

*Universidade Federal da Paraíba*  
*Centro de Tecnologia*  
***Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica***  
*-Mestrado - Doutorado-*

**ESTUDO DAS TÉCNICAS DE GD&T E SUA APLICAÇÃO EM MÁQUINAS DE  
MEDIÇÃO POR COORDENADAS**  
*por*

*Julyana Maria de Medeiros Quirino*

*Dissertação de Mestrado apresentada à Universidade Federal da Paraíba*  
*para obtenção do grau de Mestre*

*João Pessoa - Paraíba*

*Janeiro-2017*

**Julyana Maria de Medeiros Quirino**

**Estudo das Técnicas de GD&T e sua Aplicação em Máquinas de Medição  
por Coordenadas**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Mestre.

Orientador: João Bosco de Aquino Silva

**João Pessoa  
2017**

Q8e

Quirino, Julyana Maria de Medeiros.

Estudo das técnicas de GD&T e sua aplicação em máquinas de medição por coordenadas / Julyana Maria de Medeiros Quirino.- João Pessoa, 2017.

69 f. : il.-

Orientador: João Bosco de Aquino Silva.  
Dissertação (Mestrado) – UFPB/CT

1. Engenharia Mecânica. 2. GD&T. 3. Tolerância.  
4. Máquina de Medição por Coordenadas. I. Título.

UFPB/BC

CDU – 621(043)

# ESTUDO DAS TÉCNICAS DE GD&T E SUA APLICAÇÃO EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

por

**Julyana Maria de Medeiros Quirino**

*Dissertação aprovada em 24 de janeiro de 2017*

*Período letivo 2016.2*



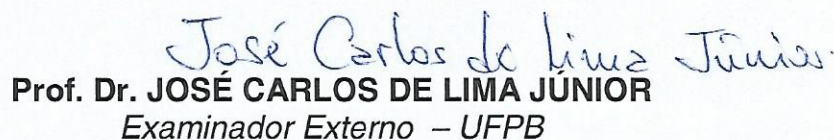
**Prof. Dr. JOÃO BOSCO DE AQUINO SILVA**  
*Orientador – UFPB*



**Prof. Dr. JOSINALDO PEREIRA LEITE**  
*Examinador Interno - UFPB*



**Prof. Dr. KOJE DANIEL VASCONCELOS MISHINA**  
*Examinador Externo – UFPB*



**Prof. Dr. JOSÉ CARLOS DE LIMA JÚNIOR**  
*Examinador Externo – UFPB*

*Dedico este trabalho aos meus pais, Ricardo Mesquita Quirino e Geruza Maria de Medeiros Quirino e a minha irmã, Luana Maria de Medeiros Quirino.*

## **AGRADECIMENTOS**

A Deus, que iluminou meu caminho durante esta caminhada.

Aos meus pais e minha irmã pelo incentivo e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida acadêmica.

A Daniel Nicolau Lima Alves, pelo apoio, compreensão e paciência.

Ao professor João Bosco de Aquino Silva meu orientador e exemplo profissional, por seus ensinamentos, confiança e dedicação ao longo do desenvolvimento deste trabalho.

Ao professor José Carlos de Lima Junior por suas contribuições indispensáveis para a conclusão deste trabalho.

Aos amigos integrantes do Laboratório de Engenharia de Precisão.

A CAPES pelo apoio financeiro.

## RESUMO

O toleranciamento e dimensionamento geométrico é uma ferramenta que tem como objetivo comunicar especificações de projeto de forma inequívoca. Em contrapartida ao tradicional sistema cartesiano de dimensionamento e toleranciamento, esta ferramenta considera as características geométricas dos elementos para estabelecer as zonas de tolerância e não avalia apenas a conformidade dimensional de uma peça. Além disto, o GD&T não questiona somente a qualidade da peça fabricada, mas também a qualidade do desenho utilizado para produzir a peça. A utilização associada do GD&T com as máquinas de medição por coordenadas permite a realização de análises de tolerância geométrica de forma eficaz e automática, trazendo benefícios não só econômicos como também técnicos devido à padronização de processos de inspeção. Esta dissertação discorre acerca da aplicação das técnicas de GD&T em uma máquina de medição por coordenadas CNC. Uma revisão bibliográfica da utilização destas técnicas também é apresentada. Foi realizada a caracterização geométrica de duas peças em alumínio, produzidas em um centro de usinagem, através das ferramentas de análise de tolerâncias geométricas disponíveis no software embarcado da máquina segundo a posição, circularidade, perpendicularidade, paralelismo e angularidade de elementos das peças.

**Palavras-chave :** GD&T; tolerância; máquina de medição por coordenadas.

## **ABSTRACT**

Geometric Dimensioning and Tolerancing is a tool that aims to communicate project specifications unequivocally. In contrast to the traditional Cartesian system of dimensioning and tolerancing, this tool considers the geometric characteristics of the features to establish the tolerance zones and does not only evaluate the dimensional compliance of a part. In addition, GD&T does not only question the quality of the manufactured part, but also the quality of the design used to produce the part. The associated use of GD&T and coordinate measuring machines allows performing geometric tolerance analysis effectively and automatically, generating economic and technical benefits due the standardization of inspection processes. This dissertation discusses the application of GD&T techniques in a CNC coordinate measuring machine. A bibliographic review of the use of these techniques is also presented. Two aluminum parts produced in a machining center were characterized geometrically through the geometric tolerance analysis tools available in the native software of the machine, according to the position, roundness, perpendicularity, parallelism and angularity of parts elements.

**Keywords:** GD&T; tolerance; coordinate measuring machine.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação esquemática simplificada de uma CMM . . . . .	17
Figura 2 – Primeira Máquina de Medição por Coordenadas . . . . .	18
Figura 3 – CMM do tipo ponte móvel . . . . .	19
Figura 4 – CMM do tipo braço horizontal . . . . .	20
Figura 5 – Sensores ( a ) de contato, ( b ) a laser e ( c ) óptico . . . . .	21
Figura 6 – Zonas de Tolerância Cartesiana e Geométrica de um Furo . . . . .	24
Figura 7 – Aplicação do Sistema Cartesiano de Dimensionamento e Tolerancia- mento . . . . .	25
Figura 8 – Aplicação do Sistema Geométrico de Dimensionamento e Tolerancia- mento . . . . .	25
Figura 9 – Aplicação da Simbologia de Dimensão Básica . . . . .	28
Figura 10 – Símbolos de Elemento de Referência Aplicados . . . . .	28
Figura 11 – Símbolos de Modificadores . . . . .	29
Figura 12 – Quadro de Controle . . . . .	30
Figura 13 – Símbolos utilizados para representar tolerâncias geométricas . . . .	31
Figura 14 – Peças utilizadas nas medições . . . . .	40
Figura 15 – Máquina de medição por coordenadas utilizada . . . . .	41
Figura 16 – Apalpador durante a medição . . . . .	41
Figura 17 – Tela do GEO PAK do MCOSMOS . . . . .	43
Figura 18 – Localização da origem da peça . . . . .	44
Figura 19 – Detalhe da tela do MCOSMOS evidenciando a determinação da origem do sistema de coordenadas . . . . .	45
Figura 20 – Desenho técnico dos furos tolerados . . . . .	46
Figura 21 – Desenho técnico das superfícies toleradas segundo a perpendiculari- dade . . . . .	46
Figura 22 – Desenho técnico das superfícies toleradas segundo o paralelismo e a angularidade . . . . .	47
Figura 23 – Representação gráfica do desvio . . . . .	49
Figura 24 – Resultados da peça 1 mostrados na tela do MCOSMOS . . . . .	53
Figura 25 – Certificado de calibração - página 1 . . . . .	66
Figura 26 – Certificado de calibração - página 2 . . . . .	67
Figura 27 – Certificado de calibração - página 3 . . . . .	68
Figura 28 – Certificado de calibração - página 4 . . . . .	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros de Especificação da CRISTA-Apex S 7106 . . . . .	42
Tabela 2 – Distâncias de nominais e medidas dos furos tolerados da peça 1 . .	48
Tabela 3 – Tolerância determinada e erro de posição encontrado para o furo B da peça 1 . . . . .	49
Tabela 4 – Tolerância determinada e erro de posição encontrado para o furo C da peça 1 . . . . .	50
Tabela 5 – Tolerância determinada e erro de circularidade encontrado para os furos da peça 1 . . . . .	50
Tabela 6 – Tolerância determinada e erro de perpendicularidade para a superfícies toleradas da peça 1 . . . . .	52
Tabela 7 – Tolerância determinada e erro de paralelismo para as superfícies toleradas da peça 1 . . . . .	52
Tabela 8 – Tolerância determinada e erro de angularidade para a superfície tolerada da peça 1 . . . . .	53
Tabela 9 – Distâncias nominais e medidas dos furos tolerados da peça 2 . . .	54
Tabela 10 – Tolerância determinada e erro de posição encontrado para o furo B da peça 2 . . . . .	54
Tabela 11 – Tolerância determinada e erro de posição encontrado para o furo C da peça 2 . . . . .	55
Tabela 12 – Tolerância determinada e erro de circularidade encontrado para os furos da peça 2 . . . . .	55
Tabela 13 – Tolerância e erro de perpendicularidade para a superfícies toleradas da peça 2 . . . . .	56
Tabela 14 – Tolerância determinada e erro de paralelismo para as superfícies toleradas da peça 2 . . . . .	56
Tabela 15 – Tolerância determinada e erro de angularidade para a superfície tolerada da peça 2 . . . . .	57

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AME	Actual Mating Envelope
ASA	American Standards Association
ASME	American Society of Mechanical Engineers
CAD	Computer Aided Design
CMM	Coordinate Measuring Machine
CNC	Comando Numérico Computadorizado
GD&T	Geometric Dimensioning and Tolerancing
GPS	Geometric Product Specification
ISO	International Organization for Standardization
LMB	Least Material Boundary
LMC	Least Material Condition
MCOSMOS	Mitutoyo Controlled Open System for Modular Operation Support
MMB	Maximum Material Boundary
MMC	Maximum Material Condition
RFS	Regardless of Feature Size

# SUMÁRIO

1	APRESENTAÇÃO . . . . .	13
1.1	Introdução . . . . .	13
1.2	Objetivo Geral . . . . .	14
1.3	Objetivos Específicos . . . . .	14
1.4	Organização da Dissertação . . . . .	14
2	MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS . . . . .	16
2.1	Introdução . . . . .	16
2.2	Histórico das CMMs . . . . .	17
2.3	Configurações Físicas das CMMs . . . . .	18
2.4	Sensores . . . . .	20
2.5	Técnicas para avaliação das CMMs . . . . .	21
3	DIMENSIONAMENTO E TOLERANCIAMENTO GEOMÉTRICO . . . . .	24
3.1	Introdução . . . . .	24
3.2	Histórico . . . . .	26
3.3	Conceitos e Regras . . . . .	27
3.3.1	Conceitos . . . . .	27
3.3.2	Regras . . . . .	30
3.4	Tolerâncias Geométricas . . . . .	31
3.4.1	Tolerâncias de Forma . . . . .	32
3.4.2	Tolerâncias de Orientação . . . . .	33
3.4.3	Tolerâncias de Localização . . . . .	34
3.4.4	Tolerâncias de Perfil . . . . .	35
3.4.5	Tolerâncias de Batimento . . . . .	36
3.5	Estado da Arte . . . . .	37
4	MATERIAIS E MÉTODOS . . . . .	40
4.1	Introdução . . . . .	40
4.2	Procedimento de Medição . . . . .	44
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES . . . . .	48
5.1	Introdução . . . . .	48
5.2	Caracterização geométrica da peça 1 . . . . .	48
5.2.1	Erro de posição dos furos B e C em relação ao furo A da peça 1 . . . . .	48
5.2.2	Erro de circularidade dos furos A,B e C da peça 1 . . . . .	50
5.2.3	Erro de perpendicularidade de superfícies da peça 1 . . . . .	50

5.2.4	Erro de paralelismo de superfícies da peça 1 . . . . .	52
5.2.5	Erro de angularidade de superfícies da peça 1 . . . . .	53
5.3	Caracterização geométrica da peça 2 . . . . .	54
5.3.1	Erro de posição dos furos B e C em relação ao furo A da peça 2 . . .	54
5.3.2	Erro de circularidade dos furos A,B e C da peça 2 . . . . .	55
5.3.3	Erro de perpendicularidade de superfícies da peça 2 . . . . .	55
5.3.4	Erro de paralelismo de superfícies da peça 2 . . . . .	56
5.3.5	Erro de angularidade de superfícies da peça 2 . . . . .	56
6	CONCLUSÕES . . . . .	58
6.1	Considerações Finais . . . . .	58
6.2	Sugestões para trabalhos futuros . . . . .	59
	Referências . . . . .	60
	<b>ANEXOS</b>	<b>64</b>
	ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS . . . . .	66

# 1 APRESENTAÇÃO

## 1.1 Introdução

Com o advento das ferramentas de desenho assistido por computador e da alta tecnologia dos processos produtivos, há um esforço comum em direção à redução da reprovação de produtos no processo de inspeção. A necessidade de desenhos bem elaborados, claros e inequívocos, além da crescente demanda de produtos com exatidão não apenas dimensional, mas também geométrica, e o questionamento quanto a reprovação de peças boas, trouxe ao cenário brasileiro da metrologia um maior interesse pelo estudo do GD&T, acrônimo de *Geometric Dimensioning and Tolerancing*, que em tradução literal significa Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico. (ZILIO; VIERO; WALBER, 2014).

O GD&T foi criado em meados da década de 40, alegadamente por Stanley Parker, engenheiro da Fábrica Real de Torpedos da Marinha Britânica, e ao longo dos seus mais de setenta anos esta ferramenta tem sido utilizada mundialmente. Uma característica importante do GD&T, e o motivo de sua criação, é o formato da zona de tolerância de posição, que em contrapartida ao formato quadrado do sistema cartesiano, é circular permitindo um aumento de 57% na área da zona de tolerância. Stanley Parker obteve esta conclusão após perceber que produtos reprovados pelo sistema cartesiano eram na verdade funcionais. (WANDECK, 2012).

A implementação bem-sucedida do sistema geométrico de dimensionamento e toleranciamento na indústria depende fortemente de um suporte administrativo. A administração das empresas deve ter consciência dos benefícios financeiros do GD&T e devem se comprometer em assegurar que as barreiras da implementação sejam superadas e os benefícios sejam alcançados. São duas as principais barreiras para a implementação efetiva do GD&T. Sua linguagem simbólica altamente complexa, que requer profundo entendimento para ser codificada e interpretada de modo funcional, e o fato de que se aplicada incorretamente pode aumentar os custos e causar rejeição de peças boas. (TANDLER, 2011).

Dentre as normas que visam padronizar o uso do GD&T destacam-se a ASME Y14.5(2009) e o conjunto de normas ISO específicas, adotadas pela grande maioria das empresas que utilizam as técnicas de GD&T. A norma ASME Y14.5 é o padrão não só nos Estados Unidos como em diversos outros países, pois é estável e a intenção de projeto é um aspecto ressaltado. Além disto a norma possui uma definição matemática e pode ser encontrada em vários idiomas. (STRAFACCI NETO, 2010).

Segundo Souza e Wandeck (2011), a tecnologia mais empregada para o con-

trole geométrico de produtos na indústria é a medição por coordenadas, e como a interpretação de desenhos é a primeira etapa do controle geométrico é necessário um correto entendimento das técnicas de GD&T e um estabelecimento de estratégias de medição eficazes para evitar erros de medição.

O fundamento da medição por coordenadas ganhou espaço na indústria e na pesquisa, as CMMs atuais possuem altas resoluções e sua natureza eletrônica tornou possível um significativo aumento da velocidade das operações e processamento ao longo dos anos, com sistemas computacionais integrados que registram dados e os interpretam. (MARTIN, 2010).

A aplicação do GD&T em máquinas de medição por coordenadas (CMM) permite a análise de tolerâncias geométricas de forma eficaz e automática, desde que definidas estratégias de medição corretas, pois as CMMs atuais possuem sistemas verdadeiramente mecatrônicos com capacidade para automatizar operações complexas, como a análise de tolerâncias.

## **1.2 Objetivo Geral**

Realizar um estudo do estado da arte das técnicas e aplicações do dimensionamento e toleranciamento geométrico, e sua aplicação em máquinas de medição por coordenadas.

## **1.3 Objetivos Específicos**

- Apresentar as técnicas de GD&T, seus conceitos fundamentais e simbologia;
- Levantamento do campo de aplicação do GD&T;
- Estudar os princípios e configurações das máquinas de medição por coordenadas;
- Aplicar as técnicas de GD&T em uma máquina de medição por coordenadas.

## **1.4 Organização da Dissertação**

O presente trabalho de dissertação é composto por seis capítulos, organizados da seguinte forma:

- O capítulo 2 apresenta os princípios de funcionamento de máquinas de medição por coordenadas, os principais tipos utilizados na atualidade e um histórico da evolução das tecnologias associadas a máquinas de medição por coordenadas.

