



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA  
CENTRO DE TECNOLOGIA  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

SÓSTENYS HENRIQUE DE OLIVEIRA SANTOS

**APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE GD&T EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR  
COORDENADAS**

JOÃO PESSOA  
2025

SÓSTENYS HENRIQUE DE OLIVEIRA SANTOS

**APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE GD&T EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO  
POR COORDENADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso  
apresentado à banca examinadora do  
Departamento de Engenharia Mecânica da  
Universidade Federal da Paraíba como parte  
das exigências à obtenção do título de Bacharel  
em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco de  
Aquino Silva

JOÃO PESSOA

2025

**Catálogo na publicação**  
**Seção de Catalogação e Classificação**

S237a Santos, Sóstenys Henrique de Oliveira.  
Aplicações de Técnicas de GD&T em Máquinas de  
Medição por Coordenadas / Sóstenys Henrique de Oliveira  
Santos. - João Pessoa, 2025.  
68 f. : il.

Orientação: João Bosco de Aquino Silva.  
TCC (Graduação) - UFPB/CT.

1. Toleranciamento Geométrico. 2. GD&T. 3. Máquinas  
de Medição por Coordenadas. 4. Exatidão. 5. ASME Y14.5.  
I. Silva, João Bosco de Aquino. II. Título.

UFPB/CT/BSCT

CDU 621(043.2)

**SÓSTENYS HENRIQUE DE OLIVEIRA SANTOS**

**APLICAÇÕES DE TÉCNICAS DE GD&T EM MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR  
COORDENADAS**

Trabalho de Conclusão de Curso – T.C.C , apresentado pelo acadêmico, SÓSTENYS HENRIQUE DE OLIVEIRA SANTOS, do Curso de Bacharelado em Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba – UFPB – Campus I – tendo obtido o conceito Aprovado, conforme a apreciação da Banca Examinadora:

Julgado em: 30/04/2025

**BANCA EXAMINADORA**

João Bosco de Aquino Silva

Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva

Universidade Federal da Paraíba

Orientador

José Carlos de Lima Junior

Prof. Dr. José Carlos de Lima Junior

Universidade Federal da Paraíba

Convidado

Koje Daniel V. Vasconcelos Mishina

Prof. Dr. Koji Daniel Vasconcelos Mishina

Universidade Federal da Paraíba

Convidado

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, que me ajudou e capacitou durante toda a minha jornada acadêmica.

Aos meus pais que sempre me ensinaram o caminho certo a se seguir para eu me tornar o que sou hoje.

A minha namorada, Erika Kaylane, por sempre acreditar em mim em todos os momentos e sempre ter uma palavra de incentivo nas horas que mais precisei.

Minha irmã e meu cunhado por todo suporte e palavras de incentivo.

Ao professor João Bosco de Aquino Silva meu orientador e excelente professor que me ajudou e esteve sempre de prontidão em todos os momentos.

Aos professores José Carlos de Lima Júnior, Koje Daniel Vasconcelos Mishina e integrantes do Laboratório de Engenharia de Precisão que me suportaram e fizeram se tornar possível a conclusão deste trabalho.

## RESUMO

Com a evolução dos processos de fabricação e produção em série, surgiu a demanda de aprimorar os métodos de medição, alinhado a isso, a metrologia desenvolvida no contexto da Indústria 4.0 motivou a necessidade de automatizar para manter a empresa em competição com as líderes de mercado mundial. Com isso, se sobressai o GD&T (Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico) que é um requisito essencial na padronização do projeto e associação funcional dos componentes projetados, fornecendo os recursos necessários para engenheiros e projetistas comunicarem sua real intenção e definirem tolerâncias e a relação geométrica das peças de forma inequívoca (TORNINCASA, 2024). Durante este processo, a utilização de uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), se destaca como uma ferramenta poderosa permitindo um aumento da exatidão das medições. O presente trabalho apresenta os fundamentos básicos da técnica GD&T e avalia a eficácia da sua aplicação no controle dimensional de uma peça usinada utilizando uma MMC.

**Palavras-chave:** Toleranciamento Geométrico. GD&T. Máquinas de Medição por Coordenadas. Exatidão. ASME Y14.5.

## ABSTRACT

With the evolution of manufacturing processes and serial production, there arose a demand to improve measurement methods. Moreover, metrology developed in the context of Industry 4.0 has driven the need for automation to keep companies competitive with world market leaders. Additionally, GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing) stands out as an essential requirement for standardizing the design and functional association of the projected components, providing engineers and designers with the necessary tools to communicate their real intent and define tolerances and the geometric relationships of parts unambiguous (TORNINCASA, 2024). During this process, the use of a Coordinate Measuring Machine (CMM) emerges as a powerful tool, enabling increased measurement accuracy. This work presents the basic principles of GD&T techniques and evaluates the effectiveness of their application in the dimensional control of a machined part using a CMM.

**Keywords:** Geometric Tolerancing. GD&T. Coordinate Measuring Machine. Accuracy. ASME Y14.5.

## LISTA DE FIGURAS

|                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Evolução das normas ISO e ASME .....                                                  | 11 |
| Figura 2– Zona de tolerância cilíndrica.....                                                     | 13 |
| Figura 3 – Princípio do envelope.....                                                            | 15 |
| Figura 4 - Aplicação Zona de Tolerância .....                                                    | 16 |
| Figura 5 - Datums .....                                                                          | 17 |
| Figura 6– Dimensão Básica .....                                                                  | 17 |
| Figura 7 - Símbolos de tolerâncias geométricas .....                                             | 18 |
| Figura 8– Símbolos dos modificadores.....                                                        | 18 |
| Figura 9 - Quadro de controle .....                                                              | 19 |
| Figura 10– Especificação da retitude em superfícies planas .....                                 | 20 |
| Figura 11– Especificação da retitude em superfícies cilíndricas .....                            | 20 |
| Figura 12– Especificação da retitude da linha mediana derivada.....                              | 21 |
| Figura 13– Especificação da planeza em uma superfície .....                                      | 21 |
| Figura 14– Especificação da circularidade em uma superfície.....                                 | 22 |
| Figura 15– Especificação da cilindricidade em uma superfície.....                                | 22 |
| Figura 16– Especificação do paralelismo em uma superfície.....                                   | 23 |
| Figura 17– Especificação da perpendicularidade em uma superfície .....                           | 24 |
| Figura 18– Especificação da angularidade em uma superfície .....                                 | 25 |
| Figura 19– Especificação da angularidade em um eixo com duas referências de datum .....          | 25 |
| Figura 20– Especificação da tolerância de posição no RFS .....                                   | 26 |
| Figura 21– Condição virtual para furos .....                                                     | 27 |
| Figura 22 – Zona de tolerância de posição na condição de MMC.....                                | 28 |
| Figura 23Aumento na zona de tolerância (Tolerância bônus) .....                                  | 28 |
| Figura 24– Especificação da tolerância de posição no LMC.....                                    | 29 |
| Figura 25– Especificação do perfil de superfície com diferentes tipos de zonas de tolerância.... | 30 |
| Figura 26– Especificação do perfil de linha .....                                                | 31 |
| Figura 27– Especificação da tolerância de batimento circular em superfície cilíndrica.....       | 32 |
| Figura 28– Especificação da tolerância de batimento circular em superfície plana .....           | 32 |
| Figura 29– Especificação da tolerância de batimento total em superfície cilíndrica.....          | 33 |
| Figura 30– Especificação da tolerância de batimento total em superfície plana .....              | 34 |
| Figura 31– Sequência de funcionamento de uma MMC .....                                           | 38 |
| Figura 32– Configuração da MMC.....                                                              | 38 |
| Figura 33– MMCs mais usuais .....                                                                | 39 |
| Figura 34– Cabeçote motorizado com sensor por contato.....                                       | 40 |
| Figura 35– Sensor a laser .....                                                                  | 41 |
| Figura 36– Sensor óptico .....                                                                   | 41 |
| Figura 37 – Gráfico entre medições tradicionais vs. MMC .....                                    | 42 |
| Figura 38– CRYSTA-Apex S7106 do LEP .....                                                        | 44 |
| Figura 39– Descrição MMC .....                                                                   | 45 |
| Figura 40– Sonda motorizada utilizada .....                                                      | 45 |
| Figura 41– GEOPAK.....                                                                           | 46 |
| Figura 42– Peça utilizada nas medições .....                                                     | 47 |
| Figura 43– Autodesk Inventor .....                                                               | 48 |
| Figura 44- Sequência de medição dos elementos .....                                              | 48 |
| Figura 45– Origem e planos da peça analisada.....                                                | 49 |
| Figura 46– Medição da peça .....                                                                 | 50 |
| Figura 47– Furos analisados na peça .....                                                        | 50 |
| Figura 48– Visualização dos elementos.....                                                       | 51 |
| Figura 49– Desenho técnico do projeto .....                                                      | 52 |
| Figura 50 - Dimensões reais da peça .....                                                        | 54 |

## SUMÁRIO

|          |                                                                                               |           |
|----------|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>INTRODUÇÃO</b>                                                                             | <b>8</b>  |
| 1.1      | OBJETIVO GERAL                                                                                | 8         |
| 1.2      | OBJETIVOS ESPECÍFICOS                                                                         | 8         |
| 1.3      | JUSTIFICATIVA                                                                                 | 8         |
| <b>2</b> | <b>FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b>                                                                  | <b>10</b> |
| 2.1      | DIMENSIONAMENTO E TOLERÂNCIAS GEOMÉTRICAS (GD&T)                                              | 10        |
| 2.1.1    | Evolução histórica das normas padrão ISO e ASME                                               | 10        |
| 2.1.2    | Definição e importância para engenharia                                                       | 12        |
| 2.1.3    | Princípios básicos do GD&T                                                                    | 14        |
| 2.1.3.1  | Regras                                                                                        | 14        |
| 2.1.3.2  | Zonas de Tolerância                                                                           | 15        |
| 2.1.3.3  | Datums                                                                                        | 16        |
| 2.1.3.4  | Dimensão Básica                                                                               | 17        |
| 2.1.3.5  | Simbologia Padronizada e Modificadores                                                        | 18        |
| 2.1.4    | Tipos de Tolerâncias conforme ASME Y14.5:2018                                                 | 19        |
| 2.1.4.1  | Tolerâncias de Forma                                                                          | 19        |
| 2.1.4.2  | Tolerâncias de Orientação                                                                     | 23        |
| 2.1.4.3  | Tolerâncias de Posição                                                                        | 26        |
| 2.1.4.4  | Tolerâncias de Perfil                                                                         | 29        |
| 2.1.4.5  | Tolerâncias de Batimento                                                                      | 31        |
| 2.1.5    | Recentes Pesquisas Desenvolvidas na temática GD&T                                             | 34        |
| 2.2      | MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS (MMC)                                                     | 37        |
| 2.2.1    | Definição e funcionamento                                                                     | 37        |
| 2.2.2    | Principais Tipos                                                                              | 39        |
| 2.2.3    | Sistemas de sondas (Probes)                                                                   | 39        |
| 2.2.4    | Benefícios das MMCs                                                                           | 41        |
| <b>3</b> | <b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>                                                                    | <b>44</b> |
| 3.1      | MATERIAIS                                                                                     | 44        |
| 3.1.1    | MMC utilizada - CRYSTA-Apex S7106                                                             | 44        |
| 3.1.1.1  | Sonda utilizada na MMC                                                                        | 45        |
| 3.1.1.2  | Software da MMC                                                                               | 46        |
| 3.1.2    | Peça utilizada                                                                                | 46        |
| 3.1.3    | Software CAD/CAE                                                                              | 47        |
| 3.2      | MÉTODO                                                                                        | 48        |
| <b>4</b> | <b>RESULTADOS</b>                                                                             | <b>54</b> |
| 4.1      | AValiação da Tolerância Dimensional                                                           | 54        |
| 4.2      | AValiação da Tolerância de Planicidade                                                        | 55        |
| 4.3      | AValiação da Tolerância de Circularidade                                                      | 56        |
| 4.4      | AValiação da Tolerância de Posição                                                            | 57        |
| <b>5</b> | <b>CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</b>                                           | <b>61</b> |
| <b>6</b> | <b>REFERÊNCIAS</b>                                                                            | <b>63</b> |
|          | <b>ANEXOS</b>                                                                                 | <b>66</b> |
|          | ANEXO A – ARQUIVO DE RESULTADOS EXPORTADO PELO SOFTWARE DA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS | 66        |

## **1 INTRODUÇÃO**

Desde a construção de estruturas antigas até a fabricação moderna é notório que a metrologia é fundamental para a padronização de componentes e o controle de qualidade em diversas áreas da engenharia. Com o crescimento da família das máquinas-ferramenta controladas numericamente, surgiram as Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC) para auxiliar os processos de usinagem automatizados, a fim de suprir a necessidade de medições mais rápidas e flexíveis. Essas máquinas são essenciais, para garantir a exatidão e precisão nas medições complexas, especialmente nos dias atuais, pelo fato do avanço da tecnologia e a globalização dos mercados (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

Nesse contexto, o dimensionamento e toleranciamento geométrico (GD&T) surge como uma ferramenta poderosa para superar as limitações dos métodos tradicionais de toleranciamento, permitindo um controle mais rigoroso sobre a forma, orientação, posição e perfil das peças. Este trabalho visa explorar a aplicação de técnicas de GD&T em peças utilizando uma Máquina de Medição por Coordenadas (MMC), com o objetivo de avaliar a eficácia dessas técnicas na garantia da qualidade e funcionalidade dos componentes fabricados.

### **1.1 Objetivo geral**

Este trabalho tem por objetivo fazer um estudo e avaliar a eficácia da aplicação de técnicas de GD&T em peças usinadas utilizando Máquinas de Medição por Coordenadas.

### **1.2 Objetivos Específicos**

- Fazer um estudo dos fundamentos teóricos da técnica de Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico (GD&T)
- Princípios de funcionamento e aplicação de Máquinas de Medição por Coordenadas
- Identificar as principais tolerâncias geométricas aplicáveis à peça escolhida para análise no presente trabalho.
- Estudar os princípios de operação de uma MMC para avaliar essas tolerâncias.

### **1.3 Justificativa**

No contexto atual da manufatura extrativa ou aditiva as peças produzidas tanto podem apresentar geometrias simples quanto complexas. No entanto, a qualidade e a exatidão dessas peças dependem das condições de fabricação e materiais utilizados. A aplicação de técnicas de GD&T permite que tanto o processo de fabricação quanto a peça em si sejam avaliados

minuciosamente. Adicionalmente, o auxílio de uma MMC permite uma medição com exatidão e produtividade, por se tratar de uma máquina de alta exatidão, eficiente e a possibilidade da automatização da medição dessas peças. O presente trabalho explora os conceitos e fundamentos básicos de GD&T e MMC, além de analisar alguns dados de medições feitos em uma peça usinada.

## **2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **2.1 Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico (GD&T)**

O desenho de engenharia é um documento que fornece a descrição de uma peça, na qual são especificados os requisitos de engenharia. Nesses desenhos, a comunicação eficaz do projetista é crucial para garantir que a peça fabricada atenda a todas as necessidades e desempenhe sua função corretamente na montagem final.

De acordo com Hocken e Pereira (2012), em um desenho técnico, cada característica da peça é representada por parâmetros numéricos, como comprimento, diâmetro e altura, sendo o valor nominal a referência ideal para sua fabricação, no entanto, as peças nunca são idênticas ao modelo ideal, exigindo a definição de tolerâncias para estabelecer limites aceitáveis de variação durante a fabricação. O método mais comum para isso é a tolerância dimensional, na qual se define um intervalo, determinando os limites máximo e mínimo para a dimensão da peça.

Entretanto, a documentação técnica de produtos que atualmente é elaborada em muitas empresas ainda apresenta ambiguidades e erros, como referências incorretas resultantes de pequenas variações na forma das peças e interpretações divergentes no processo de inspeção. Esse método tradicional de especificação já não atende de forma eficaz às demandas da produção global moderna, na qual as empresas, por razões estratégicas e de mercado, dependem de fornecedores e fabricantes em diferentes países. Diante desse cenário, torna-se essencial adotar sistemas padronizados de comunicação técnica, garantindo que as informações sejam transferidas de maneira clara e uniforme ao longo da cadeia produtiva (TORNINCASA, 2024).

