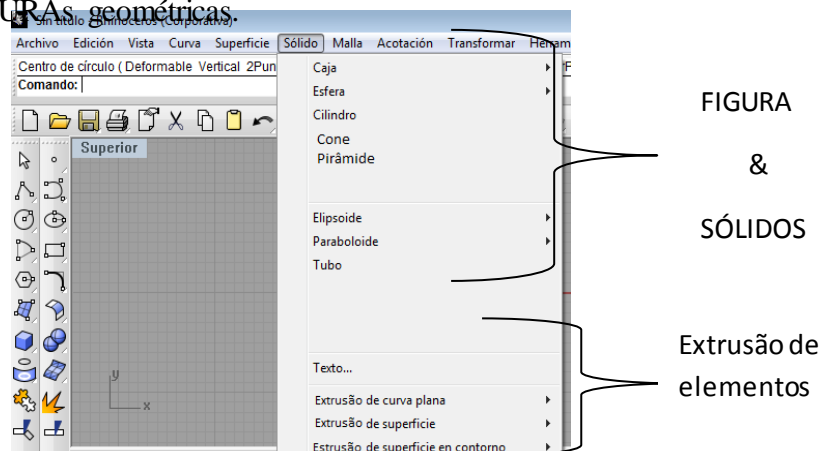


FIGURA A.5 Janela de comandos para gerar Sólidos e fazer Extrusão da Superfície ou Curva com o programa Rhinoceros

## A.5 MODELOS CAD DA BASE CIRCULAR MEDIDA COM MMC CANTILEVER E BRAÇO ARTICULADO.

Os resultados da medição da Base Circular, com a MMC Cantilever estão mostrados na FIGURA A.6a, a partir deste resultados o modelo CAD foi construído com o *software* Rhinoceros, sendo mostrado nas FIGURAs A.6b e A.6c. O arquivo gerado tem formato IGES contendo toda a informação das coordenadas dos pontos e figuras geométricas medidas.

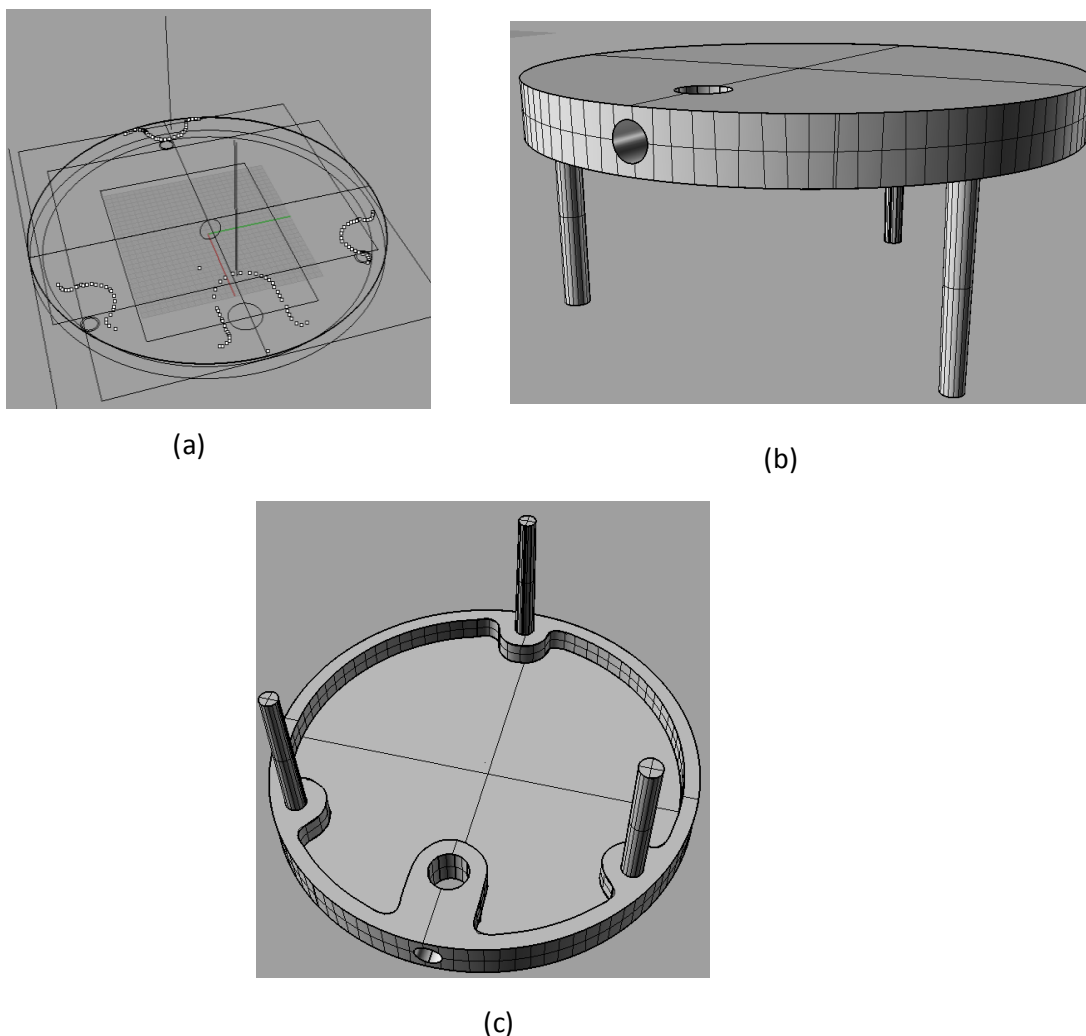
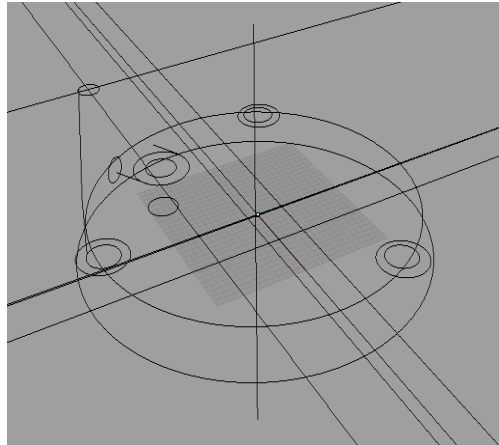
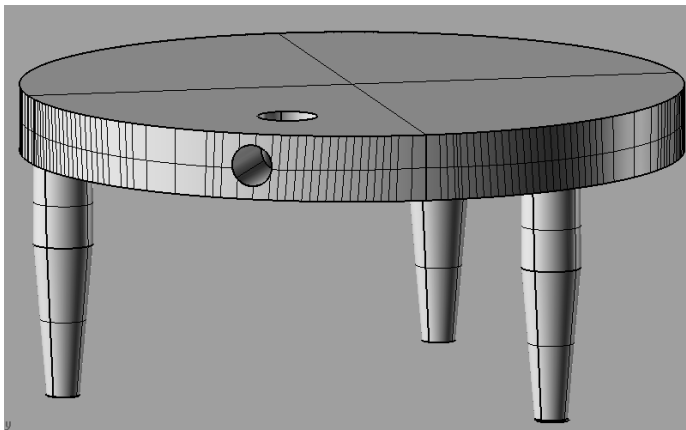