- O capítulo 3 expõe os principais conceitos para a aplicação do Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico (GD&T), discorre sobre os tipos de tolerâncias geométricas e apresenta um breve histórico da técnica.
- O capítulo 4 aborda a metodologia adotada e descreve os procedimentos experimentais aplicados para a avaliação da aplicação do método GD&T em máquinas de medição por coordenadas, bem como o histórico de manufatura da peça analisada.
- O capítulo 5 apresenta os resultados obtidos e discussões acerca dos mesmos.
- O capítulo 6 apresenta as conclusões deste trabalho e propostas para futuros trabalhos.

## 2 MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

### 2.1 Introdução

As máquinas de medição de coordenadas tornaram-se o principal meio de controle de qualidade dimensional para peças de geometria complexa na indústria. O barateamento dos recursos computacionais e o desenvolvimento de sistemas de fabricação mais integrados favorecem a expansão do uso dessas máquinas para a garantia de qualidade de peças manufaturadas e hoje as máquinas de medição de coordenadas representam uma fração significativa dos equipamentos de medição utilizados para definir a geometria de peças. (BERGER et al., 2007).

A maioria das características dimensionais de muitas peças pode ser medida em poucos minutos com essas máquinas, medições estas que levariam horas usando equipamentos e procedimentos de medição mais antigos. (BERGER et al., 2007). Esta rapidez, juntamente com a exatidão e confiabilidade das medições dimensionais tornam as CMMs instrumentos de ampla utilização na indústrias. Mas apesar de seus resultados, geralmente as máquinas de medição por coordenadas possuem custos de compra e manutenção elevados. (BARROS, 2012).

As máquinas de medição por coordenadas são máquinas(CMM) que caracterizam geometricamente peças através da localização de pontos no espaço. As máquinas de medição por coordenadas cartesianas identificam os pontos medidos na superfície de uma peça de acordo com sua coordenada nos eixos X, Y, e Z. (SILVA NETO, 2012).

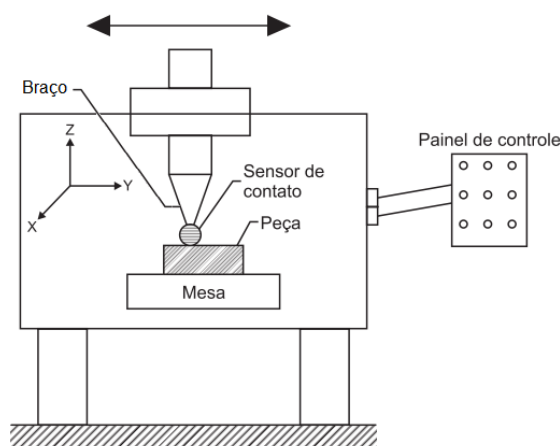
Segundo Hocken e Pereira (2012), a função primária de uma CMM é medir o formato real de uma peça de trabalho, compará-lo ao formato desejado, e avaliar informações metrológicas como dimensão, forma, localização e orientação relativas à peça.

Através da coleta de dados na superfície de uma peça, em certos pontos ou áreas, é possível obter o formato por intermédio de sensores, que podem ou não ser de contato. Alguns destes sensores são capazes de coletar o vetor de direção dos pontos medidos, o que permite uma melhor precisão na medição. No entanto, não é possível avaliar os parâmetros da peça diretamente das coordenadas obtidas pelos sensores, para isto é necessária a utilização de softwares para interpretar dos dados coletados. (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

De acordo com Barros (2012), as CMMs são compostas, de forma geral, por uma mesa, um pórtico, braços, colunas e sensores, e são caracterizadas por suas dimensões e sua configuração.

Na Figura 1 é possível observar uma representação simplificada de uma CMM, indicando alguns componentes e um painel de controle, para representar os *displays* e computadores acoplados para visualização de resultados.

**Figura 1 – Representação esquemática simplificada de uma CMM**



Adaptado de SILVA NETO (2012)

## 2.2 Histórico das CMMs

Com o intenso desenvolvimento tecnológico nos processos de usinagem e o surgimento dos centros de usinagem com comando numérico, as exigências de conformidade geométrica de componentes de sistemas mecânicos foram elevadas. Este refinamento originou especificações de projeto mais rigorosas, aumentando o desempenho funcional destes componentes. As tecnologias de medição não se desenvolveram no mesmo ritmo, o que causou uma defasagem tecnológica. Com isto o controle de peças se tornou economicamente inviável e tecnicamente laborioso. (VALENTINA, 2010).

Em resposta a esta necessidade de medições mais rápidas e mais flexíveis devido a automatização dos processos de fabricação, a primeira máquina de medição por coordenadas foi desenvolvida pela empresa Ferranti, Ltd. como um produto complementar à crescente família de máquinas-ferramenta controladas numericamente comercializadas pela empresa.

Harry Ogden, engenheiro mecânico chefe da Divisão de Controle Numérico da Ferranti Ltd., após a observação de que peças fabricadas em minutos em suas novas máquinas controladas numericamente despendiam horas de trabalho para a inspeção, concebeu em 1956 a máquina de inspeção Ferranti (Figura 2). Esta máquina de medição por coordenadas possuía um mostrador digital para facilitar a inspeção das peças e isto reduziu o tempo e as habilidades necessárias à inspeção, mudando todo o

aspecto econômico dos métodos de inspeção convencionais. (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

**Figura 2 – Primeira Máquina de Medição por Coordenadas**



HOCKEN; PEREIRA (2012)

A máquina de inspeção de Ferranti foi desenvolvida para realizar movimentos nos eixos X, com curso de 610 mm, e Y, com curso de 381 mm, já o eixo z não possuía registros de medidas e seu curso era de 254 mm. Com uma incerteza de 0.025mm e resolução de 0.012mm, esta máquina original criou um amplo mercado no mundo industrial e levou ao desenvolvimento de máquinas similares com maior capacidade e melhor precisão e resolução. Nos vinte e cinco anos seguintes à criação da primeira máquina de medição por coordenadas, duas novas empresas por ano entraram no ramo da medição por coordenadas. (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

A evolução dos sistemas de medição de deslocamento eletrônicos auxiliou o desenvolvimento das máquinas de medição por coordenadas, elevando a sua qualidade e viabilizando a integração destas máquinas com os sistemas de fabricação automatizados. (VALENTINA, 2010).

### **2.3 Configurações Físicas das CMMs**

A configuração das máquinas de medição por coordenadas exerce um papel importante nos aspectos de performance como precisão, flexibilidade e custo. (HOCKEN; PEREIRA, 2012). A classificação destas máquinas é apresentada em diferentes normas com algumas diferenças, a norma ASME B89. 4.1(1995) define onze tipos de máquinas de medição por coordenadas, já a norma ISO 10360-1:2000 traduzida para o português oficialmente na norma ABNT NBR ISO 10360-1:2010 classifica as CMM em dez tipos. Destacam-se dois tipos amplamente utilizados na indústria, o tipo ponte móvel e o tipo braço horizontal.

Segundo Hocken e Pereira (2012), a configuração de máquinas de medição por coordenadas de ponte móvel é mais utilizada na indústria. Este tipo de CMM possui uma mesa estacionária que apoia a peça e uma ponte móvel. Esta estrutura permite um fenômeno em que duas colunas se movem a diferentes velocidades, causando a torção da ponte. Um projeto que implementa sistemas de controle retroalimentados de posição e direção para as duas colunas, ou que movimenta a ponte através de sua linha central, reduz esse efeito. Um exemplo de CMM de ponte móvel é apresentado na Figura 3.

**Figura 3 – CMM do tipo ponte móvel <sup>1</sup>**



Já as máquinas de medição por coordenadas do tipo braço horizontal são ideais para medir carroçarias de automóveis e outras peças similares em tamanho e tolerâncias, elas possuem excelente acessibilidade por todos os lados da peça e podem operar a velocidades de medição altas. (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

Ainda segundo Hocken e Pereira (2012), existem diversas configurações de braço horizontal, e entre elas estão as de mesa móvel, haste móvel e duplo braço horizontal. A configuração de mesa móvel utiliza a mesa para um dos eixos horizontais de movimento e uma coluna móvel para o outro, e sua velocidade e precisão de medição dependem da dimensão e peso da peça de trabalho.

No caso de máquinas de medição por coordenadas de braço horizontal de haste móvel, a estrutura em balanço resulta em baixa rigidez mecânica e erros de deslocamento relativamente grandes. Já a estrutura do tipo duplo braço horizontal consiste

<sup>1</sup> Mitutoyo Sul América - [http://www.mitutoyo.com.br/novosite/download/catalogogeral/p2016/62\\_mmc.pdf](http://www.mitutoyo.com.br/novosite/download/catalogogeral/p2016/62_mmc.pdf)

em dois conjuntos idênticos e simétricos de braços horizontais e eixos móveis, o que possibilita a medição simultânea de lados opostos de uma peça. Uma desvantagem deste tipo de máquina de medição é a limitação da precisão de medição. (HOCKEN; PEREIRA, 2012). Um exemplo de CMM do tipo braço horizontal é apresentada na Figura 4.

**Figura 4 – CMM do tipo braço horizontal** <sup>2</sup>



## 2.4 Sensores

Uma grande parcela das tarefas da metrologia geométrica está associada à detecção da posição de pontos de uma superfície e à avaliação das posições relativas entre eles. Especialmente nas atividades relacionadas à medição por coordenadas, todas as características geométricas medidas são baseadas nas distâncias e posições de um conjunto de pontos detectados na superfície física de uma peça. Os sistemas de sensoriamento são utilizados para avaliar as posições desses pontos em relação ao sistema de coordenadas de uma CMM. (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

Os sistemas de sensoriamento para máquinas de medição de coordenadas são parte integrante do sistema de medição e formam a ligação entre a máquina e a peça a ser medida. (WECKENMANN et al., 2004 *apud* HOCKEN; PEREIRA, 2012).

Por isto é importante que haja a seleção, configuração, qualificação e uso apropriados dos sensores para aproveitar todo o potencial de um sistema de medição por coordenadas. (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

Os sensores utilizados em CMMs podem ser mecânicos, eletrônicos, ópticos ou a laser. Os sensores mecânicos são rígidos, fabricados em aço temperado, e para a leitura das coordenadas deve permanecer fixo. Já os eletrônicos podem ser

<sup>2</sup> Hexagon Metrology - [http://www.hexagonmetrology.com.br/MMCs-Braco-Horizontal\\_102.htm#.WE6C3eYrLIU](http://www.hexagonmetrology.com.br/MMCs-Braco-Horizontal_102.htm#.WE6C3eYrLIU)

medidores, que evitem sinais proporcionais ao seu deslocamento ao tocar a peça, ou comutadores, que funcionam através de micro chaves liga-desliga ao tocar a peça. Os sensores ópticos são ideais para a aferição de dimensões a nível microscópico, sem contato, e funcionam através da aquisição de imagens por câmeras digitais. Por fim, os sensores a laser realizam a medição sem contato através de feixes laser e triangulação de sinais. (LIRA, 2015). Na Figura 5 são apresentados exemplos de sensores utilizados em CMMs.

Figura 5 – Sensores (a<sup>3</sup>) de contato, (b<sup>4</sup>) a laser e (c<sup>5</sup>) óptico



## 2.5 Técnicas para avaliação das CMMs

As CMMs são projetadas para oferecer alta exatidão porém, como qualquer instrumento de medição, estão sujeitas a erros. Nas últimas décadas muitos trabalhos de pesquisa têm sido desenvolvidos para avaliação e compensação dos erros das CMMs, dentre eles destacam-se:

Sartori et al. (1988) descreveu a identificação de um modelo de software de correção de erros sistemáticos em máquinas de medição por coordenadas. Os autores utilizaram uma matriz tridimensional para representar o volume de trabalho da máquina e a correção do erro volumétrico foi realizado através de interpolações. Através da

<sup>3</sup> Renishaw - <http://www.renishaw.com.br/pt/sistemas-manuais--6657>

<sup>4</sup> Mitutoyo - <http://ecatalog.mitutoyo.com/SurfaceMeasure-Non-Contact-Line-Laser-Probe-For-CMM-C1814.aspx>

<sup>5</sup> Renishaw - <http://www.renishaw.com/en/cmm-probes-software-and-retrofits-news--6850>

parametrização, a correção de erro em tempo real utilizou algoritmos e processadores de alta velocidade.

Cheng e Menq (1995), por sua vez, utilizaram um sensor a laser para realizar inspeção sem contatos em objetos fabricados em materiais macios, substituindo o apalpador de contato, evitando assim uma possível deflexão do componente. Os autores desenvolveram algoritmos para facilitar a inspeção à laser e analisou possíveis fontes de erros neste tipo de inspeção.

Mu e Ngoi (1999) estabeleceram um modelo de avaliação de erros dinâmicos para uma máquina de medição por coordenadas. Os resultados do modelo, baseado em polinômios de ajuste dos dados de erro obtidos pelo autor foram comparados com os obtidos através de um laser interferométrico, comprovando a eficiência do modelo, considerando as simplificações utilizadas.

Porath e Souza (2002) detalhou as aplicações da medição por coordenadas no processo de desenvolvimento de produtos plásticos, destacando a restrita exploração desta ferramenta devido à falta de treinamento amplo dos operadores. O autor destaca que um treinamento que oferece conhecimentos acerca do processo de elaboração de estratégias de medição pode aumentar a garantia da confiabilidade da medição.

Lima Júnior (2007) por sua vez, implementou uma técnica baseada nas redes neurais artificiais para determinar geometrias substitutas utilizadas em CMMs, em substituição aos algoritmos baseados na geometria Euclidiana. O autor implementou a técnica para aferir parâmetros de geometrias simples e complexas, consolidando a eficiência da mesma.

Souza (2008) apresentou um modelo de formação profissional na área de medição por coordenadas, a partir da necessidade de uma formação complementar à operacional amplamente utilizada na indústria, que supra a escassez de profissionais qualificados para avaliar a confiabilidade metrológica de processos de medição. O modelo deu origem a um programa, implementado no Brasil, que já qualificou mais de quatrocentos profissionais.

Silva et al. (2009) apresentou um novo artefato para avaliação dos erros e análise da incerteza de CMMs com quatro eixos. O artefato consiste em uma placa com sete esferas de alta exatidão. Os dados dos erros volumétricos obtidos quando a CMM mede o artefato permitem verificar se a CMM atende as especificações dos fabricantes.

Uma avaliação da performance de máquinas de medição por coordenadas utilizadas na indústria utilizando artefatos calibrados foi realizada por Ferreira, Oliva e Perez (2013). Os artefatos utilizados foram desenvolvidos pelos autores e, em contramão aos artefatos existentes na indústria (como blocos padrão), reproduzem a maioria das

características geométricas passíveis de medição e avaliação em uma peça de uma única estrutura.

Stoco, Lima e Torrezan (2013) estabeleceu um padrão a ser utilizado em medições de circularidade, diminuindo o tempo gasto na escolha do número de pontos analisados. A partir de medições em uma peça, e cálculos e comparações, estabeleceu uma regra para determinar o menor número de pontos analisados para a medição de circularidade em peças diversas que determinou que se deve analisar no mínimo um ponto por milímetro do perímetro do elemento.

Já D'Amato et al. (2014) estimou a incerteza associada a medição indireta de ângulos, usando uma máquina de medição por coordenadas, através da caracterização geométrica de um bloco de medição de ângulos com quatro lados perpendiculares. Para realizar o cálculo da incerteza de medição e investigar os erros inerentes à máquina de medição por coordenadas, associados com orientação e comprimento do volume de trabalho, foram utilizados e comparados os modelos de comportamento estatístico linear e o modelo Mitutoyo de comportamento. Os valores dos ângulos e sua incerteza foram determinados pelo autor utilizando o método de Monte Carlo.

Mian e Al-Ahmari (2014) introduziu metodologias baseadas em algoritmos para gerar uma sequência de medição mais adequada resultando em um tempo de inspeção mínimo em máquinas de medição por coordenadas. O autor realizou uma comparação entre os algoritmos utilizados para demonstrar sua eficiência em minimizar o tempo de inspeção para máquinas de medição estacionárias equipadas com apalpadores de contato. A metodologia proposta pelo autor foi implementada em peças provenientes da indústria a fim de demonstrar sua aplicabilidade.

As vantagens da integração de medição por coordenadas em linhas de produção, assim como os desafios encontrados nesta integração, foram descritas por Souza (2015). O autor discorreu acerca das tecnologias disponíveis para avaliar a influência da temperatura sobre os resultados e medição e avaliou que, ao empregar estratégias corretas e levando em consideração as situações particulares de cada ambiente de produção, é possível corrigir esta influência.

Uma nova abordagem para verificar o diâmetro e avaliar a conformidade da forma de furos em máquinas de medição por coordenadas foi apresentada por Cappetti, Naddeo e Villecco (2016). O autor apresenta uma rotina baseada no método inferencial da lógica Fuzzy, reduzindo o número de pontos necessários para a medição sem alterar a precisão da mesma. O método de processamento de dados apresentado, além de reduzir o tempo da medição em relação ao tempo despendido pelo software embarcado da máquina, pode ser implementado em máquinas de medição de coordenadas a um baixo custo.