Uma solução para contornar essas ambiguidades é o uso do GD&T (Geometric Dimensioning and Tolerancing), ou dimensionamento e toleranciamento geométrico. Ao contrário do toleranciamento tradicional, que se baseia apenas em limites dimensionais, o GD&T considera elementos como forma, orientação, posição e perfil da peça, isso permite um controle mais rigoroso sobre a funcionalidade e o desempenho dos componentes (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

#### **2.1.1 Evolução histórica das normas padrão ISO e ASME**

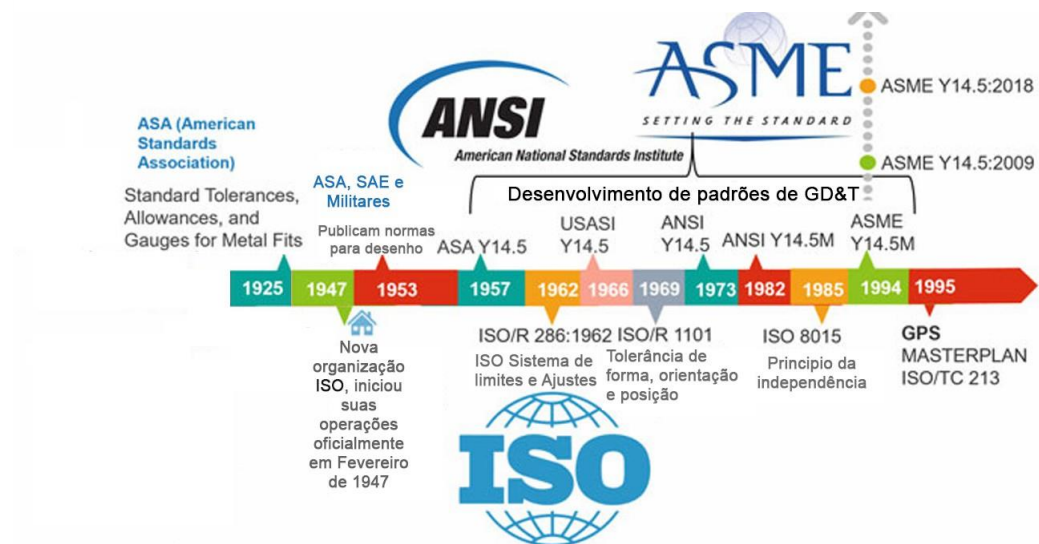
Existem dois grandes padrões de tolerâncias geométricas utilizados no mundo, o padrão ASME (American Society of Mechanical Engineers), e o padrão é o ISO (International Organization for Standardization). Eles surgiram com a demanda de avanço tecnológico na área e foram evoluindo ao longo dos anos. Até o início da Revolução Industrial, a produção era artesanal e baseada na experiência dos artesãos, com a introdução da linha de montagem e tarefas especializadas, surgiu a necessidade de métodos de padronização e controle dimensional (KRULIKOWSKI, 2012).

Para melhorar a qualidade dos desenhos, foi publicado, nos Estados Unidos, o primeiro padrão de limites e ajustes, sendo esse o American Tentative Standard Tolerances, Allowances, and Gages for Metal Fits, B4a-1925, que continha tabelas que listavam oito séries de ajustes entre furos e eixos, cada ajuste sendo especificado pelos limites de tamanho de cada uma das peças acopladas (TORNINCASA, 2024).

O surgimento desse sistema de tolerância foi um bom começo, mas suas deficiências ficaram evidentes com o início da Segunda Guerra Mundial. Na Grã-Bretanha, a produção de guerra sofreu com altas taxas de sucata, pois peças não montavam corretamente. Os britânicos, então, concluíram que isso foi causado pela insuficiência do sistema de tolerância e, mais criticamente, pela falta de informações nos desenhos de engenharia (KRULIKOWSKI, 2012).

De acordo com Krulikowski (2012), durante a Segunda Guerra Mundial, o engenheiro Stanley Parker, da fábrica real de torpedos em Alexandria, Escócia, desenvolveu um método de toleranciamento posicional utilizando zonas cilíndricas em vez de quadradas, permitindo maior exatidão na montagem de peças. A partir desse conceito, em 1944, os britânicos começaram a publicação de uma série de normas de desenho pioneiras e abrangentes que utilizavam conceitos fundamentais de tolerância de posição verdadeira. A Figura 1 apresenta a evolução das normas ISO e ASME.

**Figura 1 - Evolução das normas ISO e ASME**



**Fonte: Adaptado de Tornincasa (2024).**

No decorrer dos anos, os Estados Unidos, enfrentaram inconsistências na padronização de desenhos técnicos devido à existência de três grupos distintos publicando normas: a ASA (American Standards Association), a SAE (Society of Automotive Engineers) e os padrões militares. Esse cenário resultou em debates prolongados até que, em 1957, a ASA, que posteriormente se tornaria ANSI (American National Standards Institute), em parceria com britânicos e canadenses, aprovou o primeiro padrão americano, Y14.5, voltado ao

dimensionamento e tolerância (KRULIKOWSKI, 2012).

Revisões subsequentes do padrão Y14.5 foram publicadas como USASI (Y14.5:1966) e ANSI (Y14.5:1973 e Y14.5:1982). Posteriormente, a revisão ASME Y14.5M:1994 ("M" indicando a inclusão de unidades métricas) foi aprovada como um padrão ASME. Quinze anos depois, foi lançada a versão ASME Y14.5:2009. A versão atual, ASME Y14.5:2018, foi lançada em fevereiro de 2019. Cada versão teve como objetivo corrigir inconsistências das edições anteriores, trabalho realizado por comitês de voluntários da academia e da indústria (TORNINCASA, 2024).

Ainda conforme descreve Tornincasa (2024), após a segunda guerra mundial, a necessidade de padronização industrial levou à criação do "United Nations Standards Coordinating Committee"(UNSCC) pelos Estados Unidos, Grã-Bretanha e Canadá, com o objetivo de harmonizar normas e apoiar a reconstrução global. Em 1946, delegados da "International Standards Association"(ISA) e do UNSCC, representando 25 países, reuniram-se em Londres e fundaram a Organização Internacional para Padronização (ISO), que iniciou suas operações oficialmente em 1947, com sede em Genebra, Suíça.

Desde então, a ISO tem desenvolvido padrões fundamentais para as tolerâncias geométricas, incluindo a ISO 1101 (1969), que define tolerâncias de forma e posição, e a ISO 8015 (1985), que estabelece o princípio da independência. Na década de 1990, a comunidade técnico-científica identificou vazios e contradições nos padrões de GD&T, o que estimulou a criação da Geometric Product Specification (GPS) em 1995, para a especificação geométrica de produtos (TORNINCASA, 2024).

### **2.1.2 Definição e importância para engenharia**

Conforme define Krulikowski (2012), o GD&T é uma linguagem simbólica de comunicação em desenhos de engenharia e modelos CAD (Computer Aided Design) para especificar a geometria das peças e as variações permitidas. Sendo uma ferramenta de design, é composta por um conjunto bem definido de símbolos, regras, definições e convenções, usando uma abordagem matemática para determinar o tamanho, a forma, a orientação e a localização das características das peças. Uma peça definida com GD&T pode refletir as condições de função e montagem da peça, assegurando interpretação consistente, funcionamento adequado e fabricação eficiente.

Com isso, é notório os benefícios e importância do GD&T na Indústria. Há uma enorme redução de erros de interpretação, pois a linguagem em si, evita ambiguidades na comunicação técnica. Assim, permite que diferentes fabricantes sigam os mesmos critérios de produção, viabilizando a intercambiabilidade global de peças mesmo que sejam fabricadas em outros lugares

do mundo.

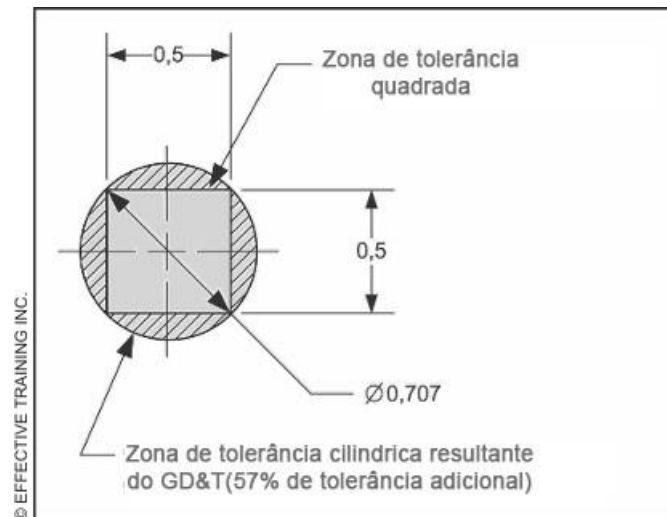
O uso do GD&T pode melhorar a qualidade do projeto dos produtos, pois fornece aos projetistas maneiras para comunicar a sua verdadeira intenção.

Sendo assim, é aplicável tecnologias de manufatura digital como o Model Based Development (MBD) que consiste em concentrar em um só arquivo digital todas as informações necessárias para que o produto seja gerado e que será utilizado ao longo de todo o ciclo de vida deste produto, logo, toda a especificação gerada com o GD&T deve estar indicada sobre o modelo CAD 3D (SOUSA; WANDECK, 2011).

Isso facilita grandemente o gerenciamento das informações, a atualização destas e minimiza erros de comunicação, eliminando a necessidade dos desenhos em 2D e suas representações de vistas.

Outro benefício é o melhor controle das peças com aumento da zona de tolerância para produção, o que assegura que os componentes se encaixem corretamente em montagens complexas, minimizando os desperdícios e, conseqüentemente, os custos (KRULIKOWSKI, 2012).

**Figura 2– Zona de tolerância cilíndrica**



**Fonte: Adaptado de Krulikowski (2012).**

A Figura 2 mostra a zona de tolerância cilíndrica, na qual, sob certas condições, o GD&T proporciona 57% a mais de tolerância para a fabricação.

Somado a isso, o GD&T permite otimizar os processos de inspeção na metrologia industrial, viabilizando o uso de Máquinas de Medição por Coordenadas (MMCs) para o controle automatizado dos processos. Com a implementação do GD&T nos softwares dessas máquinas, a análise torna-se muito mais rápida e eficiente.

### 2.1.3 Princípios básicos do GD&T

As tolerâncias geométricas possuem um conjunto de princípios básicos que garantem sua eficiência. Porém os padrões ASME GD&T e ISO GPS seguem abordagens distintas.

Assim como explica Tornincasa (2024), o ASME GD&T se baseia em regras fixas e interpretação direta, sendo mais intuitivo e reconhecido na indústria, enquanto o ISO GPS oferece maior flexibilidade, porém exigindo um conhecimento mais aprofundado para definição completa de uma tolerância. Na interpretação das regras fundamentais, o ASME define a Regra #1 (Princípio do Envelope), enquanto o ISO GPS aplica o Princípio da Independência, permitindo variações na forma sem comprometer a funcionalidade.

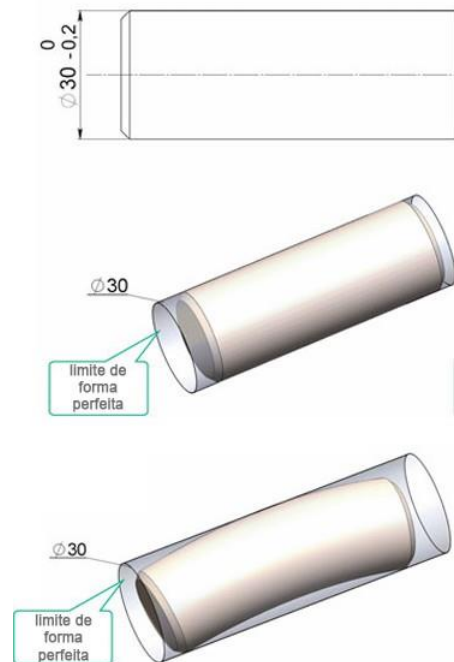
Assim, o ASME GD&T é mais adequado para inspeções rápidas e aplicações industriais convencionais, enquanto o ISO GPS atende melhor setores que exigem alta precisão estatística e peças altamente personalizadas. Nesse trabalho terá foco no padrão ASME GD&T.

#### 2.1.3.1 Regras

O padrão ASME estruturou o Princípio do Envelope, também conhecido como Princípio de Taylor, como a Regra #1 do GD&T. Esse princípio determina que a dimensão de uma peça deve respeitar um envelope de forma perfeita (Actual Mating Envelope, AME). O AME representa o menor cilindro perfeito que pode circunscrever um eixo ou o maior cilindro perfeito que pode inscrever um furo, garantindo que a peça permaneça dentro dos limites especificados.

Essa regra estabelece limites para variação de forma de uma característica, por seus limites de dimensão. Primeiramente, nenhum elemento de uma característica deve se estender além da condição máxima de material (Maximum Material Condition, MMC), sendo essa a condição em que uma característica contém a maior quantidade de material dentro dos limites especificados, é um limite de forma ideal geométrica representada nos desenhos (ASME Y14.5, 2018).

Segundo a ASME Y14.5 (2018), quando o tamanho real de uma característica se afasta do MMC em direção a condição de mínimo material (Least Material condition, LMC), que é a condição em que uma característica de tamanho contém a menor quantidade de material dentro dos limites de tamanho especificados, é permitida uma variação na forma igual ao valor desse afastamento.

**Figura 3 – Princípio do envelope**

**Fonte: Adaptado de Tornincasa (2024)**

A Figura 3 mostra que se a característica da peça não estiver no MMC, ela pode variar da forma verdadeira. Por outro lado, exige que no MMC, a peça mantenha sua forma perfeita.

Ainda segundo a ASME Y14.5 (2018), quando uma tolerância geométrica é especificada para aplicar no LMC, a forma perfeita no LMC é exigida, e não há requisito para forma perfeita no MMC. Isso pode ser necessário em peças que exigem encaixes precisos, mesmo quando fabricadas na menor condição de material permitida.

Uma exceção da regra #1 é quando se tem a utilização do princípio da independência, onde o limite máximo permissível não é estabelecido no MMC ou LMC e sim levando em consideração tolerância de forma, o símbolo de independência pode ser colocado na dimensão. Por outro lado, a regra #2 determina que quando nenhum símbolo modificador é estabelecido, a condição RFS (Regardless of feature size) é aplicada nas tolerâncias e a condição RMB (Regardless of material boundary) é aplicada aos datums. O RFS significa que a tolerância não muda e é independente da dimensão real da característica, já o RMB significa que o datum deve ser utilizado independentemente da variação de material da referência.

### **2.1.3.2 Zonas de Tolerância**

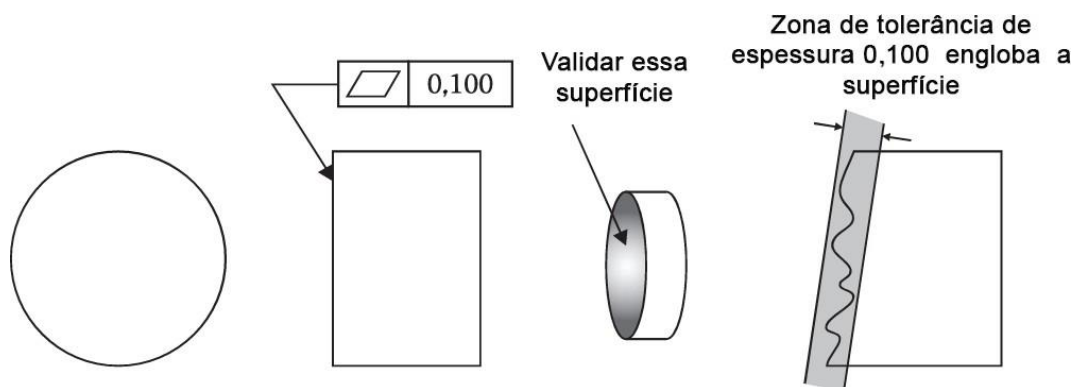
A ASME Y14.5 (2018) designa tolerância como a quantidade total pela qual uma dimensão ou característica pode variar. A tolerância é a diferença entre os limites máximo e mínimo

admissíveis.

Assim, a zona de tolerância é um conceito fundamental para o dimensionamento geométrico. Hocken e Pereira (2012) estabelece que, para avaliar uma característica real imperfeita da peça, é construída uma zona teórica no espaço; se a característica estiver contida nessa zona, ela satisfaz a especificação de tolerância.

A Figura 4 ilustra uma aplicação de uma zona de tolerância pela tolerância de planeza, discutida mais adiante. A zona possui geometria perfeita (o espaço entre dois planos teóricos, separados pelo valor da tolerância) e, assim, pode ser descrita por um único valor de tolerância.

**Figura 4 - Aplicação Zona de Tolerância**



**Fonte: Adaptado de Hocken e Pereira (2012).**

Nesse caso, o desenho especifica a "espessura" da zona, então se for possível orientá-la de forma que ela englobe toda a superfície indicada, a tolerância é atendida. A zona de tolerância de planeza não possui restrições de localização ou orientação, pois é independente de outras características.

Os conceitos de Datum e Dimensão básica são definidos e usados para localizar zonas de tolerância no espaço.

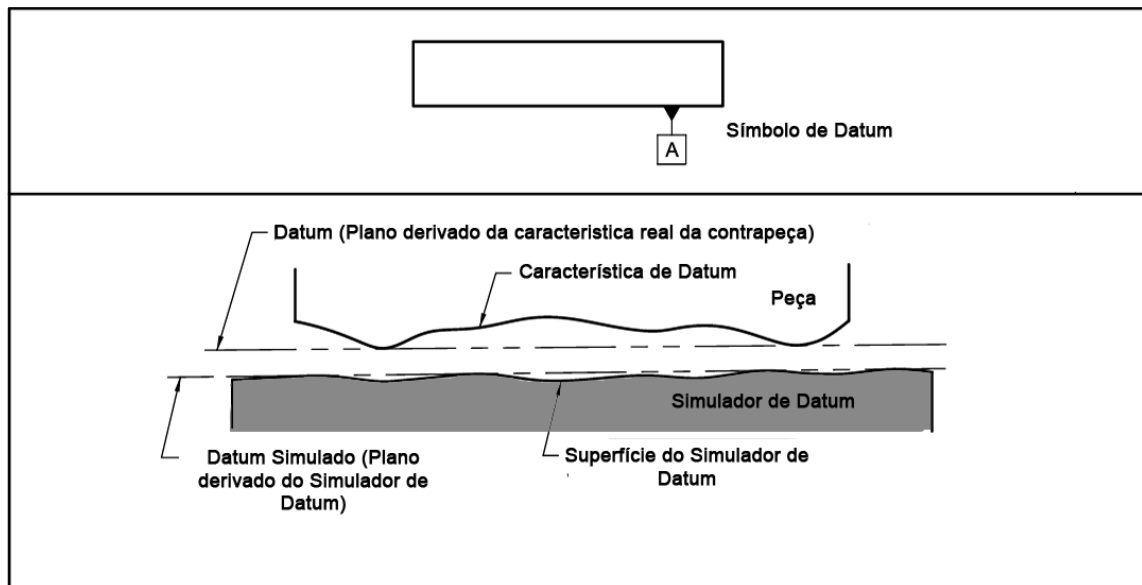
### 2.1.3.3 Datums

Para entender os datums é preciso definir três conceitos para não gerar confusão no entendimento. Primeiramente, a ASME Y14.5 (2018) define que datum (traduzido como: referência) como um ponto, eixo, linha, plano ou combinação dos mesmos teoricamente exatos, derivados da verdadeira contra peça geométrica.

