

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA ESTIMAR A INCERTEZA DE  
MEDIÇÃO NA AVALIAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE  
POR MEIO DE UMA MMC**

**HERIBERTO DO OURO LOPES SILVA**

**ORIENTADORA: PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup> MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA**

**SANTA BÁRBARA D'OESTE**

**2015**

**UNIVERSIDADE METODISTA DE PIRACICABA**

**FACULDADE DE ENGENHARIA ARQUITETURA E URBANISMO**

**PROGRAMA DE PÓS GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**

**PROPOSTA DE UM MÉTODO PARA ESTIMAR A INCERTEZA DE  
MEDIÇÃO NA AVALIAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE  
POR MEIO DE UMA MMC**

**HERIBERTO DO OURO LOPES SILVA**

**ORIENTADORA: PROF.<sup>a</sup> DR.<sup>a</sup> MARIA CÉLIA DE OLIVEIRA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção, da Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, da Universidade Metodista de Piracicaba – UNIMEP, como requisito para obtenção do Título de Mestre em Engenharia de Produção.

**SANTA BÁRBARA D'OESTE**

**2015**

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, o doador da vida, criador, mantenedor e redentor. Gratidão por encontrar em sua carta de amor, a Bíblia, a fonte da sabedoria e inspiração para tudo que faço, além da mensagem de esperança de dias muito melhores em breve.

À professora Dr.<sup>a</sup> Maria Célia de Oliveira pelos conhecimentos transmitidos, paciência e motivação que sempre transmitiu, e pela amizade.

À minha esposa amada Therully e minha filha Rayane pela compreensão de minha ausência devido aos estudos, além do apoio incondicional. Fica aqui registrado meu amor por vocês.

Aos meus familiares, em especial meus pais Paulo e Gildene, que são exemplos de dedicação e entrega em tudo o que fazem, especialmente na educação de seus filhos. Obrigado pelas orações.

A CAPES pelo apoio financeiro.

Aos colegas de graduação, laboratórios e trabalho que sempre se colocaram a disposição para ajudar e discutir ideias que cooperaram para elaboração deste trabalho, especialmente o Vinicius do Laboratório de Metrologia da Unimep.

A todos aqueles que indiretamente contribuíram com este trabalho.

SILVA, Heriberto. **Proposta de um Método para Estimar Incertezas de Medição na Avaliação de Superfícies de Forma Livre por meio de uma MMC**, 2015, 98f., Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

## RESUMO

O uso de Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC) é predominante na indústria por sua flexibilidade em medir vários tipos de peças e por fornecer baixos valores de incertezas. Contudo, no que diz respeito a medições de superfícies de forma livre com uma MMC, a atividade metrológica se torna mais complexa devido a vários fatores, por exemplo, padrões adequados, alinhamento correto entre o sistema de coordenadas das superfícies com o sistema de coordenadas do sistema de medição, escolha do apalpador e outros. Portanto, este trabalho tem o objetivo de desenvolver um método que permita estimar valores de incertezas de medição para cada ponto medido em uma superfície livre avaliada. A proposta apresentada não envolve padrões ou modelagem computacional comumente utilizadas na avaliação de superfícies de forma livre para estimar os erros e as incertezas de medições, mas os dados obtidos em uma avaliação de desempenho da MMC. Os resultados mostraram que o método proposto é adequado, pois permite avaliar as respectivas incertezas para cada ponto medido em uma superfície de forma livre considerando diferentes valores de incerteza da MMC. Verificou-se também que quanto mais pontos forem coletados na avaliação de desempenho, mais refinado será o valor da incerteza.

**PALAVRAS-CHAVE:** Incerteza de Medição; Superfícies de Forma Livre; Máquina de Medir por Coordenadas, Modelo Matemático.

SILVA, Heriberto. **Proposal of a Method to Estimate Measurement Uncertainty in Evaluation of Freeform Surfaces by CMM**. 2015, 98f., Dissertação de Mestrado em Engenharia de Produção – Faculdade de Engenharia Arquitetura e Urbanismo, Universidade Metodista de Piracicaba, Santa Bárbara d'Oeste.

### **ABSTRACT**

The use of Coordinate Measuring Machines (CMM) is prevalent in the industry for its flexibility in measuring various kinds of parts and for providing low uncertainty values. However, as regards the measurement freeform surface with a MMC metrological activity becomes more complex due to several factors, for example, suitable patterns, correct alignment between the surfaces of the coordinate system with the coordinate system measurement system, choose the probe and others. Therefore, this work aims to develop a methodology for estimating measurement uncertainties values for each point measured on a free surface evaluated. The proposal does not involve standards or computer modeling commonly used on their surfaces assessment to estimate the errors and uncertainties of measurements, but data obtained on a CMM performance evaluation. The results show that the proposed method is suitable because it allows evaluating the respective uncertainties for each point measured on the freeform surface considering different uncertainties values of the CMM. It was also found that the more points are collected in more refined performance assessment is the value of uncertainty.

**KEYWORDS:** *Measurement Uncertainty; Freeform Surfaces; Coordinate Measuring Machine, Mathematical Model.*

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	<b>II</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>III</b>
<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
1.1. OBJETIVO .....	3
1.2. JUSTIFICATIVA .....	3
<b>2. MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE.....</b>	<b>5</b>
2.1. DEFINIÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE .....	5
2.2. SISTEMAS METROLÓGICOS PARA SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE.....	8
2.2.1. RASTREADOR LASER.....	8
2.2.2. FOTOGAMETRIA .....	10
2.2.3. RADAR LASER.....	13
2.2.4. PERFILOMETRIA .....	15
2.2.5. MEDIÇÃO POR COORDENADAS .....	16
2.3. MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.....	17
2.3.1. MEDIÇÃO POR COMPARAÇÃO DIRETA OU INDIRETA.....	20
2.3.2. POTENCIALIDADES DA MMC .....	22
2.3.3. MEDIÇÃO POR CONTATO VERSUS SEM CONTATO .....	23
2.4. FONTE DE ERROS NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS .....	25
2.4.1. TIPOS DE ERROS DE UMA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.....	26
2.4.2. ERROS DO AMBIENTE .....	34
2.4.3. ERROS DA PEÇA .....	36
2.4.4. ERROS DO OPERADOR E DA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO .....	37
2.5. ETAPAS DA MEDIÇÃO COM MMC .....	38
2.6. DESAFIOS TÉCNICOS PARA MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE .....	41
2.7. DESEMPENHO DE UMA MMC.....	45
2.8. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE.....	47
<b>3. ASPECTOS METODOLÓGICOS .....</b>	<b>49</b>
<b>4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA ESTIMAR INCERTEZAS .....</b>	<b>53</b>
4.1. ETAPA 1: DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO.....	54
4.1.1. EQUIPAMENTOS E SOFTWARE .....	54
4.1.2. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO .....	55
4.1.3. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO .....	57
4.1.4. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA O FATOR DE CORREÇÃO.....	61
4.2. ETAPA 2: MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA CÁLCULO DE INCERTEZA.....	64
4.3. ETAPA 3: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO E RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	71
4.3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MMC.....	71
4.3.2. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA UMA SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE PELO MÉTODO PROPOSTO.....	78
<b>5. CONCLUSÃO .....</b>	<b>82</b>
<b>6. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>84</b>

<b>APÊNDICES.....</b>	<b>96</b>
APÊNDICE A: ROTINA PARA ESTIMAR OS ERROS E AS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA O MODELO PROPOSTO.....	96
APÊNDICE B: RESULTADO DAS MEDIÇÕES DA SUPERFÍCIE LIVRE.....	99

## Lista De Figuras

FIGURA 1: CLASSES DE INVARIÂNCIA DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS. ....	6
FIGURA 2: EXEMPLO DE UM CONE PARA CARACTERIZAR O GRAU DE INVARIÂNCIA. ....	7
FIGURA 3: CLASSIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE.....	7
FIGURA 4: FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE RASTREADOR LASER.....	9
FIGURA 5: RETRO REFLETOR MONTADO ESFERICAMENTE.....	9
FIGURA 6: FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE FOTOGRAMETRIA. ....	11
FIGURA 7: EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE FOTOGRAMETRIA.....	12
FIGURA 8: FUNCIONAMENTO DO RADAR LASER. ....	13
FIGURA 9: MÁQUINA DE PERFILOMETRIA.....	15
FIGURA 10: ESTRUTURA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS. ....	18
FIGURA 11: MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS. ....	19
FIGURA 12: MEDIÇÃO DIRETA.....	21
FIGURA 13: MEDIÇÃO INDIRETA. ....	22
FIGURA 14: CARACTERÍSTICAS QUE POTENCIALIZAM A MMC.....	23
FIGURA 15: SENSORES PARA CAPTAÇÃO DAS COORDENADAS. ....	24
FIGURA 16: DIAGRAMA DE ISHIKAWA DAS PRINCIPAIS FONTES DE ERROS.....	26
FIGURA 17: ERROS GEOMÉTRICOS DE UMA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.....	28
FIGURA 18: EXEMPLO DA TRANSGRESSÃO DO PRINCÍPIO DE ABBÉ. ....	30
FIGURA 19: APALPADOR COMUTADOR. ....	31
FIGURA 20: LÓBULO. ....	32
FIGURA 21: INFLUÊNCIA DE COMBINAÇÃO DE FONTE DE ERROS. ....	38
FIGURA 22: ETAPAS DE PREPARAÇÃO PARA UMA MEDIÇÃO. ....	39
FIGURA 23: ETAPAS DO PROCESSO DE MEDIÇÃO. ....	40

FIGURA 24: ASPECTOS IMPORTANTES PARA ESCOLHA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO.....	42
FIGURA 25: PRINCIPAIS PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO. ....	44
FIGURA 26: CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.....	50
FIGURA 27: ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO DOS PROCEDIMENTOS DE PESQUISA.....	51
FIGURA 28: SEQUÊNCIA DAS ETAPAS DO EXPERIMENTO.....	53
FIGURA 29: PLANOS DE CALIBRAÇÃO COM AS RESPECTIVAS LINHAS DE MEDIÇÃO.....	55
FIGURA 30: MALHA CÚBICA.....	56
FIGURA 31: AMBIENTE DE MEDIÇÃO. ....	58
FIGURA 32: CONFIGURAÇÃO DA MONTAGEM DAS ÓTICAS. ....	59
FIGURA 33: CALIBRAÇÃO DA MMC. (A) CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE X; (B) CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE Y; (C) CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE Z. ....	60
FIGURA 34: MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE NO PLANO XZ: (A) MEDIÇÃO EM X; (B) MEDIÇÃO EM Z.....	61
FIGURA 35: MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE NO PLANO YZ: (A) MEDIÇÃO EM Y; (B) MEDIÇÃO EM Z.....	62
FIGURA 36: MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE NO PLANO XZ: (A) MEDIÇÃO EM Y; (B) MEDIÇÃO EM X. ....	62
FIGURA 37: MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE: (A) MEDIÇÃO NA VERTICAL; (B) MEDIÇÃO NA HORIZONTAL. ....	63
FIGURA 38: POSIÇÃO DOS PONTOS CONHECIDOS NO VOLUME DE TRABALHO.....	64
FIGURA 39: IDENTIFICAÇÃO DO CUBO PEQUENO.....	66
FIGURA 40: CUBO COM INCERTEZAS CONHECIDAS NOS VÉRTICES. ....	66
FIGURA 41: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE X NO PLANO XY.....	72
FIGURA 42: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE X NO PLANO XZ.....	73
FIGURA 43: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE Y NO PLANO XY.....	74
FIGURA 44: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE Y NO PLANO YZ.....	75

FIGURA 45: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE Z NO PLANO XZ. ....	76
FIGURA 46: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE Z NO PLANO YZ. ....	77
FIGURA 47: SEQUÊNCIA DA ROTINA PARA ESTIMAR OS ERROS E INCERTEZAS DO MODELO PROPOSTO. ....	78
FIGURA 48: SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE AVALIADA COM A MMC. ....	79
FIGURA 49: RESULTADO DA ESTIMATIVA DOS ERROS E DAS INCERTEZAS PARA OS PONTOS MEDIDOS. ....	81

## 1. INTRODUÇÃO

Os produtos atuais apresentam suas formas com geometrias cada vez mais complexas. No setor automobilístico, por exemplo, é possível notar nos acessórios formas mais arredondadas e a presença de vincos que caracterizam superfícies irregulares. Dentre outros exemplos destacam-se as motocicletas, aviões e *mouses*. Estes produtos apresentam como característica comum formas geométricas complexas motivadas por questões estéticas ou também por questões funcionais que buscam atender a uma série de requisitos dos usuários (SAVIO; CHIFFRE e SCHMITT, 2007).

No tocante às características geométricas, as superfícies dos exemplos citados têm em comum o fato de não possuírem eixo de rotação e nem movimento de translação (JIANG; SCOTT; WHITEHOUSE, 2007). Comumente, na literatura utiliza-se o termo superfícies de forma livre para caracterizar esses objetos. Do ponto de vista da definição geométrica, essas superfícies se enquadram na classificação da norma ISO 17450-1 (2011), em função dos elementos geométricos que as constituem, porém em termos conceituais, não é muito clara a definição de superfícies de forma livre.

Em um sistema de produção, a etapa de controle tem enfrentado grandes desafios nos processos de medição de superfícies de forma livre (SAVIO, 2007; RODGER, 2007). Assim como todo processo, o sistema de medição também está sujeito a fatores que influenciam e causam variabilidade nos resultados (HOCKEN e PEREIRA, 2012). De acordo com GUM (2012) em uma medição qualquer, os resultados contêm erros e incertezas que dificultam a identificação das variações geométricas da peça fabricada em relação à idealizada no projeto.

A necessidade das empresas é obter resultados de medição o mais próximo possível do valor do mensurando. Isso não é possível sem identificar os fatores de influência tais como, equipamento, peça, ambiente, operador e método, que

terão efeitos sobre os resultados dos valores medidos. Por esta razão, ao se avaliar dimensionalmente qualquer medida deve-se necessariamente considerar as incertezas de medição envolvidas (GUM, 2012), independentemente se sua superfície é convencional ou de forma livre.

As técnicas convencionais (mais comuns) para avaliar incertezas e erros de medição são descritas pelo GUM (2012): análise de sensibilidade; experimentos; simulações e parecer de um especialista. Contudo, os estudos sobre medições de superfícies de forma livre com as MMCs em qualquer técnica descrita anteriormente, envolvem aspectos que dependem do alinhamento correto entre o sistema de coordenadas das superfícies com o sistema de coordenadas do sistema de medição, padrões combinados para avaliar as incertezas de diversas características geométricas, modelagem computacional, sistema de contato ou não contato e outros (LI; GU, 2004; LASEMI *et al.*, 2012; KONG *et al.*, 2009).

Diferentemente destes estudos, o estudo aqui desenvolvido não utiliza padrões para estimar os erros e incertezas, mas valores de uma calibração da MMC com base no método proposto por Oliveira (2012), que pode ser aplicado para medições de superfícies de forma livre, por exemplo, por meio de MMCs. A escolha de uma MMC para este estudo se fundamenta pelo uso dominante da MMC entre as empresas (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

No que diz respeito ao uso da MMC, o método proposto por Oliveira (2012) propõe uma medida de incerteza global que pode ser usada para avaliar a incerteza de um determinado volume de trabalho da MMC. Neste caso, a incerteza estimada é única para toda peça avaliada e não para cada um dos pontos medidos na superfície livre.

Avançando nos estudos de Oliveira (2012) pretende-se avaliar o potencial refinamento na informação da incerteza para considerar diferentes valores de incerteza de medição em cada ponto medido no produto avaliado, com uma incerteza potencialmente menor devido ao refinamento.

## 1.1. OBJETIVO

Este trabalho tem o objetivo de desenvolver um método que permita estimar valores de incertezas de medição considerando erros geométricos para cada ponto medido em uma superfície livre avaliada por meio de uma MMC.

## 1.2. JUSTIFICATIVA

Estimar as incertezas de medição, especialmente de superfícies de forma livre depende de informações que, em função da rotina do ambiente fabril, podem ser de difícil acesso ou podem depender de experimentos de alto custo.

As propostas para estimativa as incertezas de medição, quer sejam normativas ou experimentais, quase nunca se aplicam às superfícies de forma livre, pois foram desenvolvidas para avaliar superfícies com geometrias convencionais tais como, planos e esferas (METROSAGE, 2003; ISO/TS 15530-3, 2004; BACHMANN *et al.*, 2004; FENG, SAAL e SALSBURY, 2007; BARINI *et al.*, 2010; ISO/TS 15530-3, 2011; ANSI/ASME B89.1.12M, 1985; VDI/VDE 2617, 1986).

Mais especificamente, para medição de superfícies de forma livre, Savio e Chiffre (2002) desenvolveram uma proposta com artefatos calibrados a partir da combinação de formas geométricas convencionais (blocos, esferas, cones, etc.) simulando uma superfície de forma livre. Contudo, esse tipo de proposta é limitado pela falta de padrões que garantam a rastreabilidade adequada.

Mais recentemente, Cheng, Ren e Kong (2014) analisaram as incertezas de superfícies de forma livre por meio de uma MMC pelo método de simulação computacional utilizando a técnica de Monte Carlo, que parte de um modelo matemático e das potenciais fontes de variabilidade que afetam o resultado de medição. O modelo desenvolvido por Cheng, Ren e Kong (2014) incorpora os efeitos da MMC, o plano de amostragem e o método de avaliação.

Outra proposta é apresentada por Oliveira (2012) ao desenvolver um modelo que permite considerar os erros e as incertezas de medição de uma superfície de forma livre, por meio de técnicas de simulação e de reamostragem, independentemente da tecnologia de medição utilizada.

Apesar de o método proposto por Oliveira (2012) possuir aplicabilidade abrangente, pois considera desde informações mais disponíveis como a especificação do fabricante até informações mais sofisticadas obtidas por meio de experimentos planejados, é considerado um único valor de incerteza para a medição de toda a superfície. Sabendo que uma MMC se comporta de maneira diferente em cada posição do volume de trabalho, a proposta apresentada para este estudo é refinar o valor da incerteza, resultando em valores diferentes de incerteza para cada ponto medido.

Segundo Sultan e Puthiyaveettil (2012) a acurácia dos valores medidos pode ser melhorada por técnicas apropriadas de calibração, que consideram fonte de erros geométricos e não geométricos. Nesse sentido, este estudo utiliza dados de uma calibração realizada para avaliar o desempenho da MMC para estimar os erros e as incertezas para cada ponto medido na superfície de forma livre. Por utilizar exclusivamente os dados da calibração para estimar a incerteza de medição, o método apresentado considera apenas os erros geométricos da máquina como fonte de incerteza.

A proposta apresentada neste estudo permite fornecer valores de incertezas mais confiáveis, refletindo de maneira mais real as variações da MMC em cada posição da sua área de trabalho.

Com base nos projetos com tolerâncias cada vez menores, ter em mãos dados de incertezas de medição com maior acurácia permite conhecer melhor os processos de manufatura. Esta proposta vem a cooperar na tomada de decisões envolvendo o sistema produtivo no intuito de fornecer produtos com maior qualidade.

## 2. MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE

Este capítulo apresenta o resultado do levantamento bibliográfico realizado durante o desenvolvimento do estudo, que abrange os aspectos de definição e caracterização das superfícies de forma livre, os sistemas metrológicos atuais para superfícies de forma livre e especificamente uma abordagem mais profunda na utilização de MMCs.

### 2.1. DEFINIÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE

Os sistemas de produção estão em constante processo de transformação em decorrência dos avanços tecnológicos, que possibilitam alterar as características dos produtos rapidamente para atender às exigências dos clientes. Este avanço tecnológico exige características geométricas dos produtos cada vez mais complexas que não se enquadram nas classificações geométricas convencionais, tais como círculos, esferas e cilíndricos, nem mesmo na combinação delas (JIANG, SCOTT e WHITEHOUSE, 2007). Como já apresentado, o termo comum na literatura para designar os objetos com tais características é superfícies de forma livre.

No setor industrial é possível encontrar muitos produtos que possuem em sua superfície formas livres, como por exemplo, hélices, *mouse* de computador, casco de barcos e componentes automotivos. De forma especial, componentes com funcionalidade que exigem interação com fluídos e ondas, como no caso de fuselagem de aviões, pás de turbinas e no segmento ótico, são bons exemplos de superfícies de forma livre (SAVIO *et al.*, 2007).

Segundo Kowarschik *et al.* (1993) define-se superfície livre como qualquer superfície cuja geometria não pode ser representada por equações matemáticas definidas. No mesmo sentido, Jiang, Scott e Whitehouse (2007)

descrevem que as geometrias de superfícies de forma livre não podem ser descritas por uma única equação universal, e uma superfície que não pode ser definida por uma equação dificulta a descrição analítica (WOLOVICH *et al*, 2002). Outra forma de compreender as superfícies é por meio da normatização.

Com base na norma ISO 17450-1(2011), a classificação dos elementos geométricos adota a noção de simetria conforme ilustrado na Figura 1.

Classes de Invariância	Símbolo	Graus de Invariância	Descrição
Complexa		0	Nenhuma translação, tampouco rotação
Prismática		1	Uma translação ao longo de uma reta
Revolução		1	Uma rotação em torno de uma reta
Helicoidal		2	Uma translação e uma rotação simultâneas ao longo e em torno de uma reta
Cilíndrica		2	Uma translação ao longo de uma reta e uma rotação ao redor de uma linha reta
Planas		3	uma rotação em torno de uma reta e duas translações em um plano perpendicular a reta
Esféricas		3	Três rotações em torno de um ponto

FIGURA 1: CLASSES DE INVARIÂNCIA DOS ELEMENTOS GEOMÉTRICOS.

FONTE: OLIVEIRA (2012).

A Figura 1 exemplifica os elementos geométricos em sete e seus respectivos graus de invariância. Os movimentos de translação e rotação que mantêm a geometria inalterada no espaço formam um grupo de simetria e este por sua vez determina o grau de invariância. Tanto o movimento de translação como de rotação que determinam o grau de invariância podem ser compreendidos conforme a Figura 2.

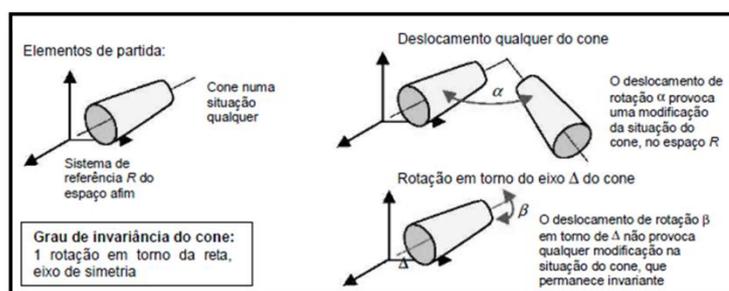


FIGURA 2: EXEMPLO DE UM CONE PARA CARACTERIZAR O GRAU DE INVARIÂNCIA.

FONTE: ALMACINHA, J. A (2005).

No exemplo da Figura 2, o cone sofre deslocamento de rotação no seu eixo de simetria  $\beta$  sem alterar sua situação no espaço, definindo um grau de invariância. No entanto, ao se deslocar em qualquer outra rotação  $\alpha$  sua situação no espaço é modificada. Outra maneira de classificar as superfícies de forma livre é de acordo com sua aplicação prática conforme a Figura 3.

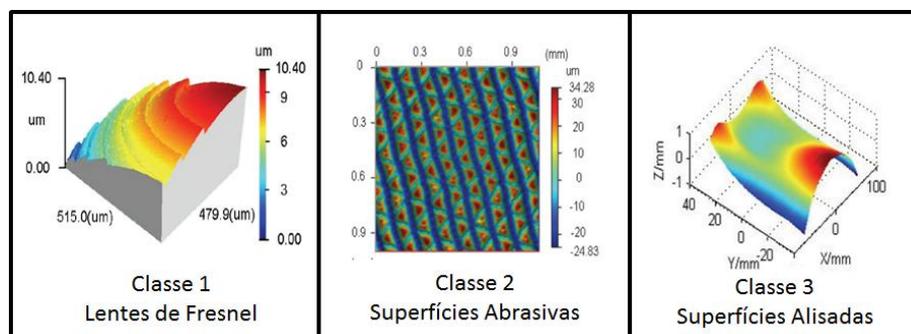


FIGURA 3: CLASSIFICAÇÃO DE SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE.

Fonte: Jiang, Scott e Whitehouse (2007).

De acordo com a Figura 3, para as superfícies de classe 1 a principal característica é de possuírem degraus, arestas e facetas. Um exemplo é a lente de Fresnel, presente em muitos equipamentos como faróis de carros, luzes de tráfego, semáforos, holofotes militares e civis e projetores para iluminação de palco no teatro e indústria cinematográfica. Essas lentes têm a capacidade de ampliar a luz devido à sua espessura, permitindo a passagem de mais luz.

As superfícies de classe 2 são aquelas que possuem uma estrutura que se repete ao longo da superfície. Exemplo dessa classe de superfície são partes abrasivas que consistem de uma matriz triangular com base piramidal.

As superfícies de classe 3 são totalmente opostas às anteriores em suas características. Elas não possuem degraus, arestas, facetas ou padrões repetidos. Sua superfície é lisa em toda sua geometria.

As superfícies de forma livre não possuem eixo de rotação e também não podem sofrer movimento de translação, pois não permanecem invariantes no espaço, portanto identificando-se com a classe de invariância complexa ilustrada na Figura 1. Com base na proposta de Jiang, Scott e Whitehouse (2007) as superfícies que serão abordadas neste estudo se enquadram aquelas de classe 3.

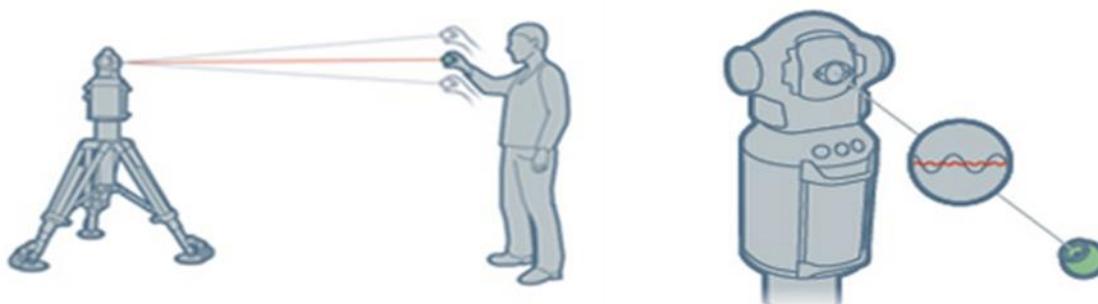
## **2.2. SISTEMAS METROLÓGICOS PARA SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE**

Nos próximos tópicos estão os sistemas metrológicos mais comumente utilizados para avaliação de superfícies de forma livre, com base nos estudos de Savio *et al.* (2007) e Rodger *et al.* (2007).