### 3 DIMENSIONAMENTO E TOLERANCIAMENTO GEOMÉTRICO

#### 3.1 Introdução

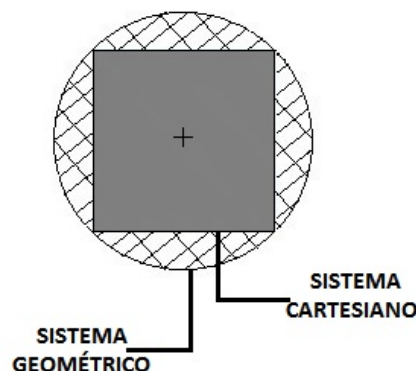
O Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico(GD&T) é uma linguagem que comunica as especificações dos projetos de engenharia de forma inequívoca para a garantia da qualidade. Como o próprio nome indica, ele transmite a geometria ideal e as tolerâncias de uma peça. Uma vez que o GD&T é expresso usando desenhos, símbolos e algarismos arábicos, as pessoas em todos os lugares podem ler, escrever, e compreendê-lo, independentemente de suas línguas maternas. (P. J. Drake Jr, 1999).

São estes símbolos, juntamente com definições, fórmulas matemáticas e regras de aplicação que fazem do GD&T uma linguagem de engenharia viável. No entanto é necessária a compreensão de que o GD&T não é uma ferramenta de design criativo, o que significa que não há sugestões sobre a forma de controle de superfícies ou comunicação de intenções de projeto e funções pretendidas de uma peça em suas especificações. (P. J. Drake Jr, 1999).

Em contrapartida aos métodos tradicionais de dimensionamento e toleranciamento, o GD&T não questiona apenas a qualidade de fabricação de peças acabadas, ele também questiona a qualidade dos desenhos de engenharia que foram utilizados para produzir a peça em questão. Além desta diferença, o GD&T difere de outros métodos, como o método cartesiano, pelo formato da zona de tolerância de posição.

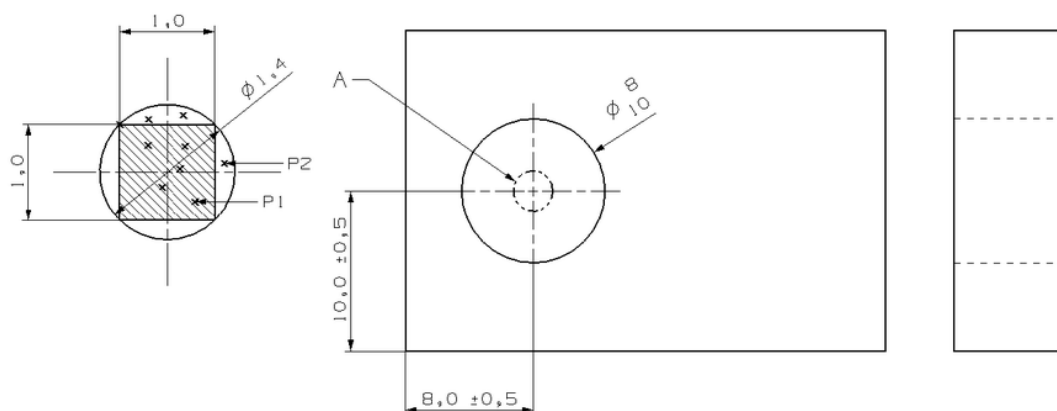
O sistema cartesiano de dimensionamento e toleranciamento, amplamente utilizado no Brasil e conhecido por estabelecer limites superiores e inferiores para dimensões, utiliza zonas de tolerância retangulares, enquanto o sistema geométrico utiliza zonas de tolerância de posição circulares. A Figura 6 apresenta a sobreposição das zonas de tolerância de um furo, pelo sistema cartesiano e pelo sistema geométrico.

**Figura 6 – Zonas de Tolerância Cartesiana e Geométrica de um Furo**



Diferenças na simbologia dos dois sistemas também são importantes, o GD&T possui uma linguagem mais complexa que o sistema cartesiano, abrangendo não só o toleranciamento dimensional, com variações nos tamanhos das dimensões, mas também o toleranciamento das características geométricas. As figuras 7 e 8 apresentam uma aplicação da simbologia do sistema cartesiano e do sistema geométrico, respectivamente.

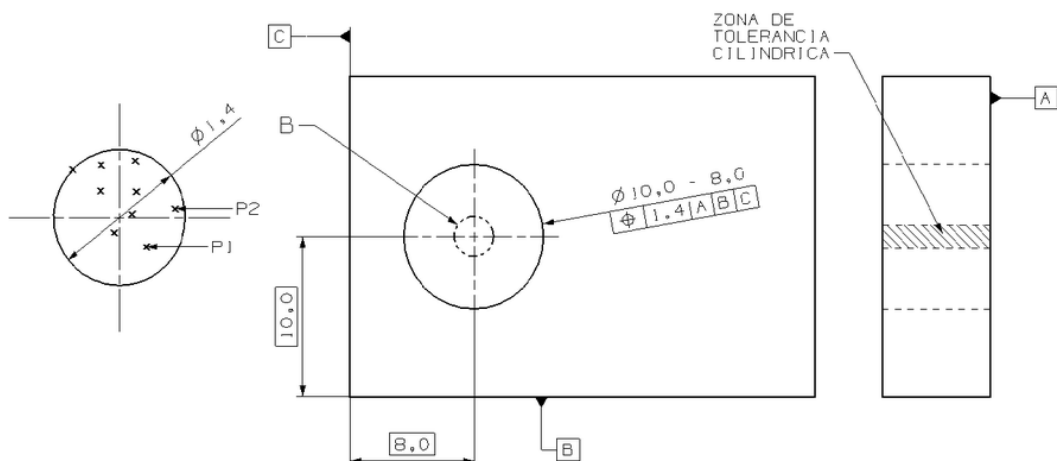
**Figura 7 – Aplicação do Sistema Cartesiano de Dimensionamento e Toleranciamento**



Zilio(2014)

Na Figura 7 observa-se que as informações de tolerância de posição, que para o desenho em questão determinaria uma tolerância para a localização do centro do furo em uma zona quadrada, faria com que peças boas fossem reprovadas. Já na Figura 8, observa-se uma zona de tolerância cilíndrica para o furo e, além disto, a posição também é tolerada com relação às superfícies, o que, pelo método cartesiano, resultaria em um desenho “poluído”, dificultando sua interpretação.

**Figura 8 – Aplicação do Sistema Geométrico de Dimensionamento e Toleranciamento**



Zilio(2014)

## 3.2 Histórico

A humanidade se comunica através de desenhos desde antes mesmo da consolidação da linguagem verbal, ao passar dos séculos a intenção destes desenhos se modificou, assim como a sofisticação de complexidade dos mesmos. O homem viu a necessidade, ao construir objetos e estruturas arquitetônicas, de um planejamento, uma forma de comunicar como deve ser a construção. E com isto, apareceram as primeiras formas de desenho técnico.

Com o desenvolvimento da manufatura, após a Revolução Industrial, os desenhos se tornaram uma forma de comunicar aos departamentos da indústria a forma de produzir e controlar as dimensões de peças. Para melhorar a qualidade dos desenhos de engenharia, em 1935, após anos de discussão, a ASA (*American Standards Association*) publicou a primeira norma para desenhos reconhecida, intitulada *American Drawing and Drafting Room Practices*, que em tradução livre pode ser lida como Práticas Americanas de Salas de Desenho. A norma possuía dezoito páginas, o dimensionamento era discutido em apenas cinco páginas e o toleranciamento em apenas dois parágrafos. (KRULIKOWSKI, 2012).

Se tornaram óbvias as deficiências da norma com o início da Segunda Guerra Mundial. A produção de guerra na Inglaterra era seriamente dificultada pela alta taxa de sucateamento. Peças não eram funcionais para montagem, e os britânicos determinaram que a causa era a fraqueza do sistema de toleranciamento por coordenadas e a ausência de informações completas e claras em desenhos de engenharia. (KRULIKOWSKI, 2012).

Por volta de 1940, conduzido pelas demandas da guerra, Stanley Parker, engenheiro da Fábrica Real de Torpedos da marinha britânica em Alexandria, Escócia, desenvolveu um sistema de toleranciamento posicional que gerou zonas de tolerâncias cilíndricas. A Inglaterra então iniciou a publicação de uma série de normas de desenho pioneiras em 1944, e em 1948 publicou a norma intitulada *Dimensional Analysis of Engineering Design*. Esta norma, que em tradução livre é lida como “Análise Dimensional de Desenhos de Engenharia”, foi a primeira norma compreensível que usou os conceitos de posição verdadeira. (KRULIKOWSKI, 2012).

A partir do princípio de Taylor, desenvolvido em 1905, foi desenvolvida a linguagem GD&T, regulamentada pelas normas americanas ASME (*American Society of Mechanical Engineers*), em especial as normas ASME Y14.5 (2009) e ASME Y14.5M (1998). Outra norma que regulamenta o dimensionamento e toleranciamento geométrico é a norma ISO 1101 (2004), que especifica a linguagem GPS (*Geometric Product Specification*), fundamentada no princípio de independência entre dimensão e forma, desenvolvido em 1920. (SOARES JÚNIOR, 2010). A linguagem abordada

neste trabalho de dissertação de mestrado será a linguagem GD&T.

### 3.3 Conceitos e Regras

Para uma melhor compreensão e correta aplicação das técnicas de GD&T apresentados neste trabalho é necessário introduzir uma série de conceitos e regras que regem esta ferramenta. Esta seção apresenta alguns conceitos-chave e regras baseados na norma ASME Y14.5 (2009). Devido à complexidade da linguagem, é recomendável a leitura da norma para o entendimento amplo das técnicas.

#### 3.3.1 Conceitos

Um conceito fundamental e necessário à compreensão dos demais, é o de elemento. Um elemento é uma porção física de uma peça, como uma superfície, pino, furo, ou suas representações em desenhos, modelos ou arquivos digitais. Elementos podem ser dimensionais ou adimensionais, os dimensionais por sua vez podem ser classificados como regulares ou irregulares.

Os elementos dimensionais regulares são superfícies cilíndricas ou esféricas, elementos circulares, ou dois elementos ou superfícies paralelas e opostas, associados diretamente a uma dimensão tolerada. Elementos dimensionais regulares possuem elementos opostos, já os irregulares não possuem.

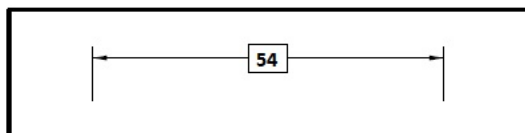
Elementos dimensionais irregulares são elementos ou grupo de elementos diretamente tolerados que contém ou são contidos por um envelope, e podem ser classificados em dois tipos de acordo com a natureza deste envelope. O primeiro tipo de elemento dimensional irregular é aquele no qual o envelope que contém ou no qual está contido é esférico, cilíndrico ou formado por um par de planos paralelos, o segundo tipo é aquele no qual o envelope é outro que não esférico, cilíndrico ou formado por um par de planos paralelos

O Envelope (*actual mating envelope*, AME) é a parte externa ao material. É a contrapeça teórica perfeita dos elementos com o menor tamanho sobre um elemento externo ou com o maior tamanho no interior de um elemento interno, para que coincida com a superfície nos pontos proeminentes. Existem dois tipos de envelopes, os relacionados e os não relacionados. Os envelopes relacionados são aqueles restritos na orientação, localização, ou ambos, à referência aplicável. Já os envelopes não relacionados não são restritos a nenhuma referência.

Pode haver alguma confusão entre os conceitos de dimensão básica e referência. Dimensões básicas são dimensões teoricamente exatas, enquanto a referência é um ponto, linha, eixo, plano ou combinação dos mesmos, teoricamente exatos, derivados de

um simulador teórico de referências. A Figura 9 ilustra a forma correta de representação de uma dimensão básica.

**Figura 9 – Aplicação da Simbologia de Dimensão Básica**

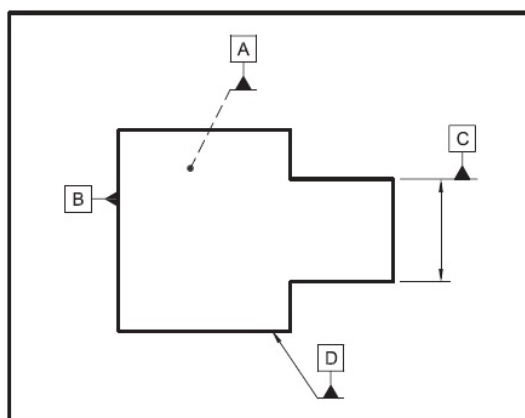


Adaptado da ASME Y14.5 (2009)

O simulador teórico de referências é o limite teoricamente perfeito usado para estabelecer uma referência a partir de um elemento de referência especificado. Já o elemento de referência é aquele identificado por um símbolo de elemento de referência ou um símbolo de alvo de referência.

A apresentação do símbolo do elemento de referência é dada por uma base triangular vazia ou cheia, e uma linha que leva ao símbolo em si. Os elementos de referência são representados por letras maiúsculas, como é possível observar na Figura 10.

**Figura 10 – Símbolos de Elemento de Referência Aplicados**



Adaptado da ASME Y14.5 (2009)

Tanto as referências quanto as tolerâncias em si podem ser modificadas, ao adicionar um símbolo ao seu lado, que indica a condição na qual a tolerância ou referência é considerada. A condição de máximo material (MMC) é a condição em que a tolerância deve ser aplicada considerando um elemento dimensional contém a maior quantidade de material dentro dos limites dimensionais.










Já a condição de mínimo material (LMC) é a condição em que a tolerância deve ser aplicada em um elemento dimensional contém a menor quantidade de material dentro dos limites dimensionais, e a condição independente do material (RFS) é a

condição que indica que a tolerância geométrica se aplica a qualquer incremento de tamanho do AME do elemento dimensional.

Entre os modificadores de material aplicados às referências temos o limite de máximo material (MMB), que é o limite definido por uma tolerância, ou combinação de tolerâncias, no exterior do material de um elemento. Já o limite de mínimo material (LMB), é definido dentro do material do elemento por uma tolerância ou combinação de tolerâncias.

O limite independente do material (RMB) é o limite que indica que um simulador de elementos de referência progride do MMB ao LMB até que haja o máximo contato com as extremidades do elemento. Estes modificadores e outros utilizados na linguagem GD&T são apresentados na Figura 11.

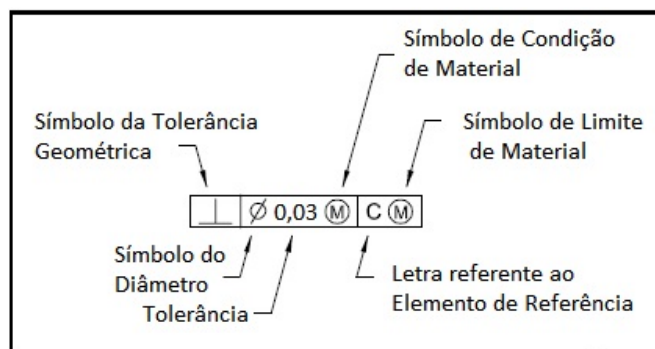
**Figura 11 – Símbolos de Modificadores**

TERMO	SÍMBOLO	TERMO	SÍMBOLO
Condição de Máximo Material - Limite de Máximo Material		Diâmetro esférico	
Condição de Mínimo Material - Limite Mínimo de Material		Raio	
Translação		Raio esférico	
Zona de Tolerância Projetada		Raio Controlado	
Estado Livre		Quadrado	
Plano Tangente		Referência	
Zona de Tolerância Assimétrica		Comprimento de Arco	
Independência		Origem da Dimensão	
Toleranciamento Estatístico		Entre dois Pontos	
Elemento Contínuo		Em Todo o Perímetro	
Diâmetro		Em Toda as Superfícies	

Adaptado da ASME Y14.5 (2009)

Estes e outros modificadores devem se localizar em um quadro de controle. O quadro de controle é um retângulo estrategicamente situado no desenho, dividido em compartimentos contendo símbolos de características geométricas, seguidos do valor da tolerância ou descrição, modificadores, e indicação de qualquer elemento referência aplicável. Um exemplo de configuração de quadro de controle é ilustrado na Figura 12.

Figura 12 – Quadro de Controle



Adaptado da ASME Y14.5 (2009)

Alguns conceitos abstratos são utilizados nas definições de tolerâncias geométricas, como os conceitos de linhas médias derivadas, planos médios derivados, variação de livre estado e o princípio da independência. Uma linha média derivada é a linha abstrata formada pelos pontos centrais de todas as seções retas ortogonais à linha de centro do envelope não relacionado do elemento. Enquanto o plano médio derivado é o plano abstrato formado pelos pontos centrais de todas as linhas normais ao plano central do envelope não relacionado do elemento.

A variação de livre estado é uma distorção gerada em uma peça depois da remoção das forças aplicadas durante a fabricação, que tem como principal causa o peso e a flexibilidade da peça, assim como a liberação das tensões internas resultantes da fabricação. Já o Princípio da Independência, Segundo Wandeck e Souza (2008), “define que cada requisito dimensional ou geométrico especificado no desenho da peça deve ser atendido individualmente, a não ser que alguma relação entre eles seja especificada”.