Em contrapartida, o Simulador de datum é um artefato com grande exatidão, usado para simular uma característica perfeita. E por fim, característica de datum, que é a superfície real e imperfeita da peça, identificada com um símbolo de datum, para indicação no desenho. Esses três

conceitos podem ser melhor vistos na Figura 5.

**Figura 5 - Datums**



**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

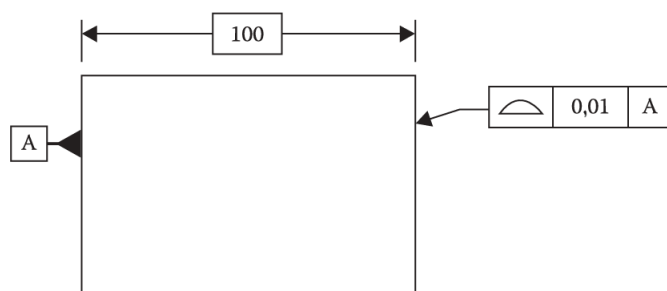
Os datums são elementos essenciais no GD&T, pois servem como pontos ou superfícies de referência para alinhar e medir peças, definindo como a peça deve ser posicionada.

Um aspecto importante do uso do datum é a capacidade de associar corretamente uma superfície de datum teórica perfeita a uma peça real imperfeita, estabelecendo um sistema de coordenadas. Cada vez que a peça é colocada no simulador de datum, ela terá a mesma posição de repouso, e as medições feitas na peça em relação ao datum terão o mesmo resultado (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

#### 2.1.3.4 Dimensão Básica

Dimensões básicas são usadas para descrever onde uma zona de tolerância está localizada, baseado no datum. A conformidade com a tolerância é então determinada pela contenção da característica na zona.

**Figura 6– Dimensão Básica**



**Fonte: Adaptado de Hocken e Pereira (2012).**

Conforme a Figura 6 mostra, a dimensão básica é indicada em um desenho com uma caixa ao redor do valor da dimensão, ou seja, ela aponta que a característica tendo o seu perfil controlado está a 100 mm da referência A.

### 2.1.3.5 Simbologia Padronizada e Modificadores

O GD&T Inclui uma série de símbolos utilizados para indicar tolerâncias e modificadores diretamente nos desenhos. Esses símbolos são apresentados na Figura 7 e na Figura 8.

Figura 7 - Símbolos de tolerâncias geométricas

| CARACTERÍSTICA | SÍMBOLO | CARACTERÍSTICA       | SÍMBOLO | CARACTERÍSTICA     | SÍMBOLO |
|----------------|---------|----------------------|---------|--------------------|---------|
| RETITUDE       | —       | PERFIL DE LINHA      |         | PARALELISMO        | //      |
| PLANEZA        |         | PERFIL DE SUPERFÍCIE |         | POSIÇÃO            |         |
| CIRCULARIDADE  |         | ANGULARIDADE         |         | BATIMENTO CIRCULAR |         |
| CILINDRICIDADE |         | PERPENDICULARIDADE   |         | BATIMENTO TOTAL    |         |

Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

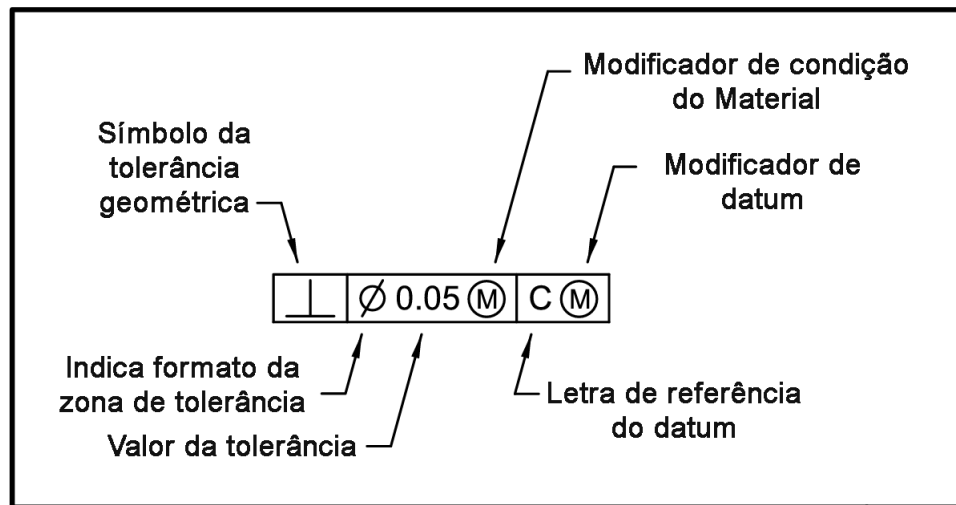
Figura 8– Símbolos dos modificadores

| TERMO                                                                                                                            | SÍMBOLO       | TERMO               | SÍMBOLO        |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------------|----------------|
| CONDIÇÃO DE MATERIAL MÁXIMO<br>(Quando aplicado para tolerância)<br>LIMITE DE MATERIAL MÁXIMO<br>(Quando aplicado para um datum) |               | DIÂMETRO ESFÉRICO   | $S\varnothing$ |
| CONDIÇÃO DE MATERIAL MÍNIMO<br>(Quando aplicado para tolerância)<br>LIMITE DE MATERIAL MÍNIMO<br>(Quando aplicado para um datum) |               | RAIO                | R              |
| TRANSLADAÇÃO                                                                                                                     |               | RAIO ESFÉRICO       | SR             |
| ZONA DE TOLERÂNCIA                                                                                                               |               | RAIO CONTROLADO     | CR             |
| ESTADO LIVRE                                                                                                                     |               | QUADRADO            |                |
| PLANO TANGENTE                                                                                                                   |               | REFERÊNCIA          | ( )            |
| PERFIL DISPOSTO DESIGUALMENTE                                                                                                    |               | COMPRIMENTO DO ARCO |                |
| INDEPENDÊNCIA                                                                                                                    |               | ORIGEM DA DIMENSÃO  |                |
| TOLERÂNCIA ESTATÍSTICA                                                                                                           |               | ENTRE               |                |
| ELEMENTO CONTÍNUO                                                                                                                |               | AO REDOR            |                |
| DIÂMETRO                                                                                                                         | $\varnothing$ | POR COMPLETO        |                |
|                                                                                                                                  |               | PERFIL DINÂMICO     |                |
|                                                                                                                                  |               | DE - PARA           |                |

Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

Os modificadores aparecem no quadro de controle logo após a tolerância geométrica ou logo após o datum, indicando a modificação correspondente. Isso pode ser observado na Figura 9.

Figura 9 - Quadro de controle



Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

#### 2.1.4 Tipos de Tolerâncias conforme ASME Y14.5:2018

O tipo de tolerância geométrica é indicado por meio de um símbolo de característica geométrica conforme mostra a Figura 7. A ASME Y14.5 (2018) secciona as tolerâncias em 5 tipos, são eles forma, orientação, posição, perfil e batimento. A descrição de cada um seguindo a norma está descrita abaixo.

##### 2.1.4.1 Tolerâncias de Forma

Quando as tolerâncias dimensionais não oferecem restrições suficientes para controle funcional e intercambiabilidade, a tolerância de forma é demandada. Isso pode acontecer nos casos em que não há uma tolerância dimensional definida, mas alguma característica compromete o desempenho do sistema. Nesses casos, é estabelecida uma zona dentro da qual essa característica deve ser controlada, se mantendo dentro dos limites da zona.

A especificação do controle da forma é estabelecida por meio de outras tolerâncias, como as dimensionais, descritas na Regra #1, e ilustrado na Figura 3. As tolerâncias de forma são aplicáveis a elementos individuais e, por isso, não estão relacionadas a datums.

A tolerância de forma é composta por retitude, planeza, circularidade e cilindridade e os tópicos abaixo abordam os detalhes dessas tolerâncias (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

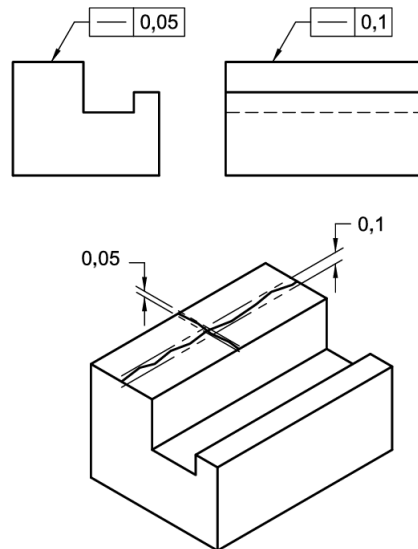
- **Retitude**

Garante que uma linha ao longo da superfície da peça ou ao longo da linha mediana derivada (linha de centro) não apresente desvios excessivos.

Em superfícies planas, cada elemento linear deve estar entre duas linhas paralelas separadas

pela tolerância especificada. Pode ser aplicada em uma ou várias direções e deve ser menor que a tolerância dimensional. O quadro de controle associado direcionando à superfície ou linha de extensão da superfície (ASME Y14.5, 2018).

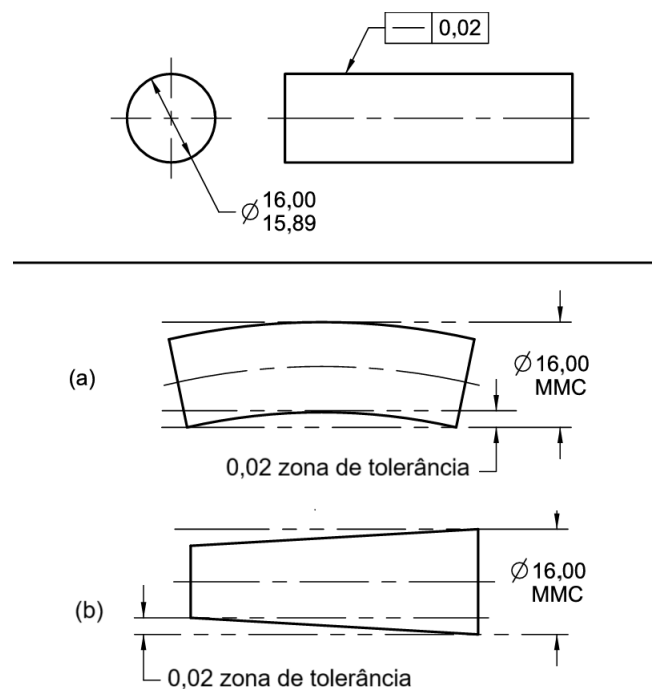
**Figura 10– Especificação da retitude em superfícies planas**



Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

Em Superfícies cilíndricas todos os elementos longitudinais da superfície devem estar dentro de duas linhas paralelas no eixo da peça. A tolerância de retitude deve ser menor que a tolerância dimensional e pode ser limitada por afunilamento ou arqueamento da superfície.

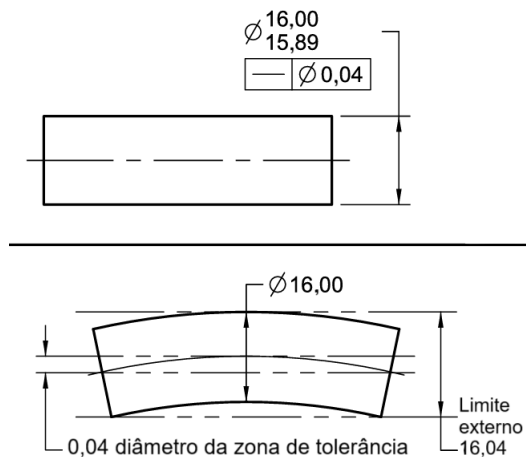
**Figura 11– Especificação da retitude em superfícies cilíndricas**



Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

Quando associada à dimensão e não a característica, a tolerância de retitude se aplica à linha mediana de uma característica cilíndrica. Se um símbolo de diâmetro ( $\varnothing$ ) estiver presente, a zona de tolerância será cilíndrica.

**Figura 12– Especificação da retitude da linha mediana derivada**

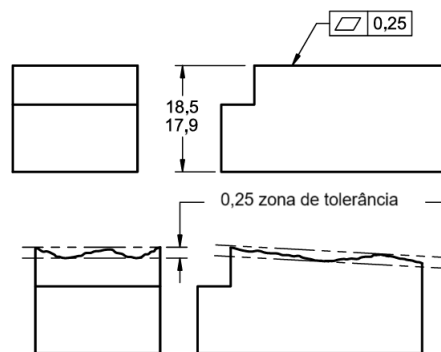


Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

- **Planeza**

Controla variações em superfícies planas, evitando ondulações. Essa tolerância define uma zona de tolerância entre dois planos paralelos, onde uma superfície ou plano mediano deve estar contido. Quando associada a uma dimensão de tamanho, a tolerância de planeza deve ser menor que a tolerância dimensional, exceto se o símbolo de "independência" for aplicado, permitindo maior variação da forma (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 13– Especificação da planeza em uma superfície**

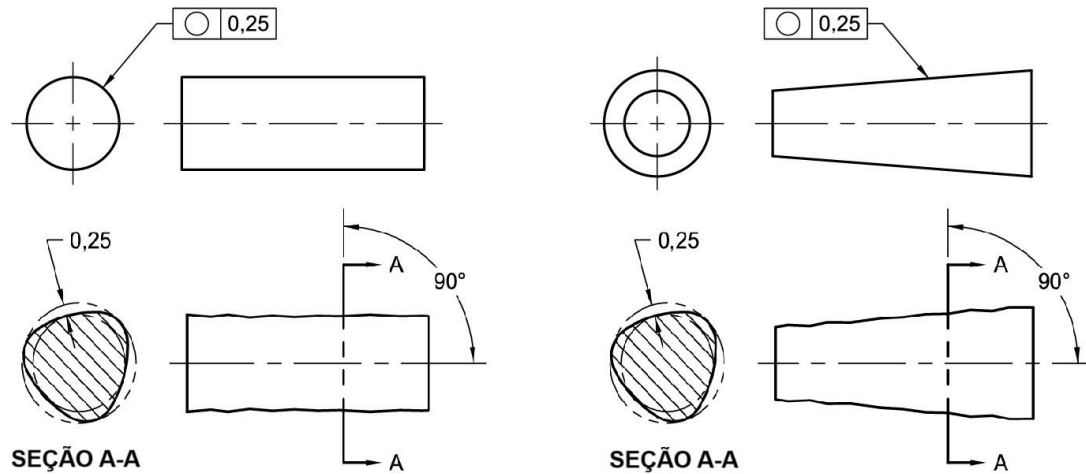


Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

- **Circularidade**

Define o quão próximo um círculo real deve estar de um círculo perfeito. Ela especifica uma zona de tolerância delimitada por dois círculos concêntricos, dentro da qual todos os elementos circulares da superfície devem estar contidos, o valor da tolerância é definido pela diferença entre os raios. Uma indicação de circularidade deve ser especificada em uma superfície e não em uma dimensão de tamanho como mostrado na Figura 14.

**Figura 14– Especificação da circularidade em uma superfície**



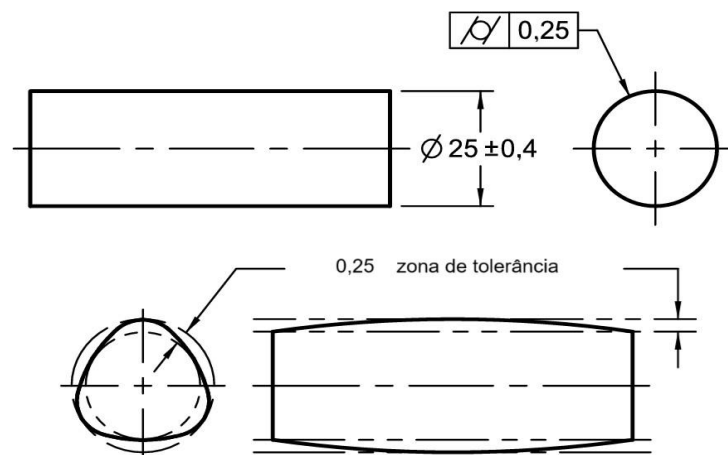
Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

A tolerância de circularidade deve ser menor que a tolerância dimensional de tamanho e outras tolerâncias geométricas que afetam a circularidade.

- **Cilindricidade**

A Cilindricidade controla a forma de um cilindro em toda a sua extensão. Similar a circularidade, a tolerância de cilindruidade define uma zona de tolerância entre dois cilindros concêntricos, dentro da qual toda a superfície deve estar contida. Porém, enquanto a circularidade controla apenas as seções transversais individuais, a cilindruidade controla toda a superfície do cilindro (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 15– Especificação da cilindruidade em uma superfície**



Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

### 2.1.4.2 Tolerâncias de Orientação

Essas tolerâncias determinam o alinhamento correto das superfícies em relação a um datum de referência e estabelece os princípios e métodos para definir ângulos, paralelismo e perpendicularidade das características de uma peça. Essas tolerâncias não controlam a localização da característica e podem influenciar a planeza da superfície (ASME Y14.5, 2018).