### **2.2.1. RASTREADOR LASER**

Esse sistema é constituído de um dispositivo móvel de medição por coordenadas que proporciona exatidão para longas distâncias. Em síntese, o rastreador envia um feixe de luz em direção ao alvo portátil retro reflexivo

mantido contra o objeto a ser medido. A luz refletida pelo alvo refaz seu caminho e volta ao rastreador, como ilustrado na Figura 4.



*FIGURA 4: FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE RASTREADOR LASER.*

*Fonte: <http://www.qualitydigest.com/inside/twitter-ed/how-laser-trackers-work.html#>*

A Figura 4 ilustra o alvo portátil sendo movimentado e o rastreador acompanhando o movimento. O rastreador laser realiza a medição por meio de dois ângulos e uma distância, permitindo calcular as coordenadas a partir de uma posição de referência. Dentre os tipos de alvos portáteis utilizados, a Figura 5 ilustra um alvo popularmente utilizado no mercado.



*FIGURA 5: RETRO REFLETOR MONTADO ESFERICAMENTE.*

*Fonte: <http://www.apitechnical.com/break-resistant-smrs-by-api/>*

Por mais preciso que seja o rastreador a laser, a qualidade das medições é afetada diretamente pela exatidão do alvo. Comercialmente existem vários tipos de alvos. Os mais populares são os retro refletores montados esfericamente (SMRs), com formato de um vértice de um cubo no centro da esfera de aço conforme ilustrado na Figura 5. Nesse sentido, para garantir a qualidade das medições é necessário baixo erro de esfericidade e vértice de centralização.

Esse sistema é aplicado a diversas áreas como, por exemplo, em inspeções de peças grandes, alinhamento e calibração de máquinas, análise dimensional e até em calibração de robôs (ESTLER *et al*, 2002). O rastreador possibilita a medição de grande escala porque a faixa de medição é em torno de 160 m de acordo com vários fabricantes.

Segundo Estler *et al.* (2002), para avaliar o desempenho do rastreador laser é comum utilizar artefatos calibrados como barras de esferas. Para proporcionar um grau de confiança no uso de rastreador laser, ASME B89.4.19 apresenta testes de desempenho geométrico.

Mais recentemente VDI/VDE 2617 e a ISO 10360 propõem um conjunto similar de testes. Outras normas são comparadas por Loser (2009), que descreve um método de calibração adequado para os testes descritos. Sandwith e Lott (2007) propõem outro teste, mas este fornece valores de incertezas para cada alvo. Este teste permite avaliar os alvos individualmente e não em conjunto, desta forma seu resultado também é individual para cada alvo e não um valor único de incerteza para o conjunto de laser mais o alvo.

### **2.2.2. FOTOGRAMETRIA**

A fotogrametria é uma tecnologia que obtém informações sobre os objetos utilizando imagens (FANTIN, 1999). Segundo Temba (2000), a fotogrametria pode ser dividida em duas grandes áreas: fotogrametria interpretativa e fotogrametria métrica.

A primeira delas tem como objetivo principal o reconhecimento e identificação de objetos como também o julgamento do seu significado a partir de uma análise sistemática e cuidadosa das fotografias. A segunda técnica, fotogrametria métrica, consiste na medição de fotos como ilustrado na Figura 6 e também em outras fontes possíveis de informação para determinar o posicionamento relativo de pontos. Com auxílio de técnicas e processos é possível determinar distâncias, ângulos, áreas, volumes, elevações, tamanhos e formas de objetos (TEMBA, 2000).

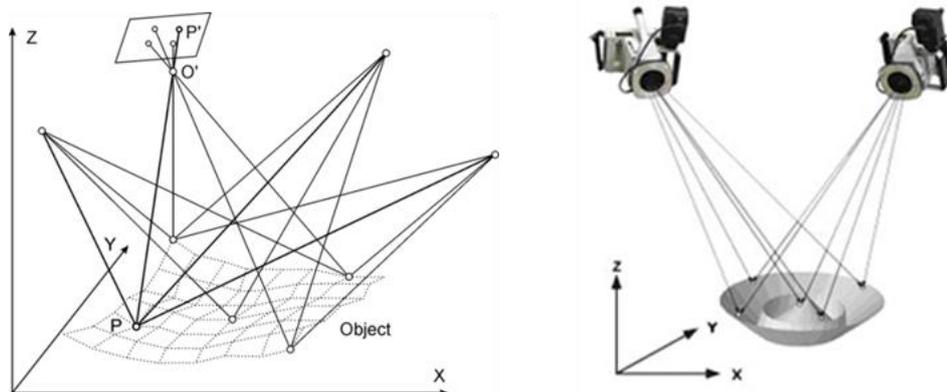


FIGURA 6: FUNCIONAMENTO DO SISTEMA DE FOTOGRAMETRIA.

Fonte: Schenellion Informatics

<<http://schnellinformatics.com/photogrammetry.html>>.

O processamento de dados captados pelas câmeras parte do ponto de identificação dos pontos homólogos conforme ilustra a Figura 6 (mesmo ponto captado por duas câmeras diferentes) que é calculado com ajuda de algoritmos específicos. Ter conhecimento da localização das câmeras no espaço geométrico é fundamental para este processamento.

Com o advento da era digital, essa tecnologia se tornou comum para gerar informações geométricas no universo 3D (tridimensional) obtidas de imagens digitais 2D (planas). Devido a diversas questões envolvendo avanço tecnológico, recursos financeiros e necessidades práticas, outros métodos foram surgindo. Dentre eles destacam-se: Digital Video Plotter (DVP); Digital

Screen Stereoplotter (DSS); Digital Photogrammetric System (DPS; Digital Stereo Imaginary (DSI), (TEMBA, 2000).

Esse sistema atualmente recorre às tecnologias informáticas que possibilitam o processamento das imagens. Porém, segundo a empresa Geodetic Systems, líder global de sistemas fotogramétricos, não é possível mapear completamente um objeto tridimensional a partir de uma imagem bidimensional, considerando que sempre se perde algum tipo de informação como, por exemplo, a profundidade. Esta situação pode ser compreendida na ilustração da Figura 7, quando parte do calçado não é capturado pelas câmeras do sistema.



*FIGURA 7: EXEMPLO DE MEDIÇÃO DE FOTOGRAMETRIA.*

*FONTE: FIRST HIGH TECH <[HTTP://WWW.1ST.COM.MY/](http://www.1st.com.my/)>.*

Conforme a Figura 7, é possível verificar que devido ao posicionamento das três câmeras do sistema fotogramétrico, ao menos metade da peça não é capturada na análise dimensional, limitando a área de inspeção.

No cenário industrial, a fotogrametria está relacionada a medições de grandes superfícies como o rastreador laser, tais como, componentes de estações espaciais e lâminas de turbina para energia eólica (ESTLER, 2002).

Exemplo de sua aplicação encontra-se no estudo de Coelho (2000), que avalia as deformações permanentes nas lanças de guindastes de plataformas marítimas da Petrobras devido aos choques acidentais com outras partes da plataforma.

Comercialmente, os equipamentos mais sofisticados possuem erros máximos de  $5\mu + 5 \mu/m$  para aplicações na indústria, como o exemplo da Figura 7. O desempenho metrológico da fotogrametria é aceitável para peças fundidas ou de plástico, como apresentado no estudo de Lima (2006) comparando os sistemas de braço articulado e de MMCs ao sistema fotogramétrico. Apesar de aplicações na indústria, a fotogrametria é mais utilizada para gerar mapas topográficos aéreos, incluindo imagens de satélite.

### 2.2.3. RADAR LASER

O Radar Laser realiza medições 3D automatizadas, sem contato, aplicados para medições de grandes volumes. Diferente dos sistemas anteriores citados, o radar laser realiza medições de forma mais independente, não necessitando de alvos móveis, retro refletores ou apalpadores conforme ilustra a Figura 8.



FIGURA 8: FUNCIONAMENTO DO RADAR LASER.

*FONTE: RODGER ET AL. (2007).*

A Figura 8 ilustra o funcionamento do radar laser durante a medição de uma superfície de automóvel. O radar laser é um sistema portátil de medição, o que permite levá-lo até a superfície a ser medida. Essa característica favorece a medição de peças grandes de difícil movimentação.

Este sistema é capaz de fazer uma varredura das superfícies e seus resultados podem ser processados em programas de computador e ter sua geometria comparada aos valores nominais com auxílio de modelos CAD (RODGER *et al*, 2007).

Essa tecnologia permite realizar medições em quase qualquer tipo de superfície tais como, plásticos, borrachas, compostos ou metais. A medição com radar laser aplica-se a diversas áreas como construção naval, construção de satélites, indústria aeroespacial, transporte ferroviário, turbinas eólicas e painéis solares.

Entretanto, existem algumas limitações impostas pela atmosfera como temperatura, umidade e intempéries que frequentemente interferem na propagação dos raios de luz. Os efeitos dessas limitações em medições com radar laser podem ser resumidos em refração, variação da velocidade da luz e turbulência (ESTLER, 2002), que podem piorar a exatidão da medição.

No intuito de fornecer um valor mais exato da medição, Jia Cheng *et al.* (2013) desenvolveram um modelo para compensação de erros dos efeitos da atmosfera sobre os raios laser.

O radar laser tem um sinal capaz de medir até 60 m de distância. Os erros envolvidos nesse sistema dependem diretamente da extensão a ser medida. Alguns equipamentos relatam erros de 24  $\mu\text{m}$  (a dois metros de distância) até 201  $\mu\text{m}$  (a vinte metros de distância).

#### 2.2.4. PERFILOMETRIA

A perfilometria, ilustrada na Figura 9, é um sistema de medição que possibilita verificar as variações de altura durante o deslocamento da peça medida em relação a um sensor.



*FIGURA 9: MÁQUINA DE PERFILOMETRIA.*

*FONTE: <[HTTP://IND-TECHNO.COM.UA/EN/CAT/8/268/27130/](http://ind-techno.com.ua/en/cat/8/268/27130/)>*

É muito comum na indústria, a utilização da perfilometria para medições especialmente em produtos de aplicações óticas (RODGER *et al*, 2007).

A perfilometria possui sensores que podem ser com contato ou sem contato. Sensores de contato são formados basicamente de uma ponteira de diamante em forma cônica com raio variando de 1,5 mm a 12,5 mm. Ele possibilita avaliar os picos e vales das superfícies com muita acuracidade, porém sua maior limitação envolve superfícies delicadas podendo deformar a superfície durante a medição.

Os sensores sem contato, como no exemplo da Figura 9, consistem na tecnologia laser ou ótica e têm a vantagem de ter acesso a vales mais

profundos. Esses equipamentos podem chegar a resoluções de  $1,0 \times 10^{-9}$ m. Segundo Savio *et al.* (2007), essa técnica é conhecida e amplamente aceita pelos procedimentos de calibração para a rastreabilidade das medições.

### **2.2.5. MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

Em geral, essa tecnologia pode ser entendida dividindo os instrumentos em dois grupos considerando o tipo de movimento realizado durante as medições, rotação e cartesiano.

Algumas máquinas que têm o princípio de movimentação por rotação são denominadas de braços articulados (BAM- braço articulado de medição) comendo 4, 5 ou mais graus de liberdade. Os BAM são equipamentos portáteis, favorecendo as medições em campo e seu custo também é menor. As incertezas das medições com as máquinas de braço articulado são geralmente maiores que as máquinas cartesianas, pois fatores como fixação da máquina com relação à peça, habilidade do operador e temperatura causam forte influência sobre os resultados da medição (SOUZA, A.R.;OROSCO, D.B; GIAMUSSO, L., 2003).

As máquinas denominadas cartesianas (MMC) têm o princípio de deslocamento retilíneo nas três coordenadas lineares ortogonais e são dotadas de uma estrutura que lhes confere baixos valores de incertezas, menores, por exemplo, que os de braços articulados. Sua estrutura tem que ser rígida para que os movimentos sejam realizados nas três coordenadas lineares ortogonais. Em geral, os fabricantes equipam suas máquinas com mancais pneumáticos, entretanto, ainda são encontradas máquinas com guias de roletes ou esferas recirculantes. A vantagem dos mancais pneumáticos está num movimento com mínimo atrito permitindo realizar medições de alta exatidão, contudo como qualquer outro sistema de medição, estão sujeitos a limitações metrológicas.

As MMCs cartesianas têm sido o principal instrumento para inspeção de superfícies de forma livre na indústria devido à sua capacidade de adaptar-se rapidamente a diferentes tipos de medições para controle geométrico (SAVIO

*et al.*, 2007; TRAPET e WALDELE, 1997; MIGUEL, 1996), por isso a proposta desse estudo se concentra nas MMCs cartesianas que serão mais detalhados a seguir.

### **2.3. MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS**

As máquinas de medir por coordenadas (MMC) estão entre os instrumentos mais importantes na metrologia. Em 1956 na Escócia, a empresa Ferranti Ltda. introduziu a primeira máquina de medir por coordenadas na indústria. A ideia surgiu da necessidade de inspecionar peças rapidamente a ponto de acompanhar o ritmo de produção acelerado em razão das máquinas ferramentas controladas numericamente. O projeto inicial oferecia uma resolução de 0,012mm e as leituras eram feitas apenas nos eixos X e Y. Somente em 1962 foi introduzido o eixo de direção Z de forma plena para realizar as medições em três coordenadas (HOCKEN e PEREIRA, 2012).

Inicialmente, a máquina foi desenhada para medição de peças com incertezas de 0,025mm. Desde então as máquinas de medir por coordenadas evoluíram e adquiriram estruturas diferentes para atender as necessidades do mercado. Dentre as estruturas existentes mais comuns e usuais no mercado são Ponte Móvel, Ponte Fixa, Cantilever, Braço Horizontal e Pórtico (NI e WALDELE, 1995; HOCKEN e PEREIRA, 2012). A Figura 10 apresenta todos esses tipos de MMC.

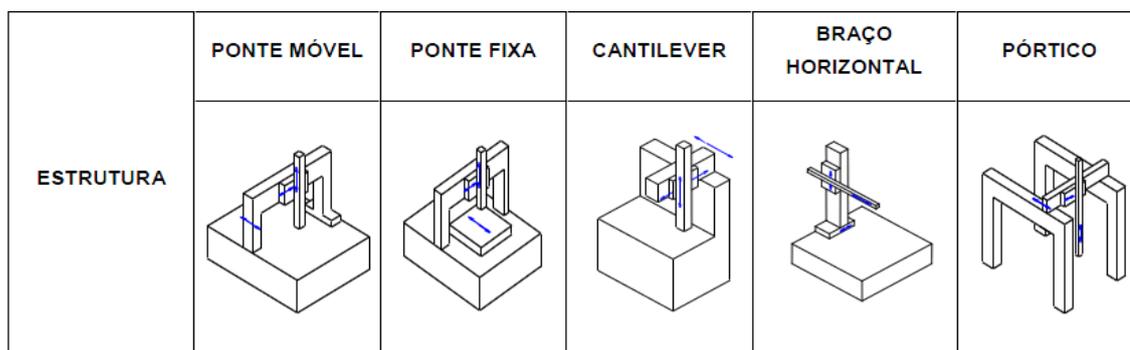


FIGURA 10: ESTRUTURA DE MÁQUINAS DE MEDIR POR COORDENADAS.

Fonte: Hocken e Pereira (2012).

Segundo Ferreira (2007), a MMC é um recurso poderoso que as indústrias possuem para o desenvolvimento de produtos e controle dimensional. Nesse sentido as indústrias de automóvel, espacial e aeronáutica, conhecidas por suas exigências, têm grande relevância no uso de MMCs e no desenvolvimento da metrologia nos últimos anos (SAVIO *et al.*,2007; RODGER *et al.*,2007).

O surgimento da MMC foi impactante na indústria no que diz respeito ao controle dimensional, desencadeando a substituição de muitos instrumentos de metrologia convencionais (MORAIS, 2012). Um sistema de medição por coordenadas é formado não somente pela MMC, mas também de computador e controle CNC conforme ilustrado na Figura 11.

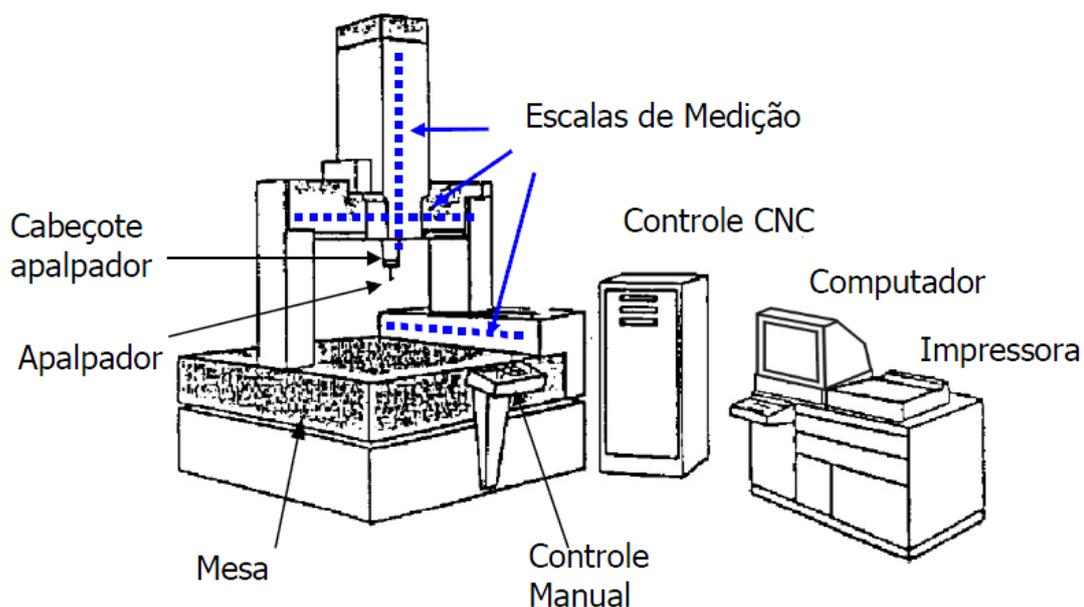


FIGURA 11: MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.

Fonte: Fundação CERTI (2003).

Uma MMC permite conhecer a posição que um elemento localizador ocupa no espaço de trabalho da máquina. Este elemento localizador é conhecido como apalpador, conforme a Figura 11, e sua operação ocorre por uma combinação eletro-mecânica. Ao movimentar o apalpador até a superfície da peça o sensor capta o momento do contato e relaciona o ponto ao sistema cartesiano (pontos coordenados  $X_i$ ,  $Y_i$ ,  $Z_i$ ).

Obtendo as coordenadas dos pontos sobre a peça ocorre um processamento de dados por meio de algoritmos matemáticos para ajustar os pontos coordenados às geometrias que modelam as peças (chamadas usualmente de geometrias substitutas).

Desta maneira é possível comparar as características ou os parâmetros das geometrias substitutas tais como dimensão, forma e posição, permitindo analisar diâmetros, distâncias e posição de círculos, com as dimensões ou tolerâncias do projeto. Por exemplo, para conhecer o diâmetro de um círculo,

deve-se conhecer as coordenadas de três pontos deste círculo e, com o auxílio de um algoritmo de ajuste, são estimados os parâmetros de elementos geométricos ideais (elementos substitutos) que nesse caso é o diâmetro.

Os computadores tornaram-se um grande aliado das MMCs por possibilitarem potencialidades matemáticas, maior flexibilidade de comunicação e conexão com um processo.

As MMCs com comando numérico computadorizado (CNC) permitem o sistema programar medições automaticamente por meio de um programa de computador que transfere comandos específicos ao CNC. O software por sua vez possui recursos básicos de processamento geométrico resultando em gráficos e viabilizando representações dos erros em relação à geometria ideal.

Para esclarecer melhor os aspectos da utilização da MMCs para medição de superfícies de forma livre, nos próximos tópicos serão abordadas questões sobre vantagens tecnológicas do sistema MMC, etapas do processo de medição e também as fontes dos erros e incertezas inerentes do sistema.

### **2.3.1. MEDIÇÃO POR COMPARAÇÃO DIRETA OU INDIRETA**

A escolha do sistema mais adequado para avaliações geométricas pode depender de questões financeiras ou técnicas. De qualquer forma, o objetivo é obter resultados o mais próximo possível dos respectivos valores verdadeiros (GUM, 2012).

Para avaliação de superfícies de forma livre, comumente são aplicadas duas formas de medição: comparação direta e indireta (NEROSKY, 2001; IP e LOFTUS, 1996). A comparação direta verifica o desvio entre a superfície avaliada e a superfície padrão por meio das distâncias (folgas) existentes entre as duas, quando sobrepostas. Esta medição é ilustrada na a Figura 12, sendo possível sua realização por microscópio ou por alta concentração de luz, ambas inspecionadas visualmente.



*FIGURA 12: MEDIÇÃO DIRETA.*

*Fonte: Savio, De Chiffre e Schimitt (2007).*

A comparação direta não é possível em qualquer tipo de peça, mas em situações específicas como na inspeção de hélices de turbinas, sendo possível sobrepor os objetos e avaliar a diferença entre elas conforme a Figura 12, que utiliza alta concentração de luz para identificar possíveis folgas entre as peças.

Embora algumas aplicações aceitem essa metodologia, os resultados estão carregados de incertezas por dependerem fortemente da habilidade do inspetor. Outras questões importantes que devem ser consideradas envolvem a manutenção e calibração dos padrões e o tempo dispendido para inspeção visual.

Em contrapartida, na comparação indireta, o padrão é substituído por um modelo geométrico computadorizado 3D. Desta forma, sua realização depende diretamente da tecnologia de medição por coordenadas e não mais do operador. O princípio básico deste método é avaliar a medição da superfície em comparação ao modelo computadorizado conforme a Figura 13, que ilustra o modelo 3D e uma foto da peça real.

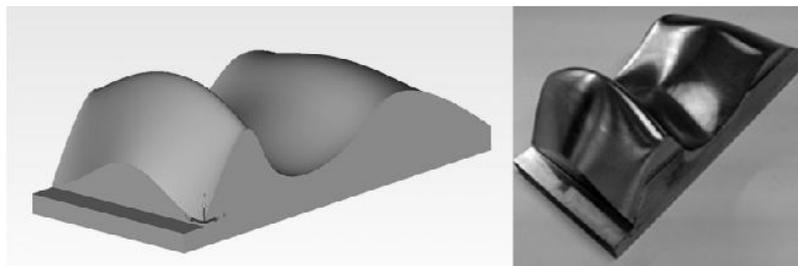


FIGURA 13: MEDIÇÃO INDIRETA.

Fonte: Oliveira (2012).

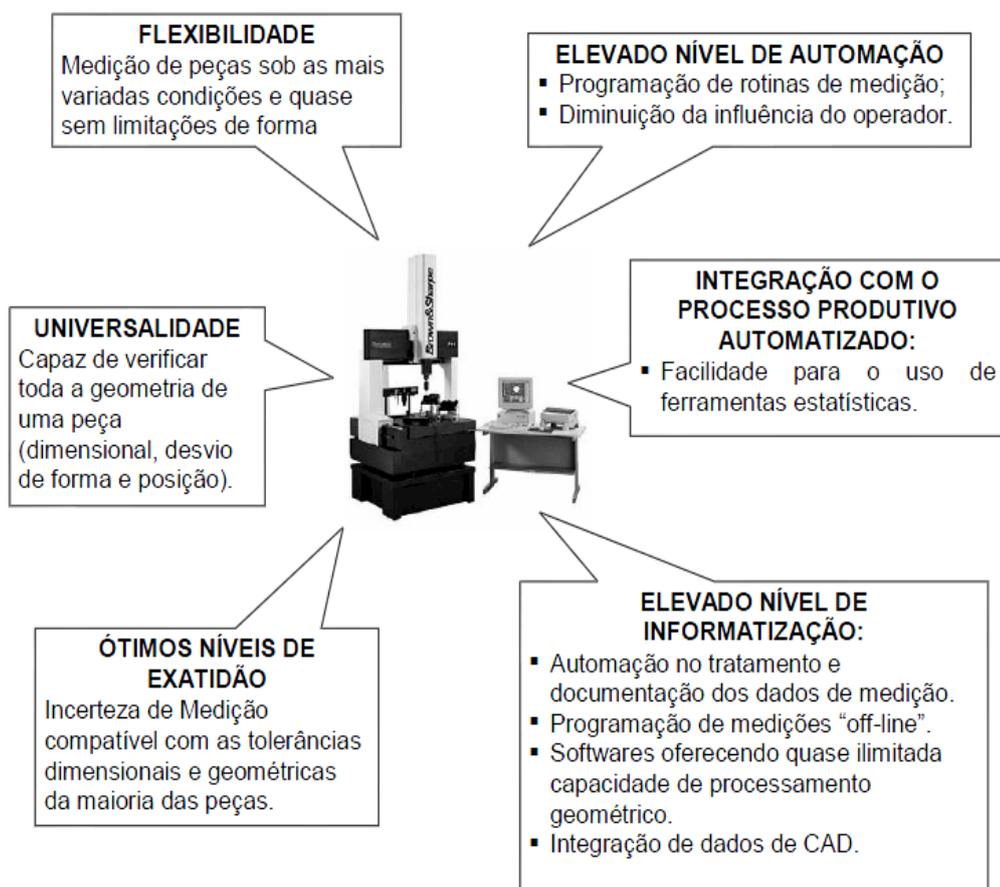
A vantagem da medição indireta em relação à medição direta tem a ver com a tecnologia que possibilita a posição e a magnitude dos erros, gerando normalmente incertezas menores (NEROSKY, 2001).

Independente do sistema escolhido, as informações sobre a orientação, a posição e a forma são essenciais para uma caracterização da superfície livre, acompanhada de análise rigorosa.

### 2.3.2. POTENCIALIDADES DA MMC

A tecnologia no contexto da metrologia vem contribuindo para formar uma nova cultura metrológica na indústria e mudar o conceito antigo de que metrologia é uma atividade dispendiosa, que não agrega valor, aumentando tempos de produção e atribuindo a ela razões de gargalos entre processos. O uso efetivo dos dados gerados pela medição juntamente com as ferramentas estatísticas amplamente disseminadas têm alavancado o papel da metrologia na garantia da qualidade com dados confiáveis sobre os produtos e processos.

São muitas as vantagens da aplicação das MMCs na indústria possibilitando em geral maior flexibilidade, velocidade, integração em ambientes com automação, entre outros como pode ser visto na Figura 14.