### 3.3.2 Regras

O GD&T possui apenas duas regras numeradas, a regra #1, ou princípio do envelope, é a regra que controla variações de forma. Segundo esta regra, a forma de um elemento dimensional regular individual é controlada por seus limites dimensionais à extensão de:

- As superfícies de um elemento dimensional regular não devem se estender além de um limite, também chamado de envelope, de perfeita forma no MMC. Este limite é a forma geométrica verdadeira representada pelo desenho. Nenhuma variação de forma é permitida se o elemento dimensional regular é produzido no seu limite dimensional MMC, a menos que uma simbologia adequada seja aplicada;

- Onde a dimensão real local de um elemento dimensional regular se afasta do MMC em direção ao LMC, uma variação local em forma é permitida na mesma proporção do afastamento;
- Onde não há nenhum requisito padrão para um limite de forma perfeita no LMC, um elemento dimensional regular produzido no LMC pode ter variações em sua forma verdadeira para a máxima variação permitida pelo limite de forma perfeita no MMC;
- Em casos onde uma tolerância geométrica é especificada para aplicação no LMC, uma forma perfeita no LMC é requerida.

A regra #2, a respeito dos modificadores de máximo e mínimo em quadros de controle, foi retirada da norma ASME Y14.5 na revisão de 2009, pois permitia a utilização de um símbolo de condição de independência de material, não mais utilizado.

### 3.4 Tolerâncias Geométricas

Segundo a ASME Y14.5 (2009), as tolerâncias geométricas podem ser classificadas em tolerâncias de forma, orientação, localização, perfil e batimento, de acordo com a característica a ser tolerada. Ao longo desta seção, cujo texto é baseado exclusivamente na norma ASME Y14.5 (2009), são apresentados conceitos e formas de especificação de cada um destes tipos de tolerância, como apresentado na referida norma. A Figura 13 apresenta a simbologia utilizada para representar cada uma destas tolerâncias nos desenhos de engenharia.

**Figura 13 – Símbolos utilizados para representar tolerâncias geométricas**

APLICAÇÃO	TIPO DE TOLERÂNCIA	CARACTERÍSTICA	SÍMBOLO
Elementos Individuais	Forma	Retitude	
		Planeza	
		Circularidade	
		Cilindricidade	
Elementos Individuais ou Relacionados	Perfil	Perfil de Linha	
		Perfil de Superfície	
Elementos Relacionados	Orientação	Angularidade	
		Perpendicularidade	
		Paralelismo	
	Localização	Posição	
		Concentricidade	
		Simetria	
	Batimento	Batimento Circular	
Batimento Total			

Adaptado da ASME Y14.5 (2009)

### 3.4.1 Tolerâncias de Forma

São as tolerâncias de forma que controlam a circularidade, cilindridade, retitude e planeza de uma peça. Este tipo de tolerância, quando crítica ao funcionamento e intercambialidade, é especificada onde as tolerâncias dimensionais não fornecem controle suficiente. A zona de tolerância é especificada pelas tolerâncias de forma onde o elemento considerado, seus elementos lineares e seu plano médio derivado, devem estar contidos.

Ao especificar uma tolerância de forma, deve-se considerar o controle de forma já estabelecido através de outras tolerâncias como o controle dimensional estabelecido na regra #1, tolerâncias orientação, batimento e perfil. É importante ressaltar que as tolerâncias de forma são aplicáveis a elementos individuais, portanto não são relacionadas a elementos de referência. (ASME Y14.5, 2009).

A condição onde um elemento de uma superfície, ou linha média derivada, é uma linha reta é denominada retitude. Uma tolerância de retitude especifica a zona de tolerância dentro da qual cada elemento considerado de uma superfície ou linha derivada média deve se encontrar. Este tipo de tolerância é aplicado na vista em que os elementos a serem controlados são representados por uma linha reta.

Já a planeza pode ser definida como a condição em que uma superfície ou plano derivado médio possui todos os seus elementos em um único plano. A zona de tolerância de planeza é definida por dois planos paralelos na qual cada superfície ou plano derivado médio deve estar. Quando a tolerância de planeza é especificada, assim como para a tolerância de retitude, é aplicada em uma vista onde os elementos da superfície a ser controlada são representados por uma linha. Onde a superfície considerada é associada a uma dimensão de tamanho, a tolerância de planeza deve ser menor que a tolerância dimensional.

A circularidade é uma condição na qual uma superfície, que não uma esfera, possui todos os seus pontos, intersectados por qualquer plano perpendicular a um eixo ou curva, equidistantes deste eixo ou curva. Para uma esfera, todos os pontos da superfície, intersectados por qualquer plano que passe por um centro comum são equidistantes a este centro.

A tolerância de circularidade especifica a zona de tolerância limitada por dois círculos concêntricos dentro da qual cada elemento circular da superfície deve estar, e é aplicada independentemente em qualquer plano que intersecte a superfície. A tolerância de circularidade deve ser menor que a tolerância dimensional e outras tolerâncias geométricas que afetam a circularidade do elemento, com exceção daquelas peças sujeitas a variação de livre-estado ou ao princípio da independência. (ASME Y14.5, 2009).

Por fim, a cilindricidade é a condição na qual uma superfície de revolução possui todos os pontos da superfície equidistantes de um eixo comum. A tolerância de cilindricidade especifica uma zona de tolerância limitada por dois cilindros concêntricos na qual a superfície considerada deve se encontrar.

No caso da cilindricidade, diferente da circularidade, a tolerância se aplica simultaneamente a elementos circulares e longitudinais de uma superfície, sendo considerada a superfície por completo. Assim como para a circularidade, a tolerância de cilindricidade deve ser menor do que a tolerância dimensional, à exceção de aplicações sujeitas a variação de livre-estado ou ao princípio da independência. (ASME Y14.5, 2009).

### 3.4.2 Tolerâncias de Orientação

Existem três relações de orientação, a angularidade, o paralelismo e a perpendicularidade. A angularidade é a condição de uma superfície, plano central de um elemento ou eixo de um elemento em qualquer ângulo especificado de um plano de referência ou linha de referência. O paralelismo é a condição de uma superfície ou plano central de um elemento, equidistantes a todos os pontos de um plano de referência, ou de um eixo de um elemento, equidistante ao longo de seu comprimento a um ou mais planos de referência ou linha de referência. Já a perpendicularidade é a condição de uma superfície, plano central de um elemento ou eixo de um elemento a um ângulo reto a um plano de referência ou linha de referência.

Ao especificar tolerâncias de orientação, o elemento considerado deve estar relacionado a um ou mais elementos de referência. As tolerâncias de orientação são restritas apenas em graus de liberdade rotacionais relativos as referências, elas não são restritas nos graus de liberdade translacionais. (ASME Y14.5, 2009).

Assim, com tolerâncias de orientação, mesmo nos casos onde elementos de referência podem restringir todos os graus de liberdade, a zona de tolerância apenas orienta àquele quadro de referência. Elementos de referência suficientes devem ser referenciados para conter os graus de liberdade requeridos, se o elemento de referência primário não contém graus de liberdade suficientes por si só, elementos de referência adicionais devem ser especificados.

Uma tolerância de orientação especifica a zona na qual cada elemento considerado, e seu elementos, eixo ou plano central, deve estar contido. A zona de tolerância pode ser definida por dois planos paralelos a um ângulo especificado, por duas linhas paralelas a um ângulo especificado, ou pode ser uma zona cilíndrica. Estas zonas de tolerância se aplicam em toda a extensão do elemento, a menos que indicado o contrário. Como por exemplo quando é um requisito controlar apenas elementos lineares de uma superfície, onde uma notação de qualificação, como "CADA ELEMENTO ou CADA

ELEMENTO RADIAL”, é adicionada ao desenho. Isso permite o controle de elementos individuais da superfície independente em relação à referência e não limita a superfície total a uma zona abrangente.

Apesar das tolerâncias de orientação serem restritas apenas em graus de liberdade rotacionais relativos à referência, a notação “CADA ELEMENTO RADIAL” adiciona um requisito para a zona de tolerância ser restrita no local relativo ao eixo a partir do qual os elementos radiais emanam. (ASME Y14.5, 2009).

### 3.4.3 Tolerâncias de Localização

As tolerâncias de localização podem ser classificadas como tolerâncias de posição, concentricidade, e de simetria. Estas tolerâncias são utilizadas para controlar as relações de distância de centro entre elementos dimensionais, a localização de elementos dimensionais como um grupo a partir de um elemento de referência, a coaxialidade de elementos dimensionais, e a concentricidade ou simetria de elementos dimensionais.

De acordo com a ASME Y14.5 (2009) a posição é a localização de um ou mais elementos dimensionais relativos um ao outro ou a um ou mais elementos de referência. Uma tolerância de posição define a zona na qual cada centro, linha ou plano central de um elemento dimensional é permitido variar de uma posição verdadeira teoricamente exata, ou quando especificado um conceito de MMC ou LMC, define um limite, definido como a condição virtual, localizado na posição verdadeira teoricamente exata, o qual não pode ser violado pela superfície ou superfícies do elemento dimensional considerado.

Dimensões básicas estabelecem a posição verdadeira de elementos de referência especificados e entre elementos inter-relacionados. Uma tolerância de posição é indicada pelo símbolo de posição, um valor de tolerância, modificadores de condição de material aplicáveis, e referências apropriadas, localizados no quadro de controle.

Já quando os pontos médios de todos os elementos diametralmente opostos de uma superfície de revolução, ou os pontos médios de correspondentemente localizados elementos de dois ou mais elementos radialmente dispostos, são congruentes com uma linha de referência ou ponto central, é definida a condição de concentricidade. Uma tolerância de concentricidade é definida por uma zona de tolerância cilíndrica, ou esférica, cujo eixo ou ponto central coincide com o eixo ponto central de um elemento de referência. (ASME Y14.5, 2009).

Os pontos médios de todos os elementos correspondentemente localizados do elemento controlado, independentemente do tamanho do elemento, deve estar dentro da zona de tolerância cilíndrica ou esférica. A tolerância de concentricidade especificada

pode ser aplicada apenas em uma condição de independência de material, e o elemento de referência pode ser aplicado apenas no limite independente de material.. Diferente do controle posicional, onde medidas tomadas ao longo da superfície de revolução são feitas para determinar a excentricidade da linha ou ponto central, a tolerância de concentricidade requer o estabelecimento e verificação de pontos médios do elemento.

Ainda segundo a ASME Y14.5 (2009), a simetria pode ser definida como a condição onde pontos médios de todos os elementos opostos ou correspondentemente localizados de dois ou mais elementos de superfície são congruentes com uma linha de referência ou plano central. Relações simétricas podem ser controladas usando tolerâncias posicionais, de perfil ou de simetria. Contudo, diferenças significantes são estabelecidas por estes controles de tolerância. O toleranciamento posicional para relações simétricas estabelece que o plano central do envelope não-relacionado de um ou mais elementos deve ser congruente com uma linha de referência ou plano central sem limites especificados. A tolerância de simetria em si só pode ser aplicada em condição de independência e o elemento de referência pode ser aplicado apenas no limite independente do material.

#### **3.4.4 Tolerâncias de Perfil**

Um perfil é um contorno de uma superfície, uma forma feita de um ou mais elementos, ou um elemento bidimensional de um ou mais elementos. Tolerâncias de perfil são utilizadas para definir a zona de tolerância para controlar forma ou combinações de tamanho, forma, orientação e localização de um elemento relativo a um perfil verdadeiro.

A zona de tolerância de perfil especifica um limite de tolerância uniforme ou não uniforme ao longo do perfil verdadeiro dentro da qual a superfície ou elementos individuais da superfície devem estar e, dependendo dos requisitos de projeto, estas zonas podem ou não estar relacionadas com elementos de referência. Um perfil verdadeiro é um perfil que pode ser definido por um raio básico, dimensões angulares básicas, dimensões cartesianas básicas, dimensões de tamanho básicas, desenhos adimensionais, fórmulas, ou dados matemáticos, incluindo modelos de projeto. (ASME Y14.5, 2009).

Quando usado como um refinamento de uma tolerância dimensional criada por dimensões toleradas, a tolerância de perfil deve estar contida dentro dos limites dimensionais. Uma tolerância de perfil pode ser aplicada a uma peça inteira, múltiplos elementos, superfícies individuais, ou a perfis individuais retirados de várias seções transversais ao longo de uma peça. Existem dois tipos de tolerância de perfil, o perfil de superfície e o perfil de linha.

Ainda de acordo com ASME Y14.5 (2009) cada zona de tolerância de um

elemento de linha estabelecida pelo requisito de tolerância de perfil de linha é bidimensional e a zona de tolerância é normal ao perfil verdadeiro do elemento em cada elemento de linha. O perfil de linha pode ser aplicado a peças com seção transversal variante, ou uma seção transversal constante onde não é desejado ter uma zona de tolerância incluída em toda a superfície do elemento como uma única entidade. Já a zona de tolerância estabelecida pelo perfil de superfície é tridimensional, que se estende ao longo do comprimento e largura, ou circunferência dos elementos considerados. O perfil de superfície pode ser aplicado a peças de qualquer formato, incluindo peças que possuam uma seção transversal constante, ou peças com uma tolerância perfil aplicada por toda ela.

### 3.4.5 Tolerâncias de Batimento

A tolerância de batimento é a tolerância usada para controlar relações funcionais de um ou mais elementos de uma linha de referência estabelecida a partir de um elemento de referência especificado no limite de independência de material. Os tipos de elementos controlados pelas tolerâncias de batimento incluem aquelas superfícies construídas ao redor ou à ângulos retos de uma linha de referência. Existem dois tipos de tolerância de batimento, batimento circular e batimento total, o batimento circular é normalmente menos complexo que o total. O tipo usado depende dos requisitos de projeto e considerações de manufatura. (ASME Y14.5, 2009).

A linha de referência para uma tolerância de batimento pode ser estabelecida por um elemento de referência cilíndrico de comprimento suficiente, dois ou mais elementos de referência cilíndricos que possuam separação axial suficiente, ou um elemento de referência cilíndrico e uma face com um ângulo reto entre si. Elementos usados como elementos de referência para estabelecer eixos devem ser funcionais, como elementos de montagem que estabelecem um eixo de rotação.

O batimento circular fornece o controle dos elementos circulares de uma superfície. A tolerância é aplicada independentemente em cada posição circular de medição a medida que a peça é rotacionada por toda a extensão angular da superfície sobre o eixo de referência simulado. Já o batimento total fornece o controle de todos os elementos de superfície. A tolerância é aplicada simultaneamente para todas as posições circulares e de perfil de medição a medida que a peça é rotacionada 360° ao redor do eixo de referência.

Quando aplicada a superfícies, construídas ao redor de eixos de referência, o batimento total pode ser usado para controlar variações cumulativas como circularidade, retitude, coaxialidade, angularidade, conicidade, e perfil de superfície. Quando aplicada a superfícies a ângulos retos a um eixo de referência, o batimento total controla variações cumulativas de perpendicularidade, para detectar oscilações, e planeza, para

detectar concavidade com convexidade. (ASME Y14.5, 2009).

### 3.5 Estado da Arte

Diversos trabalhos são fornecidos pela literatura acerca da aplicação das técnicas de GD&T em diversos setores, ao longo das últimas décadas. A necessidade de um maior interesse acadêmico acerca do GD&T é reforçada por estudos de mais de vinte anos ainda se mostram atuais, entre eles está o de Roy, Liu e Woo (1991), que apresentou o nível de entendimento das técnicas de representação, manipulação e análise dos dados de dimensionamento e toleranciamento geométrico em sistemas de desenho e manufatura assistidos por computador até 1991, ressaltando a importância da integração dos sistemas de desenho assistido por computador com o toleranciamento na fase de projeto, o que ainda é um impasse.

Já Chiabert, Lombardi e Orlando (1998) apresentaram os benefícios do GD&T, comparando-o com o método de dimensionamento e toleranciamento por coordenadas, considerado tradicional. Os autores ressaltam a importância do uso do GD&T, com ênfase nas montagens.

Kandikjan, Shah e Davidson (2001) por sua vez, desenvolveram um modelo computacional para validação de projetos de dimensionamento e toleranciamento, utilizando os conceitos de quadros de controle, dimensões teóricas e regras gerais para em sistemas CAD.

Souza, Wandek e Silva (2004) ressaltaram a importância do dimensionamento e toleranciamento correto para garantir qualidade e evitar custos desnecessários, apresentando tecnologias que especificam e simulam as especificações de projeto para reduzir custos e garantir eficiência e qualidade. Souza e Wandek (2009) também analisaram a compreensão das especificações geométricas em desenhos de engenharia, listando as deficiências na metrologia industrial no Brasil, e sugerindo a atualização da norma NBR 6409, publicada em 1997, que não representa as práticas industriais da atualidade.

Soares Júnior e Silva (2010) fizeram uma análise acerca das diferenças entre as normas ISO e ASME, que podem levar à interpretações diferentes de um mesmo desenho ou procedimento, assim como a desatualização da norma NBR 6409, da ABNT, e a falta de normas e padrões para métodos de controle dimensional e de tolerâncias de peças com geometria complexa.

A importância do GD&T foi apresentada por Tandler (2011) listando as barreiras à sua ampla implementação, com destaque para a sofisticação e complexidade da linguagem, que exige um profundo conhecimento de sua funcionalidade. O autor também ressaltou a importância de uma associação de desenho e GD&T de boa

qualidade assistidos por computador, para a garantia da qualidade dos processos de projeto, fabricação e inspeção.