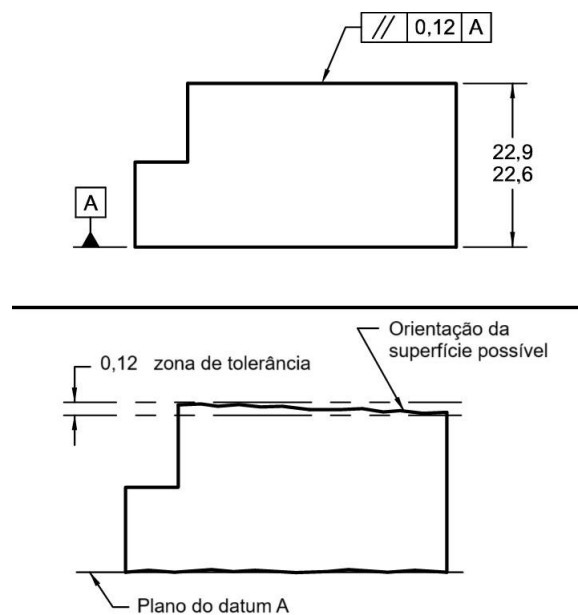
Ainda segundo a ASME Y14.5 (2018), a especificação de tolerâncias de orientação sempre é feita a um ou mais datums, restringindo graus de liberdade rotacionais, mas não restringe movimentos translacionais (Para controle de elementos radiais, deve-se utilizar tolerância de perfil). Caso um datum primário não seja suficiente, datums adicionais devem ser especificados (ASME Y14.5, 2018).

A definição da zona de tolerância é especificada em relação a um datum e é feita onde uma superfície, eixo ou plano central, da característica controlada, deve estar contido. Essa zona pode assumir três formas, a primeira delas sendo dois planos paralelos, que são orientados de forma paralela ou perpendicular em relação a um datum. Segunda consideração, uma zona cilíndrica dentro da qual um eixo deve permanecer. E por fim a forma de duas linhas paralelas posicionadas em relação a um datum, dentro das quais elementos lineares da superfície devem estar contidos (ASME Y14.5, 2018).

- **Paralelismo**

Controla a inclinação entre duas superfícies para que estejam o mais equidistantes possível.

**Figura 16– Especificação do paralelismo em uma superfície**



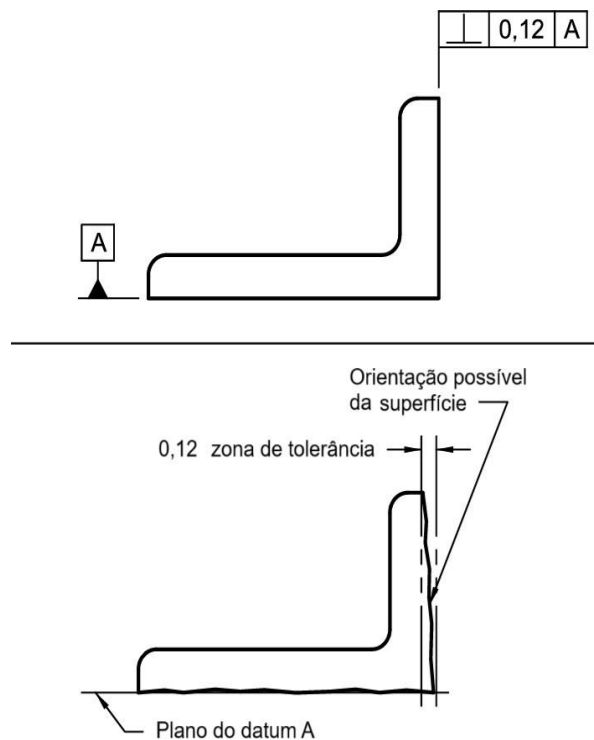
**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

A Figura 16 mostra uma aplicação, onde a superfície controlada precisa ficar entre dois planos paralelos, separados por uma distância de 0,12 mm, que são paralelos ao plano de referência do datum A (ASME Y14.5, 2018).

- **Perpendicularidade**

Controla uma superfície ou eixo para que ela esteja o mais próximo de 90° de outra referência.

**Figura 17– Especificação da perpendicularidade em uma superfície**



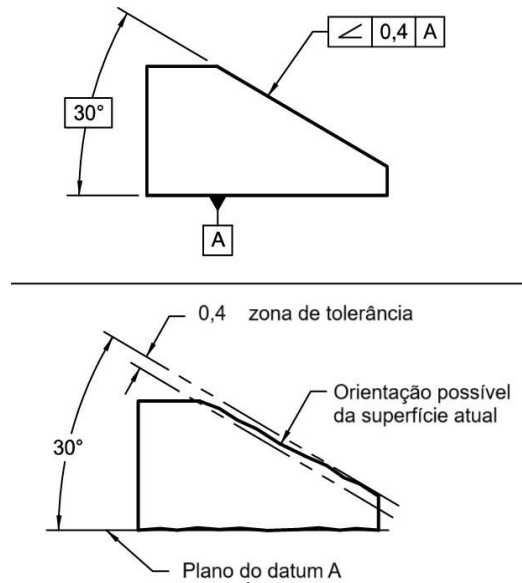
**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

Conforme Figura 17, a superfície controlada deve estar entre dois planos paralelos, distantes 0,12 mm, que estão localizados perpendicularmente ao plano do datum A.

- **Angularidade**

Controla o ângulo entre duas superfícies.

**Figura 18– Especificação da angularidade em uma superfície**

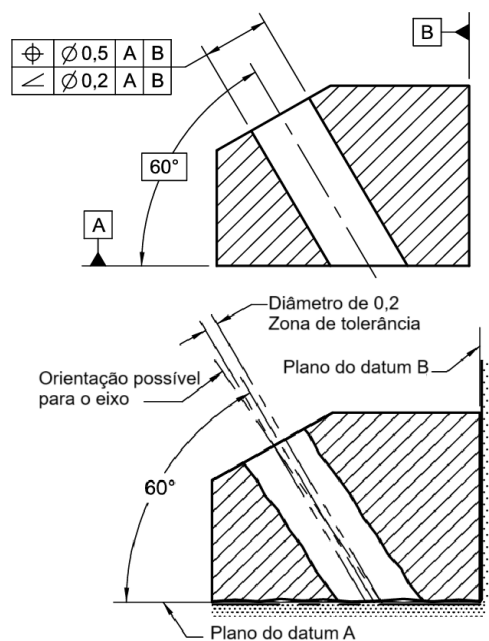


**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

Na aplicação da Figura 18 é visto que a superfície controlada deve estar contida entre dois planos paralelos, distantes 0,4 mm, que estão inclinados a 30° em relação ao plano de referência do datum A.

As características de orientação dependem dos dados de referência (datums) mencionados. Se apenas um datum for referenciado, ainda pode haver algum grau de liberdade. Para garantir a orientação correta do desenho, é possível referenciar datums adicionais que restrinjam completamente os graus de liberdade necessários (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 19– Especificação da angularidade em um eixo com duas referências de datum**



**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

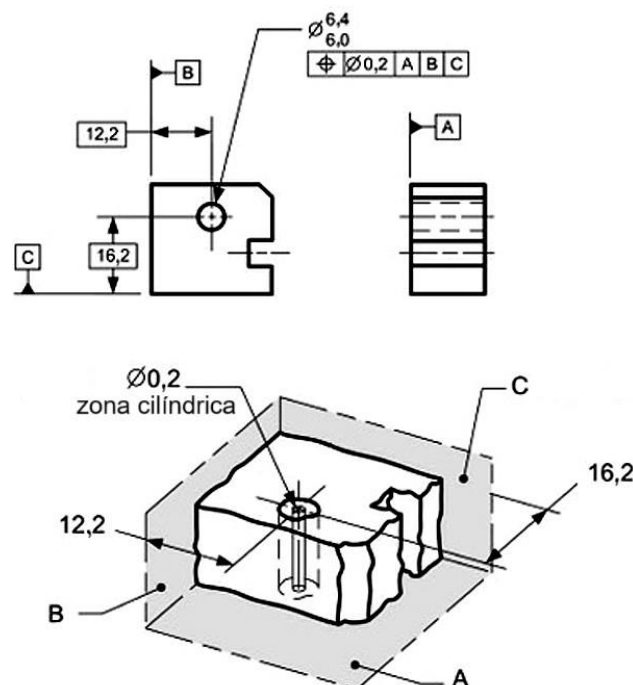
Na aplicação da Figura 19, o eixo da característica deve estar dentro de uma zona de tolerância cilíndrica de diâmetro 0,2, inclinada a 60° em relação ao plano de referência A. A característica de datum B é utilizada para restringir um grau de liberdade rotacional adicional do sistema.

#### 2.1.4.3 Tolerâncias de Posição

Especificam limites para controle da variação da localização de elementos críticos, como furos, eixos e ranhuras em relação à posição teórica exata. A tolerância de posição pode ser aplicada para distância entre centros de elementos, ou grupo de elementos, como também para relações coaxiais ou de simetria entre elementos de tamanho.

A tolerância posicional define uma zona dentro da qual o centro, eixo ou plano central de uma característica pode variar. As dimensões básicas devem ser utilizadas para determinar a posição verdadeira em relação a datums, que são necessários, caso contrário pode haver ambiguidade (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 20– Especificação da tolerância de posição no RFS**



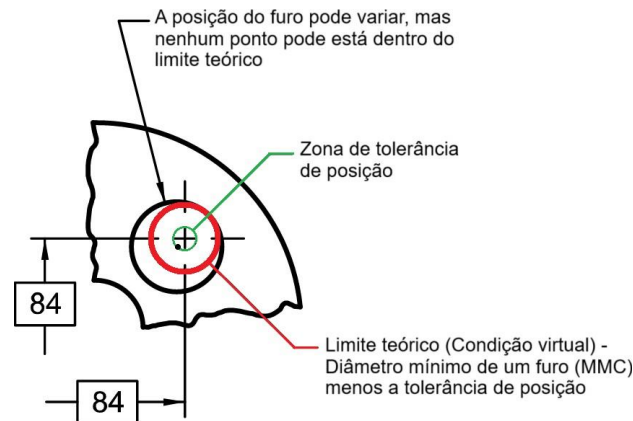
Fonte: Adaptado de Krulikowski (2009).

A zona de tolerância posicional é indicada na Figura 20 na condição de RFS, onde, independentemente da dimensão da característica, a zona de tolerância se mantém fixa, nesse caso, cilíndrica com diâmetro de 0,2mm.

Por outro lado, quando especificado com os modificadores de MMC ou LMC, é definido um limite virtual que a superfície da característica não pode ultrapassar. Esse limite é conhecido como condição virtual.

A condição virtual representa a mínima condição aceitável para uma característica. No caso de um furo, é um diâmetro virtual que se origina da combinação de tolerância dimensional e tolerância de posição na condição limite (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 21– Condição virtual para furos**



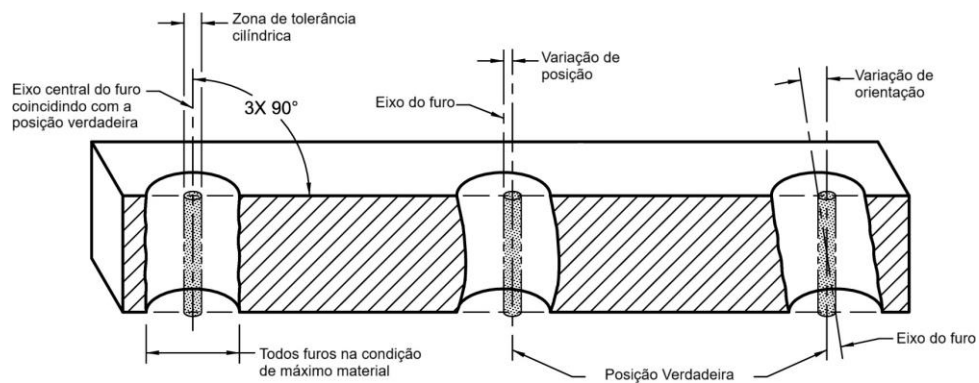
**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

Conforme Figura 21, o valor do diâmetro da condição virtual é definido subtraindo o valor da tolerância de posição, do diâmetro do furo na condição de MMC. Então, se um furo fabricado no menor diâmetro permissível variar sua posição, nenhuma superfície pode adentrar o limite teórico da condição virtual.

A tolerância posicional no MMC pode ser analisada de duas formas, pelo método da superfície ou pelo método eixo/plano central da característica de tamanho. O método da superfície se relaciona com a condição virtual já explicada. Esse método tem prioridade sobre o método do eixo (ASME Y14.5, 2018).

No método do eixo ou plano central, quando a tolerância de uma característica é especificada com o modificador de MMC, se dimensão se encontra no MMC, seu eixo/ plano deve permanecer dentro da zona de tolerância definida na posição teórica. Essa zona especifica também, os limites de variação na orientação do eixo/plano central em relação ao datum, como visto na Figura 22.

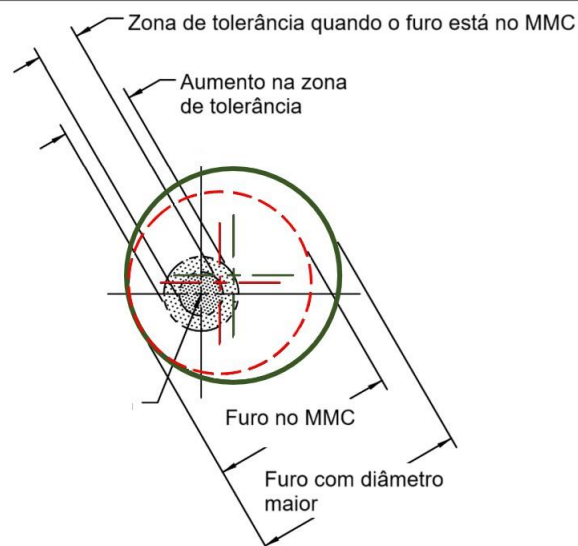
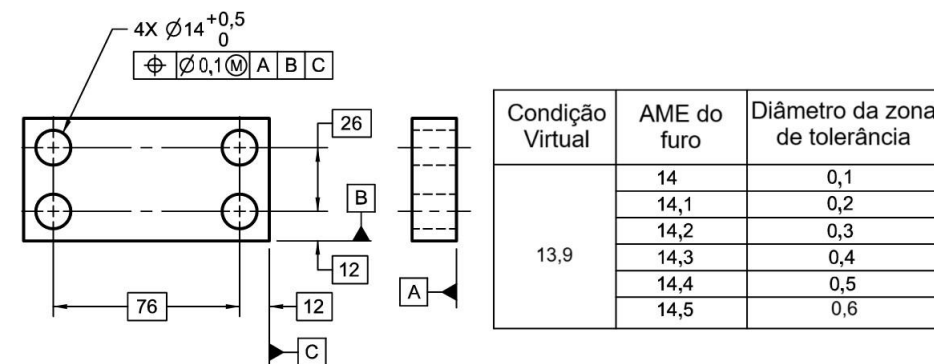
**Figura 22 – Zona de tolerância de posição na condição de MMC**



Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

Porém, a medida que a característica se afasta do MMC, a tolerância posicional aumenta proporcionalmente. Isso é conhecido como tolerância bônus, pois a tolerância está atrelada a dimensão, assim sendo, a mesma quantidade que a dimensão se afastar do MMC será acrescentada ao valor da tolerância aumentando assim seu tamanho. Isso pode ser observado na Figura 23.

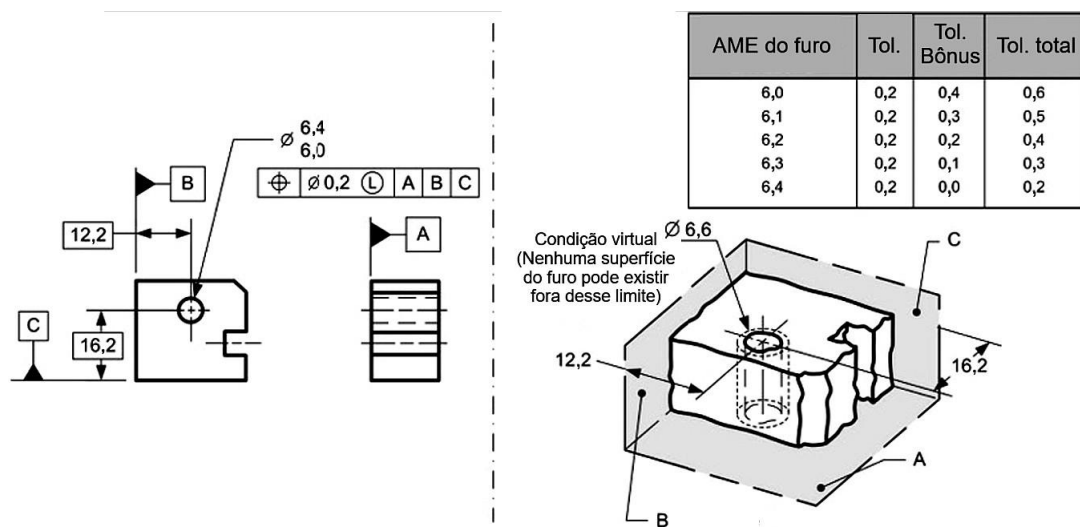
**Figura 23 Aumento na zona de tolerância (Tolerância bônus)**



Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

Semelhantemente, para a tolerância de posição aplica ao tamanho mínimo de material da peça, caso a característica se afaste do LMC, a tolerância posicional aumenta proporcionalmente. A condição virtual também é estabelecida, mas ela determina um limite onde a característica não pode sair, conforme Figura 24. O método da superfície tem prioridade sobre o do eixo, como no MMC (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 24– Especificação da tolerância de posição no LMC**



Fonte: Adaptado de Krulikowski (2009).