FIGURA A.6 (a) Esquema inicial MMC Cantilever, (b) Modelo CAD parte lateral, (c) parte de Baixo.

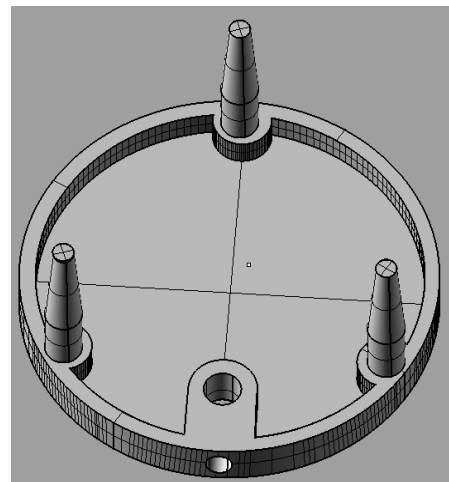
Para a medição com a MMC Braço articulado a FIGURA A.7a apresenta os resultados obtidos. O modelo CAD ajustado com o *software* Rhinoceros está mostrado nas FIGURAs A.7b e A.7c.



(a)



(b)



(c)

FIGURA A.7 (a) Esquema inicial MMC Braço Articulado, (b) Modelo CAD parte lateral, (c) parte de Baixo

A parte inferior, na qual os detalhes e os pés estão presentes, tem geometria mais complicada e requer um instrumento ou apalpador com flexibilidade para determinar pontos nestas superfícies. Ao mesmo tempo não há necessidade de usar um instrumento com incerteza reduzida, pois se trata de elementos de fixação e apoio que apresentam tolerância mais aberta. Assim, é melhor empregar a MMC Braço articulado nestas medições.

A FIGURA A.8 mostra o modelo real do pé da Base (FIGURA A.8a), bem como o modelo CAD obtido com a medição na MMC Braço articulado(FIGURA A.8b).

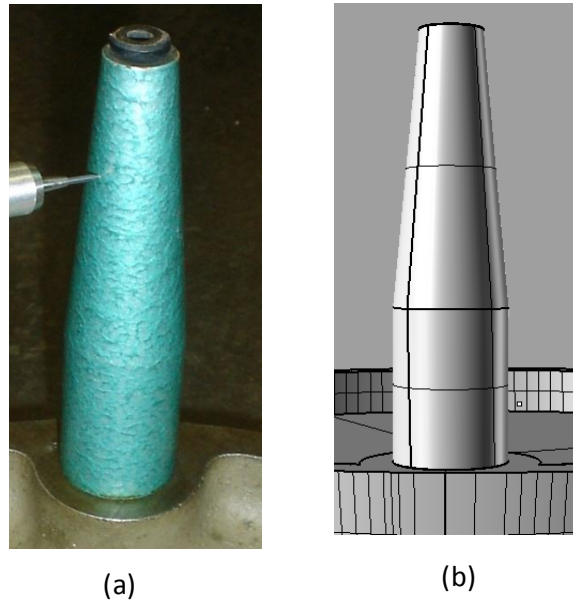


FIGURA A.8 Modelo CAD dos pés (a) Modelo real do pé da Base Circular, (b) MMC Braço Articulado.

#### A.6. ANÁLISE DA INCERTEZA PADRÃO COMBINADA E EXPANDIDA PARA OS MODELOS CADs COM DUAS MÁQUINAS MMC CANTILEVER E BRAÇO ARTICULADO.

Os pontos da superfície plana da base circular foram obtidos com a MMC Cantilever com sonda de gatilhamento apalpador de 3 mm, o ajuste do plano foi com o *software* Rhinoceros. Uma análise quantitativa foi feita pela determinação dos desvios dos pontos medidos em relação ao modelo CAD encontrados na FIGURA A.9 medido com a MMC Cantilever.