Srinivasan (2012) fez um esboço do cenário do GD&T ao longo das últimas décadas, apresentando resultados científicos de impacto e tendências de pesquisa na área, como o aumento gradativo da automatização dos processos de inspeção.

Indicadores de teste, artefatos, e procedimentos, correspondentes aos indicadores utilizados na indústria, para a caracterização e verificação dos limites de um sistema tridimensional de medição por imagens, sem contato, foram apresentados por MacKinnon et al. (2013). Esses indicadores correspondem aos indicadores de dimensionamento e tolerâncias amplamente utilizado na indústria. Indicadores de GD&T de forma, orientação, localização e tamanho, foram introduzidos para exemplificar a aplicação prática destes indicadores para caracterização de sistemas. O trabalho evidenciou o fato da linguagem padronizada do GD&T ser bem compreendida pelos operadores de sistemas de medição por imagens.

Tandler (2013) fez uma análise em uma aplicação de GD&T em um desenho de engenharia, construindo uma série de observações acerca do uso a ferramenta, o que mostrou que um desenho onde a linguagem de GD&T esteja sintaticamente correta, ainda assim pode haver a utilização elementos de referência não funcionais, mau uso dos modificadores e ferramentas de controle, ou ainda a falta de controles importantes.

Machado (2014) apresentou um método para documentação e comunicação de especificações dimensionais e geométricas de produtos, através de uma avaliação da criticidade das regiões com relação as tolerâncias, com o suporte de uma ferramenta matricial.

Caja et al. (2014) desenvolveram um algoritmo de cálculo que permite a caracterização de circunferências completas e setores angulares, permitindo a análise e comparação de métodos comumente utilizados para caracterizar metrologicamente elementos geométricos circulares de forma indireta, a partir de imagens. Os autores determinou o ângulo de precisão de cada método e seu escopo de aplicação.

Zilio, Viero e Walber (2014) aliaram a ferramenta GD&T ao processo de desenvolvimento de produtos em uma empresa de carrocerias de ônibus, observando níveis de especificações melhores e uma comunicação clara dos requisitos de projeto.

O desenvolvimento de um método geométrico de análise de tolerâncias para otimização do dimensionamento de peças foi apresentado por Xu e Keyser (2014). O método permite o ajuste de preferencias de tolerâncias, assim como maiores tolerâncias individuais sem o descumprimento dos requisitos gerais de tolerância e a realocação automática de tolerâncias pela otimização. Apesar do estudo contemplar apenas aplicações em duas dimensões, os autores apresentam um método eficiente, que

se comparado com o método paramétrico convencional, apresenta uma aproximação geométrica da zona de tolerância, além dos limites numéricos tradicionais.

Krogstie et al. (2015) investigaram as tendências de pesquisa na área de desenvolvimento de produtos, identificando pouco interesse acadêmico na área de dimensionamento e toleranciamento, contrastando com sua alta importância industrial. Os autores também verificaram que importantes atividades de engenharia que envolvem o uso de tolerâncias permanecem um assunto complexo dentro das práticas industriais. Por fim os autores destacam a importância do estudo do dimensionamento e toleranciamento e propõem áreas de pesquisa envolvendo o toleranciamento com potencial, como por exemplo a revitalização dos tópicos de toleranciamento auxiliado por computador nos currículos das instituições de ensino superior.

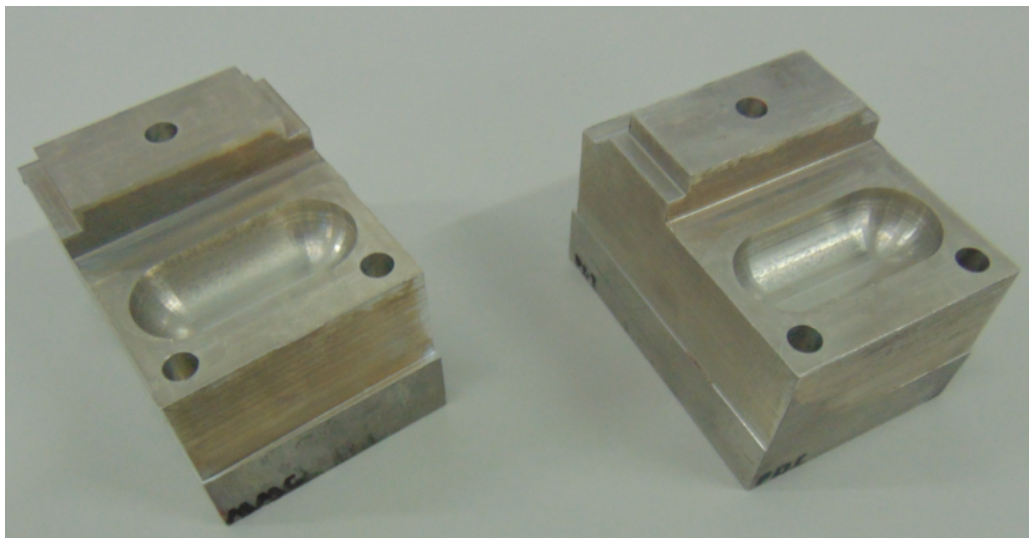
Morse (2016) realizou uma comparação entre as normas ASME e ISO que regulamentam o uso de GD&T. O autor apontou as principais diferenças entre as normas e evidenciou a necessidade da identificação da norma utilizada nos desenhos de engenharia para que sua interpretação seja feita corretamente, além de treinamento específico para interpretação de cada norma específica e da escolha da norma utilizada nas empresas baseada na conformidade com a aplicação.

## 4 MATERIAIS E MÉTODOS

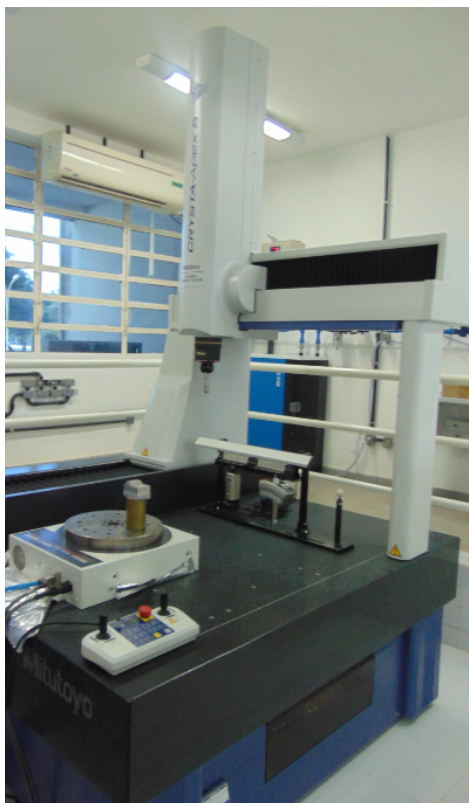
### 4.1 Introdução

Para o desenvolvimento deste trabalho foram realizadas medições em duas peças, com dimensões nominais idênticas, em alumínio fabricadas em um centro de usinagem CNC no Instituto Federal da Paraíba, como podem ser vistas na Figura 14. As medições foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Precisão da Universidade Federal da Paraíba, utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas, modelo Crysta Apex S 710.

**Figura 14 – Peças utilizadas nas medições**



A máquina de medição por coordenadas utilizada neste trabalho faz parte de uma família de máquinas CNC da Mitutoyo denominada CRYSTA-Apex S e pertence à série 500/700/900. Segundo a Mitutoyo (2016), esta é uma máquina CMM de alta exatidão, velocidade e aceleração. A Figura 15 apresenta a máquina utilizada nas medições deste trabalho de dissertação de mestrado.

**Figura 15 – Máquina de medição por coordenadas utilizada**

Esta máquina possui a tecnologia multisensor e, dependendo do sensor utilizado, a exatidão varia a partir de  $1,7\mu\text{m}$ . O apalpador SP25M da CMM foi utilizado para medir as dimensões dos elementos de interesse das peças, na Figura 16 é possível observar o apalpador (sensor de contato) em operação.

**Figura 16 – Apalpador durante a medição**

Durante as medições não foi necessário considerar a temperatura de medição, pois a mesma é equipada com um sistema de compensação de temperatura que permitem que sejam realizadas medições de alta exatidão entre 16°C e 26°C. (Mitutoyo, 2016). Alguns parâmetros da máquina de medição utilizada são apresentados na Tabela 1 e no Anexo A é apresentado o certificado de calibração da máquina fornecido pelo fabricante da mesma.

**Tabela 1 – Parâmetros de Especificação da CRISTA-Apex S 7106**

CARACTERÍSTICA		MODELO 7106
	Eixo X	700 mm
Capacidade	Eixo Y	1000 mm
	Eixo Z	600 mm
	Velocidade máxima de medição	8 mm/s
Velocidade de deslocamento		Velocidade máxima combinada de 519 mm/s
Máxima aceleração		Aceleração máxima combinada de 2309 mm/s <sup>2</sup>
Resolução		0,0001 mm
Tipo de Movimentação		Colchões de ar em cada eixo
Altura máxima da peça		800 mm
Peso máximo sobre a peça		1000 kg
Peso total (Incluindo controlador e base)		1951 kg
Ar	Pressão	0,4 MPa
	Consumo	60 L/min em condições normais (Alimentação 120L/min)
Exatidão	Utilizando	1.7+3L/1000 (20°C ± 2°C)
	o SP25M	1.7+4L/1000 (16°C - 26°C)
		L = comprimento de medição em mm

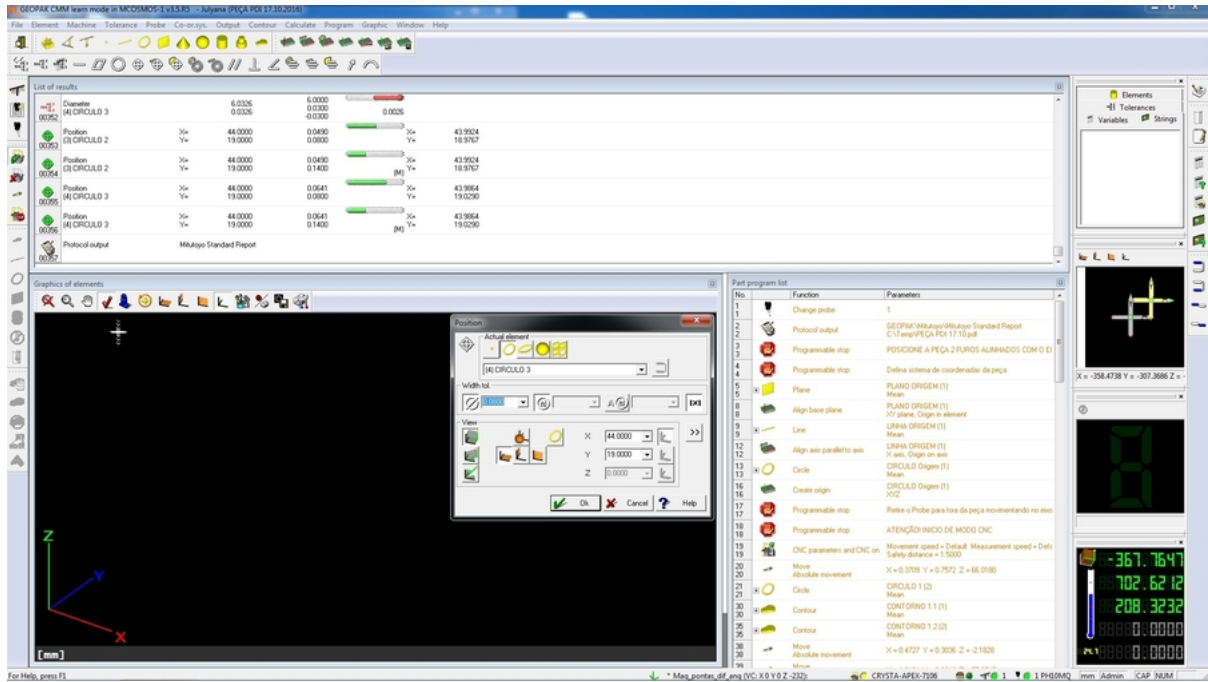
Adaptado de Mitutoyo Sul Americana

O MCOSMOS (*Mitutoyo Controlled Open Systems for Modular Operation Support*) é um pacote de programas de metrologia da Mitutoyo desenvolvido para operar integrado à máquinas de medição por coordenadas. Para realizar as medições e verificações de GD&T foi utilizado o módulo GEO PAK do pacote de programas MCOSMOS, que é um módulo utilizado para a medição e análise de elementos geométricos.

Foram realizadas comparações de tolerância de posição, em condições de independência de material e em máxima condição do material dos elementos tolerados, tolerância de circularidade, tolerância de paralelismo, angularidade e perpendicularidade entre superfícies das peças. Os valores foram armazenados e exportados para o

formato .pdf através do programa MCOSMOS da CMM. Na Figura 17 é apresentada a tela do GEO PAK do programa MCOSMOS gravada durante a execução dos comandos de verificação de tolerância de perpendicularidade.

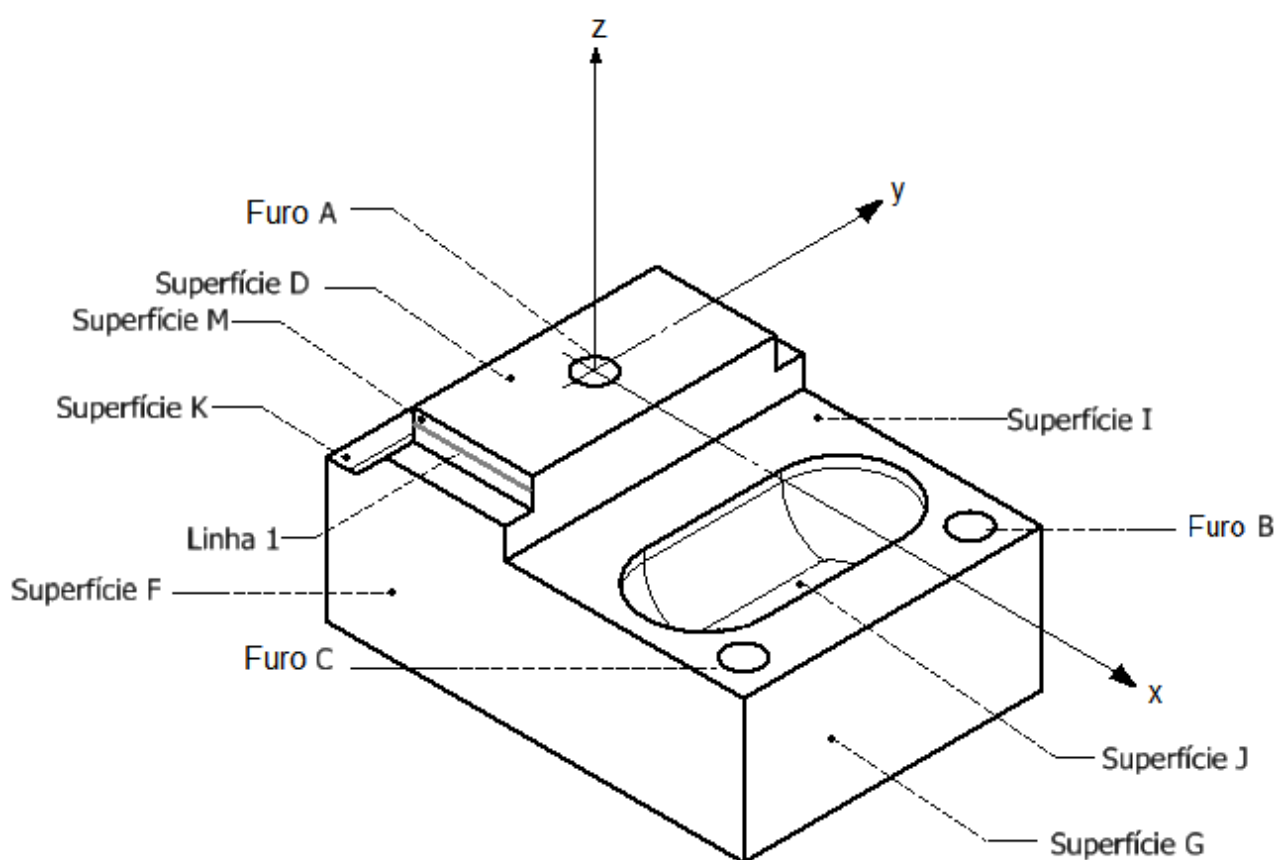
Figura 17 – Tela do GEO PAK do MCOSMOS



## 4.2 Procedimento de Medição

O procedimento de medição e toleranciamento das peças na máquina de medição por coordenadas se iniciou com o estabelecimento de uma origem para as medições de acordo com o desenho técnico, a Figura 18 apresenta a localização da origem do sistema de coordenadas. Em seguida foram realizadas as medições dos furos e superfícies, e por fim foram utilizadas as ferramentas de GD&T disponíveis no GEO PAK.

Figura 18 – Localização da origem da peça



A determinação do sistema de coordenadas da peça foi possível através dos recursos disponíveis do MCOSMOS e seguiu uma sequência de operação, utilizando os elementos apresentados na Figura 18. Inicialmente foi determinado o plano XY através do toque do apalpador em quatro pontos na superfície D.