*FIGURA 14: CARACTERÍSTICAS QUE POTENCIALIZAM A MMC.*

*FONTE: BRITO NETO, A. S. (2003).*

A MMC está fazendo parte cada vez mais dos sistemas metrológicos da indústria alavancando estudos para melhorar seu desempenho. Especialmente para superfícies de forma livre as MMCs têm contribuído para ótimos níveis de exatidão e ganhos em velocidade devido à automação e informatização, pois integra a medição a outras áreas da empresa fornecendo dados importantes sobre os processos produtivos.

### **2.3.3. MEDIÇÃO POR CONTATO VERSUS SEM CONTATO**

As medições com MMC podem ser realizadas por sensores de contato e sem contato. Esses sensores possuem características diferentes e a escolha de qual utilizar depende da aplicação. A Figura 15 ilustra ambos sensores.

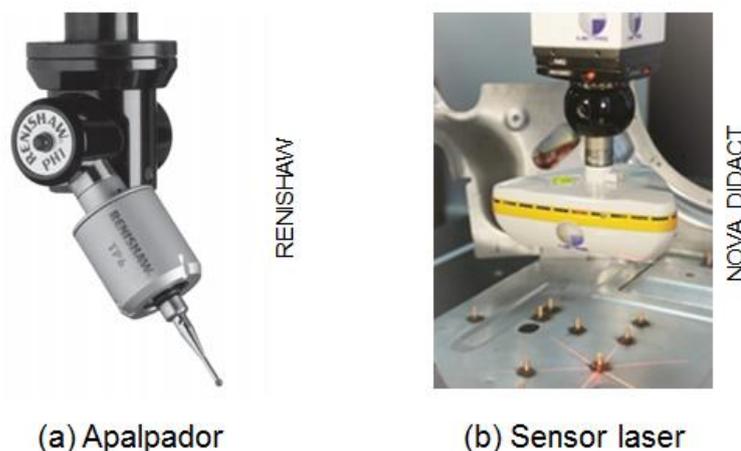


FIGURA 15: SENSORES PARA CAPTAÇÃO DAS COORDENADAS.

FONTE: SITE RENISHAW E NOVA DIDACT.

De acordo com a Figura 15 (a), um sensor de contato possui a funcionalidade de transmitir ao processador da máquina as informações das coordenadas quando toca num ponto da superfície avaliada. As principais vantagens desse sensor se devem às baixas incertezas e grande versatilidade, e uma desvantagem é a impossibilidade para peças pequenas ou delicadas devido à dificuldade de acesso e possível deformação da superfície no momento do contato (FERREIRA, 2007).

O método de medição sem contato conforme a Figura 15 (b) utiliza tecnologia de leitura óptica ou laser para obtenção das coordenadas. Esse sensor tem a vantagem de permitir a digitalização de modelos, efetuar a engenharia reversa e realizar medições de peças pequenas sem causar deformação nas mesmas (FERREIRA, 2007). Ainda segundo o mesmo autor, as desvantagens deste sensor podem ser resumidas nas incertezas de medição mais altas, comparadas com o sistema de medição por contato e a possibilidade de existir distorções provocadas pela lente.

Quando se trata da medição de superfícies de forma livre, é fundamental um grande número de pontos para serem inspecionados. Às vezes, são preferíveis as medições sem contato baseado no princípio ótico, pois este permite uma varredura rápida da superfície obtendo uma grande quantidade de pontos. Entretanto, as medições com contato também possibilitam capturar grande quantidade de pontos medidos. Existe a opção de mapeamento dos pontos por varredura, permitindo o contato permanente do sensor com a peça de modo a coletar os dados sequencialmente e mais rapidamente.

#### **2.4. FONTE DE ERROS NA MEDIÇÃO POR COORDENADAS**

O sistema de medição por coordenadas, assim como todo sistema de medição está sujeito a erros. Especialmente as MMCs que são equipamentos de alta complexidade e os resultados das medições podem ser influenciados por aspectos construtivos, operacionais ou processamento de dados. As medições devem ser gerenciadas adequadamente para minimizar os efeitos dos erros e assim tirar maior proveito da tecnologia.

Segundo GUM (2012), os resultados de uma medição são estimativas do valor do mensurando, pois contêm sempre imperfeições decorrentes do processo de medição. O erro é estimado pela diferença entre o valor nominal e o valor obtido na medição. O erro pode ser compreendido como tendo dois componentes, um aleatório e um sistemático, sendo que eles não podem ser eliminados completamente e tampouco perfeitamente conhecidos. No entanto, o erro sistemático é mais fácil de ser corrigido por variar de forma previsível ou permanecer constante durante as medições (GUM, 2012). Esse comportamento facilita a sua compensação, mesmo sabendo da impossibilidade de eliminá-lo totalmente.

O erro aleatório, por sua vez varia de forma imprevisível (GUM, 2012), impossibilitando sua compensação. O erro sistemático não pode ser compensado por completo, mas pode ser reduzido, principalmente aumentando o número de observações que possibilitam identificar sua origem.

Geralmente, os erros das MMCs são agrupados por suas fontes (SCHELLENKENS; ROSIELLE, 1998) conforme ilustra a Figura 16.

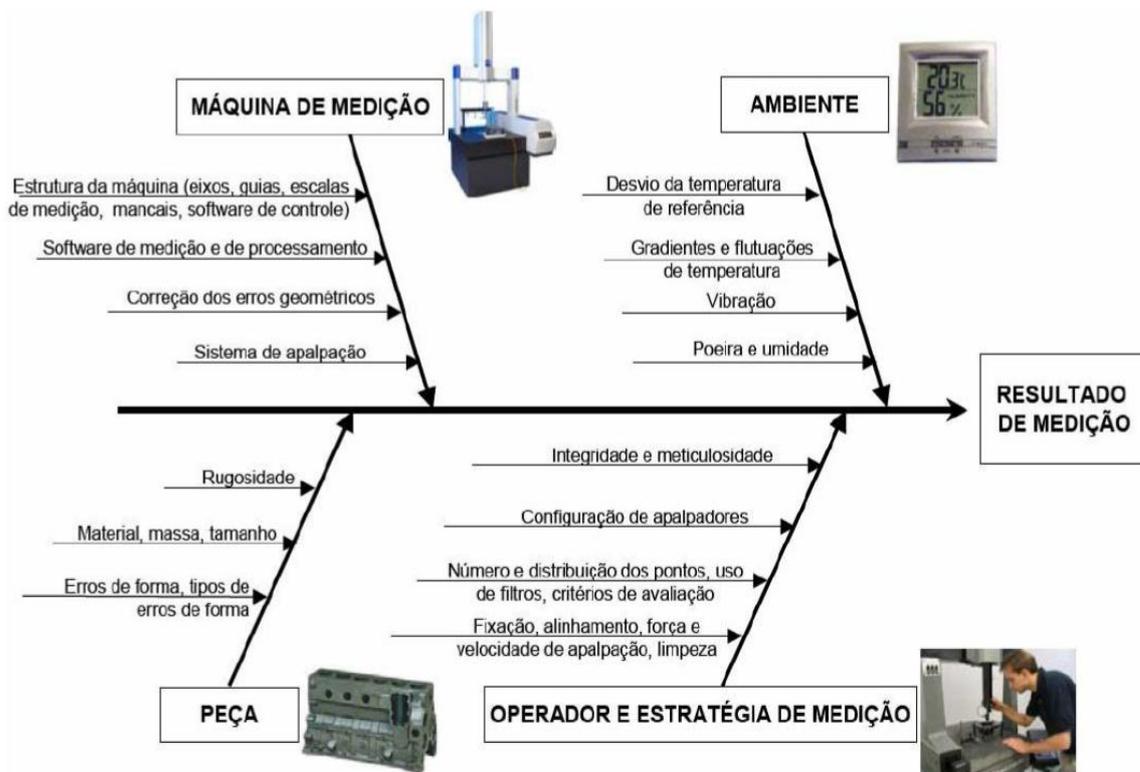


FIGURA 16: DIAGRAMA DE ISHIKAWA DAS PRINCIPAIS FONTES DE ERROS.

FONTE: HAMBURG-PIEKAR (2006).

O Diagrama de Ishikawa da Figura 16 detalha as diversas fontes de erros possíveis em uma medição com MMC divididas em quatro grupos principais: máquina de medição, ambiente, peça e operador e estratégia de medição. Para cada grupo citado são muitas as variáveis que influenciam no processo de medição e na próxima seção será detalhada cada uma delas.

#### 2.4.1. TIPOS DE ERROS DE UMA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS

Apesar de a máquina de medir por coordenadas ser tratada como um corpo rígido, sua estrutura não é perfeitamente rígida e, segundo Philips, Hocken e Pereira (2012), deveria ser chamado de corpo quase rígido. As fontes de erro

podem ser provenientes de diferentes partes da máquina (SARTORI, S; ZHANG, G, 1995), dentre elas se destacam:

**Erros geométricos** – São erros causados por movimentos indesejáveis da máquina e são inicialmente minimizados pelo fabricante por meio de uma calibração e compensados via software. Estes erros são causados pelas imperfeições na geometria dos componentes que formam a estrutura de uma MMC.

Quando uma máquina é fixa em seu local de trabalho e calibrada mesmo assim os erros não são nulos, apenas são valores de maior exatidão que atendem as especificações técnicas estabelecidas pelo fabricante.

A abordagem mais frequentemente utilizada para os movimentos irregulares de uma MMC é o conceito da cinemática do corpo rígido, que resulta em 21 erros geométricos. Esses erros geométricos alteram a localização do ponto de referência do apalpador.

No estudo de Camargo (2004) foi determinado, individualmente, cada um dos 21 erros geométricos, por meio da técnica de calibração direta utilizando um sistema interferométrico, esquadro de granito, um comparador eletrônico e um nível eletrônico.

A classificação dos 21 erros geométricos é dividida em três grupos: erros de rotação, translação e perpendicularidade, conforme a Figura 17.

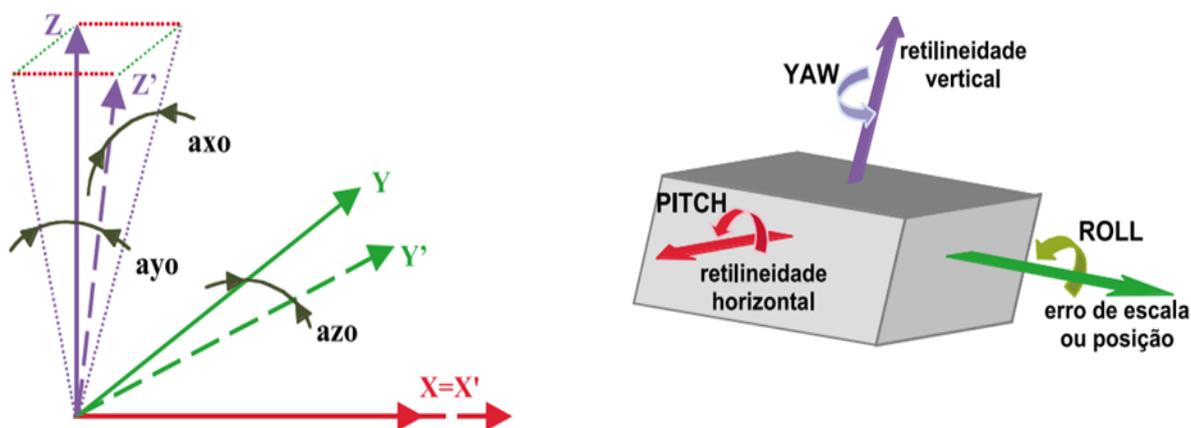


FIGURA 17: ERROS GEOMÉTRICOS DE UMA MÁQUINA DE MEDIR POR COORDENADAS.

FONTE: ORREGO ET AL. (2000).

Os erros de rotação, chamado também de angulares se dividem em rolamento (*roll*), guinamento (*pitch*) e tombamento (*yaw*). Os erros de translação se dividem em um erro de escala ou posição e dois erros de retilineidade. Para cada eixo da máquina então são seis erros geométricos, três de rotação e três de translação, totalizando dezoito erros que são chamados também de erros paramétricos devido à sua dependência com a posição. Há ainda mais três erros não paramétricos, que são os erros de perpendicularidade entre os eixos totalizando vinte e um erros.

A combinação dos vinte e um erros geométricos de uma MMC gera o que se convencionou chamar de erro volumétrico, representado pela equação (DI GIACOMO, 1986):

$$Ev_i = \overline{Ex_i + Ey_i + Ez_i}$$

Os valores de  $Ex_i$ ,  $Ey_i$ ,  $Ez_i$  representam a combinação dos erros geométricos em cada uma das três direções preferenciais. A resultante do erro em qualquer ponto do volume de trabalho é representada por  $Ev_i$ .

Segundo Kunzmann, Ni e Wäldele (1995), a grande maioria das MMCs apresentam algum nível de compensação numérica via software. Uma delas é a compensação via monitoramento das temperaturas da estrutura que atuam em tempo real nas medições (vide tópico 2.4.2.). Outra maneira é a compensação que visa minimizar os erros de origem estrutural por meio do mapeamento de erros geométricos de um determinado volume de medição em um ambiente controlado em condições estáveis. Em ambos os casos, a compensação de erros deve visar a correção de todos os efeitos dos erros sistemáticos reconhecidos como significativos e que todo o esforço tenha sido feito para identificar tais efeitos (GUM, 2012).

Outra fonte de erros geométricos, além das imperfeições geométricas dos componentes da máquina são os fatores que provocam alterações estruturais causadas pelo próprio peso dos componentes da máquina, quer seja em estado estático ou dinâmico. O peso das guias, por exemplo, pode causar flexão mecânica durante seu movimento de aceleração e desaceleração modificando os erros geométricos da máquina (CARDOZA, 1995).

Outra situação que pode provocar deformação é o carregamento excessivo sobre o desempenho. Na prática, o que ocorre é a combinação dos efeitos de diversos fatores de erro tornando a tarefa de compensação de erros geométricos uma atividade complexa.

**Transgressão do princípio de Abbe** – O princípio de Abbe foi publicado em 1890 no *Journal for Instrumental Information* e leva o sobrenome do físico alemão Ernst Abbe como homenagem. Nota-se que esse princípio surgiu muito antes das primeiras máquinas de medir por coordenadas, contudo aplicam-se muito bem, uma vez que, qualquer que seja a estrutura mecânica das MMCs todas transgridem o princípio de Abbé (DI GIACOMO, 1986).

Em termos conceituais, o princípio de Abbé diz que a escala de uma medida de um sistema linear deve ser colinear com a dimensão ou deslocamento espacial

a ser medido, ou do contrário a medida deve ser corrigida. A Figura 18 ilustra esse conceito comparando um paquímetro com um micrômetro.

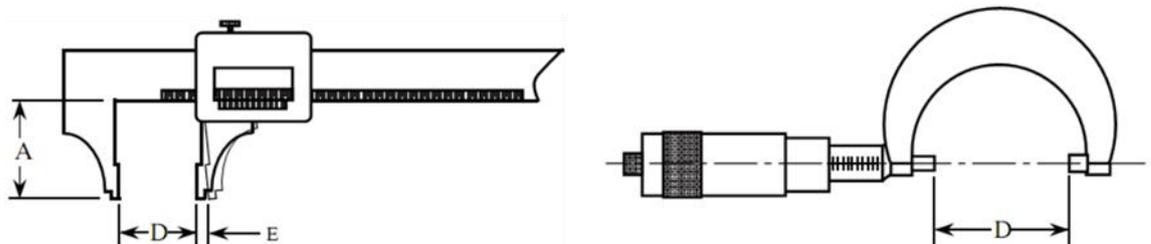


FIGURA 18: EXEMPLO DA TRANSGRESSÃO DO PRINCÍPIO DE ABBÉ.

Fonte: Nwokah e Hurmuzlu (2002).

De acordo com a Figura 18, a medição  $D$  do paquímetro fica a uma distância  $A$  entre a escala linear do sistema de medição com o ponto funcional de medição do instrumento. No exemplo do micrômetro essa distância não existe, não existindo também transgressão do princípio de Abbé.

**Sonda de medição** – A sonda é um conjunto acoplado no cabeçote da máquina de medir por coordenada encarregada de capturar os pontos coordenados sobre a superfície da peça. Existem duas tecnologias de sonda, por contato (aqueles que possuem um apalpador) e sem contato. Para fins desta dissertação será dada atenção apenas para as sondas por contato, por estas será utilizada no experimento.

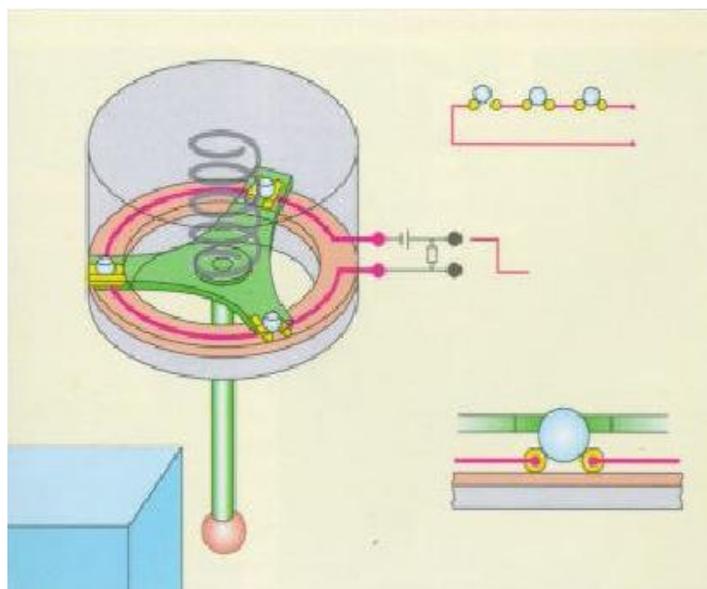
Os erros de um apalpador não dependem exclusivamente do projeto construtivo do mesmo. Questões como tempo de uso, colisões sofridas, manuseio, conservação e muitas outras afetam diretamente na qualidade do mensurando. Nessa situação, as boas práticas de medição podem ajudar a minimizar os efeitos sistemáticos e aleatórios do erro.

Segundo Phillips (1993) os fatores principais dos erros causados pelo sistema com apalpador são: o processo de qualificação do apalpador, a velocidade de aproximação, o comprimento da haste, a direção de do apalpador, ângulo de

contato com referência a superfície da peça, a pressão das molas internas e erros de forma do próprio sensor e distância percorrida.

Para entender algumas das causas de erros já apresentadas, é preciso compreender o funcionamento dos dois tipos de apalpadores existentes no mercado: comutadores ou ligadores (*“touch-trigger probes”*) e medidores (*“measuring probes”*).

O apalpador do tipo comutador envia um pulso elétrico ao sistema de controle imediatamente no momento em que o apalpador toca na peça indicando a posição nas três coordenadas conforme Figura 19.



*FIGURA 19: APALPADOR COMUTADOR.*

*FONTE: FUNDAÇÃO CERTI (2003).*

O sinal é gerado pelo deslocamento do apalpador durante o contato com a peça, abrindo ou fechando o circuito elétrico como ilustrado na Figura 19.

Ao todo são três chaves com um conjunto de molas que são acionadas quando o apalpador toca na peça e devido a esta geometria, os esforços para o

acionamento são diferentes dependendo da direção, gerando um padrão de erro lobular, ilustrado na Figura 20.

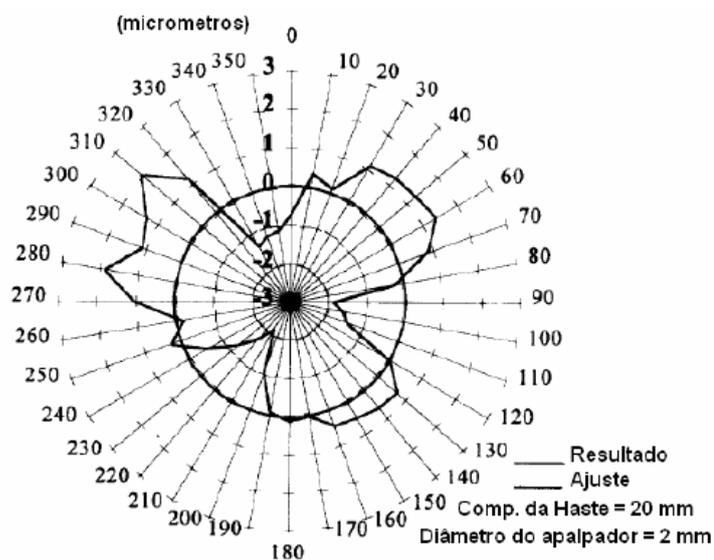


FIGURA 20: LÓBULO.

Fonte: Miguel e King (1998).

De acordo com a Figura 20, é possível identificar exatamente as três chaves de acionamento do apalpador comutador. Este erro pode ser eliminado utilizando apalpadores com chaves compostas de cristais piezelétricos, que são mais modernos, conferindo erros de lóbulos desprezíveis para incertezas das MMCs.

Outra fonte de erro para o sistema de contato é a flexão da haste do sensor no momento do contato com a peça. A diferença entre o ponto de contato e a flexão é conhecida como pré-deslocamento, e para compensar este erro é feito a qualificação do apalpador medindo uma esfera padrão com diâmetro calibrado.

Feita esta compensação, é preciso saber também a direção em que foi efetuada a medição, uma vez que, as coordenadas registradas são referentes ao centro da esfera do sensor e precisam ser compensadas para refletir o ponto de contato. Sendo assim, para evitar erros de compensação do raio do

sensor, a direção do movimento do apalpador deve ser perpendicular à superfície da peça.

Para as superfícies de forma livre em especial, movimentar o apalpador perpendicular à superfícies da peça é uma tarefa complexa, pois a superfície linear é determinada pela linha tangencial ao ponto (ARENHART, 2007). Dependendo da peça, existe ainda a complicação do acesso, limitando a movimentação do apalpador. Soma-se ainda, a necessidade, em algumas situações, da haste do sensor mais longa, que naturalmente confere erros maiores por conta da flexão da haste especialmente em medições do tipo varredura, que consiste no deslizamento contínuo do sensor ao longo de uma trajetória, causando vibrações e desgaste da sonda. Para medições tipo varredura é preocupante o tipo de material a ser medido e o material do sensor, o desgaste pode ocorrer após a medição de poucas peças.

Os apalpadores medidores são compostos por um conjunto de molas planas e transdutores indutivos que medem as deflexões paralelas aos eixos da MMC causadas pelo toque do apalpador na peça. Sua estrutura mecânica é mais complexa e possibilita a compensação do raio da esfera de toque de maneira ativa, corrigindo o sentido de aplicação da força. De forma geral, este apalpador sofre os mesmo tipos de erro que os apalpadores comutadores, por exemplo, a necessidade de qualificação do apalpador. Embora o seu sistema construtivo confira uma exatidão superior aos apalpadores comutadores.

**Software computacionais** – Os *softwares* computacionais basicamente armazenam os dados das coordenadas dos pontos medidos e processam por meio de algoritmos matemáticos para obter as geometrias substitutas (planos, círculos, esferas, cones, etc.). Na prática são vários tipos de algoritmos utilizados pelos fabricantes: mínimos quadrados, condição mínima, elemento tangente externo, elemento tangente interno, entre outros. Além disso, muitos programadores se utilizam de aproximações lineares no intuito de acelerar os cálculos acarretando em erros nas medições (PHILIPS, 1995).

Em síntese, os erros provenientes dos *softwares* se concentram em algoritmos inconsistentes, número de casas decimais, erros de interpolação e afins. Quase sempre, esses erros são desprezados por serem insignificantes.

#### 2.4.2. ERROS DO AMBIENTE

A influência do ambiente no processo de medição é inevitável. Por isso, todos os fatores de influência devem ser controlados para minimizar os efeitos sobre os valores medidos. Quanto mais severas forem às condições ambientais, mais comprometido fica o resultado da medição. Contudo, se boas práticas forem observadas durante a instalação e uso de uma MMC, a influência do ambiente sobre as medições atingiriam níveis irrelevantes. Segundo a Fundação CERTI (2003), os fatores de influência mais importantes são temperatura, vibração e partículas sólidas.

**Temperatura** – Na maioria dos laboratórios com MMC utilizam-se salas climatizadas. Mesmo assim, existem variações de temperatura advindas de diversas fontes. Orrego, Di Giacomo e Abackerli (2000) resumem as fontes de erros térmicos em quatro tópicos:

- 1- Influência do ambiente: lâmpadas acessas, temperatura externa e da proximidade do calor gerado por outras máquinas ou instrumentos;
- 2- Pessoas: presença de pessoas próximas à máquina e a manipulação das peças sem o devido isolamento;
- 3- Memória térmica: relacionado ao coeficiente de expansão térmico e de condutibilidade térmica que fazem variar o tempo de equilíbrio térmico em intervalos diferentes dos elementos estruturais de uma MMC e da peça a ser medida;
- 4- Calor gerado pela própria MMC: apesar do pouco calor gerado pelas MMCs (mancais aerostáticos eliminam a maior parte dos atritos) este ainda é um fator de influência térmica.

Com relação ao tópico 4 apresentado, as máquinas mais modernas já são fabricadas com materiais específicos pensando nas condições térmicas. Geralmente as guias são feitas de material de baixo coeficiente de expansão térmica e de elevado coeficiente de condutibilidade térmica, além de possuírem compensação matemática devido a variações térmicas detectadas na estrutura.

Um comportamento conhecido das reações dos materiais em variações de temperatura é a expansão diferencial, nome dado para o erro quando os materiais da peça e da escala da máquina são diferentes. Bryan e Doiron (2012) afirmam que quando a peça a ser medida e a escala forem do mesmo material, os seus erros de expansão tendem a se anular. Segundo os autores, atualmente as MMCs possuem sensores de temperatura para compensação da expansão diferencial.

De forma geral, para evitar que o ambiente seja um fator preponderante na exatidão das medições, deve-se dar atenção ao excesso de pessoas na sala de medição, presença de janelas, ausência de uma antessala, insufladores muito próximos ou direcionados à estrutura, dimensionamento das salas, isolamento térmico das paredes, excesso de peças de altas temperaturas e tempo ideal de climatização, além dos tópicos já mencionados.

**Vibrações** – A principal fonte proveniente de vibração é a própria fábrica, causadas por equipamentos diversos. Mas outras fontes externas ao ambiente da empresa também podem contribuir com níveis de vibrações além do permitido como, por exemplo, a instalação de uma MMC próxima a uma rodovia.