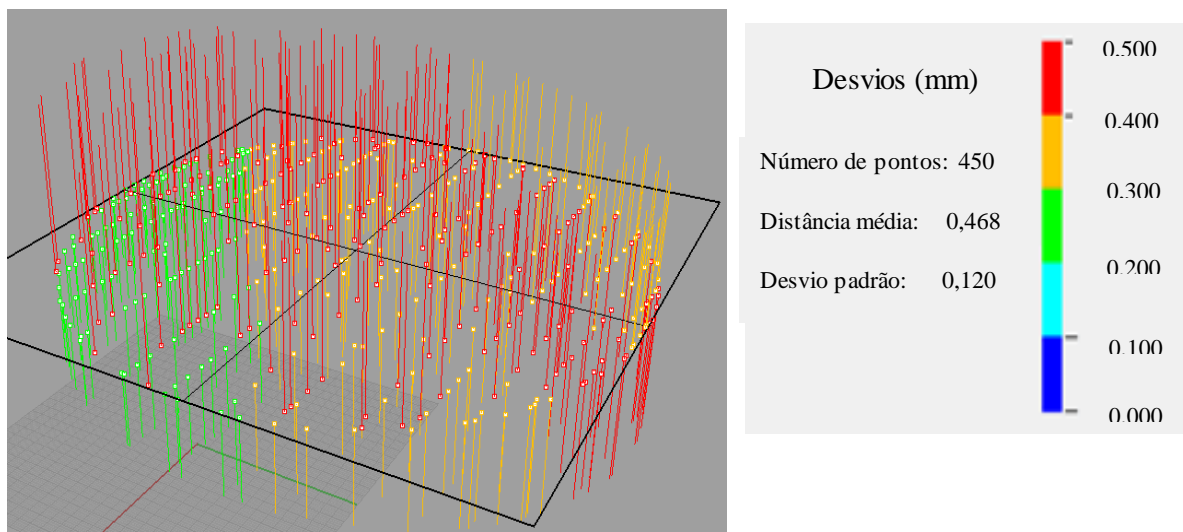


FIGURA A.9 Análise de desvios do Modelo CAD parte superior da base circular medido com MMC Cantilever com apalpador de 3 mm.

Analisando estes resultados, observa-se um desvio padrão de 0,120 mm, sendo que há grande quantidade de desvios entre 0,4 e 0,5 mm denotados pelos traços de cor vermelha. A distância média dos pontos foi de 0,468 mm.

As mesmas equações do cálculo da incerteza padrão da temperatura utilizada para plano do esquadro e pá da hélice foram utilizadas para a base circular. Nestas expressões,  $L$  é 280,07 mm,  $\Delta\alpha$  é a diferença de coeficiente de expansão térmica da material da peça aço ( $1,2 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) com o coeficiente de expansão térmica da material da máquina que foi considerado de alumínio ( $24 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ ) (Matweb, 2012),  $\Delta T1$  é a diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura de referência 20°C,  $u_T$  é a incerteza padrão do termômetro utilizado (indicado no certificado de calibração),  $u_\alpha$  a incerteza padrão associada ao coeficiente térmico linear da peça, e  $\Delta T2$  a diferença entre a temperatura da MMC (20,8°C) e temperatura da peça (20,4°C). Os dados e os cálculos são mostrados na Tabela A.1.

**TABELA A.1 Valor de cada parâmetro para o cálculo da incerteza padrão da temperatura para a Parte superior da Base Circular medido com a MMC Cantilever.**

<b>PARÂMETRO</b>	<b>VALOR</b>
$L$ (mm)	280,07
$\Delta\alpha$ ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	$12 \times 10^{-6}$
$\Delta T1$ ( $^\circ\text{C}$ )	1
$u_T$ ( $^\circ\text{C}$ )	0,05
$u_\alpha$ ( $^\circ\text{C}^{-1}$ )	$1,2 \times 10^{-6}$
$\Delta T2$ ( $^\circ\text{C}$ )	0,4
$u_{\Delta T20}$ ( $\mu\text{m}$ )	1,0
$u_{\Delta Tdif}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,4

Para calcular a incerteza padrão  $u_{NURBS1}$  do modelo CAD, foi aplicada a equação 4.1. A Tabela A.2 mostra os valores das incertezas padrões envolvidas no cálculo de incerteza padrão combinada para a medição feita com a MMC Cantilever com sonda de gatilhamento e apalpador de 3 mm.