#### 2.1.4.4 Tolerâncias de Perfil

As tolerâncias de perfil controlam o formato de uma superfície. Elas definem uma zona de tolerância para regular a forma, tamanho, orientação e localização de uma característica em relação a um perfil verdadeiro, definido por meio de um modelo digital ou vista no desenho. Essa tolerância pode ou não estar associada a datums.

As zonas de tolerância de perfil podem ser uniformes, que englobam as zonas bilaterais, unilaterais e desigualmente distribuídas, ou podem ser não uniformes, que permite que a largura da tolerância varie proporcionalmente entre dois pontos específicos da peça. Por padrão, a zona de tolerância é uniforme e centrada no perfil verdadeiro (ASME Y14.5, 2018).

Quando a zona de tolerância é uniforme, a tolerância é aplicada perpendicularmente ao perfil verdadeiro, garantindo que sigam exatamente a forma geométrica do perfil. Além disso, quando é bilateral, a tolerância pode ser distribuída igualmente para ambos os lados do perfil verdadeiro. Por outro lado, se for unilateral ou desigualmente distribuída a tolerância pode ser totalmente aplicada para um lado do perfil ou ser assimétrica, o que é indicado pelo símbolo "Perfil disposto desigualmente", conforme Figura 8 (ASME Y14.5, 2018).

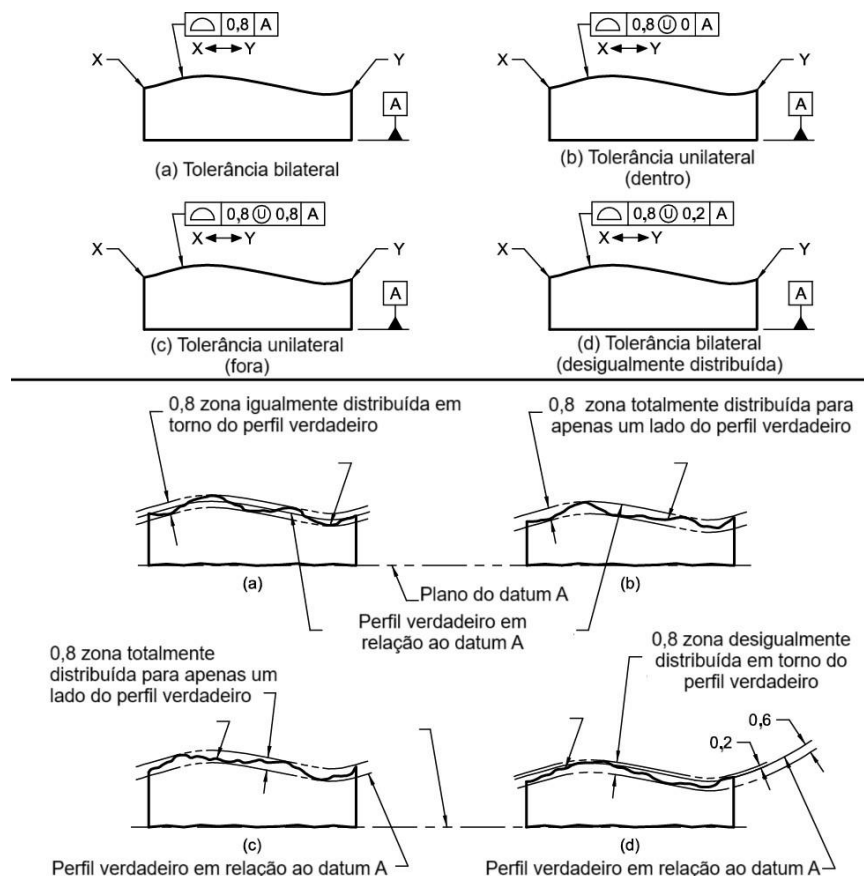
A tolerância de perfil pode ser aplicada em múltiplas características, ao longo de toda a peça, como também em características específicas ou perfis individuais, obtidos em diferentes seções transversais. Existem dois tipos principais de tolerância de perfil, sendo perfil de superfície e perfil de linha.

- **Perfil de Superfície**

Cria uma zona tridimensional dentro da qual toda a superfície da característica deve estar contida. Pode ser aplicada a peças de qualquer formato, incluindo seções constantes, superfícies de revolução e peças com tolerância de perfil aplicada em toda a superfície.

A Figura 25 mostra a aplicação da tolerância de perfil de superfície com diferentes tipos de zona.

**Figura 25– Especificação do perfil de superfície com diferentes tipos de zonas de tolerância**

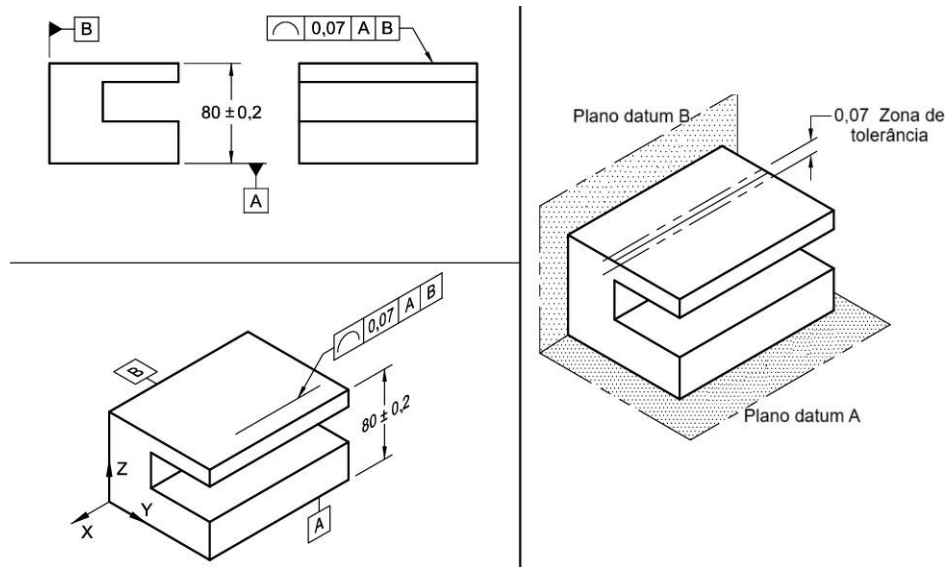


Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

- **Perfil de Linha**

Cria uma zona bidimensional ao longo de um corte transversal específico, que pode ser aplicada a peças de qualquer forma, incluindo peças com seção transversal variável, como asas de aeronaves ou seção transversal constante, como extrusões (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 26– Especificação do perfil de linha**



**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

A Figura 26 mostra a representação do perfil de linha e seu significado no desenho. Cada elemento longitudinal da superfície deve estar contido entre duas linhas paralelas separadas em 0,07 mm.

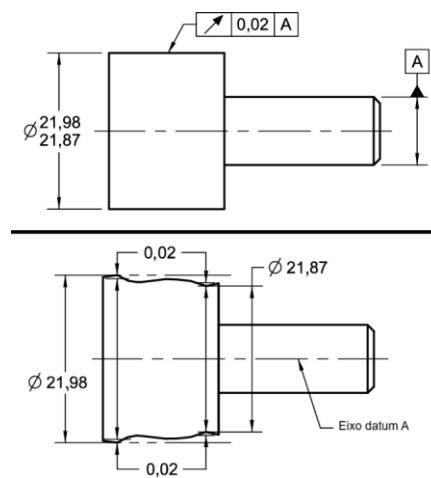
#### **2.1.4.5 Tolerâncias de Batimento**

O batimento é uma tolerância geométrica utilizada para controlar a variação de superfícies rotativas cilíndricas, cônicas ou planas que giram em torno de um eixo datum de referência. Ele pode ser circular ou total (ASME Y14.5, 2018).

- **Batimento Circular**

Controla a variação de cada seção transversal individualmente, assegurando que a peça não tenha desvios excessivos. Quando aplicado a cilindros, cones e superfícies curvas ao redor de um eixo, controla as variações de forma cumulativas e coaxialidade. A sua zona de tolerância é definida por dois círculos concêntricos ao eixo do datum, separados radialmente pelo valor da tolerância conforme visto na Figura 27 (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 27– Especificação da tolerância de batimento circular em superfície cilíndrica**

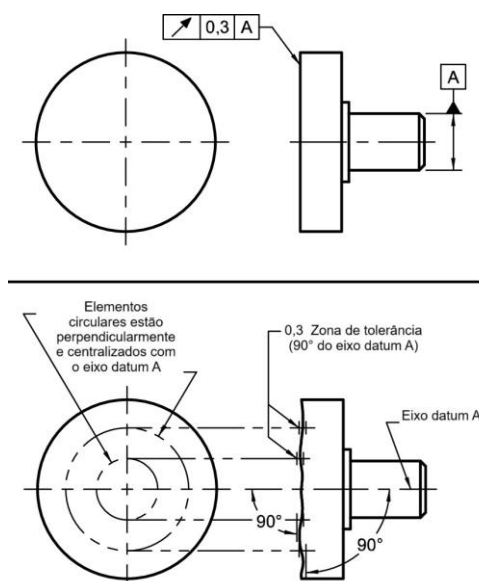


**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

O eixo apresenta variações irregulares ao longo de sua extensão, logo os diâmetros dimensionais máximo e mínimo são definidos de acordo com o eixo datum e logo após a zona de tolerância de batimento é especificada em cada extremidade pelos dois círculos concêntricos separados por um valor radial de  $0,02$  (ASME Y14.5, 2018).

Por outro lado, para superfícies planas, perpendiculares ao eixo datum, a zona de tolerância é formada por dois círculos concêntricos de mesmo diâmetro, separados axialmente pela tolerância especificada (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 28– Especificação da tolerância de batimento circular em superfície plana**



**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

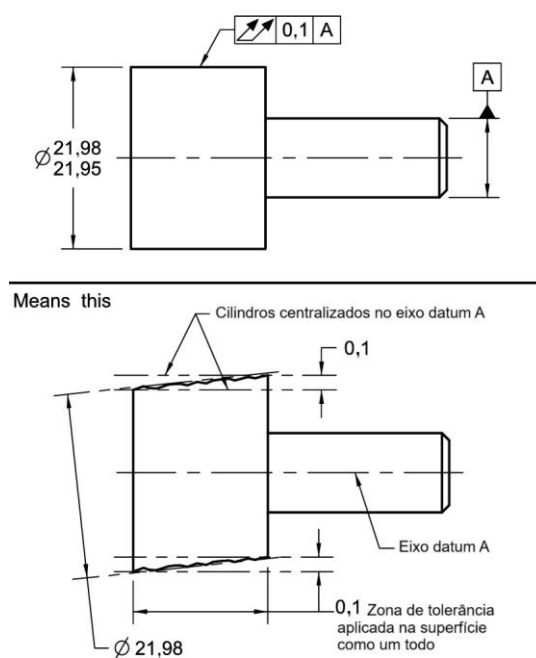
A Figura 28 mostra a especificação da zona tolerância localizada a 90° do eixo datum A e os círculos concêntricos estando separados por um valor de 0,3 axialmente.

- **Batimento Total e Controle de Superfícies**

O batimento total controla todas as variações da superfície de uma peça, abrangendo tanto os elementos circulares quanto os de perfil. Para superfícies construídas ao redor do eixo datum, ele regula variações cumulativas, como circularidade, cilindridade, retilineidade e coaxialidade, além de planicidade e perpendicularidade em superfícies planas.

Para superfícies cilíndricas a zona de tolerância é traçada de tal forma que a superfície controlada deva estar contida entre dois cilindros coaxiais, separados radialmente pelo valor da tolerância (ASME Y14.5, 2018).

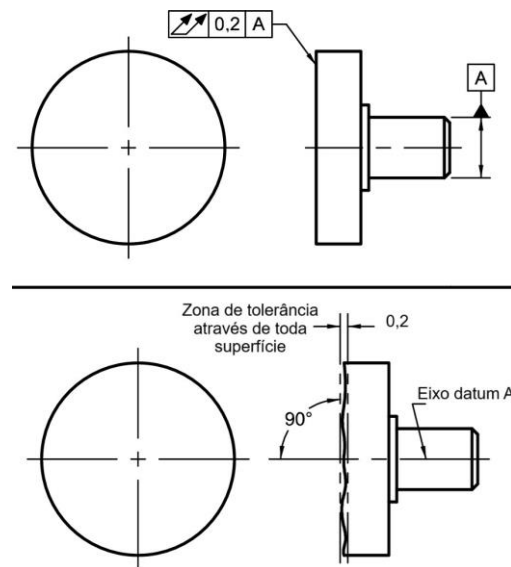
**Figura 29– Especificação da tolerância de batimento total em superfície cilíndrica**



**Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).**

Já para superfícies planas a zona deve ser posicionada perpendicularmente ao eixo datum e a característica controlada deve estar dentro de dois planos paralelos, separados axialmente pelo valor da tolerância (ASME Y14.5, 2018).

**Figura 30– Especificação da tolerância de batimento total em superfície plana**



Fonte: Adaptado de ASME Y14.5 (2018).

### 2.1.5 Recentes Pesquisas Desenvolvidas na temática GD&T

Conforme descrito nas seções anteriores, o desenvolvimento das normas ASME Y14.5 e ISO GPS possibilitou um avanço significativo na especificação da tolerância geométrica de produtos. Nesse sentido, será apresentado nesta seção estudos e avanços dentro do contexto do GD&T.

Diversos estudos, desenvolvidos nos últimos anos, vêm explorando maneiras de aprimorar a aplicação do GD&T, entre eles, o estudo de Yan *et al.* (2018) que propõe uma nova abordagem sistemática e orientada à função do componente para resolver uma limitação da norma ISO 1101 na definição de tolerâncias de posição para pontos reais em superfícies, linhas e cantos de componentes.

Outro exemplo é a pesquisa de Hofmann e Gröger (2019), que analisa a aplicação da engenharia de tolerância geométrica em malha fechada, destacando a integração de dados de medição reais e simulados no desenvolvimento de produtos. O estudo enfatiza o uso da especificação geométrica de produto e do Model-Based Development (MBD), promovendo um fluxo contínuo de informações entre projeto, manufatura e inspeção.

O estudo de Gust e Sersch (2020) aborda os desafios no ensino do sistema GPS. A análise foi feita por meio de uma revisão internacional, onde foram identificadas quatro categorias principais de ensino, sendo estas a literatura técnica, e-learning (aplicativos multimídia e laboratórios virtuais), cursos universitários e seminários industriais, além da possibilidade de exploração de tecnologias interativas, como AR (Augmented Reality) e VR (Virtual Reality) para lidar com a complexidade do GPS. Todas estas formas buscaram auxiliar o ensino do GPS para

melhorar sua compreensão.

Outro estudo de Morse (2020) discute os desafios na padronização das normas ISO GPS e ASME Y14.5, destacando a necessidade de equilibrar inovação e estabilidade na definição das tolerâncias geométricas. Ele destaca o uso de conceitos como princípio da dualidade e classes de invariância para melhorar a aplicação das tolerâncias geométricas, além de abordar o impacto do aumento da complexidade geométrica dos produtos na revisão contínua das normas.

Humiennya e Bertab (2020) propuseram uma ferramenta interativa voltada para a educação e aplicação prática, que utiliza visualizações animadas e simulação 3D para ensinar tolerâncias geométricas.

Humiennya (2021) também analisa os avanços recentes no sistema ISO GPS, destacando a evolução de padrões baseados em exemplos para padrões baseados em regras, que reduzem ambiguidades e melhoram a comunicação entre projeto, manufatura e inspeção. Ele aborda a importância de ferramentas como operações matemáticas rigorosas (extração, filtragem, associação) para garantir especificações precisas e funcionalidades adequadas. Além disso, enfatiza a necessidade de integração com sistemas digitais (CAD/CAM/MMC) e a harmonização global de padrões, apontando desafios como a complexidade dos padrões atuais e a divergência entre normas ISO e ASME.

Além das questões de norma e educacionais, Rupal, Ramadass e Qureshi (2020) analisaram, aplicando as tolerâncias geométricas de cilindridade, planeza, paralelismo e concentricidade, o impacto do microtepping (micro passos) dos motores extrusores de filamentos de plástico na qualidade da fabricação de peças impressas na manufatura aditiva (Impressões 3D).

Schuldt e Gröger (2022) discutem a utilização de um modelo de maturidade para avaliar o nível de implementação do sistema ISO GPS nas indústrias. Esse modelo permite identificar o estágio em que uma organização se encontra em relação ao uso adequado das normas e auxilia no planejamento de melhorias. Ele explora o grau de conhecimento dos engenheiros e técnicos sobre GPS, a correta interpretação e aplicação das normas nos desenhos técnicos, a compatibilidade entre as especificações geométricas juntamente aos processos e a utilização de ferramentas digitais (CAD/CAM/MMC) para validar a conformidade.

Sun e Gao (2022) apresentam uma ferramenta baseada em regras, em detrimento de um modelo baseado em exemplos, para definir e validar especificações de referências geométricas. A ferramenta consiste em uma guia detalhada de regras para serem usadas em cada camada do modelo baseado em referências com objetivo de instruir os novos projetistas o que pode ou não ser feito para evitar erros recorrentes, que como resultado melhorou a qualidade do projeto.