Os níveis de vibração aceitáveis são normalmente estabelecidos pelo fabricante. Para manter os valores de acordo com o especificado é uma prática comum utilizar sistemas de amortização sob as máquinas para minimizar os efeitos das vibrações. Esses sistemas podem ser divididos em passivos (molas) e ativos (amortecedores pneumáticos). Em geral, as atividades envolvidas na análise de vibração consistem em levantamento dos níveis de

vibração onde se pretende instalar a máquina, preparação do terreno e isolamento da base da MMC das fontes de vibrações (OLIVEIRA, 2006).

**Partículas sólidas** – A presença de partículas sólidas é fácil de detectar por caracterizar “erros grosseiros”, mas não menos importante, pois a presença de resíduos de óleo e cavacos nas peças podem produzir erros significativos nas medições. A limpeza das peças, da máquina e do sensor são fundamentais para a conservação dos equipamentos a fim de garantir resultados de medição ao menos nos limites especificados pelo fabricante.

### 2.4.3. ERROS DA PEÇA

As características geométricas de todas as peças manufaturadas não são as mesmas idealizadas no projeto, pois nelas estão presentes os erros e falhas do processo de fabricação. Geralmente as imperfeições das peças quando não acompanhadas de estratégias de medição adequadas são grande fonte de erros de medição (PHILIPS, 1995). Segundo Weckenmann *et al.* (2001), os erros das peças associados à estratégia de medição e da influência do operador são considerados uma das mais influentes fontes de erros em MMC.

De forma geral as principais causas de erro inerentes às propriedades das peças são: forma e acabamento superficial, deformação da MMC causada pelo peso da peça, interação do sistema apalpador com a peça, distorções por fixação inadequada e deformação elástica da peça quando em contato com o apalpador (WILHELM; HOCKEN e SCHWENKE, 2001; TRAPET *et al.*, 1999).

Adotando boas estratégias e práticas de medição, os erros podem ser minimizados. Com relação ao acabamento superficial da peça, por exemplo, o uso de um apalpador com ponta de diâmetro maior pode ajudar a diminuir a influência da rugosidade da peça no mensurado (SYRIA; BECK e TRUMPOLD, 1990). Os erros devido à deformação elástica podem ser reduzidos acomodando adequadamente a peça em seu sistema de fixação (WECHENMANN; KNAUER; KILLMAIER, 2001). Os erros causados pelo peso

da peça no sistema metrológico podem ser eliminados com técnicas de rebatimento (EVANS; HOCKEN; ESTLER, 1996).

Existem ainda boas práticas de medição que sugerem como realizar pontos de medição em locais mais rígidos, evitar medições em locais conhecidos de deformação geométrica ou superficial (rebarbas, ponto de solda, oxidação), observar o tipo de material da peça e da ponta de contato do apalpador para evitar desgaste em medições tipo varredura, entre outros. O conhecimento do processo de fabricação pode contribuir para evitar erros provenientes da peça durante a medição (SYRIA; BECK e TRUMPOLD, 1990; WECHENMANN; KNAUER; KILLMAIER, 2001).

#### **2.4.4. ERROS DO OPERADOR E DA ESTRATÉGIA DE MEDIÇÃO**

A MMC é uma máquina capaz de capturar as coordenadas de uma peça automaticamente obedecendo uma sequência lógica determinada por um programa de medição. Apesar disso, os parâmetros de medição são todos determinados pelo operador, podendo minimizar ou maximizar os efeitos do erros.

Por exemplo, o operador é quem fixa a peça no desempenho ou em um dispositivo de fixação dedicado, determina quantos pontos e o local dos pontos a serem medidos, escolhe o apalpador mais adequado para medição, determina a velocidade de medição e direção do apalpador e tantos outros parâmetros necessários para realizar qualquer tipo de medição.

Segundo Weckenmann (2005) o conhecimento requerido pelos operadores de MMC envolve: desenho técnico, CAD, tecnologia de fabricação, MMC, normas, gerenciamento de qualidade, computação, estatística, geometria e metrologia. Diante disso, fica evidente que o conhecimento do operador e a capacitação da equipe de metrologia são determinantes para à definição de estratégias de medição adequadas.

A Figura 21 ilustra de maneira apropriada a influência que um operador e a estratégia de medição podem exercer sobre o resultado da medição.

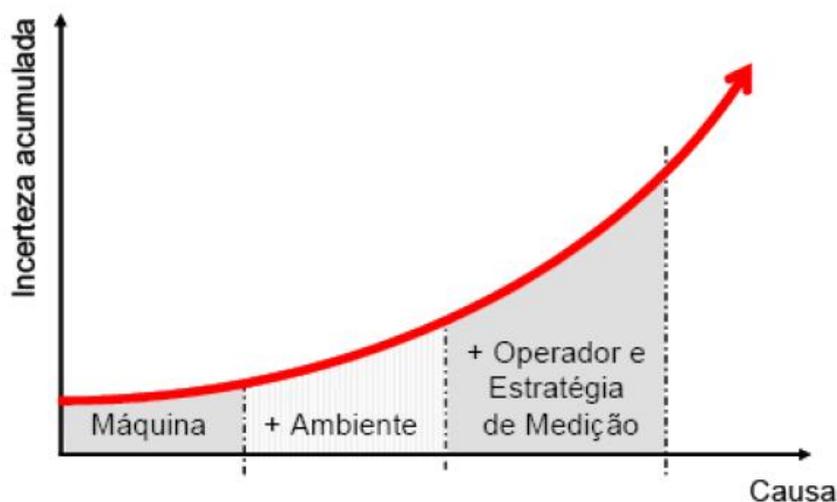


FIGURA 21: INFLUÊNCIA DE COMBINAÇÃO DE FONTE DE ERROS.

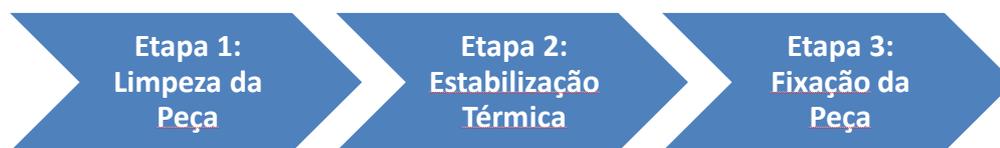
FONTE: DONATELLI ET AL(2005).

De acordo com a Figura 21 de Donatelli *et al*(2005), a influência do operador juntamente com a estratégia de medição têm uma parcela de influência na incerteza da medição além do da máquina e do ambiente.

## 2.5. ETAPAS DA MEDIÇÃO COM MMC

Durante o planejamento de uma medição algumas questões sempre são abordadas: dificuldades de acesso ou manipulação da peça no volume da MMC, segurança dos operadores em movimentar peças pesadas e manutenção da estabilização térmica com a entrada e saída de peças.

De fato, definir as etapas do processo de medição também envolve todas as condições para realizá-la. Segundo Sousa (2004), as etapas que consistem a preparação adequada para uma medição com uma MMC são três conforme ilustra a Figura 22.

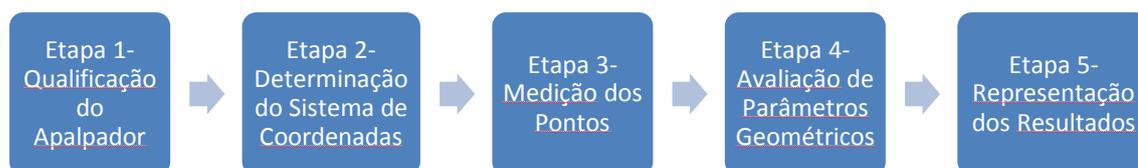


*FIGURA 22: ETAPAS DE PREPARAÇÃO PARA UMA MEDIÇÃO.*

- 1- Limpeza da peça: a limpeza da superfície submetida à medição não é uma atividade trivial. A presença de sujidades na superfície a ser medida, pode causar distorções nos mensurandos e até mesmo causar problemas no sensor do apalpador. Mesmo em um ambiente fechado, esta etapa deve ser controlada durante todo o processo de medição.
- 2- Estabilização térmica da peça: a qualidade das medições está diretamente associada também às condições da peça. Por conta da dilatação térmica, a estabilização térmica em 20°C antes e durante o processo de medição possibilita diminuir os erros causados pela deformação física das peças. Assim como calibrar um pneu quente, depois de ter percorrido alguns quilômetros e voltar a calibrá-lo depois de esfriá-lo possa haver diferenças, medir peças em temperaturas diferentes pode gerar resultados diferentes.
- 3- Fixação da peça: a fixação das peças tem o objetivo de mantê-las no mesmo local durante as medições. Alguns cuidados especiais para os dispositivos de fixação são requeridos para que ao mesmo tempo a fixação seja firme, mas que não deforme a peça. Para peças grandes, pode não haver a necessidade de fixação, mas deve-se cuidar que estejam apoiadas adequadamente para evitar deformações devidas ao próprio peso. Essa etapa pode ser muito complexa dependendo da peça, como por exemplo no estudo de Ascione e Polini (2010), que avaliam um componente não rígido de helicóptero para medições por coordenadas e projetam um dispositivo de fixação complexo para

manter a peça nas mesmas condições depois de montada no helicóptero.

Essas etapas cumpridas corretamente vão garantir que os valores medidos sejam confiáveis. Porém, isso não é tudo, em seguida, seguem as etapas do processo de medição (BOSCH,1995), conforme a Figura 23.



*FIGURA 23: ETAPAS DO PROCESSO DE MEDIÇÃO.*

- 1- Qualificação do apalpador usando, por exemplo, uma esfera calibrada: a qualificação sempre deve ser realizada segundo as especificações do fabricante. Essa etapa é a identificação do apalpador pela MMC, reconhecendo exatamente a posição do sensor do apalpador no volume de trabalho.
- 2- Determinação do sistema de coordenadas da posição da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina: tratando-se de superfícies de forma livre, o modo mais usado é o posicionamento dos pontos medidos em relação ao modelo CAD tridimensional da peça usando critérios matemáticos de ajuste (por exemplo best-fit), possibilitando avaliar a conformidade pelo desvio da superfície real com relação à superfície do modelo (LIMA, 2006).
- 3- Medição dos pontos na superfície da peça em relação ao sistema de coordenadas da máquina: a medição de cada ponto resulta em uma coordenada nos eixos X, Y e Z.
- 4- Avaliação dos parâmetros geométricos na peça: diâmetros, distâncias, posições, perfis e batimentos, entre outros tantos parâmetros geométricos são avaliados.

- 5- Representação do resultado da medição após a transformação do sistema coordenado no sistema de coordenadas da peça: exibição de relatórios dimensionais de acordo com o propósito estabelecido no programa de medição.

## **2.6. DESAFIOS TÉCNICOS PARA MEDIÇÃO DE SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE**

Durante o processo de medição, são várias as atividades envolvidas que exigem uma abordagem correta na análise dimensional tornando o processo de medição complexo. Mesmo com máquinas calibradas, operadores treinados e ambientes climatizados, se as etapas de medição já mencionadas não forem definidas e controladas corretamente, inclusive a definição de pontos amostrais ou escolha de software, os valores resultantes de uma medição podem não ser adequados.

Conforme as definições aqui já apresentadas, as superfícies de forma livre não apresentam pontos característicos óbvios, aumentando a dificuldade de modelar matematicamente. Por esse motivo, têm se desenvolvido técnicas específicas de medição para as medições de superfícies de forma livre (RODGER; FLACK; Mc CARTHEY, 2007). Nesse sentido, surgiram métodos de controle específicos e equipamentos dedicados a cada tarefa. Normalmente, esses sistemas dedicados apresentam um custo alto e não são totalmente automáticos, exigindo um operador para controlá-las, mas oferecem boa confiabilidade metrológica e muitas vezes com incertezas menores que as MMCs (NETO, 2003).

Conforme Lima (2006), o controle de peças complexas por meio de MMCs possui alta confiabilidade metrológica, com incertezas relativamente baixas quando instaladas e utilizadas adequadamente. Por isso não é possível a exploração das vantagens das MMCs sem uma rigorosa metodologia de medição/calibração seguida de criteriosa aplicação e validação experimental (ABACKERLI; ORREGO, 2001).

Nesse sentido, é dado destaque para as incertezas de medição na condução de uma medição, conforme a Figura 24.



FIGURA 24: ASPECTOS IMPORTANTES PARA ESCOLHA DO PROCESSO DE MEDIÇÃO.

Fonte: Brito Neto, A.A. (2003).

Segundo Gigo (1999), a relação entre incerteza de medição e tolerância de fabricação é um dos aspectos de maior importância metrológica, pois este aspecto determina os procedimentos necessários para a medição. De acordo com a Figura 24, a escolha de um processo de medição é uma decisão que envolve muitas outras atividades, inclusive as incertezas de medição.

Conforme já discutido, a inspeção de superfícies de forma livre por meio de MMC apresenta tarefas complicadas, uma delas é a utilização de peças padrão. É comum a utilização das peças padrão para zeragem de dispositivos

de controle e como padrão para medição pelo método da substituição. A peça padrão pode ser uma peça retirada da produção sob um controle mais rigoroso e posteriormente calibrada em sistemas de medição.

Outra opção é uma peça especialmente fabricada para servir como objeto de referência apresentando boas características de dureza, baixo erro de forma e geometria simples. O objetivo principal da peça padrão é garantir a rastreabilidade das medições sem a necessidade dos métodos convencionais de calibração que acarretam tempo e custo (MASS, 2001).

Dentre padrões mais comuns no mercado, destacam-se bloco padrão, esfera padrão, anel padrão, bloco padrão angular e pino padrão. Existem também os padrões especiais: placa de furos/esferas, barra de furos/esferas, padrão escalonado, *ball bar* e peças padrão. A Figura 25 ilustra alguns exemplos de padrões.



FIGURA 25: PRINCIPAIS PADRÕES UTILIZADOS NA CALIBRAÇÃO.

Fonte: Brito Neto, A.A. (2003).

Em casos em que a peça padrão possuir diversas características calibradas, é possível diminuir os custos e facilitar as atividades de inspeção pela diminuição de padrões necessários e menores tempos gasto com *setups*.

Entretanto, as peças padrão com geometrias complexas apresentam grandes dificuldades em sua calibração devido à complexidade e diversidade de suas características geométricas, além da necessidade de uma baixa incerteza de medição. Mesmo com a flexibilidade oferecida pelas MMCs, o controle de diversas características em uma mesma peça tem restringido o uso de peças padrão, tornando esse procedimento ainda não totalmente aceito e difundido (BRITO NETO, 2003).

Isso acontece em casos de medição com necessidade de controlar em uma mesma peça parâmetros como comprimentos, perfis, diâmetros e ângulos. A particularidade para utilização de peças padrão na metrologia de superfícies de forma livre é o fato de os padrões possuírem geometrias simples que possibilitam verificar as incertezas das medições de características semelhantes às características do padrão (BRITO NETO, 2003).

Considerando também a diversidade de peças padrão necessárias em uma sala de metrologia, seria necessário grande espaço para armazenamento dos padrões, além do controle e calibração dos mesmos, envolvendo alto custo.

Na eventualidade de não haver peça padrão, as medições em máquinas de medir por coordenadas são realizadas e seus valores comparados ao modelo CAD 3D. Os métodos mais comuns para modelagem 3D são *Bezier*, *B-Spline* e *Non-Uniform Rational B-Spline* (NURBS). Esses modelos são representações paramétricas e têm vantagens sobre representações não paramétricas por facilitarem o processamento computacional de dados e representações gráficas (PIEGL e TILLER, 1996). Nessa situação, as incertezas contidas no mensurando são maiores ainda, pois os valores medidos estão sendo afetados diretamente por todos os fatores de influência da máquina sem nenhum ajuste.

## **2.7. DESEMPENHO DE UMA MMC**

Desde que a MMC foi lançada no mercado, tanto fabricantes quanto usuários expressaram o desejo de melhorar o desempenho desses equipamentos (VIEIRA, 2009). A avaliação de desempenho para MMC é realizada por meio de testes de calibração, revelando o comportamento metrológico da máquina, garantindo assim, a confiabilidade das medidas realizadas (CARDOZA, 1995). Mesmo nos sistemas dedicados, estudos são feitos para melhorar o desempenho da máquina por meio de calibração (KHAN; WUYI, 2010). Ter sistemas de medição calibrados é essencial para fornecer resultados

rastreáveis a padrões nacionais e internacionais. Portanto, torna-se necessária a calibração dos sistemas de medição por coordenadas.

Dentre as metodologias comumente empregadas para a calibração estão: calibração direta e indireta (LIMA, 2006). A calibração indireta utiliza artefatos padrões para verificar o desvio da peça analisada (CAMARGO, 2004). De forma geral, as normas para testes de desempenho garantem rastreabilidade somente para as condições de avaliação em que são realizadas e para peças idênticas ao padrão utilizado. Essa diretriz está alinhada com o “princípio do comparador” que pressupõe a medição de uma peça idêntica as peças que serão inspecionadas, nas mesmas condições e do mesmo modo em que se realiza a inspeção (SWYT, 2012). Contudo, é impraticável dispor de uma peça padrão para cada peça possível a ser medida em MMC.

A calibração direta por sua vez utiliza-se de instrumentos de medição (de maior resolução e menor incerteza), que permitem coletar os valores dos erros de forma direta (CAMARGO, 2004).

Porém, outra divisão pode ser feita para os métodos de medição classificados como medição indireta: volume dividido e de sintetização de erros. No primeiro, as geratrizes dos planos paralelos no volume de trabalho da máquina são identificadas e o erro do eixo de interesse é calculado. Repetindo várias vezes a medição do erro de posição em todas as geratrizes, forma-se então a grade de erros.

Este método fornece grande quantidade de informação sobre o sistema de medição, frequentemente utilizado para compensação de erros, utilizado em diversos estudos (ORREGO, 1999). Contudo, segundo Vieira (2009), ele apresenta desvantagens, pois consome muito tempo para sua realização, e neste período, variações de temperatura podem influenciar no resultado, comprovado por vários estudos (OLIVEIRA; PEREIRA; ABACKERLI, 2010).

O método de sintetização de erros por sua vez utiliza-se de teorias da cinemática de corpos rígidos a fim de modelar geometricamente a estrutura da

máquina e a teoria da superposição dos efeitos para escrever o modelo matemático da contribuição de cada componente individual de erro na expressão do erro volumétrico (BURDEKIN; VOUTSADOPOULOS, 1981).

Técnicas de análise geométrica estrutural são utilizadas, verifica-se cada erro nas direções preferenciais da máquina, fornecendo equações de sintetização com as expressões das componentes  $E_x$ ,  $E_y$  e  $E_z$  do erro volumétrico (VIEIRA, 2009).

Independente do método, é extremamente complexo analisar os erros e as incertezas nas máquinas de medir, pois cada ponto coordenado é influenciado de forma diferente (ORREGO, 1999). Procedimentos específicos para calibração de MMC e teste de desempenho têm sido discutidos por diferentes autores há muito tempo (WILHELM; HOCKEN; SCHWENKE, 2001).

É necessário compreender claramente cada uma das etapas que envolvem a calibração das peças para identificar os fatores de influência que podem ser compreendidos como fontes de erros ou fontes de incertezas.

## **2.8. INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA SUPERFÍCIES DE FORMA LIVRE**

Além dos erros, as incertezas de medição também devem ser consideradas. 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). Incerteza de medição então pode ser tida como sendo uma influência combinada de todos os erros presentes em uma medição (PHILLIPS, 2012).

Mesmo ainda depois de correções de efeitos sistemáticos reconhecidos, os resultados das medições são estimativas do valor do mensurando, por causa

das incertezas provenientes dos efeitos aleatórios e a imperfeita correção dos erros sistemáticos (GUM, 2012). Considerando tudo o que já foi exposto, o trabalho de Gallas (1998) junta as fontes possíveis de incerteza gerando uma lista bem completa e detalhada:

- (a) Definição incompleta do mensurando;
- (b) Realização imperfeita da definição do mensurando;
- (c) Amostragem não representativa – a amostra medida pode não representar o mensurando definido;
- (d) Conhecimento inadequado dos efeitos das condições ambientais sobre a medição ou medição imperfeita das condições ambientais;
- (e) Erro de tendências pessoal na leitura de instrumentos analógicos;
- (f) Resolução finita do instrumento ou limiar de mobilidade;
- (g) Valores inexatos dos padrões de medição e materiais de referência;
- (h) Valores inexatos de constantes e outros parâmetros obtidos de fontes externas e usados no algoritmo de redução de dados;
- (i) Aproximação e suposições incorporadas ao método e procedimento de medição;
- (j) Variações nas observações repetidas do mensurando sob condições aparentemente idênticas.

Lima e Silveira (2011) em outras palavras citam os itens (d), (e), (f), (h) e (j) diretamente. Além desses, acrescenta a incerteza definicional ou incerteza intrínseca apresentada por GUM (2012) que está relacionada com a definição das grandezas dentro dos modelos geométricos construídos que sempre estarão sujeitos a idealizações e aproximações. De fato, há diversas abordagens para classificação de fontes de incertezas em MMCs.

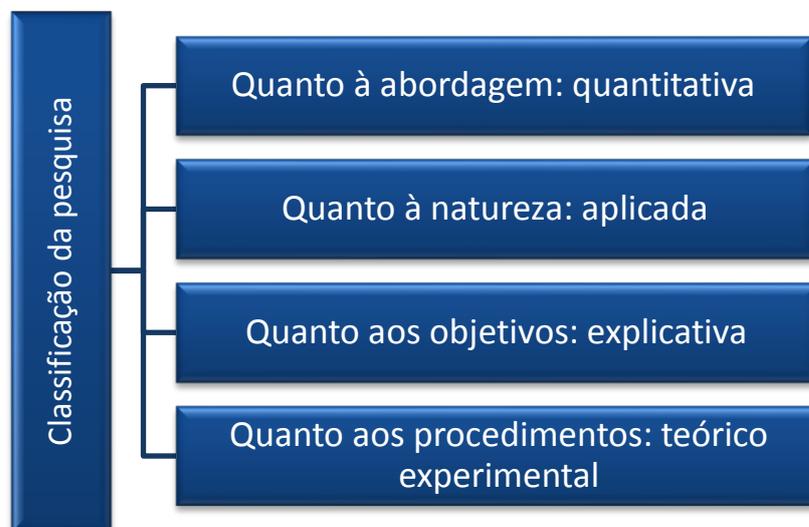
Para estimar a incerteza, existem dois procedimentos de avaliação (GUM, 2012). Incertezas obtidas por análise estatística de uma série de observações são chamadas de “incerteza do tipo A”. Incertezas obtidas por qualquer outro método são chamadas de “incertezas do tipo B”. Ambas as incertezas podem ser quantificadas como desvio padrão (LIMA; SILVEIRA, 2011).

No que diz respeito às superfícies de forma livre, a literatura não apresenta um método definitivo para estimar a incerteza. Existem algumas propostas, porém os mesmos foram desenvolvidos para avaliar superfícies convencionais, tais como planos e esferas, utilizando padrões para estimar as incertezas (BARINI; TOSELLO; DE CHIFFRE, 2010). Também foram desenvolvidas propostas de artefatos calibrados que são construídos a partir de padrões calibrados de geometrias convencionais e que simulam a superfície de forma livre (SAVIO; DE CHIFFRE, 2002).

Na tentativa de encontrar alternativas viáveis, surgiram estudos envolvendo modelos matemáticos, cuja implementação é chamada de “Máquina Virtual de Medir a Três Coordenadas” (TRAPET, *ET AL*, 1999). Estes modelos simulam o comportamento metrológico em diferentes operações de medição a partir dos erros volumétricos (KUNZMANN; PFEIFER; FLUGGE, 1993; SCHWENKE, 1994).

### **3. ASPECTOS METODOLÓGICOS**

Este capítulo apresenta os aspectos metodológicos desta pesquisa, com relação à abordagem, natureza, objetivos e aos procedimentos, conforme mostra a Figura 26.



*FIGURA 26: CLASSIFICAÇÃO DA PESQUISA.*

De acordo com a Figura 26, este estudo está classificado quanto à abordagem, como quantitativo, pois utiliza técnicas quantitativas em todas as suas etapas, desde a coleta dos dados até as análises dos resultados, por meio de ferramentas Matemáticas e estatísticas (MIGUEL, 2011).

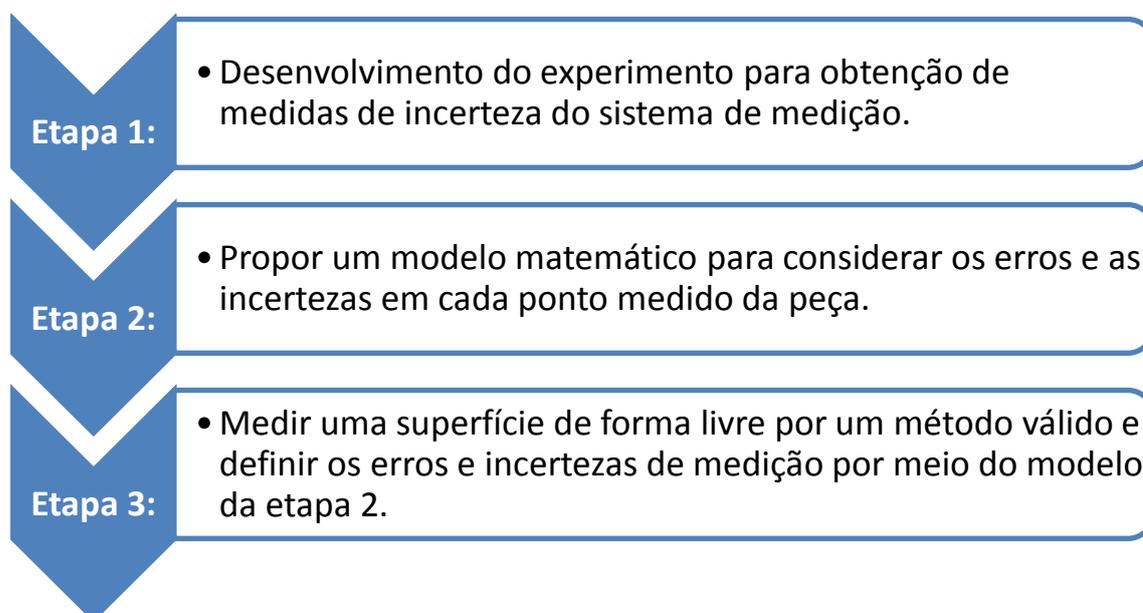
Quanto à sua natureza, este estudo está classificado como aplicado (MIGUEL, 1996), pois os seus resultados devem gerar conhecimentos para aplicações práticas na medição de superfícies de forma livre em geral.