$$u_{NURBS1} = 120 / \sqrt{450}$$

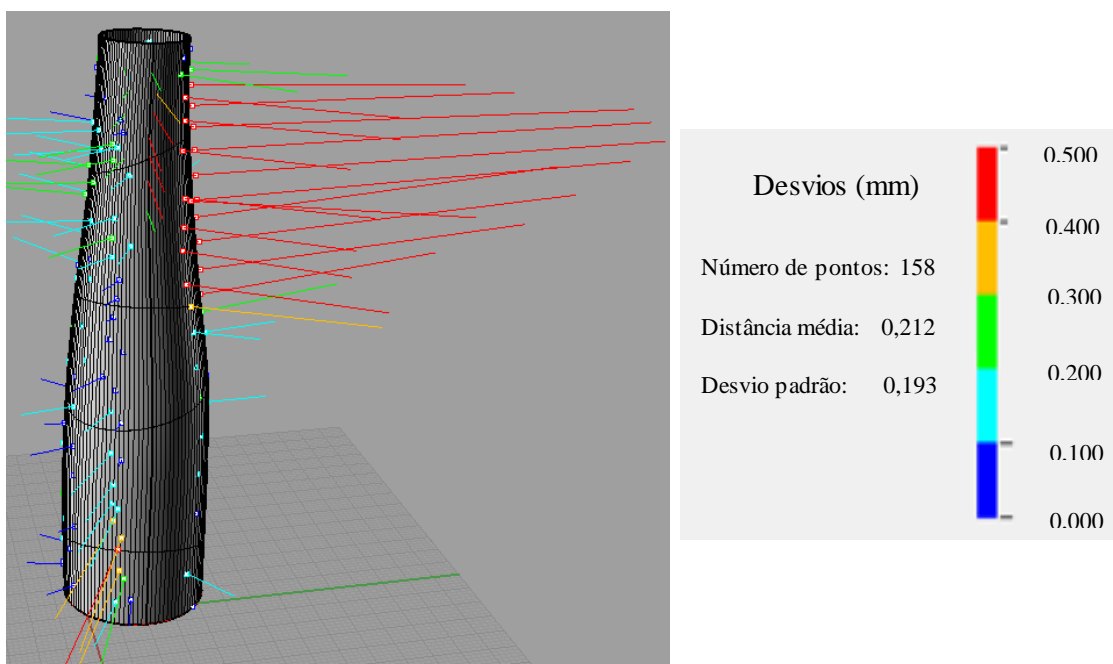
$$u_{NURBS1} = 5,6 \mu\text{m}$$

**TABELA A.2 Incerteza padrão combinada e incerteza expandida para a parte superior da base circular medido com a MMC Cantilever com apalpador de gatilhamento de 3mm.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu m$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	1,0
$u_{\Delta Tdif}$	B	Retangular	$\infty$	0,4
$u_{MMC1}$	B	Normal	$\infty$	0,7
$u_{apal}$	B	Normal	$\infty$	3,2
$u_{NURBS1}$	A	Normal	449	5,6
Incerteza padrão combinada ( $\mu m$ )			$u_{c1}$	6,6
Grau de liberdade efetivo			$\nu_{eff}$	$8,7 \times 10^3$
Fator de abrangência			$k$	1,96
Incerteza expandida 95% ( $\mu m$ )			$U$	12,9

Nesta tabela pode-se observar que a fonte de incerteza que tem maior influência é a incerteza padrão do modelo NURBS com um valor de 5,6  $\mu m$ .

Para a MMC Braço Articulado com apalpador rígido de 3 mm, foi feito o estudo dos desvios dos pontos do pé da base circular.



**FIGURA A.10 Análise de desvios do Modelo CAD pé da base circular medido com MMC Braço Articulado com apalpador de 3 mm.**

Para o cálculo da incerteza padrão da temperatura foi utilizada a mesma equação utilizada para o plano do esquadro e pá da hélice. Nestas expressões, L é 99,65 mm, os

demais parâmetros foram os mesmos utilizados para o cálculo da parte superior da base circular. Os dados e os cálculos são mostrados na Tabela A.3.

**TABELA A.3 Valor de cada parâmetro para o cálculo da incerteza padrão da temperatura para o pé da Base Circular medido com a MMC Braço Articulado.**

PARÂMETRO	VALOR
$L$ (mm)	99,65
$\Delta\alpha$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$12 \times 10^{-6}$
$\Delta T1$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	1
$u_T$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,05
$u_{\alpha}$ ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ )	$1,2 \times 10^{-6}$
$\Delta T2$ ( $^{\circ}\text{C}$ )	0,4
$u_{\Delta T20}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,4
$u_{\Delta Tdif}$ ( $\mu\text{m}$ )	0,2

Para calcular a incerteza padrão  $u_{NURBS2}$  do modelo CAD, foi aplicada a equação 4.1. A Tabela A.4 mostra os valores das incertezas padrão envolvidas no cálculo de incerteza padrão combinada para a medição feita com a MMC Braço Articulado com sonda rígida e apalpador de 3 mm.

$$u_{NURBS2} = 193 / \sqrt{158}$$

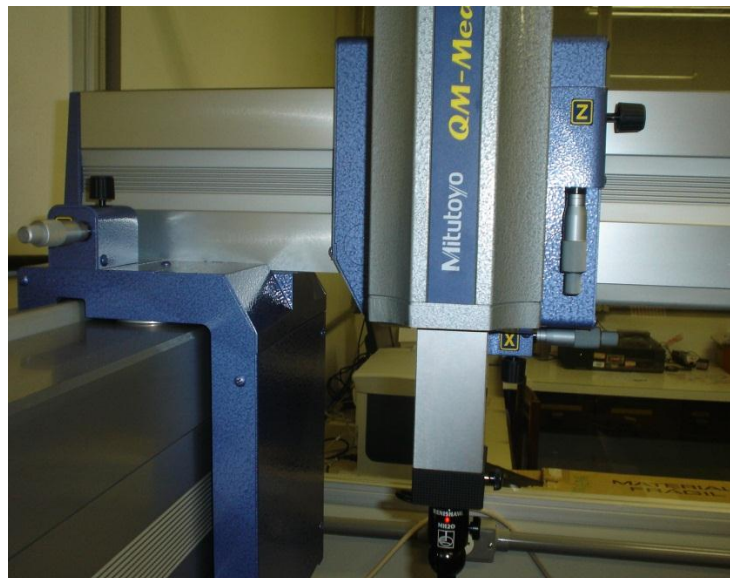
$$u_{NURBS2} = 15,4 \mu\text{m}$$

**TABELA A.2 Incerteza padrão combinada e incerteza expandida para a parte superior da base circular medido com a MMC Cantilever com apalpador de gatilhamento de 3mm.**

FONTE DE INCERTEZA	TIPO DA INCERTEZA	PDF	GRAUS DE LIBERDADE	VALOR DA INCERTEZA ( $\mu\text{m}$ )
$u_{\Delta T20}$	B	Retangular	$\infty$	0,4
$u_{\Delta Tdif}$	B	Retangular	$\infty$	0,2
$u_{MMC2}$	B	Normal	10	26,3
$u_{apal}$	B	Normal	39	7,7
$u_{NURBS2}$	A	Normal	157	15,4
	Incerteza padrão combinada ( $\mu\text{m}$ )		$u_{c2}$	31,4
	Grau de liberdade efetivo		$\nu_{eff}$	$2,7 \times 10^3$
	Fator de abrangência		$k$	1,96
	Incerteza expandida 95% ( $\mu\text{m}$ )		$U$	61,5

Nesta tabela pode-se observar que a fonte de incerteza que tem maior influência é a incerteza padrão da MMC Braço articulado seguido pela incerteza do modelo NURBS com um valor de 26,3  $\mu\text{m}$  e 15,4  $\mu\text{m}$  respectivamente.