Em seguida foi medido o furo A e seu centro, determinado pelo programa, foi definido como a origem do sistema de coordenadas, e por fim foram medidos dois pontos que caracterizaram a linha 1 na superfície M e o eixo X foi alinhado a esta linha.

É possível observar a sequência de operações realizadas dentro do ambiente

do GEO PAK do MCOSMOS na Figura 19.

**Figura 19 – Detalhe da tela do MCOSMOS evidenciando a determinação da origem do sistema de coordenadas**

No.	Function	Parameters
1 1	Change probe	1
2 2	Protocol output	GEOPAK\Mitutoyo\Mitutoyo Standard Report C:\Temp\PEÇA.PDI 17.10.pdf
3 3	Programmable stop	POSICIONE A PEÇA 2 FURROS ALINHADOS COM O EIXO "Y"
4 4	Programmable stop	Defina sistema de coordenadas da peça
5 5	Plane	PLANO ORIGEM (1) Mean
8 8	Align base plane	PLANO ORIGEM (1) XY plane, Origin in element
9 9	Line	LINHA ORIGEM (1) Mean
12 12	Align axis parallel to axis	LINHA ORIGEM (1) X axis, Origin on axis
13 13	Circle	CIRCULO Origem (1) Mean
16 16	Create origin	CIRCULO Origem (1) XYZ
17 17	Programmable stop	Retire o Probe para fora da peça movimentando no eixo Vertical
18 18	Programmable stop	ATENÇÃO! INICIO DE MODO CNC
19 19	CNC parameters and CNC on	Movement speed = Default Measurement speed = Default Safety distance = 1.5000
20 20	Move Absolute movement	X = 0.3709 Y = 0.7572 Z = 66.0180

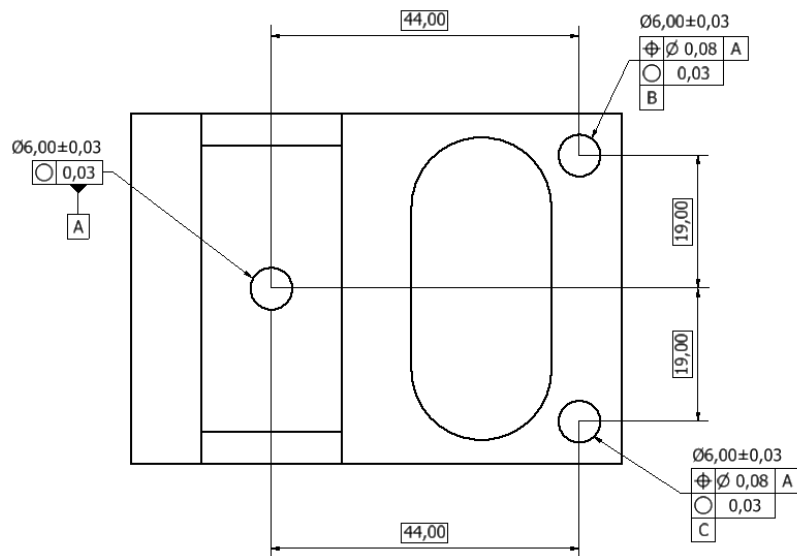
Após a determinação do sistema de coordenadas, foram realizadas as medições dos elementos de interesse das peças. A medição dos furos foi realizada através do toque em quatro pontos em uma mesma coordenada vertical, e a medição das superfícies através do toque em quatro pontos.

Posteriormente foram tolerados dois furos, identificados pelas letras B e C, em relação ao centro de um furo considerado como a Referência A, independente da condição de material, através da aplicação GEO PAK do programa MCOSMOS para cada peça.

Em seguida, os mesmos furos foram tolerados em relação a mesma referência A considerando a máxima condição de material dos elementos tolerados. Nesta etapa o diâmetro considerado para construir a zona de tolerância de posição foi o diâmetro que representa o maior peso da peça. Como os elementos tolerados são furos, o maior peso dos furos representa o menor peso da peça e por isto foi utilizado o maior diâmetro possível dentro da tolerância dimensional do mesmo.

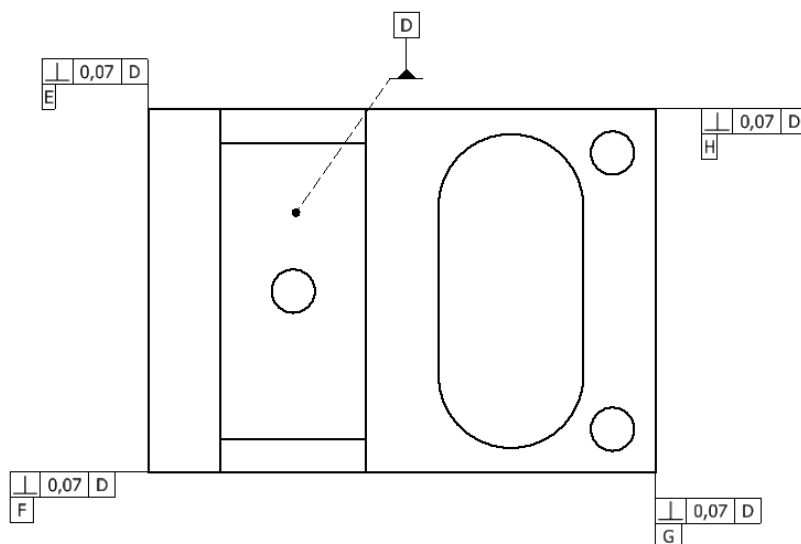
Os furos das peças, A,B e C, também foram tolerados segundo sua circularidade. O desenho técnico com as cotas de interesse representadas em GD&T utilizado na primeira etapa do toleranciamento é apresentado na Figura 20.

Figura 20 – Desenho técnico dos furos tolerados



Para avaliar a característica geométrica de perpendicularidade quatro superfícies, identificadas pelas letras E,F,G e H, foram toleradas em relação a uma superfície de referência D. A superfície de referência adotada foi a superfície na qual foi determinada a origem, que coincide com o centro do furo de referência A. O desenho técnico com as cotas de interesse representadas em GD&T utilizado desta etapa do toleranciamento é apresentado na Figura 21.

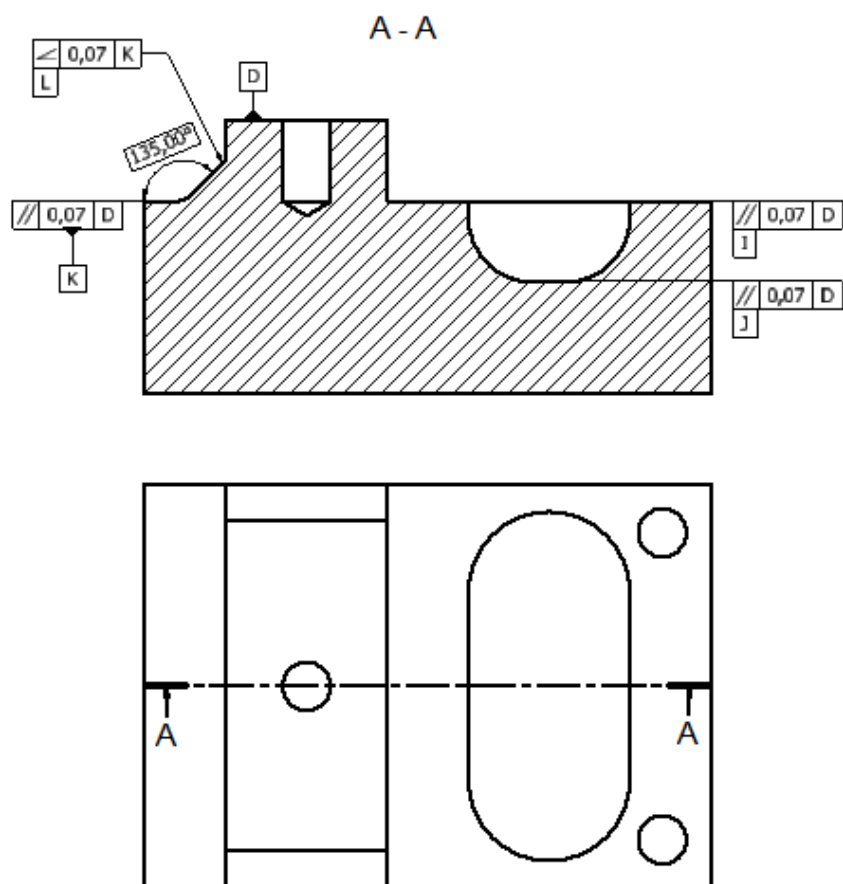
Figura 21 – Desenho técnico das superfícies toleradas segundo a perpendicularidade



Três superfícies foram avaliadas segundo seu paralelismo em relação à superfície de referência D, estas superfícies foram identificadas pelas letras I, J e K. Esta etapa do toleranciamento é apresentada na Figura 22, que também apresenta a

representação em GD&T da avaliação da angularidade da superfície L com relação à superfície de referência K.

Figura 22 – Desenho técnico das superfícies toleradas segundo o paralelismo e a angularidade



## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Introdução

Neste capítulo são apresentados os resultados da aplicação das técnicas de GD&T em uma máquina de medição por coordenadas em duas peças idênticas, aqui denominadas peça 1 e peça 2, caracterizando alguns de seus elementos quanto à posição, circularidade, perpendicularidade, paralelismo e angularidade.

### 5.2 Caracterização geométrica da peça 1

#### 5.2.1 Erro de posição dos furos B e C em relação ao furo A da peça 1

Através da medição na máquina CMM, com o auxílio do programa MCOSMOS, foram determinadas as localizações das coordenadas reais dos furos tolerados B e C em relação ao furo de referência A da peça 1. As coordenadas nominais e suas tolerâncias podem ser verificadas na Figura 18, apresentada no capítulo 4. Os valores são apresentados na Tabela 1.

**Tabela 2 – Distâncias de nominais e medidas dos furos tolerados da peça 1**

Furo	-	X (mm)	Y (mm)
B	Nominal	44,0000	19,0000
	Medida	43,9850	19,0060
C	Nominal	44,0000	19,0000
	Medida	43,9803	18,9999

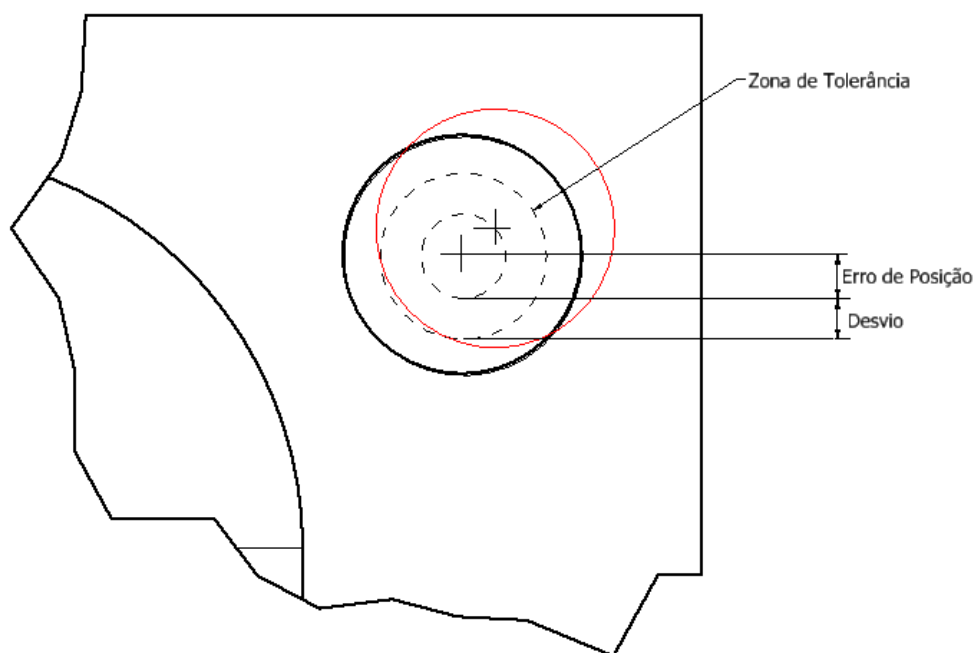
A partir dos dados das coordenadas nominais e medidas dos furos B e C foram encontrados os erros de posição dos mesmo e foi determinado o desvio em relação à tolerância determinada.

O termo desvio representa o afastamento do erro em relação à tolerância determinada. Apesar deste termo não possuir uma definição formal na norma ASME Y14.5 (2009), seu valor é fornecido pelo software MCOSMOS da máquina de medição por coordenadas e a convenção adotada neste trabalho é a de que um valor negativo de desvio representa que a característica tolerada se encontra dentro da zona de tolerância, conforme padrão do software.

Para a tolerância de posição de furos este desvio representa graficamente a distância entre o limite da zona de tolerância circular e o círculo teórico formado em torno do centro nominal, que passa pelo centro real medido.

A vista de detalhe que evidencia a posição do círculo B, contendo a representação gráfica do desvio é apresentada na Figura 23.

**Figura 23 – Representação gráfica do desvio**



As Tabelas 3 e 4 descrevem a tolerância determinada prevista no projeto, independente da condição de material, de 0,08 mm para os dois furos e a tolerância de posição com a máxima condição de material nos elementos tolerados, de 0,1327 mm para o furo B e 0,1318 mm para o furo C, além de seus respectivos erros e desvios em milímetros.

A tolerância na máxima condição de material considera a tolerância determinada a partir da tolerância prevista no projeto acrescida à parcela da máxima condição de material, e a aplicação GEO PAK realiza os cálculos da parcela de máxima condição automaticamente.

**Tabela 3 – Tolerância determinada e erro de posição encontrado para o furo B da peça 1**

	Tolerância Determinada (mm)	Erro de Posição encontrado (mm)	Desvio (mm)
Independente do Material	0,0800	0,0322	- 0,0478
Condição de Máximo Material	0,1327	0,0322	- 0,1005

Observa-se que o erro de posição encontrado nos dois furos foi inferior a tolerância na condição de independência de material. Como a zona de tolerância considerando a Máxima Condição de Material é maior, o desvio encontrado nesta condição também obedece aos requisitos de projeto.

Os desvios de posição encontrados são compatíveis com o processo de fabricação da peça, realizado em um centro de usinagem CNC (Comandado Numericamente por Computador). Este tipo de fabricação apresenta ótima precisão e repetibilidade, resultando em peças com elementos consistentes e que atendem às especificações de projeto.

**Tabela 4 – Tolerância determinada e erro de posição encontrado para o furo C da peça 1**

	<b>Tolerância Determinada (mm)</b>	<b>Erro de Posição encontrado (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>
Independente do Material	0,0800	0,0394	- 0,0406
Condição de Máximo Material	0,1318	0,0394	- 0,0924

### 5.2.2 Erro de circularidade dos furos A,B e C da peça 1

A circularidade dos furos A,B e C também foi analisada, e a Tabela 5 apresenta a tolerância determinada e os erros de circularidade de cada furo da peça 1. Todos os furos desta peça apresentaram erros de circularidade significativamente menores que a tolerância determinada no projeto.

É importante ressaltar que pode haver um refinamento destes valores de erro de circularidade ao considerar mais pontos de análise, para cada furo foram considerados quatro pontos em uma mesma profundidade.

**Tabela 5 – Tolerância determinada e erro de circularidade encontrado para os furos da peça 1**

<b>Furo</b>	<b>Tolerância Determinada (mm)</b>	<b>Erro de Circularidade encontrado (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>
A	0,0300	0,0009	- 0,0291
B	0,0300	0,0009	- 0,0291
C	0,0300	0,0003	- 0,0297

### 5.2.3 Erro de perpendicularidade de superfícies da peça 1

Após a caracterização geométrica dos furos da peça 1, foi calculada a perpendicularidade de quatro superfícies com relação a superfície de referência D, apresentadas na Figura 21 do capítulo 4, com a manutenção da perpendicularidade até o comprimento de referência equivalente a toda a extensão da superfície de referência D. Na Tabela 6 são apresentados os resultados.



**Tabela 6 – Tolerância determinada e erro de perpendicularidade para a superfícies toleradas da peça 1**

<b>Superfície</b>	<b>Tolerância Determinada(graos)</b>	<b>Erro de Perpendicularidade encontrado (graos)</b>	<b>Desvio (graos)</b>
E	0,0700	0,0276	- 0,0424
F	0,0700	0,0395	- 0,0305
G	0,0700	0,2413	0,1713
H	0,0700	0,0216	- 0,0484

Como é possível observar na Tabela 6, o ângulo entre as superfícies D e E foi de 90,0276°, enquanto o ângulo encontrado entre as superfícies D e F foi de 90,0395°. Já o ângulo entre as superfícies G e D foi de 90,2413°, e por fim 90,0216° foi o ângulo encontrado entre as superfícies D e H. Os valores dos ângulos das superfícies E, F e H com relação à superfície D se encontram dentro da tolerância determinada no projeto, mas o ângulo entre as superfícies D e G ultrapassou em 0,1713° o valor da tolerância de projeto.