Quanto aos objetivos, esta pesquisa é classificada como explicativa. Segundo Santos (2007), uma pesquisa explicativa estuda um determinado fenômeno de forma mais aprofundada, explicando detalhadamente as relações entre as variáveis. Ainda segundo o autor, este tipo de pesquisa consiste numa investigação mais aprofundada do fenômeno, por meio de métodos experimentais. Desta forma, este estudo busca entender o comportamento dos erros e das incertezas, para então propor um método capaz de considerá-las em medição em geral.

Com relação aos procedimentos, este estudo está classificado como teórico experimental. A questão teórica está relacionada ao fato de este estudo

envolver a proposta de um modelo matemático para avaliar os erros e as incertezas de medição de superfícies de forma livre por meio de ferramentas matemáticas e estatísticas. O procedimento experimental relaciona-se ao fato de a aplicabilidade e viabilidade prática do modelo matemático proposto depender de dados reais obtidos por meio de procedimentos experimentais.

Dentre os aspectos aqui apresentados, este estudo apresenta os procedimentos de forma detalhada, para que seja possível a replicação deste trabalho. A seguir, são apresentadas as etapas para o desenvolvimento do método proposto conforme a Figura 27.



*FIGURA 27: ETAPAS PARA O DESENVOLVIMENTO DOS PROCEDIMENTOS DE PESQUISA.*

De acordo com a Figura 27, a primeira etapa corresponde ao planejamento e à realização do experimento para a coleta dos dados que serão usados como base para a proposta deste estudo. O experimento, que tem como objetivo obter os erros geométricos e as incertezas da MMC foi realizado por meio de um interferômetro e conduzido de acordo com o estudo desenvolvido por Orrego (1999).

A segunda etapa dos procedimentos é a proposta deste estudo, que consiste em um modelo matemático para estimar as incertezas de medição pontuais na avaliação de superfícies de forma livre por meio de uma MMC.

A terceira etapa é a aplicação do modelo matemático a um conjunto de dados reais, medidos em uma superfície de forma livre. A realização da medição considera as práticas convencionais para uma medição como já discutido na revisão bibliográfica (tópico 2.5) e a eliminação ou o controle das fontes de incertezas (tópico 2.4).

#### 4. DESENVOLVIMENTO DO MÉTODO PARA ESTIMAR INCERTEZAS

Este capítulo apresenta o desenvolvimento do método proposto para estimar os erros e incertezas de modo a possibilitar também a replicação deste método em qualquer MMC e qualquer superfície livre. Dentre os tipos de procedimento para estimar incertezas o método apresentado se identifica com “incerteza do tipo A”.

A primeira etapa do procedimento apresenta o experimento que envolve atividades complexas que devem ser rigorosamente seguidas para que os resultados do modelo matemático sejam reais. O sistema laser que captura as coordenadas da MMC é muito sensível e fornece valores na casa de milésimo de milímetro. Nesse sentido, deve-se ter muito cuidado na condução do experimento para não enviesar os resultados obtidos.

A Figura 28 ilustra a sequência das principais atividades envolvidas no experimento que calibra a MMC.

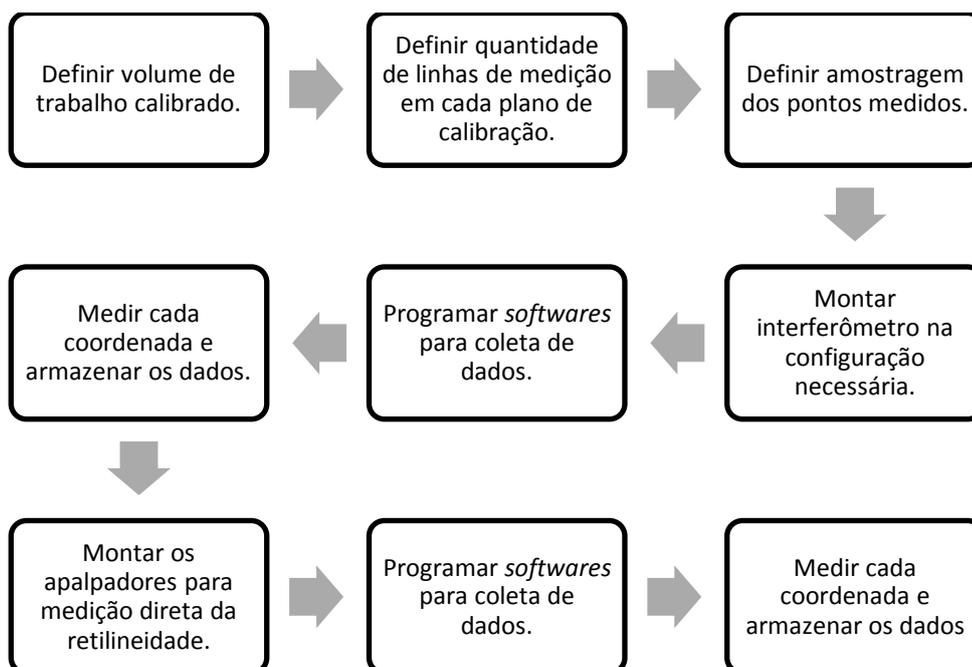


FIGURA 28: SEQUÊNCIA DAS ETAPAS DO EXPERIMENTO.

Conforme a Figura 28, as três primeiras atividades tratam diretamente de definições do volume cúbico a ser calibrado, a quantidade de pontos a serem medidos e a amostragem. Essas definições correspondem à coleta das coordenadas da calibração e também à coleta das coordenadas para o fator de correção de reticidade. As atividades restantes abordam questões práticas do experimento, desde a montagem dos equipamentos e programação dos softwares até a condução da coleta de dados propriamente dita.

A segunda etapa do procedimento apresenta o modelo matemático que utiliza os dados resultantes do experimento para estimar as incertezas de medição. O modelo matemático foi desenvolvido para ser válido independente dos parâmetros definidos no experimento (volume cúbico analisado, quantidade de pontos, amostragem), pois o objetivo é que este modelo seja aplicado para qualquer porte de MMC e qualquer superfície livre.

A terceira e quarta etapa apresentam uma medição real de uma superfície livre e os respectivos valores de incertezas com base no modelo matemático proposto.

#### **4.1. ETAPA 1: DESENVOLVIMENTO DO EXPERIMENTO**

Para detalhar o planejamento do experimento, os resultados obtidos e os valores que serão utilizados no modelo matemático, esta primeira etapa dos procedimentos foi dividida nos tópicos que se seguem.

##### **4.1.1. EQUIPAMENTOS E SOFTWARE**

Para a realização do experimento foi utilizado um conjunto de equipamentos que funcionam sincronizados para a coleta dos dados:

- 1- Máquina de medir por coordenada do tipo ponte móvel: Tesa Micro Hite DCC 3D equipada com software PC-DMIS versão v.4.2;
- 2- Interferômetro: modelo XL 80 Renishaw com exatidão de  $\pm 0,5\text{ppm}$  e com sistema de compensação ambiental da temperatura, pressão e

umidade durante a medição. Juntamente ao canhão laser, um jogo de óticas da Renishaw (*beam splitter, beam reflecter, beam steerer*, angular e interferômetro) que permite realizar medições em todos os sentidos preferenciais da máquina;

- 3- Apalpador eletrônico LVDT da Mitutoyo, modelo  $\mu$ -checker diferencial;
- 4- Apalpador Tesa Star-I com desempenho de MPE =  $3\mu\text{m}$  e MPE=  $3 + 1L/333 \mu\text{m}$  quando em operação entre  $20 \pm 1 \text{ }^\circ\text{C}$ ;
- 5- Esquadro mecânico: modelo EG 630 de granito com dimensões de 300x200 mm, com erro de ortogonalidade de 0,011 mm/m, perpendicularidade de 0,006mm/m e planicidade de 0,005 mm.

#### 4.1.2. PLANEJAMENTO DO EXPERIMENTO

Primeiramente define-se um volume cúbico a ser calibrado localizado no centro do volume de trabalho da MMC, por este representar a posição onde frequentemente são medidas as peças. Este volume calibrado é formado por meio de três planos paralelos a seus eixos, chamados de planos de calibração: XY, XZ e YZ, conforme mostra a Figura 29.

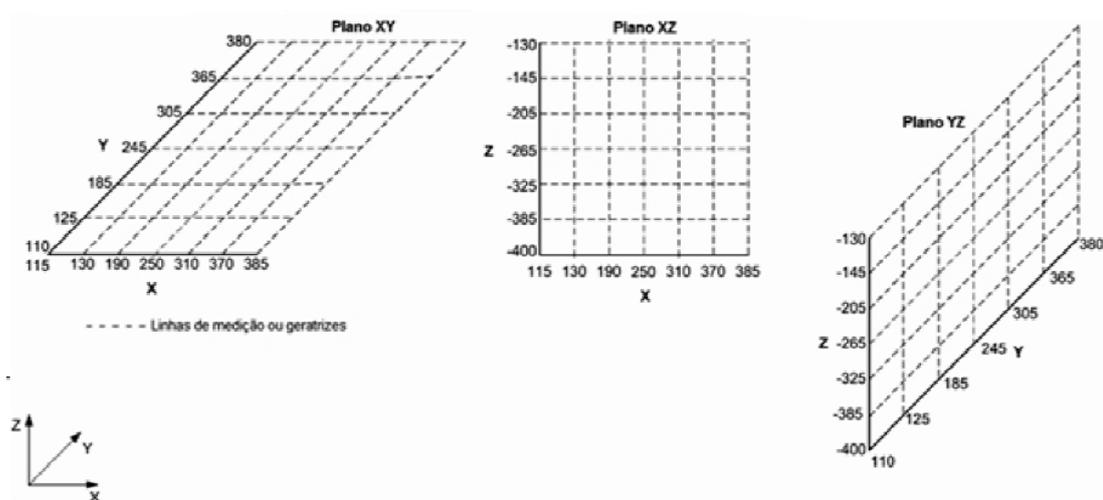


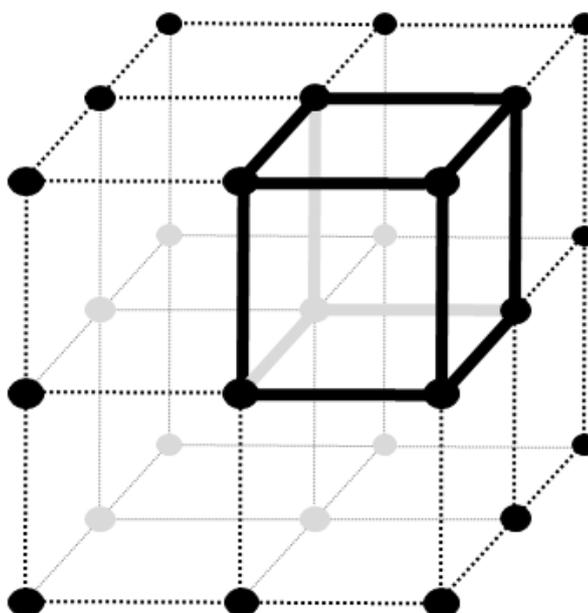
FIGURA 29: PLANOS DE CALIBRAÇÃO COM AS RESPECTIVAS LINHAS DE MEDIÇÃO.

Conforme se observa na Figura 29, para cada plano existem sete geratrizes ou linhas de medição em cada uma de suas direções preferenciais, formando uma

rede plana de pontos. As medições dos erros de posição devem ser realizadas ao longo de cada geratriz no sentido ida e volta completando seis corridas, três no sentido ida e três no sentido volta. A definição das geratrizes é, de acordo com Oliveira (2012), espaçada por 60mm cada exceto as extremidades, pois estas são afastadas por 15mm para a movimentação da máquina ao mudar de sentido durante a medição.

O volume definido para este experimento conforme a Figura 29, foi dividido em função de condições físicas que permitissem o deslocamento do interferômetro. Além disso, este volume é suficiente para avaliar superfícies de tamanho médio. Na prática, outros volumes podem ser definidos em função de condições como o tamanho da MMC, o espaço para movimentação do interferômetro ou o tamanho das superfícies a serem avaliadas.

A disposição dos pontos dos planos de calibração no espaço forma uma malha cúbica conforme ilustrado na Figura 30.



*FIGURA 30: MALHA CÚBICA.*

Considerando que os pontos estão separados por 60mm nos eixos X,Y e Z, também pode-se entender que cada ponto avaliado com o interferômetro é um vértice de um cubo de 60x60x60 mm conforme cubo destacado na Figura 30.

O ponto que se deseja conhecer os erros e incertezas de medição deve estar no interior da malha cúbica. Então, a superfície livre avaliada tem que estar obrigatoriamente no interior do volume considerado no experimento.

O modelo matemático proposto considera sempre os oito pontos da malha cúbica mais próximos do ponto medido para estimar as incertezas. Nesse sentido, o ponto medido sempre estará inserido em um cubo de 60x60x60 mm conforme cubo destacado na Figura 30, e os oito pontos mais próximos serão os vértices desse cubo.

Por fim, o modelo matemático proposto considera os erros dos oito pontos, vértices de um cubo, para estimar um valor único de incerteza válido para qualquer ponto no interior do cubo. Cada cubo terá um valor de incerteza diferente do outro.

#### **4.1.3. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO**

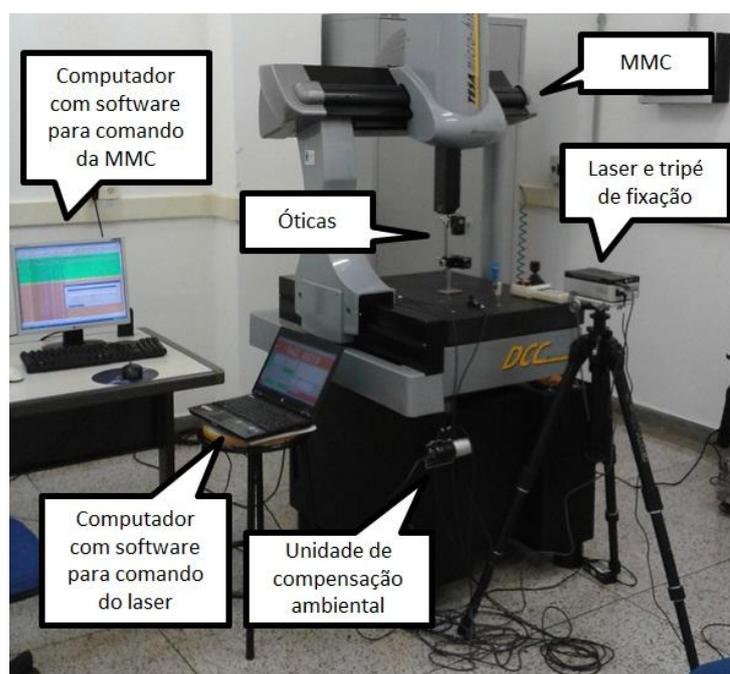
Durante a coleta dos dados, o ambiente de medição foi mantido com temperatura constante de  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ . O tempo esperado para estabilizar esta condição foi de aproximadamente 12 horas. Desta forma, o sistema de ar condicionado deve ser mantido ligado por este período antes do início do experimento. O interferômetro aqui usado favorece uma rápida estabilização, pois seu conjunto de óticas não é de metal. Além disso, o equipamento conta com um sistema de compensação das influências da condição do ar (temperatura, umidade e pressão) durante o experimento.

Para realizar a coleta de dados ao longo das geratrizes é necessário um software para programação de medição. A mesma lógica sequencial de medição foi configurada também no software do interferômetro para permitir a leitura e gravação dos pontos medidos automaticamente em cada

posicionamento da geratriz. Os dois programas não estabelecem comunicação, desta forma foi necessário configurar manualmente os parâmetros em cada programa a fim de que os dados fossem obtidos de maneira adequada. O ideal é trabalhar com dois computadores para que cada um comande independentemente o movimento da MMC e a captura do mensurando pelo sistema laser.

Para simular uma situação real de medição foi utilizada a velocidade “default” da máquina de medição e as paradas em cada ponto de medição são automáticas, porém sua retomada é manual, por meio do software da MMC.

Para a coleta de dados os equipamentos foram posicionados na sala de medição conforme ilustra a Figura 31.



*FIGURA 31: AMBIENTE DE MEDIÇÃO.*

Conforme ilustra a Figura 31, o ambiente de medição é formado pela MMC, o sistema laser e dois computadores. Para realizar as calibrações, o apalpador da MMC é substituído pelas óticas do sistema laser, porém antes desta

substituição o apalpador é qualificado. Somente depois disso é retirado o apalpador e adicionada à ótica.

O posicionamento dos equipamentos ilustrado na Figura 31 não considera questões didáticas, mas práticas que permitem a condução do experimento. Para a obtenção dos dados, os comandos inseridos nos *softwares* devem ser acionados de maneira sincronizada, necessitando um planejamento na montagem de todos os equipamentos.

A primeira tarefa a ser realizada no experimento é a programação no *software* de comando da MMC para a medição dos pontos ao longo da geratriz conforme ilustrado na Figura 29. O programa deve seguir a sequência de ida e volta parando a cada 60mm e considerar um recuo de 15mm para movimentação da máquina a fim de mudar o sentido de medição.

Em seguida, o conjunto de óticas deve ser configurado conforme ilustra a Figura 32, e o laser ser posicionado linearmente para cada uma das geratrizes a serem medidas.

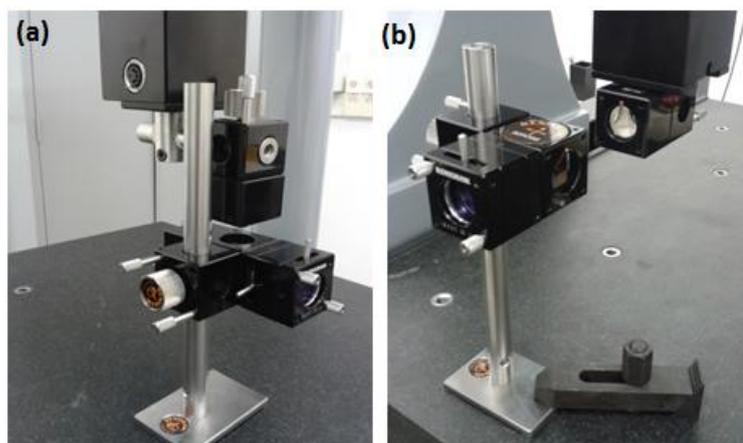


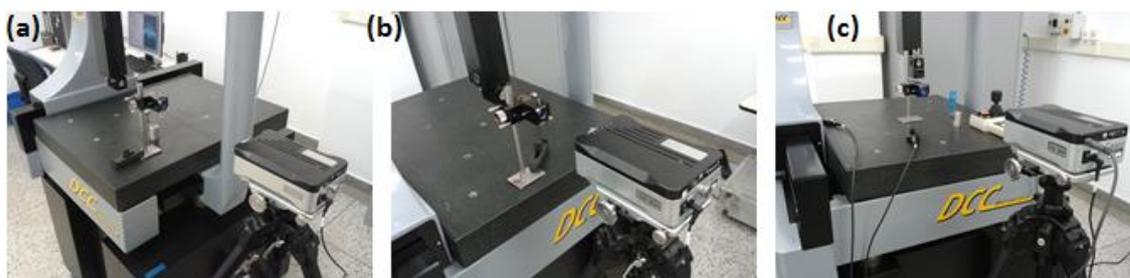
FIGURA 32: CONFIGURAÇÃO DA MONTAGEM DAS ÓTICAS.

A Figura 32(a) ilustra a configuração das óticas para calibração no eixo Z, no sentido vertical e a Figura 32(b) ilustra a configuração das óticas para calibração nos eixos X e Y, no sentido horizontal.

Após a montagem das óticas e antes do início da coleta de dados, o laser deve ser alinhado. Entre todas as etapas da coleta de dados, o alinhamento é a mais demorada e complexa. O laser é posicionado sobre um tripé (Figura 31) que deve ser movimentado para deixar o laser na posição desejada, mas este é apenas um ajuste grosseiro para o alinhamento completo. Depois de visualmente alinhado, a MMC é movimentada para conferir a necessidade de um ajuste fino, que é realizado na base de fixação do laser no tripé.

Em cada medição o procedimento orientado pelo fabricante do interferômetro deve ser seguido, inclusive a correção do erro de cosseno que permite fazer um alinhamento correto do laser com as geratrizes.

Depois deste alinhamento, é necessário também configurar o *software* de comando do laser para capturar as medições nos pontos da geratriz. Toda a sequência de movimento e parada da máquina deve ser informada no *software*. Em seguida, a medição pode ser iniciada para calibração dos eixos X, Y e Z conforme mostra a Figura 33.



*FIGURA 33: CALIBRAÇÃO DA MMC. (A) CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE X; (B) CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE Y; (C) CALIBRAÇÃO DOS ERROS DE Z.*

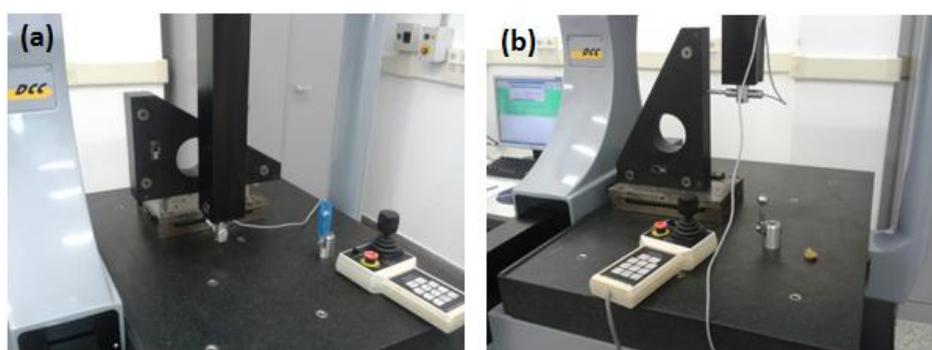
Independente do eixo calibrado, a MMC é movimentada para o primeiro ponto a ser medido. O *software* de comando do laser é informado que este é o primeiro ponto da geratriz, zerando a medição do laser. Desse modo, o primeiro ponto de cada reta medida não contém valores de erro. O programa da MMC é acionado para movimentá-la. A cada parada da MMC (espaçadas a 60mm) as coordenadas dos respectivos pontos são coletadas.

O *software* do sistema laser reconhece cada parada da MMC e depois de três segundos captura a sua posição registrando os dados em um relatório. Os dados são registrados juntamente com todas as informações de pressão, umidade e temperatura, capturadas pela umidade de compensação ambiental no momento exato da medição de cada ponto.

Os procedimentos descritos para a coleta de dados são válidos para todas as geratrizes dos planos de calibração XY, XZ e YZ. A programação nos *softwares*, posição do laser e alinhamento são realizados para cada geratriz. A diferença se encontra na medição das geratrizes do eixo Z, onde é necessário um remanejamento das óticas para mudar o sentido do laser de horizontal para vertical.

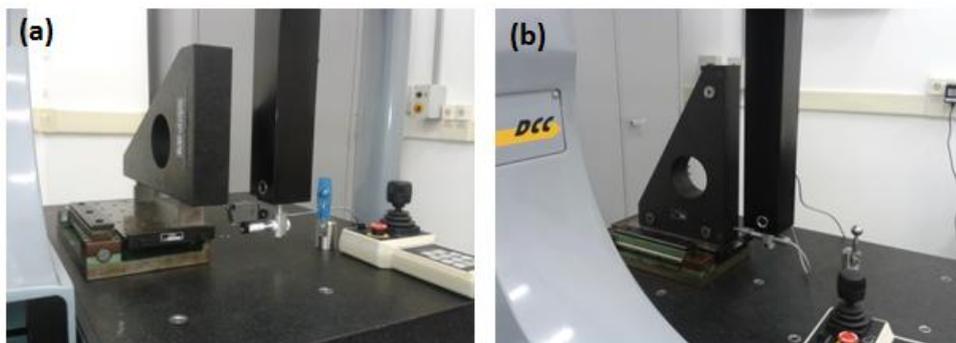
#### 4.1.4. REALIZAÇÃO DO EXPERIMENTO PARA O FATOR DE CORREÇÃO

As geratrizes medidas pelo sistema laser podem conter erros de retilineidade, pois a MMC não necessariamente consegue iniciar as medições de cada uma das geratrizes no mesmo ponto de origem. Para corrigir este erro nos valores calibrados, eles devem ser primeiramente estimados conforme o experimento ilustrado na Figura 34, Figura 35 e Figura 36.



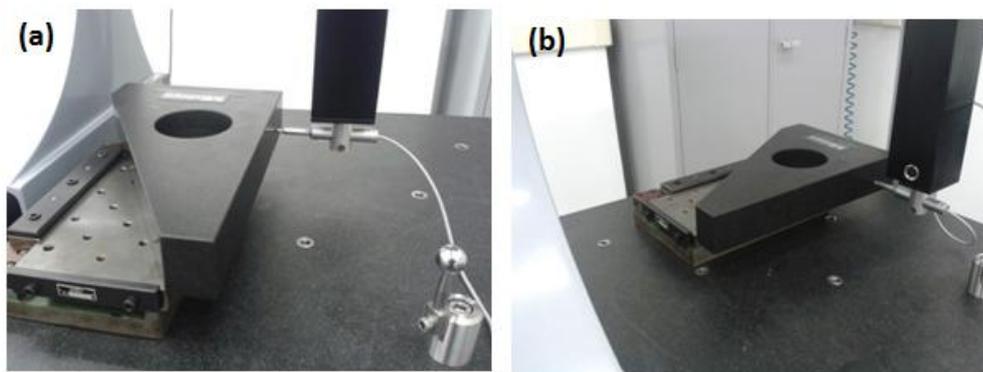
*FIGURA 34: MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE NO PLANO XZ:*

*(A) MEDIÇÃO EM X; (B) MEDIÇÃO EM Z.*



*FIGURA 35: MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE NO PLANO YZ:*

*(A) MEDIÇÃO EM Y; (B) MEDIÇÃO EM Z.*



*FIGURA 36: MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE NO PLANO XZ:*

*(A) MEDIÇÃO EM Y; (B) MEDIÇÃO EM X.*

O erro de retilineidade foi medido para cada plano (XY, XZ e YZ) coletando dados nas direções preferenciais conforme a Figura 34, Figura 35 e Figura 36. Nesta etapa é utilizado o apalpador eletrônico e o esquadro mecânico. Com esses equipamentos é possível a medição direta da retilineidade que será utilizado como fator de correção  $f_{c_{jk}}$  para as linhas de calibração.

Devido ao espaço disponível para a movimentação do apalpador e para o posicionamento do esquadro, foi necessário utilizar dois tipos de apalpadores durante o experimento, um para medições a serem realizadas na vertical e outro para realizar medições na horizontal conforme Figura 37.