**ANEXO 1 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO MAQUINA DE MEDIR  
POR COORDENADA CANTILEVER**







EULENSTRASSE 36  
CH-2556 BRUGG/SWITZERLAND

SAPHIRWERK INDUSTRIEPRODUKTE AG  
Tel: +41 (0)32 374 25 85 E-mail: info@saphirwerk.com  
Fax: +41 (0)32 374 25 99 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 $\mu\text{m}$ :	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

QS-FO-03.01-33

To determinate 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%.

# Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.



## 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

Calibração  
NBR ISO/IEC  
17025



CAL 0031

#### 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: 19/08/08

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 (ou ao Sistema Internacional de U  
A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.  
Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

#### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

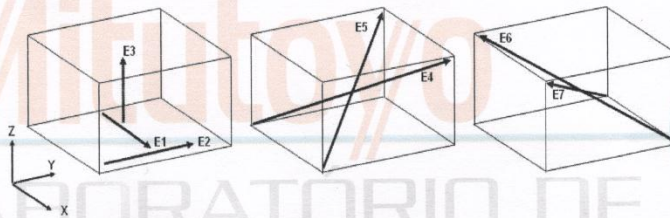
Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

#### IV. Resultado das Medições :

##### 4.1. Verificações iniciais do equipamento :

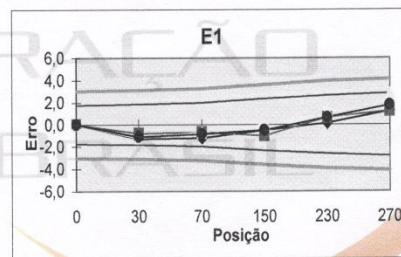
- a. Movimento da Máquina : OK
- b. Condições da área de Medição : OK
- c. Avaliação do Sist. Pneumático : OK
- d. Limpeza das superfície de ref. : OK

##### 4.2. Verificação do equipamento:



##### 4.2.1. Exatidão de medição Posição E1 - unidade : $\mu\text{m}$

Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			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

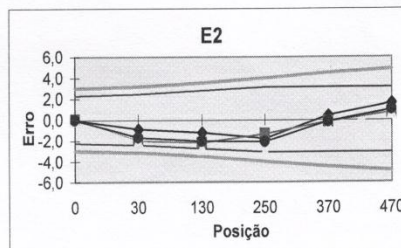


$$U = 1,2 + L/900 \quad \mu\text{m}$$

, onde: L = posição em " mm ".

##### 4.2.2. Exatidão de medição Posição E2 - unidade : $\mu\text{m}$

Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			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



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

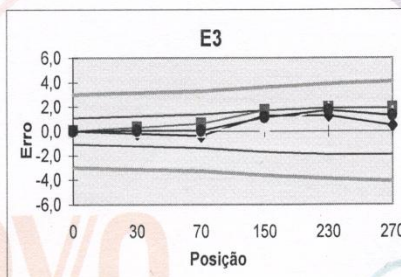
, onde: L = posição em " mm ".

#### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

#### 4.2.3. Exatidão de medição Posição E3 - unidade : $\mu\text{m}$

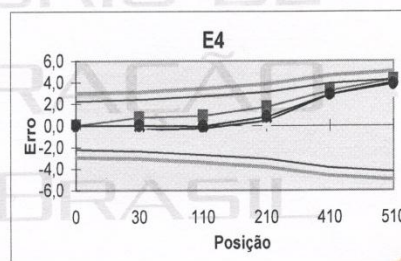
Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,2	0,3	0,0	0,0
70	-0,4	0,6	0,0	0,1
150	1,3	1,7	0,5	1,2
230	1,3	1,9	1,9	1,7
270	0,5	1,9	1,5	1,3



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

#### 4.2.4. Exatidão de medição Posição E4 - unidade : $\mu\text{m}$

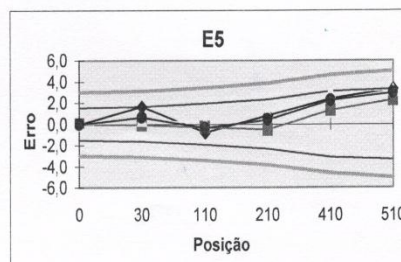
Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	-0,4	0,7	-0,4	0,0
110	-0,3	0,9	-0,8	-0,1
210	0,4	1,7	0,3	0,8
410	2,9	3,2	2,5	2,9
510	4,0	4,3	3,2	3,8



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

#### 4.2.5. Exatidão de medição Posição E5 - unidade : $\mu\text{m}$

Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			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



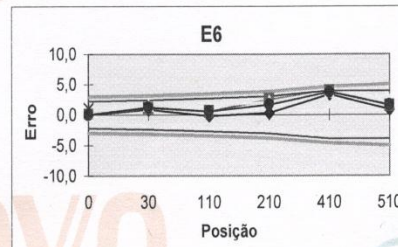
$U = 1,2 + L/700 \mu\text{m}$  , onde: L = posição em " mm ".

#### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 7407/08

Cliente : Laboratório de Metrologia - LM - UNB.