#### 5.2.4 Erro de paralelismo de superfícies da peça 1

As tolerâncias determinadas e erros de paralelismo para as superfícies I, J e K em relação à superfície D da peça 1 são apresentadas na Tabela 7. É possível observar que o ângulo entre as superfícies D e I é de 0,368, já o ângulo encontrado entre as superfícies J e D foi de 0,0378, e o ângulo entre as superfícies D e K foi de 1,0474.

**Tabela 7 – Tolerância determinada e erro de paralelismo para as superfícies toleradas da peça 1**

<b>Superfície</b>	<b>Tolerância Determinada (graos)</b>	<b>Erro de Paralelismo encontrado (graos)</b>	<b>Desvio (graos)</b>
I	0,0700	0,0368	- 0,0332
J	0,0700	0,0378	- 0,0322
K	0,0700	1,0474	0,9774

O único ângulo que atende às especificações de projeto é o ângulo entre as superfícies J, localizada na base do rasgo elíptico da peça 1, e D. Como há um arredondamento entre as superfícies K e L as medições na superfície K podem ter sido comprometidas, já que a extensão da superfície é pequena e há uma grande probabilidade de a ponta do apalpador tocar uma região do arredondamento, aumentando o ângulo relativo à superfície D.

### 5.2.5 Erro de angularidade de superfícies da peça 1

A última característica geométrica analisada na peça 1 foi a angularidade entre a superfície L e a superfície de referência K considerando a manutenção do ângulo até o comprimento de referência equivalente a toda a extensão da superfície de referência K. Os resultados desta análise, apresentados na Tabela 8, demonstram o maior erro encontrado na peça. O ângulo nominal entre estas superfícies é de 135 graus, como é apresentado na Figura 22 do capítulo 4, e o ângulo real encontrado foi de 136,9829 graus.

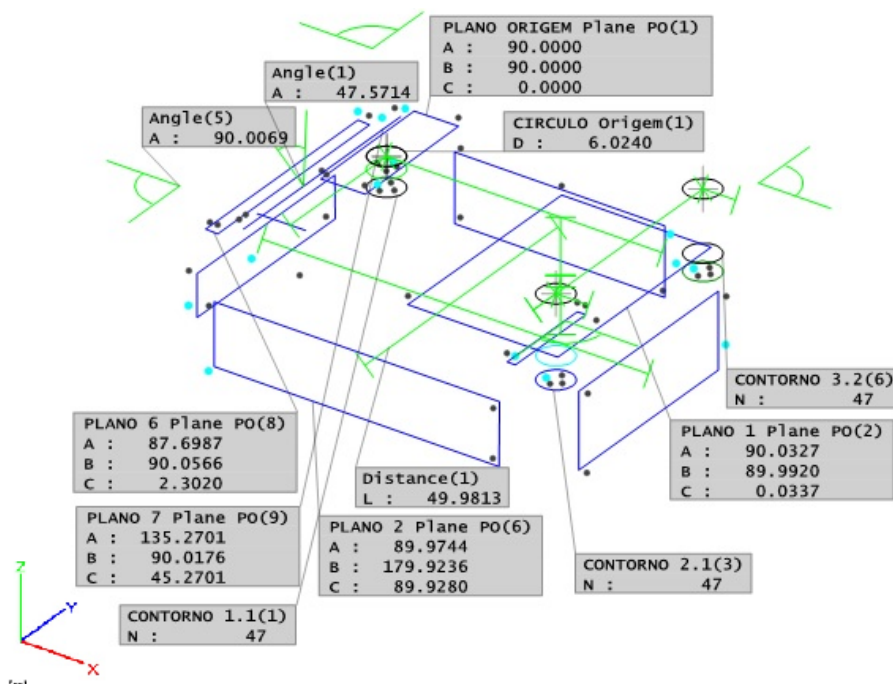
O erro de angularidade encontrado pode ser justificado pelo processo de fabricação da peça que, embora tenha sido executado em um centro de usinagem, para a superfície L foi feito por escalonamento devido a uma limitação do alcance angular da ferramenta utilizada.

**Tabela 8 – Tolerância determinada e erro de angularidade para a superfície tolerada da peça 1**

Superfície	Tolerância Determinada (graus)	Erro de Angularidade Encontrado (graus)	Desvio (graus)
L	0,0700	1,9829	1,9129

O software MCOSMOS inclui a opção de mostrar os resultados do toleranciamento da peça na tela, em uma vista de perspectiva. Esta funcionalidade, apresentada na Figura para a peça 1, facilita a associação dos resultados das tolerâncias às suas respectivas geometrias.

**Figura 24 – Resultados da peça 1 mostrados na tela do MCOSMOS**



### 5.3 Caracterização geométrica da peça 2

#### 5.3.1 Erro de posição dos furos B e C em relação ao furo A da peça 2

O mesmo procedimento de medição e toleranciamento utilizado na peça 1 foi utilizado na peça 2. As localizações das coordenadas reais dos furos tolerados B e C em relação ao furo de referência A na peça 2, determinadas a partir da medição na máquina CMM são apresentadas na Tabela 9. As coordenadas nominais e suas tolerâncias, assim como para a peça 1, podem ser verificadas na Figura 18, apresentada no capítulo 4.

**Tabela 9 – Distâncias nominais e medidas dos furos tolerados da peça 2**

Furo	-	X (mm)	Y (mm)
B	Nominal	44,0000	19,0000
	Medida	43,9864	19,0290
C	Nominal	44,0000	19,0000
	Medida	43,9924	18,9767

Assim como para a peça 1, os erros de posição dos furos e o desvio em relação à tolerância foram determinados a partir dos valores das coordenadas dos furos tolerados.

As Tabelas 10 e 11 descrevem a tolerância determinada prevista no projeto, independente da condição de material, de 0,08 mm para os dois furos e a tolerância de posição com a máxima condição de material, de 0,1423 mm para o furo B e 0,1631 mm para o furo C, nos elementos tolerados.

**Tabela 10 – Tolerância determinada e erro de posição encontrado para o furo B da peça 2**

	Tolerância Determinada (mm)	Erro de Posição encontrado (mm)	Desvio (mm)
Independente do Material	0,0800	0,0641	- 0,0159
Condição de Máximo Material	0,1423	0,0641	- 0,0782

O erro de posição encontrado nos dois furos tolerados da peça 2 foi inferior a tolerância tanto na condição de independência de material, quanto na Máxima Condição de Material, obedecendo aos requisitos de projeto.

**Tabela 11 – Tolerância determinada e erro de posição encontrado para o furo C da peça 2**

	<b>Tolerância Determinada (mm)</b>	<b>Erro de Posição encontrado (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>
Independente do Material	0,0800	0,0490	- 0,0310
Condição de Máximo Material	0,1631	0,0490	- 0,1141

### 5.3.2 Erro de circularidade dos furos A,B e C da peça 2

Na etapa seguinte do toleranciamento, foi analisada a circularidade dos furos A, B e C da peça 2, e a Tabela 12 apresenta a tolerância determinada e os erros de circularidade para cada um destes furos.

**Tabela 12 – Tolerância determinada e erro de circularidade encontrado para os furos da peça 2**

<b>Furo</b>	<b>Tolerância Determinada (mm)</b>	<b>Erro de Circularidade encontrado (mm)</b>	<b>Desvio (mm)</b>
A	0,0300	0,0003	- 0,0297
B	0,0300	0,0019	-0,0281
C	0,0300	0,0008	- 0,0292

Todos os furos desta peça apresentaram erros de circularidade significativamente menores que a tolerância determinada no projeto, sendo o furo B o portador do maior desvio encontrado.

### 5.3.3 Erro de perpendicularidade de superfícies da peça 2

A perpendicularidade de quatro superfícies com relação a superfície de referência D foi calculada em seguida, considerando a manutenção da perpendicularidade até o comprimento de referência equivalente a toda a extensão da superfície de referência D da peça 2.

As superfícies e suas tolerâncias podem ser verificadas na Figura 20, apresentada no capítulo 4. Os resultados dos erros de perpendicularidade para todas as superfícies analisadas e seus respectivos desvios a tolerância determinada são apresentados na Tabela 13.

**Tabela 13 – Tolerância e erro de perpendicularidade para as superfícies toleradas da peça 2**

<b>Superfície</b>	<b>Tolerância Determinada (graus)</b>	<b>Erro de Perpendicularidade encontrado (graus)</b>	<b>Desvio (graus)</b>
E	0,0700	0,0245	- 0,0455
F	0,0700	0,0440	- 0,0260
G	0,0700	0,0330	- 0,0370
H	0,0700	0,0102	- 0,0598

Da tabela 13, é possível inferir que o ângulo entre as superfícies D e E da peça 2 foi de  $90,0245^\circ$ , enquanto o ângulo encontrado entre as superfícies D e F foi de  $90,0440^\circ$ , o ângulo entre as superfícies G e D foi de  $90,0330^\circ$ , e por fim  $90,0102^\circ$  foi o ângulo encontrado entre as superfícies D e H. Os valores dos ângulos das superfícies E, F, G e H com relação à superfície D se encontram dentro da tolerância determinada no projeto.

#### 5.3.4 Erro de paralelismo de superfícies da peça 2

Assim como para a peça 1, as tolerâncias e erros de paralelismo para as superfícies I, J e K, representadas na Figura 22 do capítulo 4, em relação à superfície D da peça 2 foram determinados e são apresentados na Tabela 14. O ângulo entre as superfícies D e I encontrado é de 0,0206, já o ângulo encontrado entre as superfícies J e D foi de 0,0845, e o ângulo entre as superfícies D e K foi de 1,4070.

**Tabela 14 – Tolerância determinada e erro de paralelismo para as superfícies toleradas da peça 2**

<b>Superfície</b>	<b>Tolerância Determinada (graus)</b>	<b>Erro de Paralelismo encontrado (graus)</b>	<b>Desvio (graus)</b>
I	0,0700	0,0206	- 0,0494
J	0,0700	0,0845	0,0145
K	0,0700	1,4070	1,337

O único ângulo analisado que atende às especificações de projeto é o ângulo entre as superfícies I e D. O alto valor de desvio entre as superfícies D e K, como na peça 1, pode ser justificado pelo arredondamento entre as superfícies K e L.

#### 5.3.5 Erro de angularidade de superfícies da peça 2

A angularidade entre a superfície L e a superfície de referência K foi a última característica geométrica analisada, considerando a manutenção do ângulo até o

comprimento de referência equivalente a toda a extensão da superfície de referência K. A Tabela 15 apresenta os resultados desta análise.

**Tabela 15 – Tolerância determinada e erro de angularidade para a superfície tolerada da peça 2**

<b>Superfície</b>	<b>Tolerância Determinada (graus)</b>	<b>Erro de Angularidade Encontrado (graus)</b>	<b>Desvio (graus)</b>
L	0,0700	2,9191	2,8491

Assim como para a peça 1, o erro de angularidade foi o maior erro encontrado na peça 2, e para um ângulo nominal de 135 graus entre estas superfícies, o ângulo real encontrado foi de 137,9191 graus. Este erro, justificado pelo processo de fabricação da superfície por escalonamento, é maior do que o erro encontrado na peça 1.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 Considerações Finais

Este trabalho teve como objetivo o estudo das técnicas de GD&T aplicadas à máquinas de medição por coordenadas. A partir de informações coletadas no levantamento do estado da arte destas técnicas foi possível observar que o uso desta ferramenta no Brasil é pouco utilizado e ensinado no setor acadêmico, universidades, e demais instituições de ensino técnico, ficando restrito ao setor industrial e às empresas que oferecem capacitação para o mesmo, a responsabilidade pela maior parte do conhecimento destas técnicas no país.

Procedimentos experimentais foram executados com a finalidade de avaliar as ferramentas de GD&T disponíveis no software embarcado de uma máquina de medição por coordenadas, em especial as ferramentas de análise de posição, circularidade, perpendicularidade, paralelismo e angularidade. Neste contexto, as principais conclusões deste trabalho de dissertação podem ser descritas como segue:

- De maneira geral a peça 2 apresentou erros de geometria maiores do que a peça 1;
- As características geométricas de posição e circularidade apresentaram valores de desvios dentro das especificações de projeto para as duas peças;
- As tolerâncias de perpendicularidade, paralelismo e angularidade apresentaram valores que não atendem às especificações de projeto, portanto em um contexto de fabricação seriada estas peças seriam reprovadas;
- A tolerância de angularidade apresentou os maiores erros para as duas peças analisadas, como já apresentado, uma causa para isto pode ser o escalonamento na execução da usinagem da superfície inclinada devido a limitações da ferramenta utilizada;
- Apesar da análise de circularidade ter sido realizada com poucos pontos, a mesma apresentou resultados satisfatórios de tolerância nas peças 1 e 2.

O aplicação GEOPAK do pacote de programas MCOSMOS se mostrou eficaz no cálculo e apresentação de tolerâncias geométricas. Uma vantagem adicional de se utilizar uma máquina com comando numérico computadorizado (CNC) foi a possibilidade de criar um programa automático de inspeção, o que possibilitou uma redução significativa no tempo de inspeção das peças, enquanto a primeira medição

foi realizada em aproximadamente trinta minutos, as subseqüentes foram reproduzidas pelo programa CNC da máquina em pouco mais de um minuto. A utilização deste tipo de ferramenta, tanto na indústria quanto na academia, acarreta em uma série de vantagens como a redução do tempo de inspeção de peças, padronização da inspeção, melhor aproveitamento do custo da hora de trabalho de operador.

## 6.2 Sugestões para trabalhos futuros

Com base nas análises e conclusões deste trabalho, os seguintes pontos devem ser investigados mais profundamente:

- Caracterizar a circularidade de furos com um número variável de pontos, relacionando o número de pontos à exatidão da análise;
- Calcular tolerâncias de cilíndricidade e conicidade em geometrias internas e externas;
- Aplicar técnicas de GD&T para caracterizar geometrias complexas utilizando máquina de medição por coordenadas;
- Utilizar técnicas de GD&T para caracterizar superfícies de forma livre utilizando sensores de escaneamento por contato(usando o sensor SP25) e sem contato(usando o sensor laser).

## REFERÊNCIAS

- ASME Y14.5. **Dimensioning and Tolerancing - Engineering Drawing and Related Documentation Practices**. New York, USA, 2009.
- BARROS, W. S. **Estudo sobre a confiabilidade metrológica das máquinas de medição por coordenadas na utilização de varredura por contato**. 2012. 245 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.
- BERGER, R. W. et al. (Ed.). **The Certified Quality Engineer Handbook**. 2. ed. USA: ASQ Quality Press, 2007.
- CAJA, J. et al. Metrological characterization of interior circular features using digital optical machines: Calculation models and application scope. **Precision Engineering**, v. 38, p. 36 – 47, 2014.
- CAPPETTI, N.; NADDEO, A.; VILLECCO, F. Fuzzy approach to measures correction on Coordinate Measuring Machines: The case of hole-diameter verification. **Measurement**, v. 93, p. 41 – 47, 2016.
- CHENG, W.; MENQ, C. H. Integrated Laser/CMM System for the Dimensional Inspection of Objects Made of Soft Material. **Advanced Manufacturing Technology**, v. 10, p. 36 – 45, 1995.
- CHIABERT, P.; LOMBARDI, F.; ORLANDO, M. Benefits of Geometric Dimensioning and Tolerancing. **Journal of Materials Processing Technology**, v. 78, p. 29 – 35, 1998.
- D'AMATO, R. et al. Use of coordinate measuring machine to measure angles by geometric characterization of perpendicular planes. Estimating uncertainty. **Measurement**, v. 47, p. 598 – 606, 2014.
- FERREIRA, F. A. M.; OLIVA, J. de Vicente y; PEREZ, A. M. S. Evaluation of the performance of coordinate measuring machines in the industry, using calibrated artefacts. **Procedia Engineering**, v. 63, p. 659 – 668, 2013.
- HOCKEN, R. J. .; PEREIRA, P. H. . (Ed.). **Coordinate Measuring Machines and Systems**. 2. ed. USA: CRC Press, 2012.
- KANDIKJAN, T.; SHAH, J. J.; DAVIDSON, J. K. A mechanism for validating dimensioning and tolerancing schemes in CAD systems. **Computer-aided Design**, v. 33, p. 721 – 737, 2001.
- KROGSTIE, L. et al. Towards a more comprehensive understanding of Tolerance Engineering research importance. In: **13th CIRP conference on Computer Aided Tolerancing Towards**. [S.l.: s.n.], 2015. v. 27, p. 29 – 34.
- KRULIKOWSKI, A. **Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing**. 3. ed. [S.l.]: Cengage Learning Int, 2012. ISBN 1111129827.