Pei *et al.* (2022) destaca os desafios e avanços na aplicação do GD&T em estruturas de treliça fabricadas na manufatura aditiva. Ele torna evidente que apesar do GD&T ser uma técnica consolidada em manufatura tradicional, ela carece de padrões específicos para manufatura aditiva,

especialmente para geometrias complexas como treliças. O estudo propõe soluções como o conceito de superfície teórica complementar (Total Supplemental Surface-TSS) e artefatos de teste padronizados (Geometric Benchmark Test Artifacts-GBTA) para avaliação de precisão, mas enfatiza a urgência de normas e métodos de medição adaptados a esses cenários.

Gaikwad, Pawar e Sapkal (2022) compararam os desvios dimensionais e geométricos em peças fabricadas por Fused Deposition Modeling (FDM) e Masked Stereolithography Apparatus (MSLA), utilizando uma peça modelo de referência padronizada com características complexas (furos, cilindros, esferas, paredes finas). Os resultados mostraram que o MSLA oferece melhor precisão geométrica, em média 0,087 mm, especialmente em curvas e superfícies. Ambos os processos apresentam desafios críticos em eixos verticais, planeza e retitude, então o estudo reforça a necessidade de otimização de parâmetros e padronização de métodos de medição, como Máquinas de Medição por Coordenadas, para garantir a qualidade em manufatura aditiva.

Stiuso *et al.* (2022) fez uma análise prática para avaliar a precisão dimensional e geométrica de peças fabricadas por Digital Light Processing (DLP) utilizando três resinas diferentes (S-Clear, S-Hard e G-Strong) a fim de determinar qual seria a melhor escolha de material. Os resultados, baseados em medições por Máquinas de Medição por Coordenadas e analisando critérios do sistema GD&T (planicidade, perpendicularidade, paralelismo e coaxialidade) puderam justificar a escolha da resina S-Hard, na qual ofereceu o melhor equilíbrio entre tolerâncias geométricas e custo.

Maltauro e Morse (2023) propuseram a definição do conceito de especificações de verificação geométrica (Geometric Verification Specifications), baseado nos requisitos funcionais, dentro do sistema ISO GPS. O objetivo principal é estabelecer uma estrutura clara para garantir que a verificação geométrica seja realizada de maneira coerente e repetível, por qualquer operador qualificado, entre vários instrumentos e em diferentes contextos industriais.

Toro, Wiberg e Tarkian (2023) abordam o desenvolvimento de uma ferramenta chamada eDOCr usada na digitalização de desenhos de engenharia, para interpretação dos símbolos de GD&T visando à automação do controle de qualidade na produção. O estudo destaca que a maioria dos algoritmos de OCR enfrenta limitações ao lidar com desenhos mecânicos devido à presença de medições, orientações variadas, tolerâncias e símbolos especiais de GD&T. A ferramenta eDOCr supera essas dificuldades, oferecendo uma solução eficiente para o controle de qualidade na produção.

A aplicação de Mohammed, Arbo e Tingelstad (2023) propõe métodos para incorporar informações de GD&T diretamente nos arquivos STEP AP242, um padrão internacional neutro para a troca de dados em modelos 3D CAD. Esse uso direto das informações de GD&T desde a fase de projeto nesses arquivos permite a automação robótica estando assim em conformidade com as práticas da Indústria 4.0. Além disso, o estudo explora como essas informações podem ser

extraídas e interpretadas, exemplificando com casos de uso práticos em montagem e soldagem. A pesquisa de Piscopo, Salmi e Atzeni (2024) destaca a importância das tolerâncias geométricas e dimensionais para garantir a qualidade das peças fabricadas por manufatura aditiva. O estudo compara a exatidão geométrica do LP-DED (Laser Powder Directed Energy Deposition) com outros processos de manufatura aditiva e com a fundição em areia tradicional. As medições de características como circularidade, cilindridade e retitude revelaram que a conformidade das peças com as especificações GD&T pode ser impactada por fatores como qualidade da deposição e pós-processamento, isso reforça a necessidade da correta especificação da GD&T para evitar retrabalho e desperdícios.

## **2.2 Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC)**

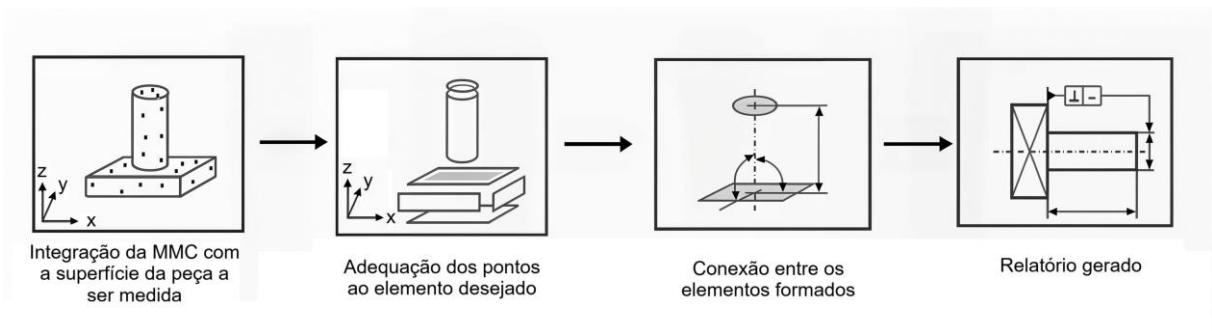
Com a evolução dos processos de fabricação e produção em série, em conjunto com padrões de precisão e exatidão mais elevados, surgiu a necessidade de novas formas de medição diferentes das utilizadas com instrumentos convencionais e medição manual. Daí surgiu a demanda de modernização dos processos de medição, fomentado pela exigência de automatizar visando a permanência da empresa no mercado. Têm-se então o surgimento das Máquinas de Medição por Coordenadas (MMC) que vieram atender a esses requisitos podendo realizar medições complexas onde métodos de medição tradicionais seriam inadequados ou inexatos (SILVA NETO, 2012).

As MMCs deram um novo patamar à metrologia geométrica e dimensional na medição de características complexas. Elas possibilitam não apenas rapidez no monitoramento contínuo da qualidade dos processos, mas também a redução de erros durante a fabricação (FERREIRA; GUERRA, 2018).

### **2.2.1 Definição e funcionamento**

As Máquinas de Medição por Coordenadas são poderosos instrumentos de medição que se baseiam na geometria cartesiana por coordenadas, utilizando os valores numéricos de três eixos perpendiculares (X, Y e Z) para coletar informações das partes da peça a ser medida. Isto é feito por sensores, sendo por contato ou não, que ao interagir com a superfície da peça, gravam os dados das coordenadas desse ponto que na sequência é modelado por um software que utiliza os dados coletados para aplicar um algoritmo que faz a melhor adequação dos pontos ao elemento desejado (HOCKEN; PEREIRA, 2012).

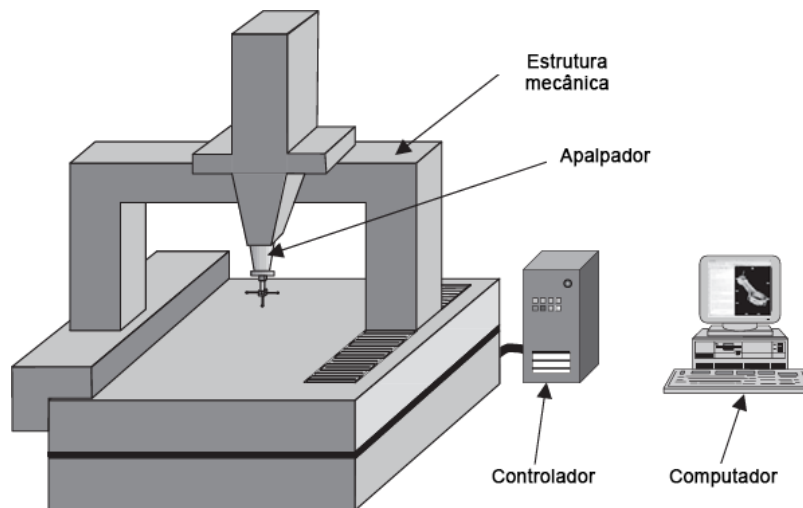
**Figura 31– Sequência de funcionamento de uma MMC**



**Fonte: Adaptado de Hocken e Pereira (2012)**

A movimentação da máquina é feita por um painel de controle que envia o comando para que ative os motores que deslocam os eixos. Pelo fato de as MMCs utilizarem controles embarcados, para realizar medições rápidas e de alta exatidão, é possível fazer automatização no processo de medição com utilização de recursos dentro do próprio software para controlar a máquina, reduzindo a influência do erro do fator humano e consequentemente aumentando a eficiência do processo de inspeção (ARENHART; PIZZOLATO, 2020).

**Figura 32– Configuração da MMC**



**Fonte: Adaptado de Hocken e Pereira (2012).**

A configuração em geral se dá pela seguinte forma:

- Estrutura mecânica: Três eixos móveis, guias lineares, mancais aerostáticos e a mesa de medição.
- Sensores de medição: comumente um probe (sonda), que, por contato, interage com as superfícies das peças

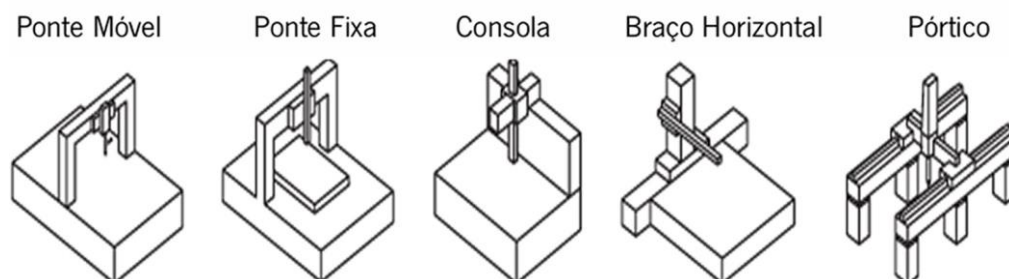
- Software de controle: Comanda o funcionamento da máquina e interpreta os dados coletados através do computador

Essas máquinas são calibradas e avaliadas seguindo normas globais que especificam requisitos e métodos para avaliação da performance das MMCs, como a ASME B89.4.10360.2. Em conjunto com a ISO 10360-2, essas normas buscam unificar terminologias, classificações e controles ambientais para garantir a exatidão das medições, assegurando que o desempenho das máquinas esteja em conformidade com os requisitos globais de indústrias como aeroespacial, automotiva, médica e instrumentação (ASME B89.4.10360.2, 2008).

### 2.2.2 Principais Tipos

Podemos encontrar as Máquinas de Medição por Coordenadas dispostas de várias formas, dentre as quais temos as mais usuais descritas na Figura 33, (Hocken e Pereira (2012).

**Figura 33– MMCs mais usuais**



**Fonte: Adaptado de Hocken e Pereira (2012).**

### 2.2.3 Sistemas de sondas (Probes)

A sonda é um componente essencial da Máquina de Medição por Coordenadas, responsável por coletar os parâmetros e dimensões necessários para os cálculos. A escolha da sonda deve ser feita com base na aplicação específica. Esse dispositivo é fixado na ponta do eixo móvel da MMC e, originalmente, foi projetado de maneira rígida onde exigia manipulação manual para estabelecer contato com a peça para registrar as leituras no visor digital. Nos dias de hoje, existem vários tipos de sondas, que podem ser classificadas em rígidas, mecânicas, motorizadas e com apalpadores (NIKAM, 2019).

Já os sensores, integrados a sonda, podem ser por contato (mecânico ou eletrônico), ópticos e a laser. Os sensores mecânicos são rígidos e precisam permanecer fixos para garantir uma leitura precisa das coordenadas. Já os eletrônicos podem ser divididos em medidores, que detectam sinais proporcionais ao deslocamento ao tocar a peça, e comutadores, que operam por meio de microchaves de liga-desliga ao entrar em contato com a superfície medida. Por outro lado, os

sensores ópticos são ideais para medições em nível microscópico, capturando imagens digitais para análise sem a necessidade de contato físico. Por fim, sensores a laser também realizam medições sem contato, utilizando feixes de laser e triangulação de sinais para coletar dados com alta precisão e exatidão (LIRA, 2015).

A escolha da sonda é primordial, diferentes tipos de sondas são usados nas máquinas e essa escolha depende de vários fatores, como o tamanho da peça, especificações de design e capacidades da sonda. Não selecionar a sonda apropriada pode comprometer a precisão e exatidão da medição (STAR Market, 2024).

Uma opção bastante eficiente é a sonda motorizada, ela apresenta uma ampla capacidade de posicionamento, permitindo até 720 orientações distintas, distribuídas em 48 posições no eixo horizontal e 15 no eixo vertical. Essa versatilidade possibilita a realização de medições em diversas configurações, adaptando-se a diferentes geometrias de peças. Além disso, com o acoplamento de extensões leves, a sonda pode alcançar orifícios profundos, tornando-se uma solução eficaz para a inspeção de superfícies de difícil acesso, pode-se também realizar a troca de sensores para um mesmo cabeçote de sonda. Outra vantagem desse sistema é o design compacto da cabeça da sonda, que pode atuar como uma extensão do próprio eixo da MMC, permitindo a medição de componentes complexos sem a necessidade de ajustes adicionais no setup da máquina (NIKAM, 2019).

Nas Figuras 34, 35 e 36, abaixo, são apresentados exemplos de sensores e sondas para MMCs.

**Figura 34– Cabeçote motorizado com sensor por contato**



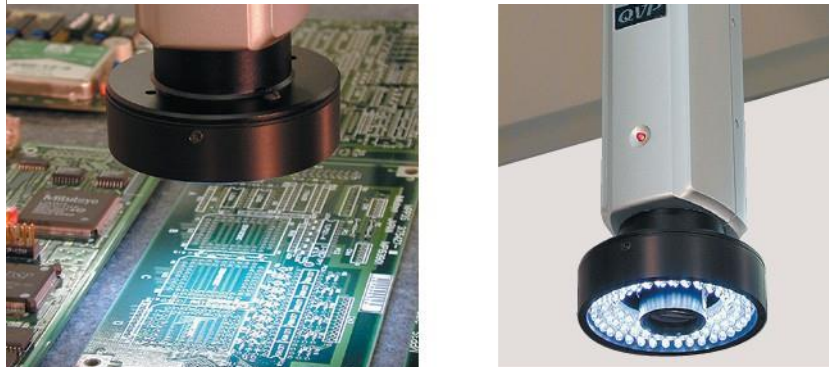
**Fonte: Adaptado de Mitutoyo (2019).**

**Figura 35– Sensor a laser**



**Fonte: Adaptado de Mitutoyo (2019).**

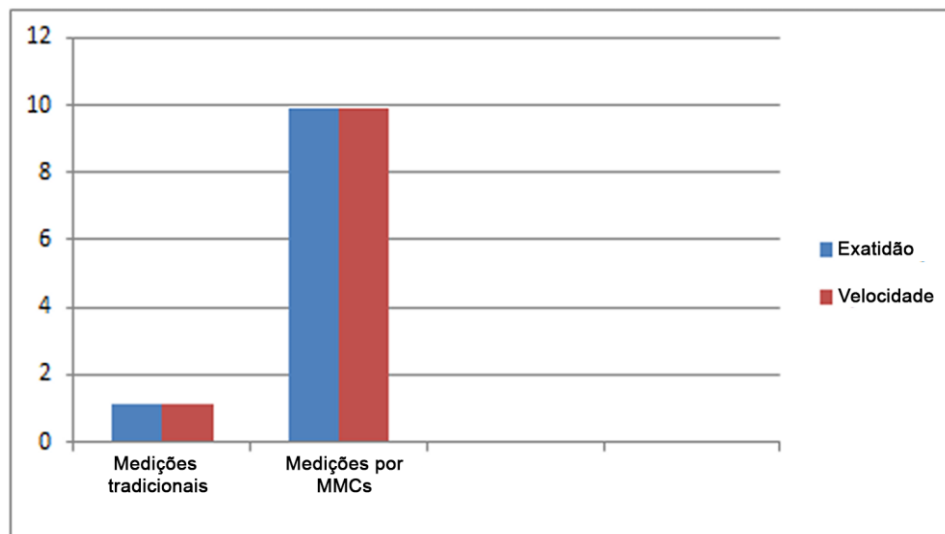
**Figura 36– Sensor óptico**



**Fonte: Adaptado de Mitutoyo (2018).**

#### **2.2.4 Benefícios das MMCs**

As Máquinas de Medição por Coordenadas possuem diversas vantagens, como já apresentado, o grau da precisão e exatidão, alinhados com a rapidez da máquina, é muito elevado devido às técnicas de medição usadas. Isso é confirmado por estudos que comparam medições tradicionais com medições feitas por MMCs, conforme Figura 37.

**Figura 37 – Gráfico entre medições tradicionais vs. MMC**

**Fonte: Adaptado de Nikam (2019).**

De acordo com Nikam (2019), nas MMCs, as medições são realizadas a partir de um sistema de coordenadas fixo de referência, suprimindo o acúmulo de erros que ocorre com métodos tradicionais que dependem da interpretação subjetiva do operador. As MMCs eliminam esse fator por meio de leituras digitais automatizadas, utilizando os sistemas de sonda que reduzem a necessidade de intervenção manual. Muitas delas operam com procedimentos de medição pré-programados, garantindo maior padronização no processo de inspeção. Esse fator garante uma boa repetibilidade das medições, reduzindo a variação nos resultados e aumentando a confiabilidade dos processos de inspeção.

Uma das principais vantagens das MMCs é sua versatilidade, por isso, frequentemente são chamadas de máquinas universais. Elas não precisam ser dedicadas a nenhuma tarefa específica, podendo ser facilmente programadas para inspecionar peças dos mais diversos contextos produtivos, independentemente do formato ou complexidade geométrica (ARENHART; PIZZOLATO, 2020).