##### 4.2.6. Exatidão de medição Posição E6 - unidade : $\mu\text{m}$

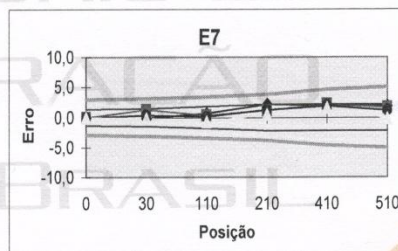
Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			erro médio
	1a.	2a.	3a.	
0	0,0	0,0	0,0	0,0
30	0,8	1,1	1,6	1,2
110	-0,2	0,6	1,2	0,5
210	0,3	2,5	2,2	1,7
410	3,3	3,9	3,8	3,7
510	0,8	1,5	2,3	1,5



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

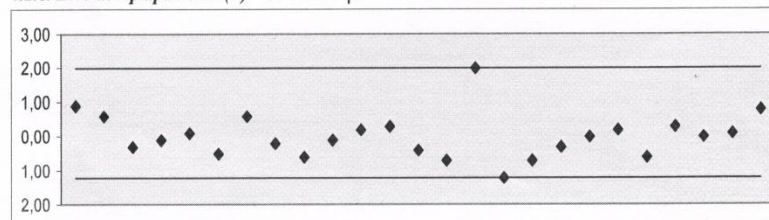
##### 4.2.7. Exatidão de medição Posição E7 - unidade : $\mu\text{m}$

Posição (L) (mm)	Erro ( $\mu\text{m}$ )			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 Apalpamento (P) - unidade : $\mu\text{m}$



Erro de Apalpamento ( $\mu\text{m}$ )	3,2
--	-----

V. Observações Gerais :

**ANEXO 2 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO MAQUINA DE MEDIR  
POR COORDENADA BRAÇO ARTICULADO**





VL Corrêa Medição e Calibração

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre / Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o nº 0375

Empresa  
Certificada

ISO 9001  
ISO 14001  
OHSAS 18001



## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº 0115/10/005-1

### 1. Dados Gerais:

Solicitante: FAPDF - UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA - FACULDADE DE TECNOLOGIA  
Endereço: SIA Trecho 6 Lotes 105/115 - Prédio SG - 9 - Zona Industrial - Brasília / DF  
Contratante: ITG ROMER LTDA.  
Endereço: Rua Alonso Keese, 73, Vila Linópolis - Santa Bárbara D' Oeste / SP  
Data da Calibração: 23/abr/10  
Local da Calibração: Contratante

### 2. Dados do Item Calibrado:

Descrição:	Braço Articulado de Medição	Capacidade de medição radial:	1250 mm
Identificação:	1408	Valor de uma Divisão:	0,01 mm
Fabricante:	Romer	Software de medição:	Romosoft 1.06
Modelo:	Arm 100	Apalpador Utilizado:	Diâmetro de 15 mm
Nº Série:	1408		

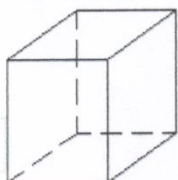
### 3. Padrão(ões) Utilizado(s):

Descrição: Barra padrão de assentos cônicos  
Identificação: DM-026  
Nº Certificado: 20231-09  
Laboratório/Rastreab.: Aferitec / RBC  
Validade: setembro-11

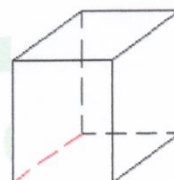
### 4. Procedimento(s) Utilizado(s):

Número/Rev.: PC 031 revisão C  
Resumo: O braço foi calibrado através da medição de uma distância da barra padrão de assentos cônicos disposta em 05 posições diferentes. O valor médio de cada posição foi obtido de 09 retas formadas pela combinação dos pontos medidos com o "cotovelo" do braço em três situações distintas (esquerda, centro e direita). A repetitividade foi obtida através da medição de 30 pontos sobre um mesmo assento da barra.

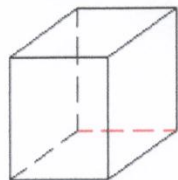
1ª Posição:



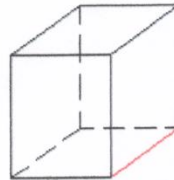
2ª Posição:



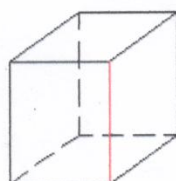
3ª Posição:



4ª Posição:



5ª Posição:



### 5. Condições Ambientais:

Temperatura:  $20,0 \pm 0,6$  °C



VL Corrêa Medição e Calibração

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre / Inmetro de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o nº 0375

Empresa  
Certificada

ISO 9001  
ISO 14001  
OHSAS 18001



## CONTINUAÇÃO DO CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO Nº

## 0115/10/005-1

### 6. Resultados:

#### 1ª Posição:

Valor do Padrão [mm]	Indicação [mm]	Tendência [mm]
780,064	780,06	0,00

#### 2ª Posição:

Valor do Padrão [mm]	Indicação [mm]	Tendência [mm]
780,064	780,06	-0,01

#### 3ª Posição:

Valor do Padrão [mm]	Indicação [mm]	Tendência [mm]
780,064	780,04	-0,03

#### 4ª Posição:

Valor do Padrão [mm]	Indicação [mm]	Tendência [mm]
780,064	780,05	-0,01

#### 5ª Posição:

Valor do Padrão [mm]	Indicação [mm]	Tendência [mm]
780,064	780,12	0,05

6.1. Erro de apalpação:  $0 \mu\text{m}$  Incerteza do erro de apalpação:  $\pm 16 \mu\text{m}$   $k= 2,07$   $V_{\text{eff}} = 39$

6.2. Incerteza de medição volumétrica:  $\pm 60 \mu\text{m}$   $k= 2,28$   $V_{\text{eff}} = 10$

- **Valor do Padrão:** Valor obtido no certificado de calibração da barra padrão de assentos cônicos.
- **Indicação:** Valor da média das leituras indicadas pelo braço calibrado.
- **Tendência:** Média dos erros de indicação de um número apropriado de medições repetidas.
- **Incerteza:** 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  $V_{\text{eff}}$  graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

- Este certificado refere-se exclusivamente ao item submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes. A sua reprodução total ou parcial depende da aprovação formal da VL Corrêa.