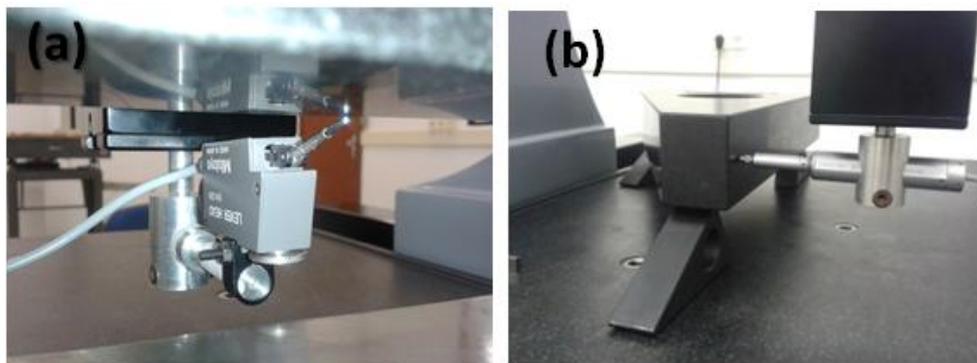


FIGURA 37: MEDIÇÃO DE RETILINEIDADE: (A) MEDIÇÃO NA VERTICAL; (B) MEDIÇÃO NA HORIZONTAL.

Para condução do experimento, primeiramente define-se um volume cúbico a ser calibrado, localizado no centro do volume de trabalho da MMC por este representar a posição onde frequentemente são medidas as peças. Este volume calibrado é formado por meio de três planos paralelos a seus eixos, chamados de planos de calibração, definidos para a calibração da MMC.

Para iniciar as medições o apalpador é posicionado na coordenada da primeira linha de medição e o contador eletrônico é zerado nesta coordenada. As distâncias entre os pontos medidos também são de 60mm, de forma que os pontos medidos correspondam as mesmas linhas de calibração, para cada coordenada de todos os planos. Para avaliar a repetibilidade, a medição foi realizada cinco vezes em cada linha de medição, sob as mesmas condições. Em cada ponto  $r$  medido em cada linha de medição  $s$  do plano de calibração  $t$  foram calculados os erros  $E_{x_{rst}}$ ,  $E_{y_{rst}}$  e  $E_{z_{rst}}$  pela média dos cinco pontos medidos. Considerando os fatores de correção  $f_{c_{st}}$ , as componentes finais do erro volumétrico de cada ponto  $r$ ,  $s$  e  $t$  são expressas como:

$$\begin{aligned}
 E_{x_{rst}} &= E_{x_{rst}} - f_{c_{st}} \\
 E_{y_{rst}} &= E_{y_{rst}} - f_{c_{st}} \\
 E_{z_{rst}} &= E_{z_{rst}} - f_{c_{st}}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

#### 4.2. ETAPA 2: MODELO MATEMÁTICO PROPOSTO PARA CÁLCULO DE INCERTEZA

Com base no cruzamento dos planos de calibração já apresentados, os pontos das geratrizes formam uma malha cúbica contendo 64 cubos de 60mm de arestas cada, conforme a Figura 38.

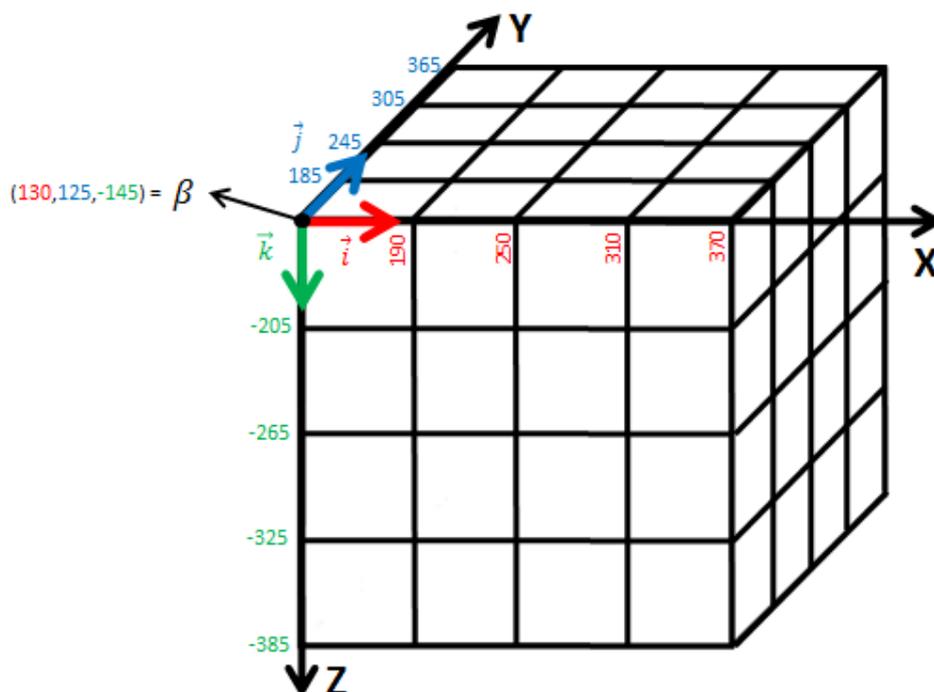


FIGURA 38: POSIÇÃO DOS PONTOS CONHECIDOS NO VOLUME DE TRABALHO.

De acordo com a Figura 38, ao todo são 125 pontos representados pelos vértices de cada cubo pequeno. O ponto de origem do sistema de eixos cartesianos dos pontos conhecidos foi chamado de  $\beta$  com as coordenadas em  $X = 130$ ,  $Y = 125$  e  $Z = -145$  mm, considerando o sentido de cada direção preferencial como  $X > 0$ ,  $Y > 0$  e  $Z < 0$ . A Figura 38 ilustra ainda a disposição e orientação dos vetores diretores nas respectivas direções  $i$ ,  $j$  e  $k$ .

O método aqui proposto para estimar as incertezas de medição permite obter valores individuais para cada cubo pequeno. Para isso, primeiramente é necessário localizar em qual cubo  $\mathcal{C}_{ijk}^*$  está um ponto  $P = (x_p, y_p, z_p)$

qualquer, que representa as coordenadas de um ponto medido de uma superfície de forma livre. A localização do cubo  $\mathbb{C}_{ijk}^*$  é obtida da seguinte forma:

$$i = \frac{x_p - 130}{60} \quad (2)$$

$$j = \frac{y_p - 125}{60} \quad (3)$$

$$k = \frac{-(z_p + 145)}{60} = \frac{z_p + 145}{60} \quad (4)$$

O valor de 130 na equação do vetor  $i$  corresponde ao ponto de origem  $\beta$  do sistema de eixos cartesianos dos pontos conhecidos. Da mesma forma, os valores de 125 e 145 correspondem respectivamente aos vetores  $j$  e  $k$ . As equações têm como denominador comum o tamanho das arestas de cada cubo pequeno, 60 mm. Por fim, os valores de  $i$ ,  $j$  e  $k$  indicam em qual cubo o ponto  $P = (x_p, y_p, z_p)$  se encontra entre os 64 cubos existentes. Por exemplo, seja  $P = (280, 150, -370)$  então  $\mathbb{C}_{ijk}^*$  será:

$$i = \frac{(x_p - 130)}{60} \quad i = \frac{(280 - 130)}{60} \quad i = \frac{150}{60} \quad i = 2,5 \quad i = 3. \quad (5)$$

$$j = \frac{(y_p - 125)}{60} \quad j = \frac{(150 - 125)}{60} \quad j = \frac{25}{60} \quad j = 0,41 \quad j = 1. \quad (6)$$

$$k = \frac{z_p + 145}{60} \quad k = \frac{-370 + 145}{60} \quad k = \frac{-225}{60} \quad k. \quad (7)$$

$$= 3,75 \quad k = 4.$$

Desta maneira,  $P = 280,315,-370 \in \mathfrak{C}_{314}^*$  conforme Figura 39.

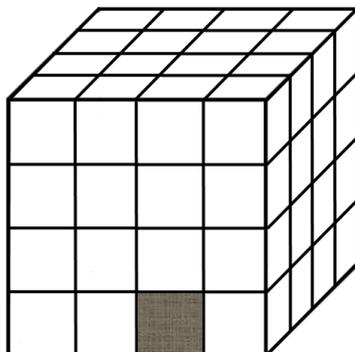


FIGURA 39: IDENTIFICAÇÃO DO CUBO PEQUENO.

Note que  $i, j$  e  $k \in 1,2,3,4$ . Considerar também no cálculo que os valores de  $i, j$  e  $k$  devem ser convertidos para o menor inteiro maior do que  $i, j$  e  $k$ , conforme exemplificado nas equações (5), (6) e (7).

Os métodos convencionais e normativos estimam um valor de incerteza único para o cubo maior (dado pelo volume total calibrado). Contudo, a proposta deste estudo é estimar um valor de incerteza para cada cubo pequeno. Portanto, conhecendo em qual cubo pequeno um ponto  $P$  qualquer se encontra, o próximo passo é calcular um valor único de incerteza que seja válido para qualquer ponto  $P$  inserido no cubo  $\mathfrak{C}_{ijk}^*$ . Conforme a Figura 40, um cubo  $\mathfrak{C}_{ijk}^*$  qualquer é formado pelos vértices A, B, C, D, E, F, G e H.

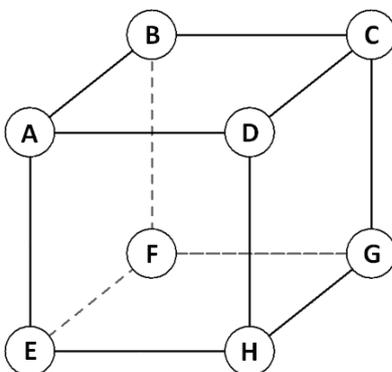


FIGURA 40: CUBO COM INCERTEZAS CONHECIDAS NOS VÉRTICES.

Os valores de A, B, C, D, E, F, G e H são os valores resultantes da calibração. Esses valores são compostos por suas coordenadas em X, Y e Z, portanto cada vértice pode ser representado da seguinte forma:

$$A_{ijk}^* = x_{Aijk}^*, y_{Aijk}^*, z_{Aijk}^* . \text{ Ser\acute{a} denotado por: } x_A^*, y_A^*, z_A^* ,$$

$$B_{ijk}^* = x_{Bijk}^*, y_{Bijk}^*, z_{Bijk}^* . \text{ Ser\acute{a} denotado por: } x_B^*, y_B^*, z_B^* ,$$

$$C_{ijk}^* = x_{Cijk}^*, y_{Cijk}^*, z_{Cijk}^* . \text{ Ser\acute{a} denotado por: } x_C^*, y_C^*, z_C^* ,$$

$$D_{ijk}^* = x_{Dijk}^*, y_{Dijk}^*, z_{Dijk}^* . \text{ Ser\acute{a} denotado por: } x_D^*, y_D^*, z_D^* ,$$

$$E_{ijk}^* = x_{Eijk}^*, y_{Eijk}^*, z_{Eijk}^* . \text{ Ser\acute{a} denotado por: } x_E^*, y_E^*, z_E^* ,$$

$$F_{ijk}^* = x_{Fijk}^*, y_{Fijk}^*, z_{Fijk}^* . \text{ Ser\acute{a} denotado por: } x_F^*, y_F^*, z_F^* ,$$

$$G_{ijk}^* = x_{Gijk}^*, y_{Gijk}^*, z_{Gijk}^* . \text{ Ser\acute{a} denotado por: } x_G^*, y_G^*, z_G^* ,$$

$$H_{ijk}^* = x_{Hijk}^*, y_{Hijk}^*, z_{Hijk}^* . \text{ Ser\acute{a} denotado por: } x_H^*, y_H^*, z_H^* .$$

As medições da calibração para cada ponto, que se localizam nos vértices de cada respectivo cubo foram realizadas nas três direções preferenciais da máquina (X, Y, Z) obtendo dezoito medições em cada ponto, seis no sentido do eixo X, seis no sentido do eixo Y e seis no sentido do eixo Z. O erro de medição para cada eixo será representado por  $\delta_i$  sendo  $i = 1, 2, 3, 4, 5$  e  $6$  . As equações (8), (9) e (10) calculam a média aritmética dos erros de medições no vértice A de um cubo qualquer  $\mathfrak{C}_{ijk}^*$ :

$$\epsilon_{x_A}^* = \frac{\sum_{i=1}^6 \delta_{i_{xA}}}{6} = \frac{\sum_{i=1}^6 x_i - x_A}{6} \quad (8)$$

$$\epsilon_{y_A}^* = \frac{\sum_{i=1}^6 \delta_{i_{yA}}}{6} = \frac{\sum_{i=1}^6 y_i - y_A}{6} \quad (9)$$

$$\epsilon_{z_A}^* = \frac{\sum_{i=1}^6 \delta_{i_{z_A}}}{6} = \frac{\sum_{i=1}^6 z_i - z_A}{6} \quad (10)$$

Similarmente, será calculada a média aritmética dos erros em cada direção preferencial para os vértices de B até H, resultando em:

$$A_{ijk}^* = \epsilon_{x_A}^*, \epsilon_{y_A}^*, \epsilon_{z_A}^* ,$$

$$B_{ijk}^* = \epsilon_{x_B}^*, \epsilon_{y_B}^*, \epsilon_{z_B}^* ,$$

$$C_{ijk}^* = \epsilon_{x_C}^*, \epsilon_{y_C}^*, \epsilon_{z_C}^* ,$$

$$D_{ijk}^* = \epsilon_{x_D}^*, \epsilon_{y_D}^*, \epsilon_{z_D}^* ,$$

$$E_{ijk}^* = \epsilon_{x_E}^*, \epsilon_{y_E}^*, \epsilon_{z_E}^* ,$$

$$F_{ijk}^* = \epsilon_{x_F}^*, \epsilon_{y_F}^*, \epsilon_{z_F}^* ,$$

$$G_{ijk}^* = \epsilon_{x_G}^*, \epsilon_{y_G}^*, \epsilon_{z_G}^* ,$$

$$H_{ijk}^* = \epsilon_{x_H}^*, \epsilon_{y_H}^*, \epsilon_{z_H}^* .$$

O erro  $\delta_i$  apresentado nas equações (8), (9) e (10) é a diferença entre o valor medido e o valor nominal. Portanto os valores  $x_A$ ,  $y_A$  e  $z_A$  são os valores nominais dos vértices do cubo  $\mathfrak{C}_{ijk}^*$ . Esses valores são determinados por:

$$x_A = 130 + i - 1 \times 60; y_A = 125 + j - 1 \times 60; z_A = -145 - k - 1 \times 60; \quad (11)$$

Dependendo dos valores de  $i, j$  e  $k$ , a expressão apresentada na equação (11) revela os valores nominais dos componentes  $x_A$ ,  $y_A$  e  $z_A$  do vértice A.

Similarmente, para cada vértice do cubo  $\mathfrak{C}_{ijk}^*$ , os valores nominais das

coordenadas em  $X$ ,  $Y$  e  $Z$  para os vértices B, C, D, E, F, G e H são calculados por:

$$x_B = 130 + i - 1 \times 60; y_B = 185 + j - 1 \times 60; z_B = -145 - k - 1 \times 60; \quad (12)$$

$$x_C = 190 + i - 1 \times 60; y_C = 185 + j - 1 \times 60; z_C = -145 - k - 1 \times 60; \quad (13)$$

$$x_D = 190 + i - 1 \times 60; y_D = 125 + j - 1 \times 60; z_D = -145 - k - 1 \times 60; \quad (14)$$

$$x_E = 130 + i - 1 \times 60; y_E = 125 + j - 1 \times 60; z_E = -205 - k - 1 \times 60; \quad (15)$$

$$x_F = 130 + i - 1 \times 60; y_F = 185 + j - 1 \times 60; z_F = -205 - k - 1 \times 60; \quad (16)$$

$$x_G = 190 + i - 1 \times 60; y_G = 185 + j - 1 \times 60; z_G = -205 - k - 1 \times 60; \quad (17)$$

$$x_H = 190 + i - 1 \times 60; y_H = 125 + j - 1 \times 60; z_H = -205 - k - 1 \times 60; \quad (18)$$

As equações (19), (20) e (21) estão calculando a média aritmética do erro  $\varepsilon$  em cada direção preferencial. Para  $\varepsilon_X$  somam-se todos os erros médios já calculados para cada vértice de A até H. Da mesma forma ocorre para  $\varepsilon_Y$  e  $\varepsilon_Z$ .

$$X \quad \varepsilon_X = \frac{H}{8} \frac{\sum_{i=A}^H \varepsilon_{x_i}^*}{8} = \frac{\varepsilon_{x_A}^* + \varepsilon_{x_B}^* + \varepsilon_{x_C}^* + \varepsilon_{x_D}^* + \varepsilon_{x_E}^* + \varepsilon_{x_F}^* + \varepsilon_{x_G}^* + \varepsilon_{x_H}^*}{8} \quad (19)$$

$$Y \quad \varepsilon_Y = \frac{H}{8} \frac{\sum_{i=A}^H \varepsilon_{y_i}^*}{8} = \frac{\varepsilon_{y_A}^* + \varepsilon_{y_B}^* + \varepsilon_{y_C}^* + \varepsilon_{y_D}^* + \varepsilon_{y_E}^* + \varepsilon_{y_F}^* + \varepsilon_{y_G}^* + \varepsilon_{y_H}^*}{8} \quad (20)$$

$$Z \quad \varepsilon_Z = \frac{H}{8} \frac{\sum_{i=A}^H \varepsilon_{z_i}^*}{8} = \frac{\varepsilon_{z_A}^* + \varepsilon_{z_B}^* + \varepsilon_{z_C}^* + \varepsilon_{z_D}^* + \varepsilon_{z_E}^* + \varepsilon_{z_F}^* + \varepsilon_{z_G}^* + \varepsilon_{z_H}^*}{8} \quad (21)$$

A incerteza para cada direção preferencial considerando os erros de todos os vértices do cubo é expressa como sendo o desvio padrão amostral:

$$U_{\varepsilon_X} = \frac{\sqrt{\sum_{i=A}^H \varepsilon_{x_i}^* - \varepsilon_X}^2}{7} \quad (22)$$

$$U_{\varepsilon_Y} = \frac{\sqrt{\sum_{i=A}^H \varepsilon_{y_i}^* - \varepsilon_Y}^2}{7} \quad (23)$$

$$U_{\varepsilon_Z} = \frac{\sqrt{\sum_{i=A}^H \varepsilon_{z_i}^* - \varepsilon_Z}^2}{7} \quad (24)$$

A incerteza final para um cubo  $\mathfrak{C}_{ijk}^*$  considerando cada direção preferencial é dada com base na expressão convencional usada para estimar a incerteza combinada:

$$U_{\varepsilon} = \sqrt{s_{\varepsilon_X}^2 + s_{\varepsilon_Y}^2 + s_{\varepsilon_Z}^2} \quad (25)$$

A incerteza  $U_{\varepsilon}$ , é o resultado do método proposto. Este valor de incerteza é considerado o mesmo para qualquer ponto  $P$  medido no cubo  $\mathfrak{C}_{ijk}^*$ . Os

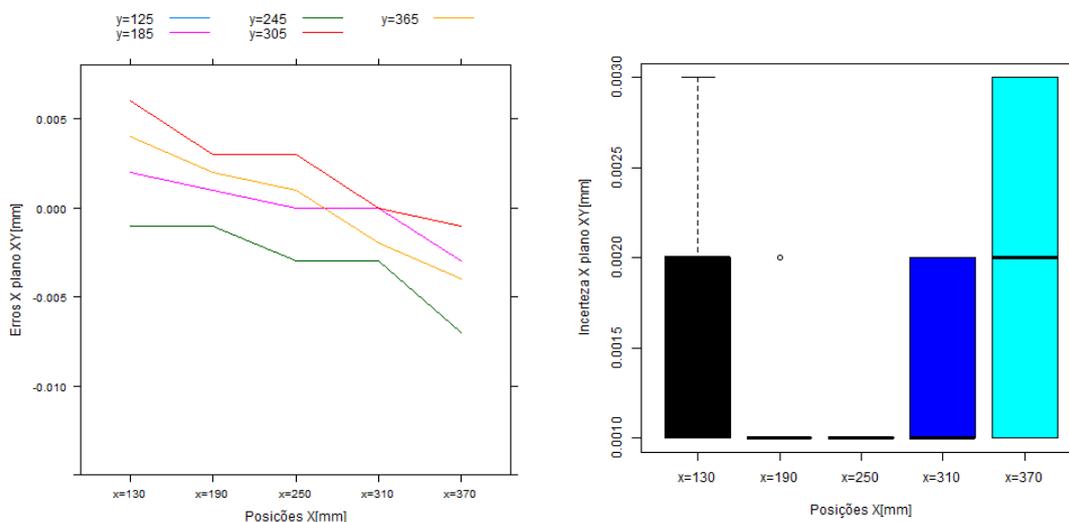
cálculos apresentados demonstram que essa incerteza é calculada a partir dos erros conhecidos em cada vértice do cubo  $\mathcal{C}_{ijk}^*$ , possibilitando obter uma estimativa de incerteza diferente para cada área da superfície de forma livre avaliada.

#### **4.3. ETAPA 3: APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO E RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Para iniciar a aplicação do método proposto, primeiramente são avaliados os erros observados na calibração da MMC, conforme descrito na subseção 4.1. Posteriormente são apresentadas as etapas da avaliação da incerteza de medição de uma superfície de forma livre pelo método proposto. Por fim, são estimado as incertezas de uma medição real.

##### **4.3.1. ANÁLISE DOS RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DA MMC**

Os resultados da calibração estão apresentados graficamente pelas curvas dos erros em cada eixo calibrado em cada plano, além dos gráficos com os desvios padrão observados nas repetições das medições dos erros em cada posição. Primeiramente estão apresentados os erros de X calibrados no plano XY, quando  $Z = -265$  e os respectivos desvios padrão. Os resultados aqui apresentados correspondem aos planos que se cruzam no centro do volume de trabalho da MMC avaliada.



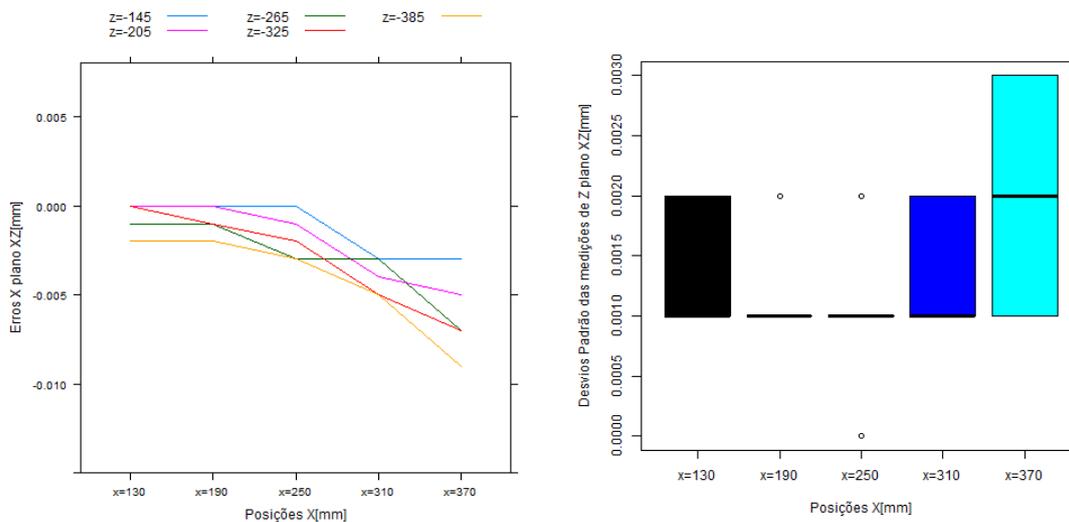
(A) ERROS DE X CALIBRADOS NO PLANO XY COM  $Z = -265$  MM

(B) DESVIOS PADRÃO PARA AS MEDIÇÕES DOS ERROS DE X CALIBRADOS NO PLANO XY COM  $Z = -265$  MM

FIGURA 41: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE X NO PLANO XY.

Conforme ilustra o gráfico (a) da Figura 41 a grande maioria dos erros observados para X no plano XY assumem valores em torno de zero, com forte tendência decrescente, à medida que os valores de posicionamento de X se afastam da origem do sistema de coordenadas da MMC. Este fato é observado pelo aumento dos valores das posições de X. Já os desvios padrão para estes erros mostram que os valores mais próximos do centro do plano possuem menor variabilidade. Esse resultado faz sentido uma vez que o centro de volume da máquina é o local mais utilizado para medições, tornando o centro das atenções também na calibragem.

A Figura 42 apresentam os resultados dos erros observados para X no plano XZ.



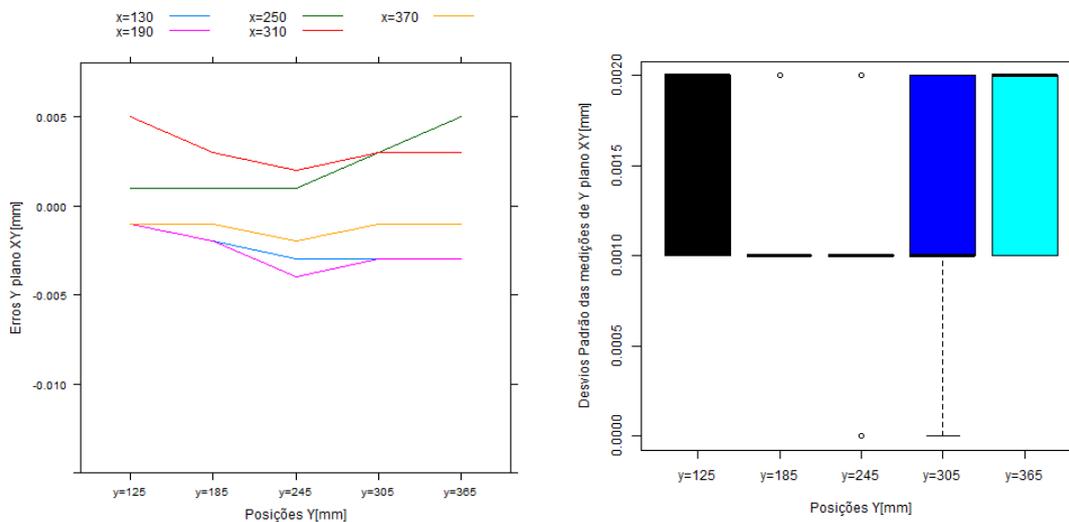
**(A) ERROS DE X CALIBRADOS NO PLANO XZ COM Y = 245 MM**

**(B) DESVIOS PADRÃO PARA AS MEDIÇÕES DOS ERROS DE X CALIBRADOS NO PLANO XZ COM Y = 245 MM**

**FIGURA 42: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE X NO PLANO XZ.**

Os erros observados para X no plano XZ apresentam o mesmo comportamento decrescente dos erros observados no plano XY, com valores negativos em um intervalo entre 0 e 10 $\mu$ m. Os desvios padrão para estes erros também apresentam o mesmo comportamento dos desvios observados para o plano XY, com valores maiores nas extremidades dos planos.