Durante o setup da máquina há uma redução significativa do tempo de configuração, pois o software permite definir um sistema de coordenadas na peça e todos os dados subsequentes são tomados de acordo com esse sistema definido. Com isso a configuração é padronizada, eliminando assim a necessidade de reorientar as peças para acessar todas as características. Essa padronização, reduz o tempo necessário para a inspeção de peças (NIKAM, 2019).

Por causa disso, pode-se afirmar que as MMCs reduzem a probabilidade de retrabalho, contribuindo assim para uma redução nos custos e aumento da produtividade. Elas destacam-se também, quanto a sua capacidade de gerar um grande volume de dados precisos sobre as características técnicas de peças e manusear esses dados para promover uma integração eficiente com os processos produtivos (FERREIRA; GUERRA, 2018).

As MMCs desempenham um papel estratégico em diversas etapas do ciclo de

desenvolvimento e manufatura do produto. De acordo com Porath e Sousa (2002), a Tecnologia de Medição por Coordenadas (TMC) se destaca por sua alta flexibilidade, produtividade, informatização, precisão e confiabilidade, sendo aplicada então, desde a concepção do produto até o final da linha de produção, pode-se notar isto na qualidade e a eficiência do processo produtivo.

Tendo em vista isso podemos listar a seguir alguns benefícios que a MMC proporciona em algumas etapas industriais. Antes da fase da fabricação do produto em si, na fase da concepção, precisa-se pensar em como fabricar e se essa maneira é viável e econômica para a empresa. Segundo Porath e Sousa (2002), dentro da etapa de modelagem a MMC possibilita a digitalização de superfícies de peças existentes, com os dados obtidos é feita a geração de curvas e superfícies pelo sistema computacional presente na MMC e então tem-se um modelo que pode ser exportado para sistemas CAD. Esse processo facilita a criação de moldes baseados nessas peças e garantem que cada peça fabricada esteja dentro das tolerâncias especificadas.

Outro exemplo prático para a aplicação da MMC, foi divulgado por Guimarães (2021), utilizando a técnica de engenharia reversa em uma peça de geometria considerada complexa, gerando um modelo pela máquina e, posteriormente, convertendo em CAD 3D, possibilitando assim, desempenhar várias análises como modificações geométricas, análise de esforços mecânicos e, novamente, desenvolvimento de moldes para produção em massa.

Após a fabricação do molde é possível utilizar a MMC para verificar a conformidade com a referência desejada, qualificando-o através de análises detalhadas de peças piloto. Ademais, Máquinas de Medição por Coordenadas podem ser integradas à linha de produção o que permite monitorar os desgastes do ferramental e desvios do processo e assim tomar decisões para não comprometer a qualidade do produto final (PORATH; SOUSA, 2002).

Esse processo melhora a confiabilidade do molde e permite a análise da qualidade dos lotes inteiros de peças, algo difícil de ser realizado com instrumentos convencionais.

A integração das MMCs às linhas de produção possibilita um diagnóstico imediato das peças logo após a fabricação. Esse processo elimina deslocamentos desnecessários, reduz perdas de tempo e permite ajustes rápidos no processo produtivo (SOUSA, 2015).

Portanto, as MMCs se alinham com os conceitos da indústria 4.0. A automação dos processos com sistemas digitais gera mais conectividade, e dados que podem ser compartilhados em tempo real para tomada de decisão.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

Nos capítulos anteriores (2 e 3) foi discutido toda a base teórica, sobre MMCs e GD&T, essenciais para a realização e compreensão do procedimento experimental. Neste capítulo será abordado quais materiais foram utilizados e qual foi o procedimento para realização da atividade experimental do presente trabalho.

#### 3.1 MATERIAIS

Para a realização da atividade prática, foram utilizados materiais como a Máquina de Medição por Coordenadas da Mitutoyo, juntamente com seus complementos, a peça de estudo, além do sistema CAD para análise do design da peça.

##### 3.1.1 MMC utilizada - CRYSTA-Apex S7106

A máquina de medição por coordenadas utilizada neste trabalho foi a CRYSTA-Apex S7106 CNC da Mitutoyo, localizada no Laboratório de Engenharia de Precisão (LEP) da UFPB. Pelo fato dessa máquina ser CNC existe a possibilidade de executar rotinas de medição automáticas, a depender da necessidade. Ela possui um software embarcado para tratamento e análise dos dados coletados e também, um probe por contato, guiado pelo joystick controlador, para obter esses dados. Ver Figura38.

**Figura 38– CRYSTA-Apex S7106 do LEP**



**Fonte: LABORATÓRIO DE ENGENHARIA DE PRECISÃO - CT - UFPB (2025).**

Conforme Mitutoyo (2018), essa MMC possui alta precisão, rapidez e capacidade de aceleração. Ela é equipada com sistema de compensação de temperatura ao operar entre 16 e 26°C e com mancais aerostáticos diminuindo atrito e aumentando a rapidez. Uma descrição geral das características da MMC é vista na Figura 39.

**Figura 39– Descrição MMC**

| CRYSTA-Apex S7106                                                    |                                                                       |
|----------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Faixa de Medição</b>                                              |                                                                       |
| Eixo X                                                               | 700 mm                                                                |
| Eixo Y                                                               | 1000 mm                                                               |
| Eixo Z                                                               | 600 mm                                                                |
| Resolução                                                            | 0,0001 mm                                                             |
| Método de Guiamento                                                  | Rolamentos de ar em cada eixo                                         |
| <b>Velocidade de Deslocamento</b>                                    |                                                                       |
| Modo CNC (Seletor de chave: AUTO)                                    | Vel. máx. de deslocamento = 519 mm/s<br>Vel. máx. de medição = 8 mm/s |
| Modo CNC (Seletor de chave: MANUAL)                                  | Vel. máx. de deslocamento = 239 mm/s<br>Vel. máx. de medição = 8 mm/s |
| Aceleração Máx. de Deslocamento                                      | 2.309 mm/s <sup>2</sup> (3D)                                          |
| <b>Peça de Trabalho</b>                                              |                                                                       |
| Altura máxima                                                        | 800 mm                                                                |
| Massa máxima                                                         | 1000 kg                                                               |
| Massa (incluindo dispositivo de controle e plataforma de instalação) | 1951 kg                                                               |
| <b>Suprimento de Ar</b>                                              |                                                                       |
| Pressão                                                              | 58 PSI (0,4 MPa)                                                      |
| Consumo                                                              | 50 L/min sob condições normais                                        |
| Fonte de ar                                                          | 100 L/min                                                             |

**Fonte: Adaptado de Mitutoyo (2018).**

### 3.1.1.1 Sonda utilizada na MMC

A sonda equipada na máquina é composta por um cabeçote PH10MQ motorizado, que conforme Renishaw (2018) permite a reorientação da sonda em 720 posições em incrementos de 7,5°, e um sensor de scanning SP25M, com diâmetro externo de 25 mm, que realiza medições por varredura e pontuais de alta precisão. Além disso o cabeçote PH10MQ também permitem a conexão de sensores especiais como ópticos e Laser, também disponíveis no LEP.

**Figura 40– Sonda motorizada utilizada**



**Fonte: Adaptado de Renishaw (2018).**

### 3.1.1.2 Software da MMC

O software da MMC é o MCOSMOS (Mitutoyo Controlled Open Systems for Modular Operation Support) dentro dele existem vários módulos desenvolvidos pela Mitutoyo para medições em Máquinas de Medição por Coordenadas. O módulo utilizado neste trabalho foi o GEOPAK.

O módulo GEOPAK, medição de uso geral, é o coração do sistema de software MCOSMOS e é utilizado para medir e analisar elementos geométricos. Através dele foi feito a análise e medição dos parâmetros de GD&T, como visto na Figura 41.

**Figura 41– GEOPAK**

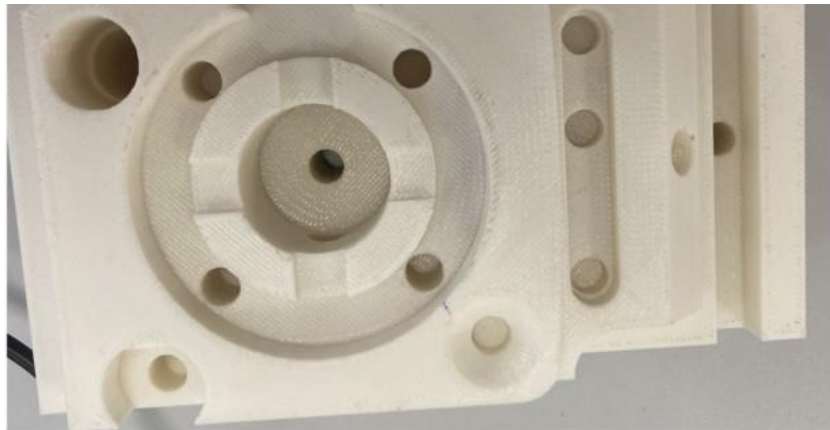
| List of results |                             |    |          |    |         |     |         |             |  |
|-----------------|-----------------------------|----|----------|----|---------|-----|---------|-------------|--|
| 00030           | Distance XY no compensation | X= | 0.1033   |    |         | DI= | 10.0542 | (2) Linha 2 |  |
|                 | Distance                    | Y= | -10.0537 |    |         |     |         | (3) Linha 3 |  |
|                 | (1)                         | Z= | 0.0000   |    |         |     |         |             |  |
| 00031           | Circle Mean                 | X= | -37.7423 | A= | 90.0000 | D=  | 17.2731 |             |  |
|                 | Circulo 5                   | Y= | 24.8026  | B= | 90.0000 | d=  | 0.16151 |             |  |
|                 | (5)                         | Z= | 4.8318   | C= | 0.0000  | n=  | 4       |             |  |
| 00034           | Circle Mean                 | X= | -32.9556 | A= | 90.0000 | D=  | 19.8579 |             |  |
|                 | Circulo 6                   | Y= | -38.0394 | B= | 90.0000 | d=  | 0.08833 |             |  |
|                 | (6)                         | Z= | 6.3485   | C= | 0.0000  | n=  | 4       |             |  |
| 00037           | Plane Mean PQ               | X= | -0.0017  | A= | 89.9638 | L=  | 2.7316  |             |  |
|                 | Plano 2                     | Y= | 0.0019   | B= | 90.0400 | d=  | 0.01347 |             |  |
|                 | (2)                         | Z= | -2.7316  | C= | 0.0539  | n=  | 4       |             |  |
| 00040           | Distance XY no compensation | X= | 0.0000   |    |         | DI= | 10.0665 | (1) Plano 1 |  |
|                 | Distance                    | Y= | 0.0000   |    |         |     |         | (2) Plano 2 |  |
|                 | (2)                         | Z= | -10.0665 |    |         |     |         |             |  |

**Fonte: Próprio Autor.**

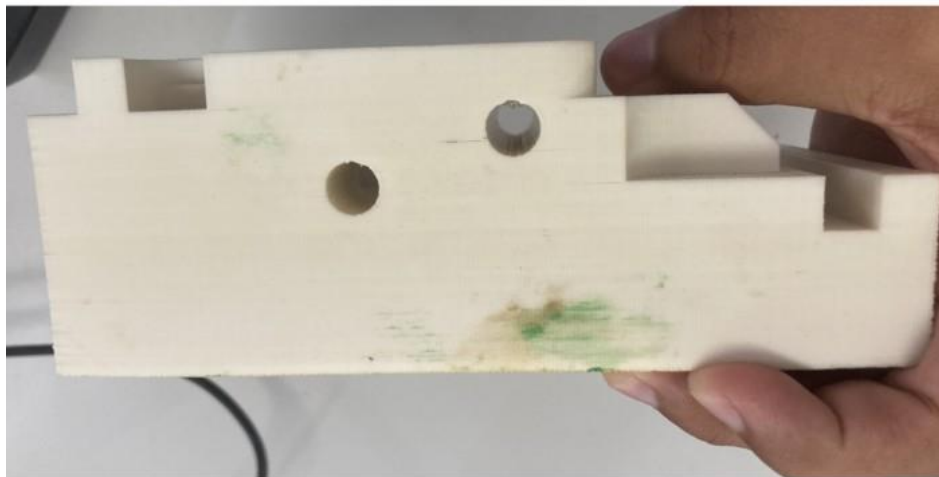
### 3.1.2 Peça utilizada

A peça utilizada neste trabalho, ilustrada na Figura 42, apresenta diversas características passíveis de aplicação de tolerâncias geométricas e foi fornecida pelo Laboratório de Engenharia de Precisão da Universidade Federal da Paraíba.

**Figura 42– Peça utilizada nas medições**



(a)



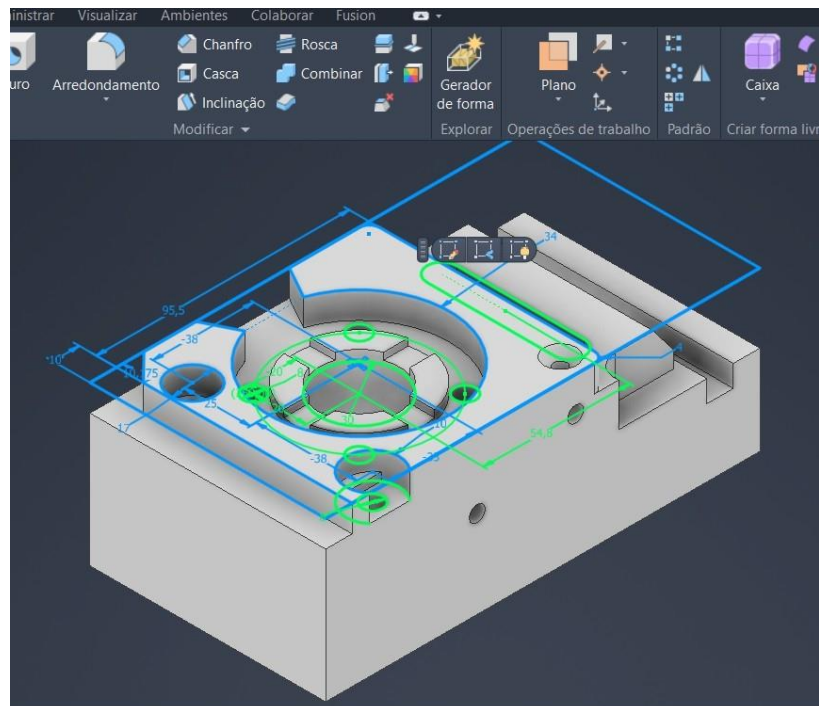
(b)

**Fonte: Próprio Autor.**

### **3.1.3 Software CAD/CAE**

Para toda a análise do projeto e dimensões da peça foi utilizado o Autodesk Inventor, que integra modelo 3D de peças montagens com desenhos de engenharia em 2D.

Figura 43– Autodesk Inventor

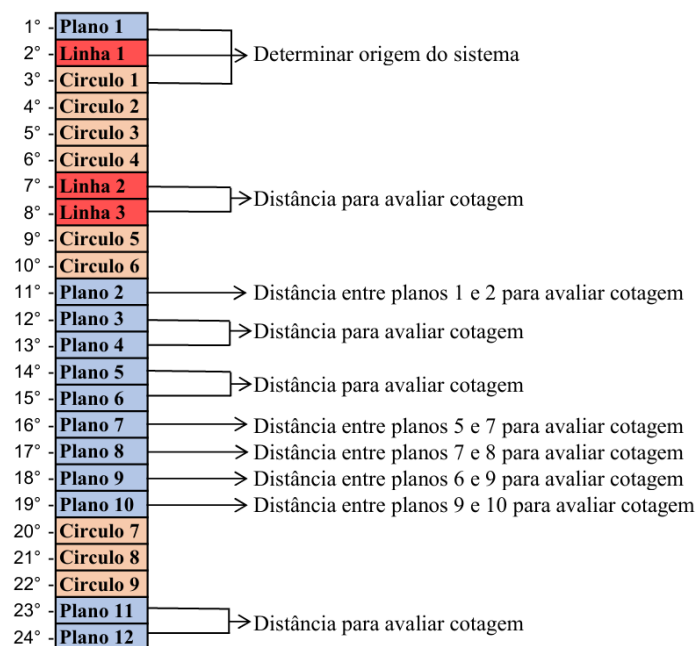


Fonte: Próprio Autor.

### 3.2 MÉTODO

O método experimental se iniciou com a medição da peça para definição da origem do sistema de coordenadas. Esse sistema pode ser definido com base em qualquer característica da peça e seguiu o procedimento indicado na Figura 44.

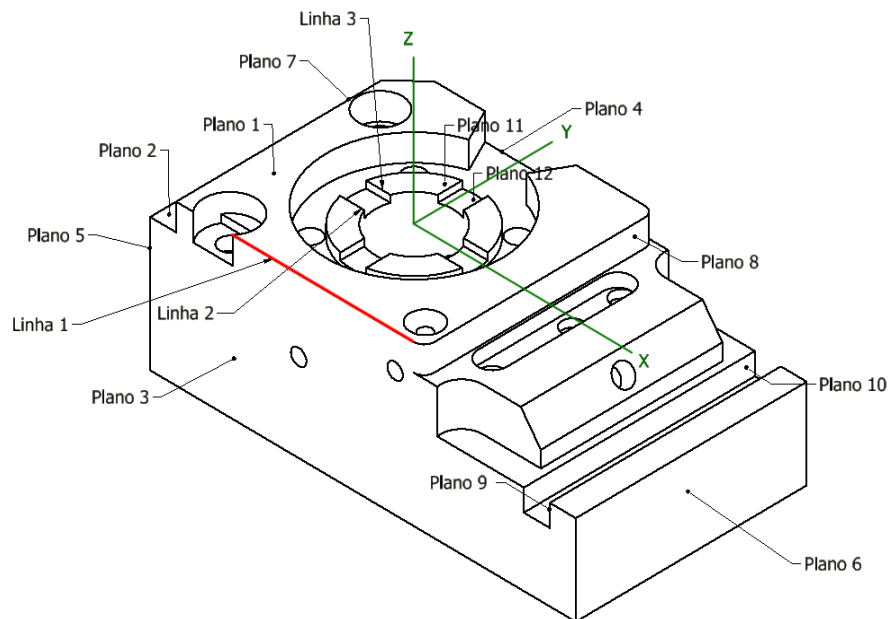
Figura 44- Sequência de medição dos elementos



Fonte: Próprio Autor.