- LIMA JÚNIOR, J. C. de. **Aplicação de redes neurais artificiais para determinar parâmetros de geometrias substitutas em MMCs**. 2007. 138 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba.
- LIRA, F. A. de. **Metrologia Dimensional: técnicas de medição e instrumentos para controle e fabricação industrial**. 1. ed. São Paulo: Érica, 2015. (Série eixos). ISBN 978-85-365-1985-2.
- MACHADO, A. de M. **Método para documentar e comunicar a especificação dimensional e geométrica do produto**. 2014. 107 p. Dissertação (Mestrado em Gestão e Tecnologia Industrial) — Programa de Pós Graduação em Gestão e Tecnologia Industrial. Faculdade de Tecnologia SENAI CIMATEC, Salvador-BA, Brasil.
- MACKINNON, D. et al. GD&T-Based Characterization of Short-Range Non-contact 3D Imaging Systems. **Int J Comput Vis**, v. 102, p. 56 – 72, 2013.
- MARTIN, V. B. **Melhoria da confiabilidade metrológica na inspeção de componentes usinados com aplicação na indústria nuclear**. 2010. 130 p. Dissertação (Mestrado em Metrologia) — Pontifícia Universidade do Rio de Janeiro, Centro Técnico Científico, Rio de Janeiro.
- MIAN, S. H.; AL-AHMARI, A. Enhance performance of inspection process on Coordinate Measuring Machine. **Measurement**, v. 47, p. 78 – 91, 2014.
- Mitutoyo. **Coordinate Measuring Machines - CRYSTA-Apex S Series [Catalog No. E16004(6)]**. 2016. Disponível em: <[http://www.mitutoyo.co.uk/media/wysiwyg/E16004\\_1.pdf](http://www.mitutoyo.co.uk/media/wysiwyg/E16004_1.pdf)>. Acesso em: 09/12/2016.
- MORSE, E. Tolerancing standards: a comparison. **Quality**, v. 55, n. 8, p. 40 – 43, Agosto 2016.
- MU, Y. H.; NGOI, B. K. A. Dynamic Error Compensation of Coordinate Measuring Machines for High-Speed Measurement. **Advanced Manufacturing Technology**, v. 15, n. 810, p. 814 –, 1999.
- P. J. Drake Jr. **Dimensioning and Tolerancing Handbook**. New York: Mcgraw-Hill, 1999. ISBN 0-07-018131-4.
- PORATH, M. de C.; SOUZA, A. R. de. A tecnologia de Medição por Coordenadas no ciclo de desenvolvimento de produtos plásticos. **artigo da Fundação CERTI(in portuguese)**, v. 20001, 2002.
- ROY, U.; LIU, C.; WOO, T. C. Review of dimensioning and tolerancing : representation and processing. **Computer-aided Design**, v. 23, n. 7, p. 466 – 483, setembro 1991.
- SARTORI, S. et al. A way to improve the accuracy of a co-ordinate measuring machine. **Measurement**, v. 6, n. 2, p. 50 – 54, 1988.
- SILVA, J. B. de A. et al. Approach for uncertainty analysis and error evaluation of four-axis co-ordinate measuring machines. **International Journal of Manufacturing Technology**, v. 41, p. 1130 – 1139, 2009.
- SILVA NETO, J. C. da. **Metrologia e Controle Dimensional**. 1. ed. [S.l.]: Elsevier Editora, 2012.

SOARES JÚNIOR, L. **Sistemática para Garantia da Qualidade na Medição de Peças com Geometria Complexa e Superfície com Forma Livre Utilizando Máquina de Medir por Coordenadas**. 2010. 186 p. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa-PB.

SOARES JÚNIOR, L.; SILVA, J. B. de A. Especificação e controle de tolerância de geometrias complexas e superfícies de forma livre. In: **VI Congresso Nacional de Engenharia Mecânica**. [S.l.: s.n.], 2010.

SOUZA, A. R. de. Importância de Formação Metrológica Avançada na Área de Medição por Coordenadas. In: **Metrologia para a competitividade em áreas estratégicas**. Salvador-Bahia: [s.n.], 2008.

SOUZA, A. R. de. Integração de Sistemas de Medição por Coordenadas na Medição em Linhas de Produção. In: **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**. Salvador-Bahia: [s.n.], 2015.

SOUZA, A. R. de; WANDECK, M. Desafios Operacionais e Metrológicos da Medição por Coordenadas no Ambiente de Manufatura Industrial. In: **2º Congresso Internacional de Metrologia Mecânica**. Natal, RN: [s.n.], 2011.

SOUZA, A. R. de; WANDECK, M.; SILVA, D. C. da. O uso do GD&T aliado ao cálculo computacional de tolerâncias - Quantificando a qualidade ainda na fase de projeto. **Revista Máquinas e Metais**, v. 463, p. 56 – 75, 2004.

SOUZA, A. R. de; WANDECK, M. Deficiências da metrologia industrial no Brasil no correto entendimento do GD&T e na definição de estratégias de medição consistentes para seu controle geométrico. In: **V Congresso Brasileiro de Metrologia**. Salvador-Bahia: [s.n.], 2009.

SRINIVASAN, V. Reflections on the Role of Science in the Evolution of Dimensioning and Tolerancing Standards. In: **12th CIRP Conference on Computer Aided Tolerancing Reflections**. [S.l.: s.n.], 2012. v. 227, p. 3 – 11.

STOCO, W. H.; LIMA, A. de; TORREZAN, H. F. Proposta de metodologia de medição para máquinas de medir por coordenadas - MMC: Influência do número de pontos de medição na obtenção de erros de forma. In: **XX Simpósio de Engenharia de Produção**. Baurú, SP: [s.n.], 2013.

STRAFACCI NETO, G. Por que Geometric Dimensioning and Tolerancing (GD&T) ? **Revista Metrologia e Instrumentação**, p. 88 – 90, 2010. Acesso em: 15/03/2016.

TANDLER, B. GD&T: Realize its promises: GD&T is the only means we have to say precisely what we want so that others can do precisely what we say. **Quality**, p. 34 – 36, Setembro 2011.

TANDLER, B. GD&T functionality: a good way to learn more about GD&T is to critique its application. . **Quality**, p. 25 – 28, Jan 2013.

VALENTINA, L. V. O. D. Máquinas de Medir por Coordenadas. Material da disciplina Metrologia e Controle Dimensional da Universidade do Estado de Santa Catarina. 2010. Disponível em: <[http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/veriano/materiais/09\\_Maquinamedircoordenadas.pdf](http://www.joinville.udesc.br/portal/professores/veriano/materiais/09_Maquinamedircoordenadas.pdf)>.

WANDECK, M. **Engenharia Dimensional - GD&T**. Rio de Janeiro, RJ, Brasil: [s.n.], 2012.

WANDECK, M.; SOUZA, A. R. de. Análise funcional e metrológica dos princípios de Taylor e da independência na especificação e controle geométrico de produtos. In: **1º CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA MECÂNICA**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2008.

WECKENMANN, A. et al. Probing Systems in Dimensional Metrology. **CIRP Annals - Manufacturing Technology**, v. 53, n. 2, p. 657 – 684, 2004.

XU, S.; KEYSER, J. Geometric computation and optimization on tolerance dimensioning. **Computer-aided Design**, v. 46, n. 1, p. 129 – 137, 2014.

ZILIO, T. M.; VIERO, C. F.; WALBER, M. GD&T - Aspectos relacionados ao desenvolvimento de produtos. **Revista CIATEC-UPF**, v. 6, n. 1, p. 1 – 12, 2014.

## **Anexos**



# ANEXO A – CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO DA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS

Figura 25 – Certificado de calibração - página 1

 <p>Mitutoyo Sul Americana Ltda.</p>	<p><b>LABORATÓRIO DE METROLOGIA</b></p> <p>REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO</p> <p><b>CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 04380/15</b></p>	
<p><b>Cliente : Universidade Federal da Paraíba - UFPB</b> Endereço : Cidade Universitária Campus I, s/n - CEP - 58059-900</p>		
<p>Ordem de Serviço : 041.329/001</p>		
<p><b>I. Objeto Calibrado :</b></p>		
<p>Máquina de Medição por Coordenadas Fabricante : Mitutoyo MMC Modelo : CRT-AS7106 No de Série : 65831223 / Código : KK191-000H-R6 Identif. do Cliente : 65831223 Faixa Nominal : 700 x 1000 x 600 mm Contador Digital / Controlador Modelo : UC400/A1 No Série : 22491407 Resolução : 0,0001 mm Cabeçote Modelo : PH-10MQ No Série : 295L82 Probe Modelo : SP25M No Série : 310A20 Rack Modelo : ACR3 No Série : 221690 Programa de Medição Programa : MCosmos Versão : 3.5R5 Dongle No. : 140414</p>		
<p><b>II. Notas:</b></p>		
<p>1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência <math>k</math>, o qual para uma distribuição <math>t</math> com <math>V_{eff}</math> graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.</p> <p>2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.</p> <p>3. Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.</p> <p>4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.</p> <p>5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PML-0030 revisão 3.</p> <p>6. Condição ambiental: Temperatura ambiente: ( 19,7 ± 0,5 )°C</p> <p>7. Endereço e local da calibração são os mesmos.</p>		
<p><b>III. Padrões utilizados :</b></p>		
<p>Padrão Escalonado No Série : 0500040 Certificado No : 01599/15 Emitido em : 23/02/2015 Validade : 08/2015</p>	<p>Termômetro No Série : T1F006 Certificado No : LV32660-14 Emitido em : 24/09/2014 Validade : 09/2016</p>	<p>Esfera Padrão No Série : N1801 Certificado No : 07802/14 Emitido em : 02/07/2014 Validade : 07/2016</p>
<p>Data da Calibração : 20 de Março de 2015 Data da Emissão : 29 de Abril de 2015</p>	<p> Carlos Kazuo Suetake Chefe Laboratório de Metrologia</p>	
<p>Pag.: 1 / 4</p>		
<p><small>Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI). A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo. Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.</small></p>		
<p><small>*Escritório Central: Av. João Carlos da Silva Borges, 1240 - Santo Amaro - CEP 04726-002 - São Paulo - SP - Tronco Chave: (11) 5643-0000 - Fax: (11) 5641-3722 *Fábrica: Rod. Indio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raíto - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br</small></p>		

Figura 26 – Certificado de calibração - página 2

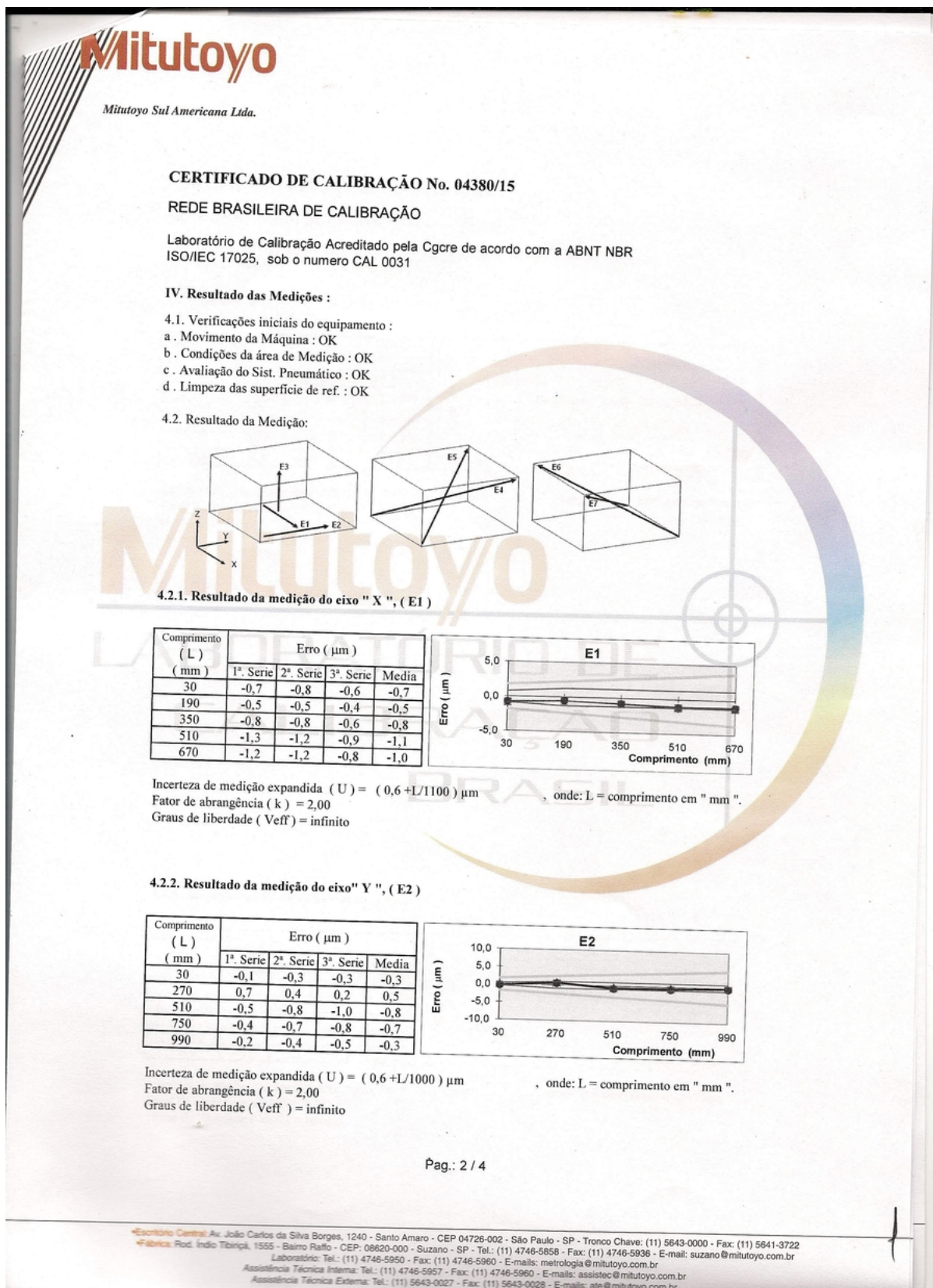


Figura 27 – Certificado de calibração - página 3

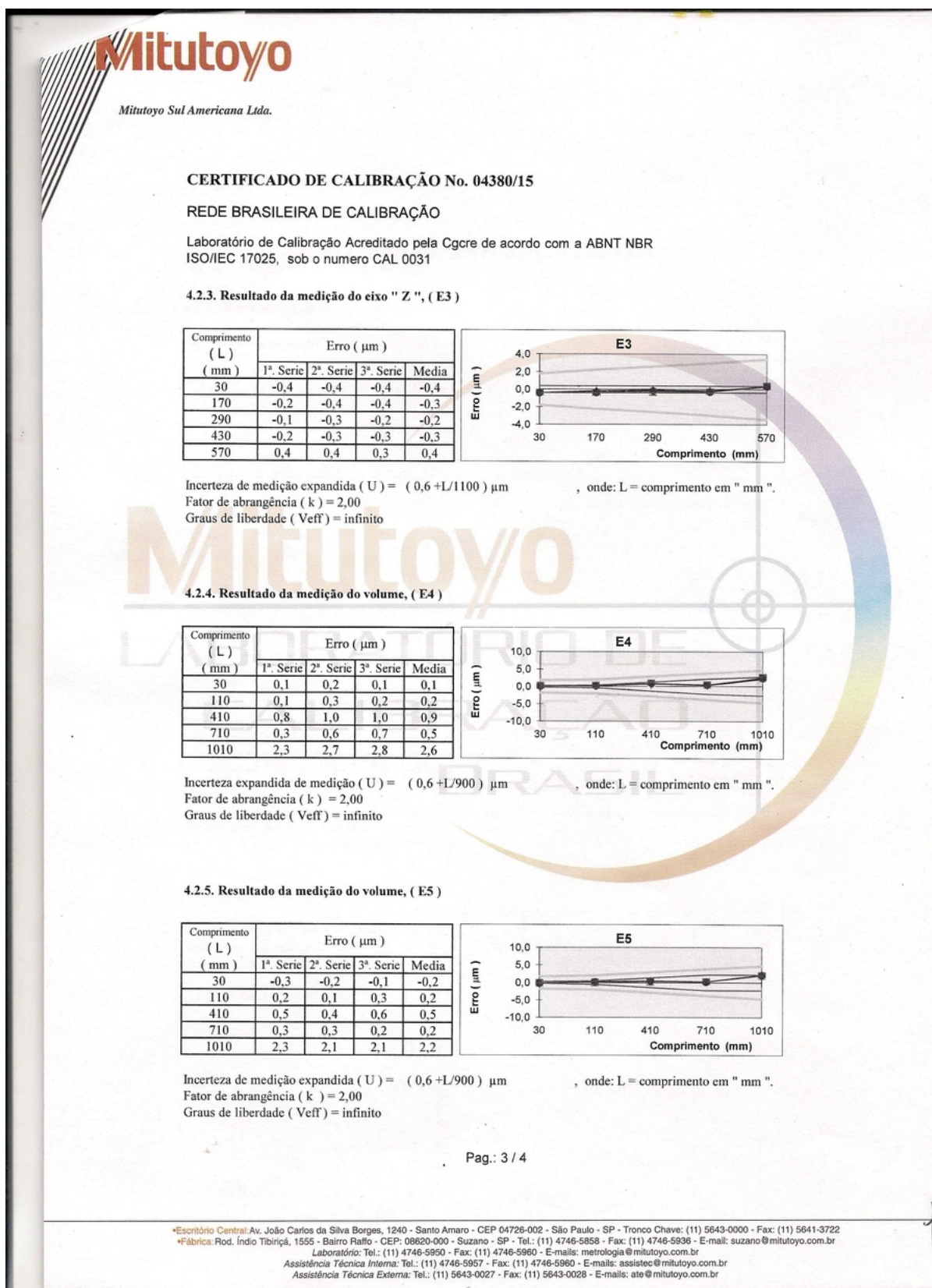


Figura 28 – Certificado de calibração - página 4