Executante: Cristiano Teixeira Lopes

Digitally signed by  
Eduardo de Castro Pedro

Eng. Eduardo de Castro Pedro  
Gerente Técnico



## Certificado de Ajuste

Página 1 de 2

Data da Emissão: 26/04/10  
Data da Calibração: 23/04/10

**Nº. 1408 - 923**

1. **EMPRESA:** FAPDF - Universidade De Brasília - Faculdade De Tecnologia  
SIA TRECHO 6 LOTES 105/115 - PRÉDIO SG -9 - ZONA INDUSTRIAL  
BRASILIA - DF
2. **SOLICITANTE:** Antonio Piratelli Filho
3. **IDENTIFICAÇÃO DA MÁQUINA:** Máquina de medição Tridimensional Portátil de Braço Articulado
- N.º SÉRIE DO BRAÇO: 1408
  - MODELO: Arm100
  - VOLUME DE MEDIÇÃO: X=2500, Y=2500 e Z=2500
  - INCERTEZA DO BRAÇO: 0,070 mm ( 2 Sigma)

4. **PADRÃO UTILIZADO NA CALIBRACAO:** Barra de aço com dimensão rastreada
- IDENTIFICAÇÃO INTERNA: BR01
  - COMPRIMENTO: 711.271
  - INCERTEZA: +/- 0,004 mm
  - RASTREABILIDADE DO PADRÃO: AFERITEC – Comprovações Metrológicas.
  - Certificado de Calibração nº 19049-09 datado 21/08/2009 emitido pela AFERITEC – Comprovações Metrológicas, credenciado pelo INMETRO sob o nº157.

5. **CONDIÇÕES DE CALIBRAÇÃO**

- Temperatura Especificada: 20 +/- 5 °C
- Temperatura durante calibração: 23 +/- 1 °C
- Material da barra: Aço
  - Coeficiente de dilatação: 11.5 10-6m/C
- Material do equipamento ROMER: Fibra de Carbono
  - Coeficiente de dilatação: 0.25 10-6 m/C

**ITG ROMER**  
SISTEMAS DE MEDIÇÃO 3D PORTÁTEIS  
Gustavo Junqueira SCS  
TECNOLOGIA DIVISÃO PORTÁTEIS

**ITG ROMER LTDA.**  
Rua Alonzo Keese, nº 63 – Centro  
CEP 13450-410 – Santa Bárbara D' Oeste – SP  
Fone (55) 19 3455 6129 Fax: (55) 19 3455 4516  
Internet: www.itgromer.com.br  
E-mail: suporte@itgromer.com.br

Este certificado atende aos requisitos do manual da qualidade da empresa ITG ROMER Ltda. a qual é certificada ISO 9001:2000 pela DNV Det Norske Veritas com o certificado N.º. 1694 – 2002 – SPA –INMETRO. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente a Braços ROMER submetido à ajustes, nas condições específicas e de acordo com Norma Francesa, não sendo extensivo a quaisquer lotes..

**6. PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO:**

- O braço de medição por coordenada portátil foi montado sobre uma base magnética fixada na distancia em que permitisse acessar todos os pontos de características a serem controlada do padrão.
- Foi utilizado o sensor apalpador tipo rígido de 15 mm, calibrado conforme os procedimentos do software GDS do fabricante ROMER.
- A calibração foi realizada com medições nos assentos cônicos, em 5 posições com 9 dimensões cada para precisão e 30 dimensões para repetibilidade, conforme procedimento externo IPS007 – ROMER.
- Foi utilizado o software de manutenção GDS e o EXCEL para gerar relatório de calibração; os mesmos se encontram instalados no microcomputador portátil do cliente ou da ITG ROMER.

**7. OPERAÇÕES PRELIMINARES PARA AJUSTE:**

- Checagem visual
- Checagem cabeamento/conexões
- Checagem da Instalação dos Softwares
- Verificação da precisão do braço
- Manutenção corretiva e preventiva
- Limpeza completa
- Inicialização do equipamento
- Verificação de funcionalidade / Teste de Precisão

**8. PROCEDIMENTO DE AJUSTE:**

- Foi utilizado procedimento ITtec/03 para ajustar a precisão do equipamento segundo Norma ROMER IPP09 que define as posições e instruções para calculo do algoritmo de calibração.
- Softwares utilizados: GDS e Suprastuff

**9. RESULTADO COMENTADO:**

- De acordo com o relatório de controle de incerteza de medição nº 1408 - 923
- Os resultados do cálculo de incerteza de medição, conforme a Norma NFX ENV 13005 (08/1999), para a máquina Arml00 série 1408, estão em conformidade com os requisitos e características técnicas especificados.

**10. RESPONSÁVEL PELA CALIBRAÇÃO**

Guilherme Jenera Sopena

**Analista Qualidade e Suporte Técnico**

Este certificado atende aos requisitos do manual da qualidade da empresa ITG ROMER Ltda. a qual é certificada ISO 9001:2000 pela DNV Det Norske Veritas com o certificado N°. 1694 – 2002 – SPA –INMETRO. Os resultados deste certificado referem-se exclusivamente a Braços ROMER submetido à ajustes, nas condições específicas e de acordo com Norma Francesa, não sendo extensivo a quaisquer lotes..

**ITG ROMER**  
SISTEMAS DE MEDIÇÃO 3D PORTÁTEIS

**ITG ROMER LTDA.**  
Rua Alonso Keese, nº 63 – Centro  
CEP 13450-410 – Santa Bárbara D' Oeste – SP  
Fone (55) 19 3455 5129 Fax: (55) 19 3455 4516  
Internet: www.itgromer.com.br  
E-mail: suporte@itgromer.com.br

**ANEXO 3 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO ESQUADRO  
MITUTOYO**



## LABORATÓRIO DE METROLOGIA



REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO  
Laboratório de Calibração Credenciado pelo "INMETRO", sob o N° 031

### CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N° 3834/02

CLIENTE: "FUBRA - FUNDAÇÃO UNIVERSITÁRIA DE BRASÍLIA."  
Endereço: SCLN, 208 - BL. D - Sala 210 São Paulo - SP.