A Figura 43 apresenta os resultados dos erros observados para Y no plano XY.



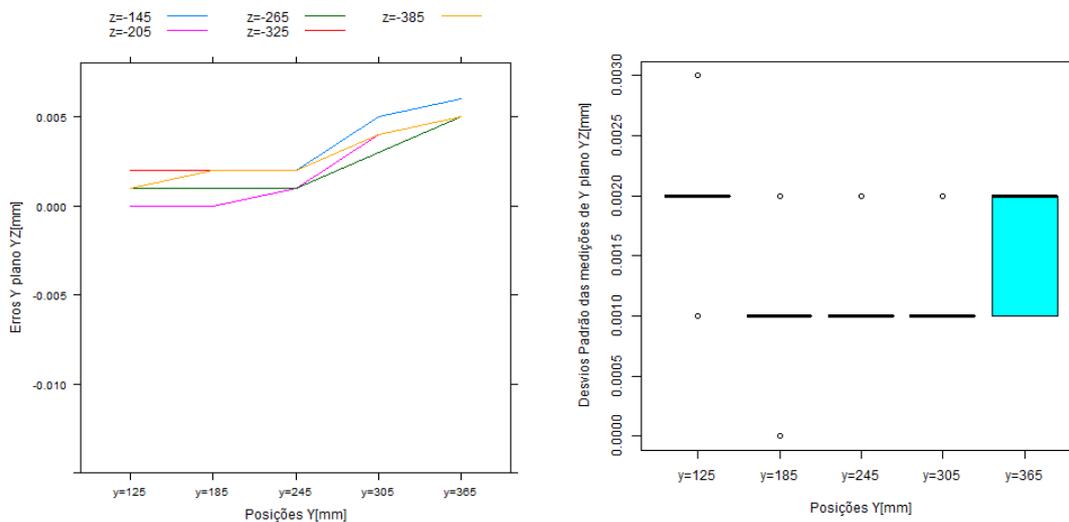
(A) ERROS DE Y CALIBRADOS NO PLANO XY COM Z = -265 MM

(B) DESVIOS PADRÃO PARA AS MEDIÇÕES DOS ERROS DE X CALIBRADOS NO PLANO XY COM Z = -245 MM

FIGURA 43: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE Y NO PLANO XY.

Conforme a Figura 43 os erros de Y no plano XY apresentam uma tendência decrescente até o centro do plano e crescente depois do centro do plano. Mais uma vez os resultados apontam para uma menor variabilidade em medições no centro do volume da MMC. Os desvios padrão para estes erros também apresentam o mesmo comportamento dos desvios observados para o plano XY e XZ, com valores maiores nas extremidades dos planos.

A Figura 44 apresenta os resultados dos erros observados para Y no plano YZ.



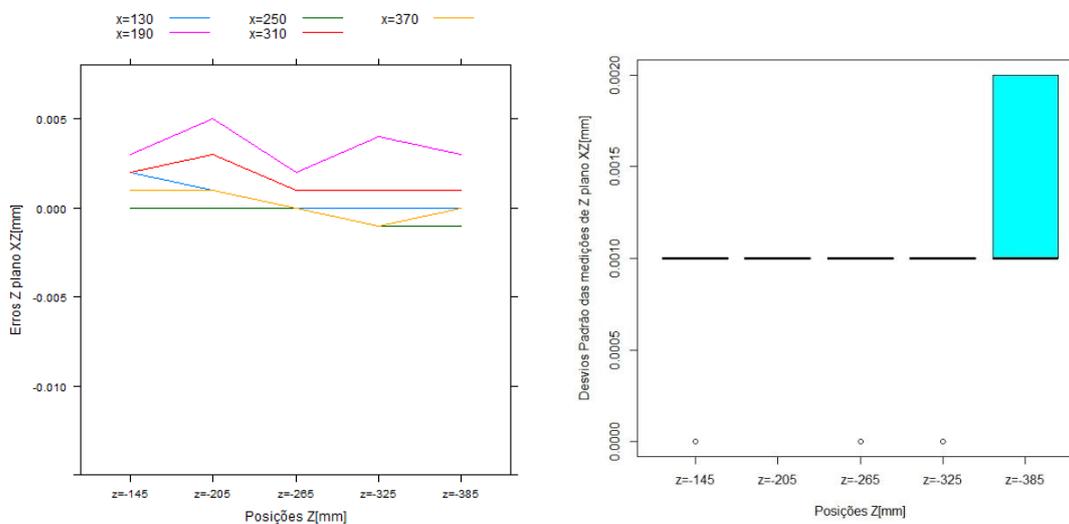
(A) ERROS DE Y CALIBRADOS NO PLANO YZ COM X = 250 MM

(B) DESVIOS PADRÃO PARA AS MEDIÇÕES DOS ERROS DE Y CALIBRADOS NO PLANO YZ COM X = 250 MM

FIGURA 44: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE Y NO PLANO YZ.

Os erros observados para Y no plano YZ apresentam uma tendência crescente à medida que os valores de posicionamento de Y se afastam da origem do sistema de coordenadas da MMC. Já os desvios padrão para estes erros apresentam valores maiores na extremidade do plano mais distante da origem do sistema de coordenadas da MMC.

Os erros e desvios padrão para Z no plano XZ são apresentados na Figura 45.



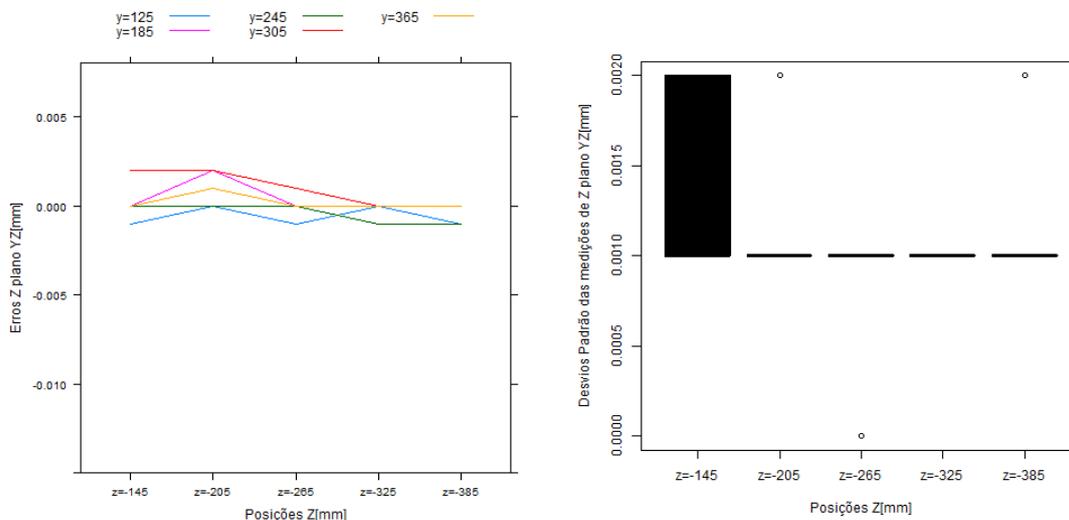
(A) ERROS DE Z CALIBRADOS NO PLANO XZ COM  $Y = 245$  MM

(B) DESVIOS PADRÃO PARA AS MEDIÇÕES DOS ERROS DE Z CALIBRADOS NO PLANO XZ COM  $Y = 245$  MM

FIGURA 45: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE Z NO PLANO XZ.

Os erros de Z no plano XZ apresentam uma leve tendência decrescente conforme gráfico (a) da Figura 45. Os desvios padrão para estes erros apresentam valores maiores na extremidade do plano mais próximo da origem do sistema de coordenadas da MMC.

A Figura 46 apresenta os resultados dos erros observados para Z no plano YZ.



(A) ERROS DE Z CALIBRADOS NO PLANO YZ COM  $X = 250$  MM

(B) DESVIOS PADRÃO PARA AS MEDIÇÕES DOS ERROS DE Z CALIBRADOS NO PLANO YZ COM  $X = 250$  MM

FIGURA 46: ERROS DE CALIBRAÇÃO E DESVIOS PADRÃO DE Z NO PLANO YZ.

Os erros de Z no plano YZ apresentam valores entre -2 e 2  $\mu\text{m}$  e aleatórios em torno de zero. Observa-se uma pequena tendência decrescente ao longo do eixo Z. Os desvios padrão para estes erros apresentam valores maiores na extremidade do plano mais próximo da origem do sistema de coordenadas da MMC.

De forma geral, os gráficos dos erros calibrados e dos desvios padrão dos planos apresentados possuem valores menores no centro do plano calibrado. Conclui-se então que o centro geométrico do volume da MMC possui uma variação menor de erros e incertezas em relação às extremidades.

Uma vez observado esta característica da MMC calibrada, faz sentido posicionar a superfície livre a ser avaliada no centro do cubo calibrado, que é também o centro do volume total da MMC.

### 4.3.2. AVALIAÇÃO DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO PARA UMA SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE PELO MÉTODO PROPOSTO

Para aplicar o modelo aqui proposto gerou-se uma rotina no *software R* conforme mostra o Apêndice A. A rotina desenvolvida considera os erros obtidos pela calibração da MMC, conforme apresentado na subseção 4.1. A sequência da estimativa dos erros e incertezas esquematizada na Figura 47.

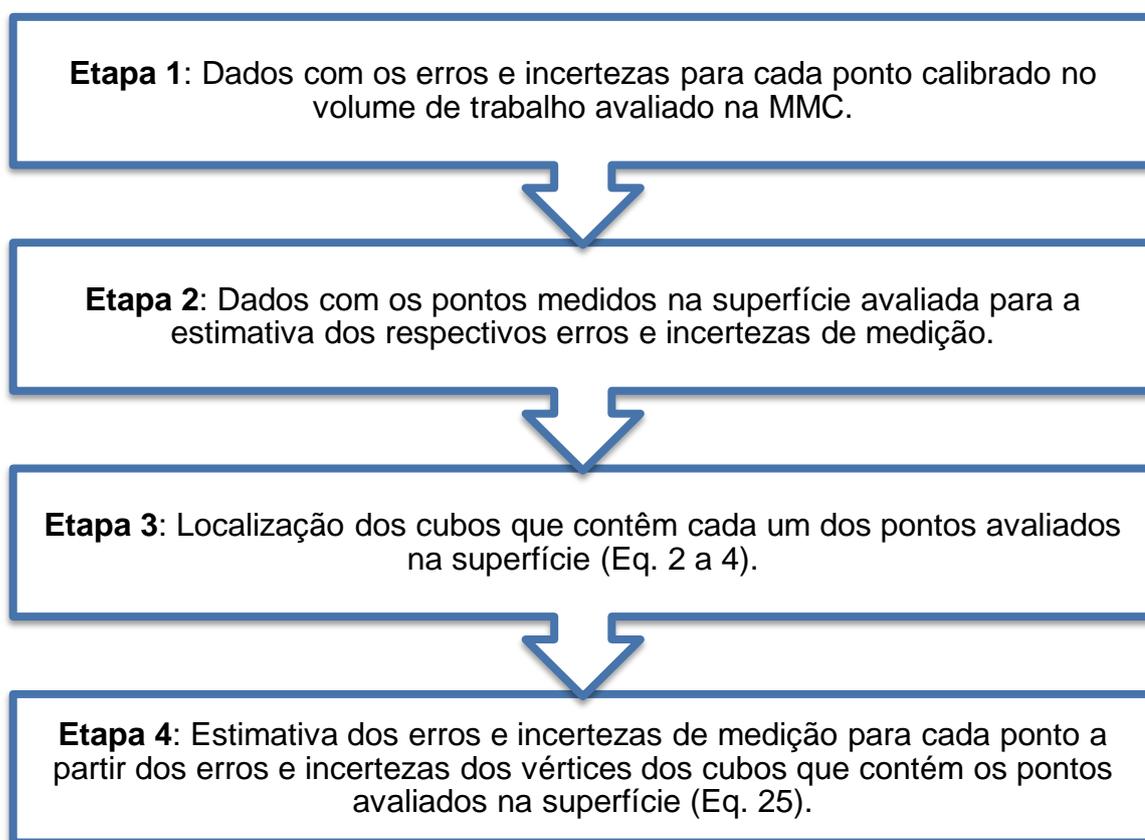


FIGURA 47: SEQUÊNCIA DA ROTINA PARA ESTIMAR OS ERROS E INCERTEZAS DO MODELO PROPOSTO.

As etapas 1 e 2 da Figura 47 compreendem a entrada dos dados para as estimativas. Na etapa 1 são inseridos os dados da calibração da MMC com as incertezas de cada um dos vértices dos 64 cubos medidos nesta calibração, totalizando 125 pontos. Na etapa 2 são inseridos os dados correspondentes a cada ponto medido em uma determinada superfície de forma livre.

Na etapa 3, localiza-se o cubo que contém cada um dos pontos medidos na superfície com base nas equações 2 a 4. Após localizado o cubo que contém o referido ponto, a etapa 4 estima os erros e incertezas para este ponto a partir dos erros e incertezas de cada um dos respectivos vértices.

Para ilustrar o método proposto, durante este estudo foram realizadas medições em uma superfície de forma livre, conforme Oliveira (2012). A peça medida pertence à classe três (da Figura 3) das definições de Jiang, Scott e Whitehouse (2007) de classificação de superfícies livres por apresentar uma superfície alisada, não possuindo degraus, arestas, facetas ou padrões repetidos. Soma-se a isso o fato de a peça não possuir grau de invariância, pois não existe eixo de rotação e também não poder sofrer movimento de translação (definição apresentada na Figura 2). A Figura 48 ilustra a peça avaliada para estimar os erros e incertezas da medição.



*FIGURA 48: SUPERFÍCIE DE FORMA LIVRE AVALIADA COM A MMC.*

As dimensões nominais da peça são aproximadamente 71 mm de largura, 153 mm de comprimento e 49 mm de altura. A estratégia de medição seguiu as etapas apresentadas no tópico 2.5 de limpeza; estabilização térmica; fixação; qualificação do apalpador; determinação do sistema de coordenadas e medição dos pontos.

**Limpeza da peça:** mesmo em ambiente fechado a limpeza da peça foi realizada e controlada durante toda a medição para evitar possíveis distorções nos resultados.

**Estabilização térmica:** a sala de medição foi mantida em temperatura constante em  $20 \pm 1^\circ\text{C}$  durante toda o experimento. Antes de iniciar as medições foi mantida a sala climatizada por 12h para minimizar os erros causados pela deformação física das peças. Durante este período o laser permaneceu ligado.

**Fixação da peça:** a peça foi posicionada no centro do volume avaliado no experimento com o interferômetro. Para tanto, a mesma foi apoiada sobre a mesa de seno para atingir a altura desejada. Esta condição de localização é necessária, pois os cálculos consideram os pontos da malha cúbica para estimar as incertezas nos valores da medição da peça. Para manter a peça fixa foi necessário a fixação com dispositivos apropriados a fim de mantê-la no mesmo local durante as medições.

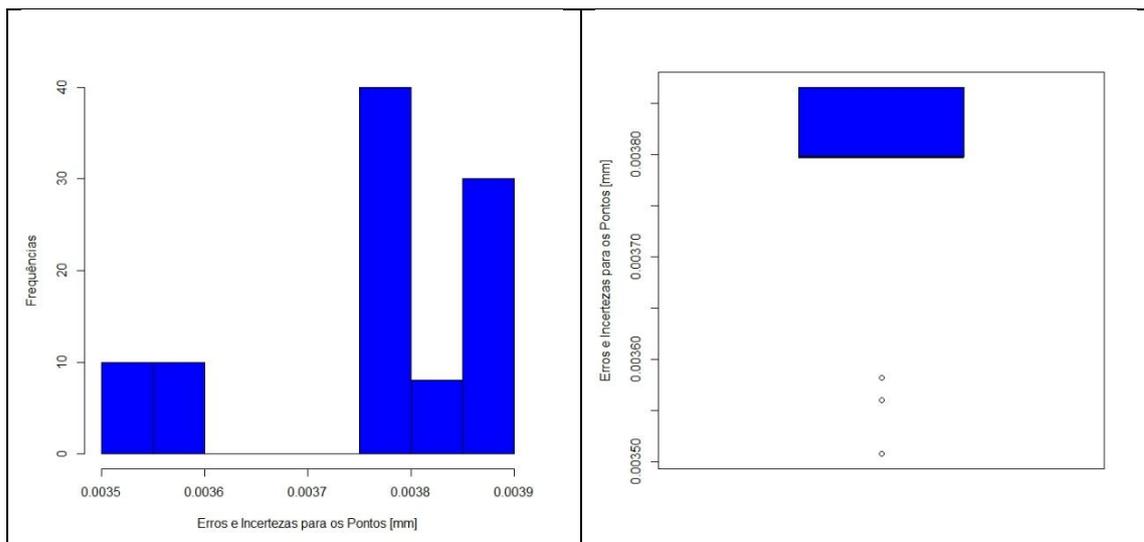
**Qualificação do apalpador:** esta etapa foi realizada segundo as especificações do fabricante.

**Determinação do sistema de coordenadas:** esta etapa é considerada muito importante por se tratar de uma peça com superfície de forma livre. Normalmente o alinhamento nestes casos utiliza critérios matemáticos de ajustes como o *best-fitting*. Entretanto, o método utilizado nesta medição foi o alinhamento convencional 3-2-1 (plano, reta e ponto) possibilitado pela forma física concebida no processo de usinagem.

**Medição dos pontos:** a definição da quantidade e da localização dos pontos medidos foi adotada de acordo com Rajamohan, Shunmugam e Samuel (2011). Os pontos são mais concentrados nas regiões de maior curvatura e menos concentrados nas regiões de menor curvatura em cada linha de medição ao longo do comprimento da peça. Definiu-se quatro linhas de

medição, composta de 25 pontos cada. Os valores medidos finais são resultantes da média de três medições de cada ponto.

Com base nos resultados obtidos da medição, foi elaborado o histograma e o diagrama de caixa (*boxplot*) apresentados na Figura 49.



*FIGURA 49: RESULTADO DA ESTIMATIVA DOS ERROS E DAS INCERTEZAS PARA OS PONTOS MEDIDOS.*

Os gráficos da Figura 49 revelam a dispersão das incertezas dos 98 pontos medidos sobre a superfície livre. Os valores das incertezas variaram entre 3,5 $\mu$ m e 3,9 $\mu$ m, de modo a concluir que a MMC se comporta de maneira diferente dependendo da localização no volume de trabalho da máquina.

O valor encontrado de incerteza recomendado pelo fabricante é expresso pela equação  $MPE_E = 3.0 + 4 L/1000$ . Considerando que  $L=240$ mm (distância mais longa de medição)  $MPE_E = 3,96\mu$ m. Este valor é superior ao valor máximo encontrado de incerteza no experimento, 3,9 $\mu$ m. O valor de incerteza do experimento pode ser ainda maior se considerado outras fontes de incertezas, como por exemplo, a incerteza do apalpador. Todos os resultados obtidos na medição, com as suas respectivas incertezas e posições no cubo, estão apresentados no Apêndice B.

## 5. CONCLUSÃO

O presente trabalho apresentou um método para estimar as incertezas de medição na avaliação de superfícies de forma livre, medida por uma MMC. O método propõe obter uma estimativa da incerteza com base nos erros geométricos, obtidos por meio de uma calibração direta utilizando um interferômetro. Os dados da calibração são inseridos no modelo matemático proposto que gera um valor de incerteza válido para um determinado subvolume da área de trabalho da MMC.

Considerando que existem métodos desenvolvidos para avaliar e determinar a incerteza de medição em superfícies de forma livre por meio de MMC, o método proposto vem a contribuir para fornecer um valor de incerteza mais refinado, considerando o comportamento da MMC próximo ao ponto desejado, ao invés de uma incerteza resultante de uma avaliação de todo o sistema de medição. Desse modo foi possível obter valores diferentes de incerteza para cada região de trabalho dentro do subvolume da área de trabalho da MMC, variando entre  $3,5\mu\text{m}$  e  $3,9\mu\text{m}$  enquanto o valor de incerteza de todo o sistema indicado pelo fornecedor da MMC é de  $3,96\mu\text{m}$ .

A aplicação do modelo proposto é mais indicada para medições de peças que exigem tolerâncias restritas, onde necessário maior confiança das medições. Em situações em que o valor medido se aproxima das tolerâncias, é vital conhecer o comportamento da máquina na região da medição realizada para saber a variação do valor medido. Por exemplo, uma medição com valor de  $28\mu\text{m}$  e tolerância máxima de  $30\mu\text{m}$  pode ser comprometedor se a incerteza for de  $3,9\mu\text{m}$ . Neste exemplo o valor medido pode chegar até  $31,9\mu\text{m}$ , resultando  $1,9\mu\text{m}$  além da tolerância.

Outra aplicação do método proposto é indicada para MMCs de grande porte, pois seu comportamento pode ser mais instável em determinadas regiões no volume de trabalho do equipamento, principalmente nas extremidades da

máquina. Este comportamento pode ser evidenciado nos resultados da calibração realizados no experimento que contemplou uma MMC de pequeno porte, porém a situação é análoga a uma máquina de grande porte. Em medições de peças de grande porte, a MMC começa a trabalhar nas extremidades de seu volume de trabalho, exatamente onde se encontram as maiores incertezas da máquina.

Retomando o objetivo deste estudo, o método proposto permite estimar as incertezas de medição para avaliação de superfícies de forma livre avaliada por meio de uma MMC. Essas incertezas são estimadas para cada um dos pontos medidos com base nos diversos valores de desempenho da MMC e não somente por um valor único definido convencionalmente como a declaração de incerteza do sistema de medição.

O ponto crítico do método proposto fica pelo fato de que o refinamento do valor da incerteza depende da quantidade de pontos calibrados e a obtenção desses valores está em função do experimento, que pode ser demorado.

Como sugestão para trabalhos futuros, com base nas conclusões deste trabalho, alguns aspectos ainda podem ser explorados e aprofundados. Por exemplo, mapear todo o volume de trabalho de uma MMC que possibilite estimar a incerteza para medição de qualquer peça, em qualquer posição para uma determinada MMC.

Também é sugerido desenvolver um cálculo matemático que possibilite considerar um fator de influência sobre as distâncias dos pontos do vértice do cubo para o ponto medido, a fim de estimar valores diferentes de incerteza para pontos no interior do mesmo cubo. Este modelo matemático pode estimar valores de incertezas ainda mais refinados do que a proposta apresentada neste trabalho.

## 6. BIBLIOGRAFIA

**ASME B89.4.19.** Performance Evaluation Tests and Geometric Misalignments in Laser Tracker. p.48. 2009.

**ABACKERLI, A. J.; ORREGO, R. M. M.** Intercomparação de Medições em Máquinas de Medir por Coordenadas. II Relatório parcial de projetos de pesquisa FAP-UNIMEP. 205-99. n. 205-99, 108 p. 2001.

**ALMACINHA, A. J.** Introdução à Nova Linguagem ISO de Especificação Geométrica de Produtos - Parte I: A Classificação dos Elementos Geométricos de Superfícies e suas Aplicações. *In* Revista Tecnometal. Porto: AIMMAP. pp. 7-14. 2005.

**ARENHART, F. A.** Desempenho Metrológico de Máquinas de Medição por Coordenadas no Âmbito Industrial Brasileiro. Trabalho submetido à ABCN para participação do prêmio ABCM-Yehan Numata na Categoria de Graduação. Florianópolis. 2007.

**ASCIONE, R.; POLINI, W.** Measurement of Nonrigid Freeform Surfaces by Coordinate Measuring Machine. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, v. 51, n. 9-12, p. 1055–1067, 2010.

**BACHMANNM, J.; LINHARES, J. M.; SPRAUEL, J. M.** Aide in Decision Making: Contribution to Uncertainties in Three Dimensional Measurement. *Precision Engineerig*. Vol. 28, pp. 78-88. 2004.

**BARINI, E. M.; TOSELLO, G.; De CHIFFRE, L.** Uncertainty Analysis of Point-by-Point Sampling Complex Surface Using Touch Probe CMMs: DOE for Complex Surfaces Verification with CMM. *Precision Engineering*. Vol. 34, pp. 16-21. 2010.

**BOSCH, J. A.** Coordinate Measuring Machines and Systems. New York, Ed. Marcel Decker Inc, 1995.

**BRIAN, J.B.; DOIRON, T.; KOCKEN, R.J.** Temperature Fundamentals. Coordinate Measuring Machines and Systems. Boca Raton. CRC Press. pp. 273-303. 2012.

**BRITO NETO, A. A. B.** A Tecnologia da Medição por Coordenadas na Calibração de Peças Padrão e Medição de Peças com Geometrias Complexas. Tese de Doutorado. Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2003.

**BURDEKIN, M.; VOUTSADOPOULOS, C.** Computer Aided Calibration of Geometric Errors of Multi-axis Coordinate Measuring Machines. Proc. Instr. Mech. Engrs, n. 195, pp 231–239, 1981.

**CAMARGO, R.; LINK, W.** Calibração Direta dos 21 Erros Geométricos da MM3C. São Paulo: Sinergia, v. 5, n. 2, pp. 147–155, 2004.

**CARDOZA, J. A. S.** Máquinas Virtuais de Medir a três Coordenadas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo - USP. São Carlos, 1995.

**CHENG, M. N.; CHEUNG, C. F.; LEE, W. B.** Theoretical and Experimental Analysis of Nano-Surface Generation in Ultra Precision Raster Milling. International Journal of Machine Tools & Manufacture. Vol. 48, pp. 1090-1102. 2008.

**CHEUNG, C. F.; LI, H. F.; LEE, W. B.** An Integrated Form Characterization Method for Measuring Ultra-Precision Freeform Surfaces. Machine Tools and Manufacture. Vol. 47, pp. 81-91. 2007.

**CHEUNG, C. F.; KONG, L. B.; TO, S.;** Measuring Ultra-Precision Freeform Surfaces Using a Hybrid Fitting and Matching Method. Measurement Science and Technology. Vol. 20, pp. 1-12. 2009.

**CHEUNG, C.F.; REN, M.J.; KONG, L.B.** Modelling and analysis of uncertainty in the form characterization of ultra-precision freeform surfaces on coordinate measuring machines. CIRP Annals –Manufacturing Technology. 2014.