#### 1 - OBJETO CALIBRADO:

ESQUADRO DE GRANITO

Fabricante: Mitutoyo.

Código: 972-101

N° de Identificação: BE000078

Dimensões: 220 x 150 x 50 mm

Identificação do Proprietário: Não Consta

Ordem de Serviço: 008.545/DAT

Data da Calibração: 12 de Setembro de 2002

#### 2 - PADRÃO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO:

APALPADOR ELETRÔNICO

N° de Identificação: 6G014

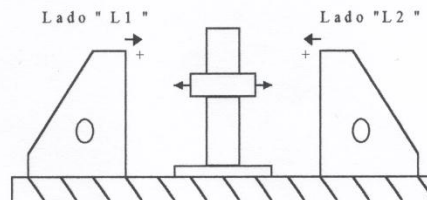
Certificado de N° 0850/02 - RBC - Mitutoyo.

Apalpador Eletrônico calibrado SISTEMA LASER DE MEDIÇÃO N° US41113744, rastreado ao Padrão Nacional pelo Certificado de Calibração N° 0105/2001, emitido pelo Laboratório de Interferometria (LAINTE) do "INMETRO", datado de 07 de Novembro de 2001, com validade até Novembro de 2004.

#### 3 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO: PML - 0032 Versão 1/2.

O erro de Perpendicularidade do Esquadro de Granito foi verificado da seguinte forma:

Verifica-se a perpendicularidade do esquadro no lado "L1", e repete-se o mesmo procedimento do lado oposto à 180° (lado "L2"), conforme figura abaixo.



Condições Ambientais durante o ensaio: Temperatura de ensaio de 20° C ± 0,5° C.

Umidade relativa do ar de 55% ± 10%.

Carlos Kazuo Suetake  
Técnico Responsável.

Antonio Sergio Conejero  
Gerente do Depto de Garantia da Qualidade  
Emissão: 13/09/02

pág. 1/2

Este Certificado atende aos requisitos de credenciamento do INMETRO, o qual avaliou a competência de medição do laboratório e comprovou sua rastreabilidade à padrões nacionais de medida. A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo. Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

\*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722

## CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Credenciado pelo " INMETRO " , sob o N°. 031

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 3834/02

CLIENTE: " FUBRA - FUNDAÇÃO UNIVERSITÁRIA DE BRASÍLIA."

OBJETO CALIBRADO:

ESQUADRO DE GRANITO

Código: 972-101

N°. de Identificação: BE000078

Data da Calibração: 12 de Setembro de 2002

#### 4 - RESULTADO DAS MEDIÇÕES: Resultado é a média das medições.

- Perpendicularidade verificada na linha central do esquadro.

Posição ( mm )	Desvio ( $\mu\text{m}$ )	Incerteza de Medição ( $\mu\text{m}$ )
50	-0,3	1,5
100	-1,5	
150	-1,9	
200	-3,7	

Planeza das Faces	Verificado ( $\mu\text{m}$ )	Incerteza de Medição ( $\mu\text{m}$ )
Face "A"	2,0	1,0
Face "B"	2,0	

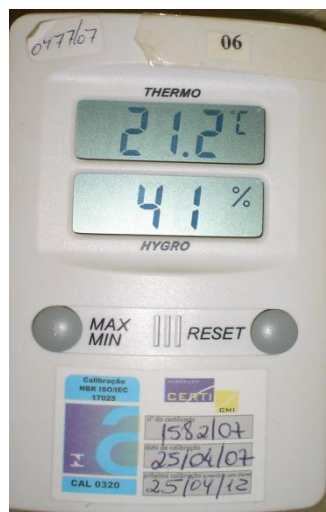
#### 5 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO:

- " A incerteza declarada é baseada em uma incerteza padronizada combinada multiplicada por um fator de abrangência  $k=2$ , para um nível de confiança de aproximadamente 95% " .

pág. 2/2



## ANEXO 4 CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO TERMOMETRO DIGITAL





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: 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				

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.

4.2 HIGRÔMETRO DE PONTO DE ORVALHO

n. Registro (CERTI): 000975

Incerteza: 0,2 °C

Rastreabilidade: Certificado de Calibração INMETRO DIMCI 0888/2006, de 23/05/06, válido até 05/09.

5. PROCEDIMENTOS DE CALIBRAÇÃO

Temperatura: PC-265, revisão 008 ; PC-266, revisão 008

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.

Umidade: PC-265, revisão 008

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.



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

Campus da Universidade Federal de

Satélite 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

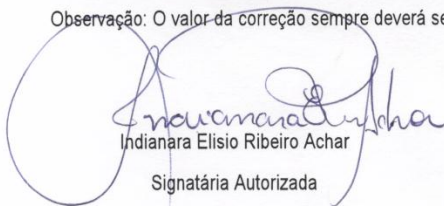
Página: 3 de 3

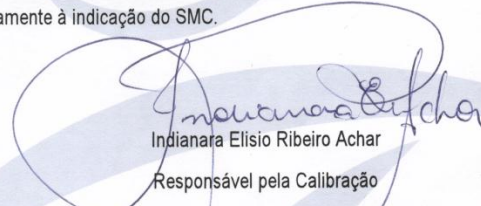
## 7.2 Escala de Umidade

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 Cgcre/Inmetro, que avalia a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida. A Cgcre/Inmetro é signatária do Acordo de Reconhecimento Mútuo de 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.