**CHENG, J; WANG Y; JIN CUI C.** Infinite Element Dynamic Analysis of the Shafting of Transmission – Laser-Scanning-Emitter. Advanced Materials Research. pp. 694-607. 2013.

**COELHO, A. H.** Fotogrametria Digital à Curta Distância Aplicada à medição da Configuração Geométrica de Elementos de Instalações Industriais. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2000.

**DI GIACOMO B.** Computer aided calibration and Hybrid compensation of geometric errors in coordinate measuring machines. Tese de Doutorado – Institute of Science and Technology, University of Manchester. Manchester 1986.

**DE CHIFFRE L.** Technical University of Denmark Centre for Geometrical Metrology: annual report 2000–2001. Kgs. Lyngby. 2002.

**DONATELLI, G.D.; ALBERTAZZI, A.; SCHNEIDER, C.A.; PFEIFFER, G.** Metrologia Geométrica na Indústria - Tendências e Desafios. O futuro da indústria: a importância da metrologia para o desenvolvimento industrial: Coletânea de artigos. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial, Departamento Nacional, Brasília, pp. 1-28, 2005.

**ESTLER, W. T.; EDMUNDSON, K. L.; PEGGS, G. N.;** Large Scale Metrology - An Update. CIRP. Vol. 51, pp. 587-609. 2002.

**EVANS, C.J.; HOCKEN, R.J.; ESTLER, W.T.** Self-calibration: reversal, redundancy, error separation and ‘absolute testing’, CIRP Annals, 46, (2), pp. 617-634, 1996.

**FANTIN, A. V.** Medição de Formas Livres Tridimensionais por Topogrametria, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 1999.

**FENG, C. X. J.; SAAL, A. L.; SALSURY, J. G.** Design and Analysis of Experiment in CMM Measurement Uncertainty Study. Precision Engineering. Vol. 31, pp. 94 – 101. 2007.

**FERREIRA, F.** Medição por Contato Versus Medição Ótica em Máquinas de Medir por Coordenadas (3D). 2ª Conferência Nacional. Sociedade Portuguesa de Metrologia, 2007.

**Fundação CERTI.** “Garantia da Confiabilidade Metrológica na Medição por Coordenadas” apostila de curso, julho, 2003.

**GALLAS, M.R.** Incerteza de Medição. Texto baseado no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição, 2ª Edição. ABNT, INMETRO. 1998.

**Geodetic Systems, Inc.** Site disponível em: <[http:// www.geodetic.com](http://www.geodetic.com)>. Acesso: março de 2015.

**GIGO, L.G.** Estação de Medição por Coordenadas na Produção de Peças Complexas. Metodologia de Especificação, Dissertação de Mestrado em Metrologia Científica e Industrial. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 1999.

**HAMBURGER-PIEGAR D.S.** Calibração de Peças Padrão em Máquinas de Medir por Coordenadas. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. Florianópolis, 2006.

**HOCKEN, R. J.; PEREIRA, P. H.** Coordinate Measuring Machines and Systems. 2ª Ed. New York : CRC Press Taylor & Francis Group, 978-1- 57444-652-4. 574 p. 2012.

**IP, W. L. R., LOFTUS, M.** Adaptive and compensation methods in free-form surface assessment, Proc. Inst. Mech. Eng. Part B-J. Eng. Manuf., 21:135-145. 1996

**ISO TAG 4WG-3.** Guide to the Expression of Uncertainty in Measurements. Geneva: International Organization for Standardization -ISO, 2008.

**ISO/NP 10360-10.** Geometrical product specifications (GPS)—acceptance and reverification tests for coordinate measuring systems (CMS): part 10. Laser trackers for measuring point-to-point distances (Geneva: International Organization for Standardization). 2010.

**ISO/TS 17450-1:2011.** Geometrical Product Specification (GPS) - General Concepts - Part 1: Model for Geometrical Specification and Verification, 2011.

**ISO DTS/15530-2:2003.** Geometrical Product Specifications (GPS) Coordinate Measuring machines (CMMs). Techniques for Evaluation and the Uncertainty of Measurement. Part 2: Use of Multiple Measurement Strategies. Geneva: International Organization for Standardization. p. 18. 2003.

**ISO/TS 15530-3:2004(E).** Geometrical Product Specification (GPS) - Coordinate Measuring Machines (CMM): Techniques for Determining the Uncertainty on Measurement - Part 3: Use the Calibrated Workpieces or Standards. Geneva: International Organization for Standardization. p. 16. 2004.

**Guia para Expressão da Incerteza de Medição (GUM).** Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO). 3ª Edição Brasileira (Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement). 2012.

**JIANG, X.; SCOTT, P.; WHITEHOUSE, D.** Freeform Surface Characterization - A Fresh Strategy. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 56, n. 1, pp. 553–556. 2007.

**KHAN, A. W.; WUYI, C.** Systematic Geometric Error Modeling for Workspace Volumetric Calibration of a 5-axis Turbine Blade Grinding Machine. *Chinese Journal of Aeronautics*, v. 23, n. 5, pp. 604–615. 2010.

**KONG, L. B.; CHEUNG, C. F.; TO, S.** An Investigation into Surfaces Generation in Ultra-Precision Raster Milling. *Journal of Material Processing Technology*. Vol. 209, pp. 4178-4185. 2009.

**KOWARSCHIK, R.; KÜHMSTEDT, P.; SCHREIBER, W.** 3-Coordinate Measurement with Structured Light, Fringe 93, 2nd International Workshop on Automatic Processing of Fringe Patterns, p. 204 – 208, Bremen, Alemanha, 1993.

**KUNZMANN, H.; PFEIFER, T.; FLUGGE, J.** Scales vs. Laser Interferometers Performance and Comparison of Two Measuring Systems. *Annals of the CIRP*, v. 42, n. 2, pp. 753–767. 1993.

**KUNZMANN, J.; Ni, F. WÄLDELE.** Accuracy Enhancement. In: *Coordinate Measuring Machines and Systems*, Chapter 10, Edited by J. A. Bosch, Marcel Dekker Inc., New York. 1995.

**LASEMI, ALI; XUE, DEYI; GU, PEIHUA.** A Freeform Surface Manufacturing Approach by Integration of Inspection and Tool Path Generation. *International Journal of Production Research*. 2012.

**LI, Y.; GU, P.** Free-form Surface Inspection Techniques State of the Art Review. *Computer Aided Design*. 2004, Vol. 36, pp. 1395-1417. 2004.

**LIMA, C.R.G.** Um Estudo Comparativo de Sistemas de Medição Aplicáveis ao Controle Dimensional de Superfícies Livres em Peças de Médio e Grande Porte. *Dissertação de Mestrado*. Universidade Federal de São Carlos – UFSC, 2006.

**LIMA, J. P.; SILVEIRA, F. L.** 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.

**LOSER R.** Laser tracker accuracy certification for large-volume measurements *CMSC J.* (Autumn) 14–9. 2009.

**MASS, G.A.A.** A Tecnologia de medição por coordenadas na solução de problemas da indústria: Sistematização de informações e do processo metrológico do laboratório prestador de serviços. Dissertação de mestrado do Programa de Pós-Graduação em Metrologia Científica e Industrial, Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC. 103 p. Florianópolis. 2001.

**METROSAGE - PUNDIT/CMM.** User Manual Version 1.10. Volcano, CA, USA : Metrosage LCC, p. 140. 2003.

**MIGUEL, P.A.C; T.G., KING.** Factor which influence CMM tough trigger probe performance. *Tools Manufacturing.* Vol 38, p 363, 1998.

**MIGUEL, P.A.C.,** Integração de máquinas de medir por coordenadas em sistemas produtivos automatizados. *Revista de Ciência e Tecnologia.* v. 05, pp. 79-92. 1996.

**MIGUEL, P.A.C.,** Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações. Elsevier Brasil. 2ª Edição 1996.

**MORAIS, C. A. G.** Modelo de Sintetização Plena e Reduzida de Erros em Máquinas de Medir por Coordenadas. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo – USP. São Paulo. 2012.

**NEROSKY, L. A. R.** Medição de Formas Livres através da Integração de um Sensor Óptico tipo "Folha de Luz" em um Braço de Medição. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC, Florianópolis, 2001.

**NI, J.; WÄLDELE, F.** Coordinate Measuring Machines. Bosch, J. A. Coordinate Measuring and Systems. New York: Marcel Dekker, Inc. 1995.

**NWOKAH, O. D.I.; HUMUZLU, Y.** The Mechanical systems design handbook: modeling, measurement, and control, CRC Press, Boca Raton, 2002.

**OLIVEIRA, A. L.** Introdução e tecnologia a medição por coordenadas. Fundação CERTI, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006.

**OLIVEIRA, M. C** Modelo Decisório para Avaliar a Qualidade Geométrica e Dimensional de Superfícies de Forma Livre. Tese de Doutorado. Universidade Metodista de Piracicaba - UNIMEP, Santa Bárbara d'Oeste, 2012.

**OLIVEIRA, M. C.; PEREIRA, P. H.; ABACKERLI, J. A.** Analise do Efeito do Sistema de Coordenadas da Peça na Temperatura na avaliação dimensional de Geometrias. XXX Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2010.

**ORREGO, R. M. M.** Método de Calibração Direta para Máquinas de Medir a Três Coordenadas. Tese de Doutorado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo - USP, São Carlos, 1999.

**ORREGO, R. M. M.; GIACOMO, BENEDITO DI; ABACKERLI, A. J.** Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: considerações gerais. Revista de Ciência & Tecnologia, Volume 8 n°-16. p. 43, 2000.

**PEREIRA, P. H.; HOCKEN, R. J.** Characterization and compensation of dynamic errors of a scanning coordinate measuring machine. Precision Engineering, v. 31, n. 1, pp. 22–32, 2007.

**PHILLIPS, S.D., BORCHARDT, B., CASKEY, G.** Measurement uncertainty consideration for coordinate measuring machines. NISTIR – National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, 1993.

**PHILLIPS, S.D.** Performance Evaluations, in : Bosch, J.A. Coordinate Measuring Machines and Systems, New York, Marcel Dekker, Inc., 1995.

**PHILLIPS, S.D.; Hocken, R.J.; Pereira, P.H.** Coordinate Measuring Machines and Systems. Boca Raton: CRC Press. 2012.

**PIEGL, L.; TILLER, W.** The NURBS Book. 2<sup>a</sup> Edição. Berlim: Springer-Verlag. pp. 660.1996. 1997.

**RAJOMOHAN, M. S.; SHUNMUGAM, M. S.; SAMUEL, G. L.** Practical Measurement Strategies of Verification on Freeform Surfaces Using Coordinate Measuring Machines. Metrology and Measurement Systems. Vol. 02, pp. 1-13. 2011

**RODGER, G.; FLACK, D.; MC\_CARTHEY, M.** A Review of Industrial Capabilities to Measure Free-Form Surfaces. Engineering and Process Control Division, NPL. UK. National Measurement System, 2007.

**SANDWITH S.; LOTT R.** Large Volume Metrology Conf., LVMC (Chester, UK, 2007) <http://www.lvmc.org.uk> 2007.

**SANTOS, R. A.** Metodologia Científica: a construção do conhecimento, 7<sup>a</sup> Edição, Rio de Janeiro: DP&A, 2007.

**SARTORI, S.; ZHANG, G.** Geometric error measurement and compensation of machines, Annals of CIRP, p. 599, Keynote Papers Vol. 44/2, 1995.

**SAVIO, E.; DE CHIFFRE, L.** An Artefact for Traceable Freeform Measurements on Coordinate Measuring Machines. *Precision Engineering*. Vol. 26, pp. 58-68. 2002.

**SAVIO, E.; DE CHIFFRE, L.; SCHMITT, R.** Metrology of freeform shaped parts. CIRP Annals - Manufacturing Technology, v. 56, n. 2, p. 810–835, 2007.

**SCHELLEKENS, P. H. J.; ROSIELLE, N.; VERMEULEN, H.; WETZELS, S. PRILL W.** Design for precision: currents status and trends. Annals of the CIRP, 47 (1): 557-586. 1998.

**SCHWENKE, H.** Experience with the Errors Assessment of Coordinate Measurements by Simulations. Proceeding of the 3rd International Conference on Ultraprecision in Manufacturing Engineering. Aachen, p. 370–373, 1994.

**SOUSA, A. R.** Formação Regular de Metrologistas 3D – FORMA 3D. Módulo 1, Metrologista 3D – Nível C. Resende, 2004.

**SOUSA, A. R.; OROSCO, D. B.; GIAMMUSSO, L.** Avaliação da Incerteza Volumétrica de Braços de Medição Por Coordenadas. Congresso METROLOGIA-2003 – Metrologia para a Vida, Sociedade Brasileira de Metrologia (SBM), Recife, 2003.

**SYRIA N.A.; BECK C.H; TRUMPOLD H.** The influence of surface roughness in dependence of the probe ball radius with measuring the actual size. Annals of CIRP, pag 577, Keynote Papers Volume 2, 1990.

**SULTAN, I. A.; PUTHIYAVEETIL, P.** Calibration of an articulated CMM using stochastic approximations. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, v. 63, n. 1-4, pp. 201–207, 2012.

**SWYT, D. A.** The International Standard of Length. Bosch, Coordinate Ensuring Machines and Systems, v. 1A, 2012.

**TEMBA, P.** Fundamentos da Fotogrametria – Geoprocessamento. Departamento de Cartografia. UFMG. 2000.

**TRAPET, E.; WÄLDELE, F.** Coordinate Metrology . Flexibility in Conflict with Accuracy? Seminário Internacional da Metrologia para controle da qualidade, Florianópolis. 1997

**TRAPET, E.; WÄLDELE, F.** Quality Assurance of Coordinate Measuring Machines, PTB, 1993.

**TRAPET, E.; FRANKE, M.; HEARTIG, F.** Traceability of Coordinate Measurements According to the Method of the Virtual Measuring Machine: Final Project Report MAT1-CT94-0076. PTB-Report F-35, Parts 1 and 2. 1999.

**VDI/VDE.** Accuracy of Coordinate Measuring Machines: Characteristics and their Checking: Acceptance and Reverification Tests of Laser Trackers (Dusseldorf: Verein Deutscher Ingenieure) VDI/VDE 2617 part 10. 2011.

**VIEIRA, A. D.** Calibração indireta de máquina de medir por coordenadas utilizando esquadro mecânico de esferas. Dissertação de Mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo – USP. São Carlos, 2009.

**WECKENMANN, A.; KNAUER, M.; KILLMAIER, T.** Uncertainty of coordinate measurements on sheet-metal parts in the automotive industry. Journal of Materials Processing Technology 115, pp. 9-13. 2001.

**WECKENMANN, A.; HUMIENNY, Z.; BIALAS, S.** Geometrical Product Specifications – Course for Technical Universities. Warsaw University of Technology Printing House, 2001.

**WECKENMANN, A.** Research project “European Training for Coordinate Metrology”. Chair Quality Management and Manufacturing Metrology, University Erlangen-Nuremberg, Disponível em: <[http://131.188.196.25:8080/eukom/project/\\_description/eukom\\_english.pdf](http://131.188.196.25:8080/eukom/project/_description/eukom_english.pdf)> Acesso em: 14 nov. 2014.

**WEI, YAO HSU; YEN, LIANG LIU; YUAN, CHIEH CHENG.** Design, fabrication, and metrology of ultra-precision optical freeform surface for progressive addition lens with B-spline description. International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2012.

**WILHELM, R.G.; HOCKEN, R.; SCHWENKE, H.** Task Specific Uncertainty in Coordinate Measurement, Annals of CIRP, p.553, Keynote Papers Volume 2, 2001.

**WOLOVICH, W., ALBAKRI, H., YALCIN, H.** The Precise Measurement of Free-form Surfaces, Journal of Manufacturing Science and Engineering, Vol. 124, 2002.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A: ROTINA PARA ESTIMAR OS ERROS E AS INCERTEZAS DE MEDIÇÃO PARA O MODELO PROPOSTO.

**# Estima a localização e os respectivos erros e incertezas de medição para um determinado ponto medido em uma determinada superfície avaliada**

# Rotina para a aplicação do modelo para estimar as incertezas de medição -  
Dissertação Heriberto

# limpar todos os objetos da área de trabalho

```
rm(list=ls(all=TRUE))
```

# ler o arquivo com os dados da calibração feitas pelo sistema laser. Este arquivo possui três colunas, cada qual com os respectivos valores das coordenadas x, y, z.

```
DadosCalibracao <- read.table("horg.txt", head=T)
```

DadosCalibracao # mostra a matriz com os dados da calibração.

# Para entrar com valores individuais de pontos medidos em (x,y,z) e localização do cubo em que o respectivo ponto se encontra

# Exemplo para o ponto (215, 235, -385)

```
x = 215
```

```
y = 235
```

```
z = - 385
```

# Para localizar em qual cubo Cijk o ponto P (medido em uma superfície qualquer) está no interior,

```
i <- (x-130)%/%60 + 1
```

```
j <- (y-125)%/%60 + 1
```

```
k <- (-162-z)%/%60 + 1
```

# Para encontrar o desvio padrão dos erros combinados

```
desvioijk <- sqrt((sd(DadosCalibracao[c(150*(i-1) + 1) : (150*i) , 1])^2 +
sd(DadosCalibracao[c(150*i + 1) : (150*(i+1)) , 1])^2)/2 +
(sd(DadosCalibracao[c(150*(j-1) + 1) : (150*j) , 2])^2 +
sd(DadosCalibracao[c(150*j + 1) : (150*(j+1)) , 2])^2)/2 +
(sd(DadosCalibracao[c(150*(k-1) + 1) : (150*k) , 3])^2 +
sd(DadosCalibracao[c(150*k + 1) : (150*(k+1)) , 3])^2)/2)
```

# Para gerar um vetor linha com os valores de i,j,k e o respectivo valor para os erros e incertezas de medição para o ponto desejado

```
cuboiijk <- data.frame(i,j,k,desvioijk)
```

# Apresenta a localização do ponto em relação ao volume de trabalho avaliado e o respectivo valor de erros e incertezas

```
cuboiijk
```

**# Estima a localização e os respectivos erros e incertezas de medição de um conjunto de pontos medidos em uma determinada superfície avaliada**

# Com um conjunto dados contendo as coordenadas de pontos medidos em uma determinada superfície, como por exemplo, o arquivo "teste.txt"

```
teste <- read.table("teste.txt", head=T) # leitura do conjunto de dados
```

```
n <- length(teste[,1]) # define o número de linhas da matriz dos dados de
entrada (quantidade de pontos medidos)
```

```
for (c in 1:n) # localiza cada um dos pontos medidos dentro do cubo e calcula o
respectivo erros e incertezas de medição.
```

```
{
```

```
i[c] <- ((teste[c,1]) - 130)%/%60 +1
```

```
j[c] <- ((teste[c,2]) - 125)%/%60 +1
```

```
k[c] <- (- 162 - (teste[c,3]))%/%60 +1
```

```
desvioijk[c] <- sqrt((sd(DadosCalibracao[c(150*(i[c]-1) + 1) : (150*i[c]) , 1])^2 +
sd(DadosCalibracao[c(150*i[c] + 1) : (150*(i[c]+1)) , 1])^2)/2 +
(sd(DadosCalibracao[c(150*(j[c]-1) + 1) : (150*j[c]) , 2])^2 +
sd(DadosCalibracao[c(150*j[c] + 1) : (150*(j[c]+1)) , 2])^2)/2 +
(sd(DadosCalibracao[c(150*(k[c]-1) + 1) : (150*k[c]) , 3])^2 +
sd(DadosCalibracao[c(150*k[c] + 1) : (150*(k[c]+1)) , 3])^2)/2)
```

```
# Organiza a apresentação dos dados (localização dos pontos e os respectivos
erros e incertezas de medição
```

```
cuboiijk <- data.frame(i, j, k, desvioijk)
```

```
}
```

```
# Apresenta o resultado final (localização dos pontos e respectivos erros e
incertezas)
```

```
Cuboiijk
```

**APÊNDICE B: RESULTADO DAS MEDIÇÕES DA SUPERFÍCIE LIVRE.**

Ponto	X	Y	Z	Cubo: $\mathcal{C}_{ijk}^*$	Incerteza: $U_\varepsilon$
1	201.012	288.265	-280.518	2 3 2	0.003797643
2	202.097	281.138	-284.793	2 3 3	0.003846009
3	203.326	267.106	-289.768	2 3 3	0.003846009
4	203.641	248.912	-289.736	2 3 3	0.003846009
5	202.868	233.855	-284.296	2 2 3	0.003559811
6	205.106	233.656	-284.416	2 2 3	0.003559811
7	206.701	248.864	-289.685	2 3 3	0.003846009
8	207.376	267.191	-289.387	2 3 3	0.003846009
9	206.659	281.407	-284.393	2 3 3	0.003846009
10	205.357	288.634	-280.383	2 3 2	0.003797643
11	208.633	287.917	-276.829	2 3 2	0.003797643
12	209.484	280.145	-280.620	2 3 2	0.003797643
13	210.043	266.523	-285.647	2 3 3	0.003846009
14	209.506	249.121	-286.374	2 3 3	0.003846009
15	208.090	234.223	-281.663	2 2 2	0.003507500
16	210.410	235.542	-277.086	2 2 2	0.003507500
17	211.555	249.584	-281.491	2 3 2	0.003797643
18	212.050	265.672	-280.700	2 3 2	0.003797643
19	211.634	278.659	-275.861	2 3 2	0.003797643
20	210.879	286.924	-272.070	2 3 2	0.003797643
21	213.350	285.961	-267.302	2 3 2	0.003797643
22	213.948	277.210	-271.251	2 3 2	0.003797643
23	214.165	264.773	-275.798	2 3 2	0.003797643
24	213.622	250.051	-276.381	2 3 2	0.003797643
25	212.686	236.958	-272.143	2 2 2	0.003507500
26	215.563	238.224	-267.732	2 2 2	0.003507500
27	216.350	250.495	-271.861	2 3 2	0.003797643
28	216.969	264.081	-271.646	2 3 2	0.003797643
29	216.878	276.141	-267.461	2 3 2	0.003797643
30	216.319	285.256	-263.531	2 3 2	0.003797643
31	220.225	284.675	-260.718	2 3 2	0.003797643
32	220.619	275.280	-264.722	2 3 2	0.003797643
33	220.691	263.540	-268.524	2 3 2	0.003797643
34	220.210	250.802	-268.346	2 3 2	0.003797643
35	219.638	239.223	-264.270	2 2 2	0.003507500
36	224.809	239.828	-261.995	2 2 2	0.003507500
37	225.135	250.994	-265.907	2 3 2	0.003797643
38	225.450	263.218	-266.294	2 3 2	0.003797643
39	225.309	274.716	-262.810	2 3 2	0.003797643
40	224.986	284.314	-258.896	2 3 2	0.003797643
41	230.476	284.116	-258.091	2 3 2	0.003797643
42	230.748	274.425	-261.833	2 3 2	0.003797643
43	230.935	263.038	-265.097	2 3 2	0.003797643

Ponto	X	Y	Z	Cubo: $\mathcal{C}_{ijk}^*$	Incerteza: $U_\epsilon$
45	230.685	240.017	-260.923	2 2 2	0.003507500
46	236.943	239.920	-260.951	2 2 2	0.003507500
47	237.033	251.029	-264.409	2 3 2	0.003797643
48	236.896	263.093	-264.827	2 3 2	0.003797643
49	236.598	274.430	-261.774	2 3 2	0.003797643
50	236.408	284.129	-258.262	2 3 2	0.003797643
51	242.483	284.301	-259.323	2 3 2	0.003797643
52	242.682	274.724	-262.549	2 3 2	0.003797643
53	243.078	263.285	-265.447	2 3 2	0.003797643
54	243.350	250.917	-265.125	2 3 2	0.003797643
55	243.280	239.468	-261.873	2 2 2	0.003507500
56	249.473	238.784	-263.606	2 2 2	0.003507500
57	249.579	250.705	-266.654	2 3 2	0.003797643
58	249.226	263.654	-266.851	2 3 2	0.003797643
59	248.712	275.294	-264.065	2 3 2	0.003797643
60	248.476	284.660	-261.166	2 3 2	0.003797643
61	254.105	285.142	-263.673	3 3 2	0.003866285
62	254.417	276.074	-266.233	3 3 2	0.003866285
63	255.034	264.121	-268.932	3 3 2	0.003866285
64	255.438	250.416	-268.881	3 3 2	0.003866285
65	255.277	237.918	-266.026	3 2 2	0.003581708
66	260.459	236.921	-268.965	3 2 2	0.003581708
67	260.750	250.079	-271.696	3 3 2	0.003866285
68	260.322	264.711	-271.613	3 3 2	0.003866285
69	259.579	277.010	-268.924	3 3 2	0.003866285
70	259.167	285.736	-266.681	3 3 2	0.003866285
71	263.764	286.361	-269.884	3 3 2	0.003866285
72	264.293	277.995	-271.862	3 3 2	0.003866285
73	265.118	265.331	-274.486	3 3 2	0.003866285
74	265.554	249.743	-274.615	3 3 2	0.003866285
75	265.105	235.946	-271.924	3 2 2	0.003581708
76	269.749	235.148	-274.270	3 2 2	0.003581708
77	270.337	249.475	-276.960	3 3 2	0.003866285
78	269.996	265.839	-276.933	3 3 2	0.003866285
79	269.049	278.868	-274.423	3 3 2	0.003866285
80	268.359	286.874	-272.642	3 3 2	0.003866285
81	273.905	287.171	-274.471	3 3 2	0.003866285
82	274.757	279.370	-276.024	3 3 2	0.003866285
83	275.726	266.169	-278.294	3 3 2	0.003866285
84	275.894	249.310	-278.202	3 3 2	0.003866285
85	275.127	234.693	-275.575	3 2 2	0.003581708
86	282.112	234.741	-275.037	3 2 2	0.003581708
87	282.983	249.337	-277.417	3 3 2	0.003866285

Ponto	X	Y	Z	Cubo: $C_{ijk}^*$	Incerteza: $U_\epsilon$
88	283.012	266.146	-277.531	3 3 2	0.003866285
89	282.104	279.306	-275.575	3 3 2	0.003866285
90	281.158	287.116	-274.342	3 3 2	0.003866285
91	290.536	286.515	-271.337	3 3 2	0.003866285
92	291.433	278.369	-272.228	3 3 2	0.003866285
93	292.170	265.562	-273.772	3 3 2	0.003866285
94	292.034	249.602	-273.694	3 3 2	0.003866285
95	291.218	235.564	-271.801	3 2 2	0.003581708
96	302.917	237.354	-265.147	3 2 2	0.003581708
97	303.485	250.248	-266.333	3 3 2	0.003866285
98	303.627	264.397	-266.393	3 3 2	0.003866285