Conforme Figura 45, a origem foi determinada como o centro do furo principal da peça.

**Figura 45– Origem e planos da peça analisada**



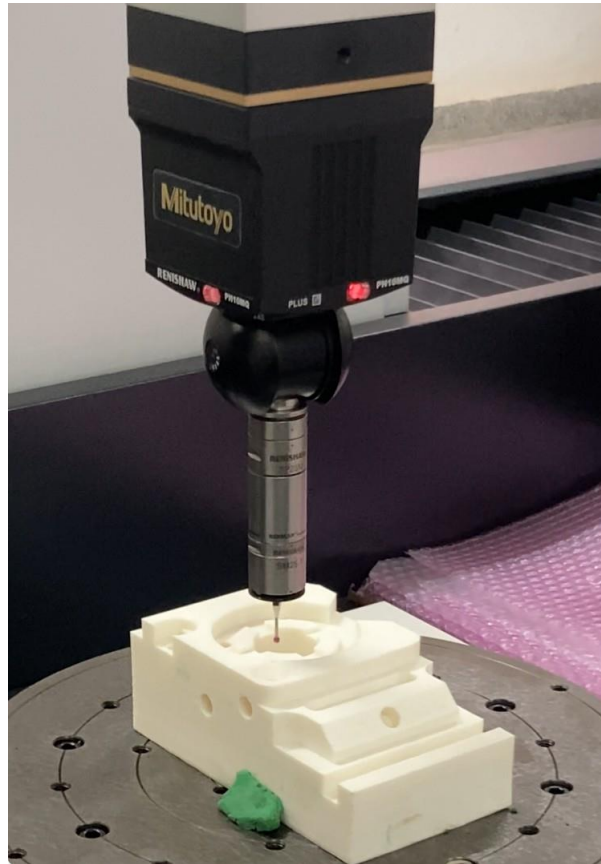
**Fonte: Próprio Autor.**

A medição foi conduzida de forma manual controlando a sonda da máquina até tocar a peça nos pontos desejados, como visto na Figura 46, quando esse toque ocorre, um sinal sonoro é emitido para avisar que o ponto foi coletado. O procedimento seguiu os seguintes passos:

- Definição do plano 1 de origem com quatro pontos coletados;
- Definição da linha 1 (em vermelho), onde foi alinhada a direção do eixo X;
- Definição do círculo 1, na qual seu centro foi determinado pelo GEOPAK.

Através do software MCOSMOS é feito a alocação da origem no ponto desejado pelos elementos já medidos pela máquina, bem como a orientação do eixo X.

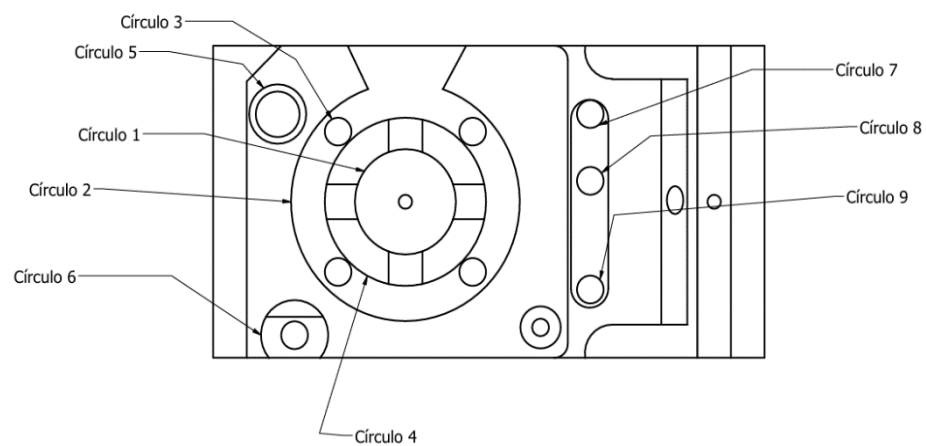
**Figura 46– Medição da peça**



**Fonte: Próprio Autor.**

Na sequência foram realizadas as medições de vários furos da peça e enumerados como círculos, conforme Figura 47, que foram usados para análise de suas tolerâncias geométricas.

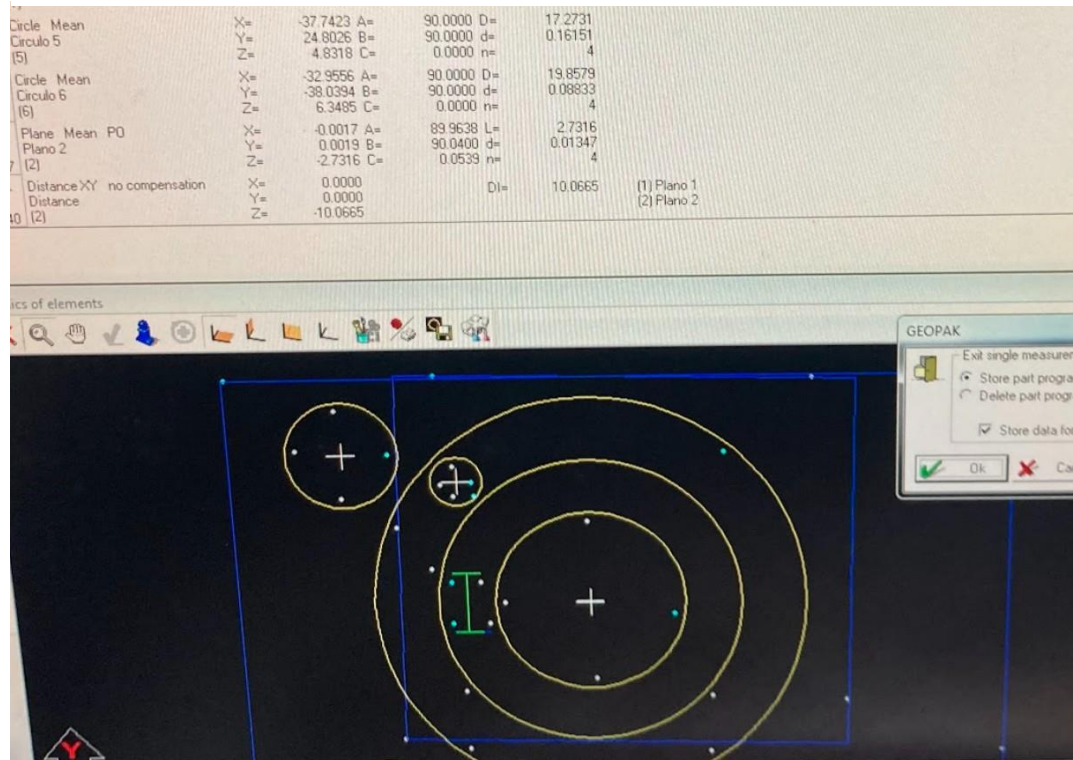
**Figura 47– Furos analisados na peça**



**Fonte: Próprio Autor.**

À medida que é feita a medição dos elementos, o GEOPAK permite a visualização dos elementos e a sequência de operações realizadas, o que é visto na Figura 48.

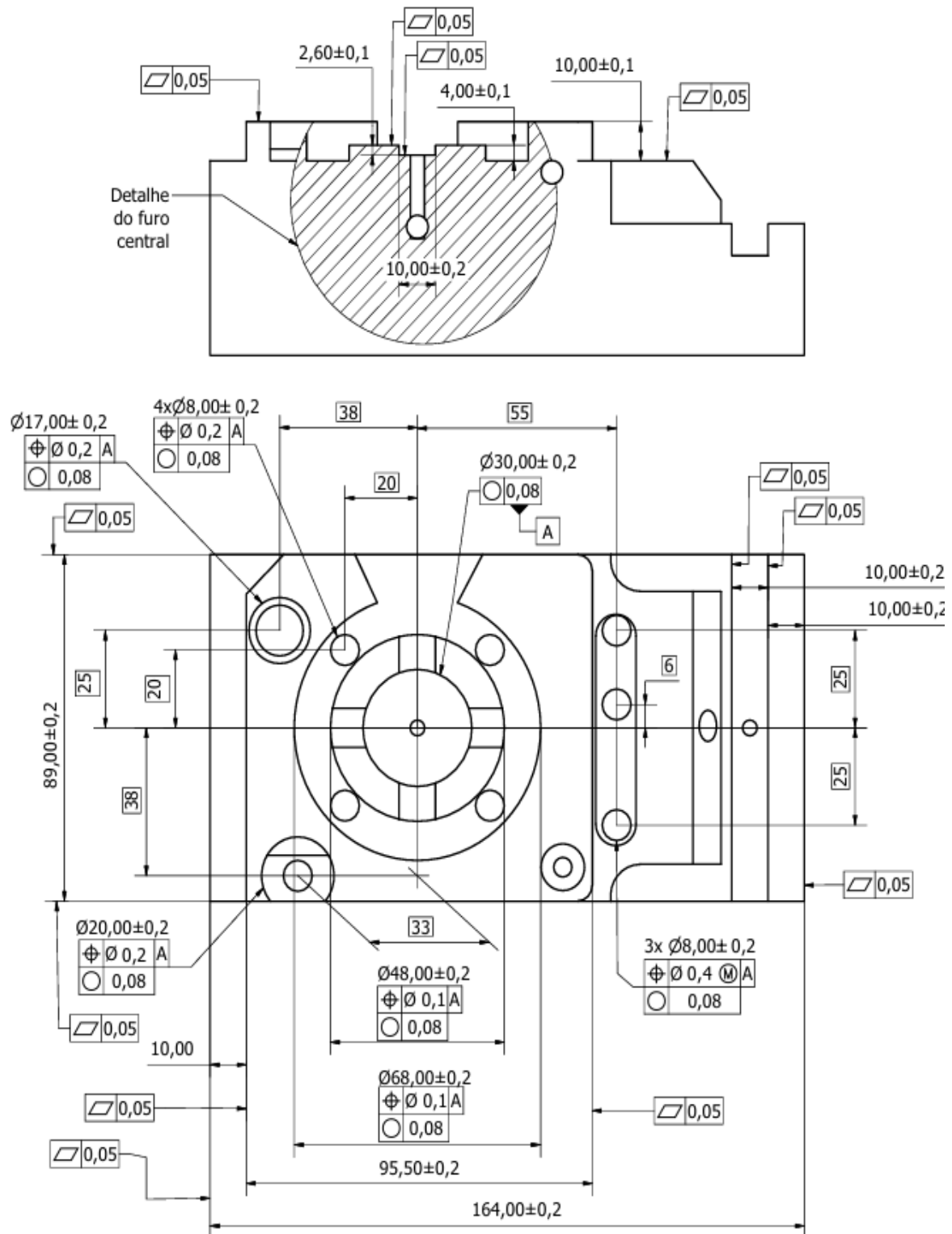
**Figura 48– Visualização dos elementos**



**Fonte: Próprio Autor.**

Após as medições foi feita uma engenharia reversa a fim de construir o desenho técnico, Figura 49, e determinar os elementos a serem tolerados.

**Figura 49– Desenho técnico do projeto**



**Fonte: Próprio Autor.**

De acordo com o desenho estabelecido, foram tolerados os planos conforme sua planeza e os círculos conforme sua circularidade e posição. Para isso foram implantadas métricas para todos os elementos.

Todos os cálculos foram feitos dentro do próprio software da MMC e a sequência de

medição foi definida pensando na determinação dos valores reais de cada um dos elementos da peça descritos nas Figuras 45 e 47.

## 4 RESULTADOS

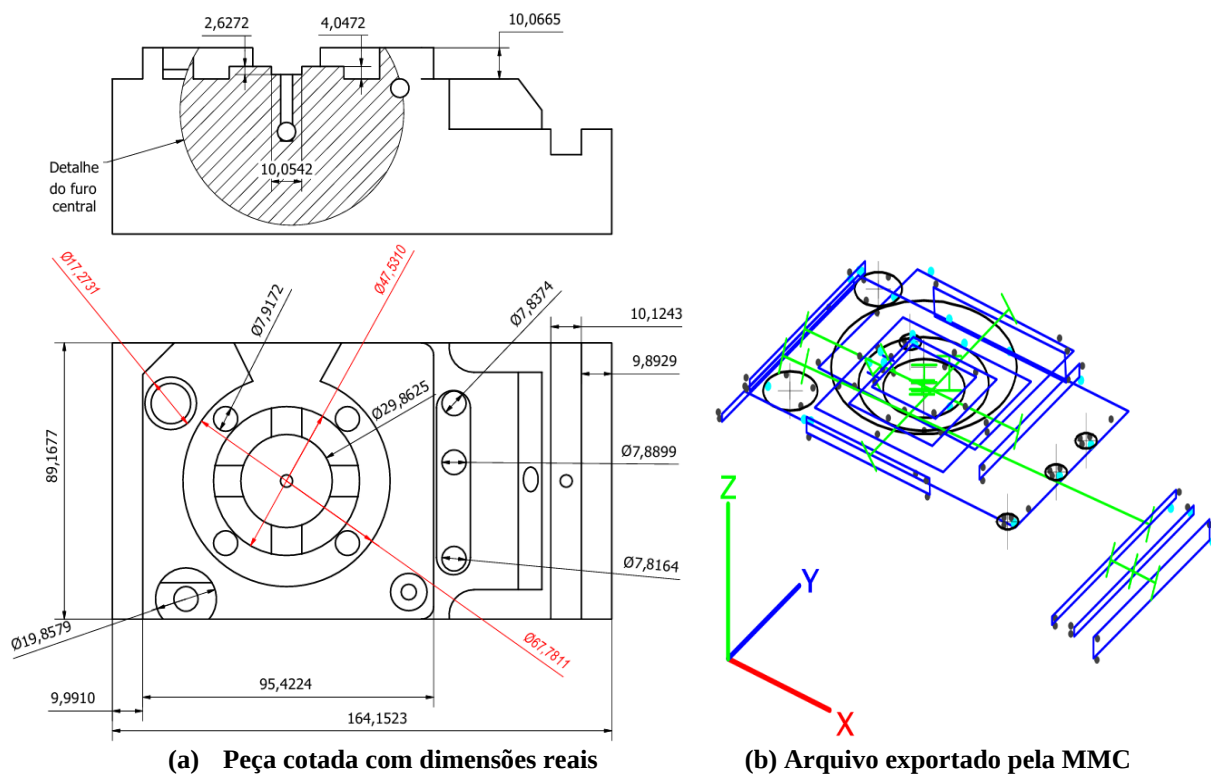
Neste capítulo, serão apresentados os resultados da atividade experimental realizada neste trabalho, destacando a análise de cada um dos resultados das medições dos elementos da peça em estudo, de acordo com as tolerâncias dimensionais e geométricas, de planeza, de circularidade e de posição.

### 4.1 Avaliação da tolerância dimensional

Após a realização das medições, o software da MMC fornece a lista dos resultados brutos (em anexo) para tratar e fazer a análise pretendida. A partir disso foi possível determinar as dimensões reais da peça, com resolução na 4ª casa decimal, ou seja, de 0,0001mm correspondente a 0,1µm. Além disso o software também possibilita a visualização tridimensional dos elementos e seus resultados reais, como visto na Figura 50 b.

Assim toda a cotação do projeto da peça foi avaliada e seus resultados estão evidentes na Figura 50 a. As cotas em vermelho significam que a dimensão real foi maior que o limite permitido. Então conclui-se que três furos (Círculos 2, 4 e 5) não estão conformes, enquanto o resto das dimensões estão aprovadas na inspeção dimensional.

**Figura 50 - Dimensões reais da peça**



Fonte: Próprio Autor.

## 4.2 Avaliação da tolerância de planeza

Partindo para as tolerâncias geométricas, foi avaliado a tolerância de forma de planeza, na qual a métrica estabelecida para essa avaliação foi de 50  $\mu\text{m}$ . A máquina forneceu a variação de forma de cada elemento, ou seja, para cada plano estabelecido qual o erro em relação a um plano perfeito, indicando assim, o quão plano é o elemento.

Portanto, a Tabela 1 apresenta os resultados de cada plano medido com suas variações de forma. Além disso, foi realizada uma análise da distância de cada variação de forma observada em relação ao limite estabelecido pela métrica utilizada, isso é visto no campo de observações, sendo valores negativos representativos de ultrapassagem do limite permitido, caracterizando um resultado insatisfatório.

**Tabela 1- Análise planeza**

| <b>Elemento</b> | <b>Tipo de Tolerância</b> | <b>Métrica (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Variação da Forma (<math>\mu\text{m}</math>)</b> | <b>Observações</b>                        |
|-----------------|---------------------------|-------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------|
| <b>Plano 1</b>  | Planeza                   | 50                                        | 25,3                                                | 24,7 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 2</b>  | Planeza                   | 50                                        | 13,5                                                | 36,5 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 3</b>  | Planeza                   | 50                                        | 0,7                                                 | 49,3 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 4</b>  | Planeza                   | 50                                        | 29,3                                                | 20,7 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 5</b>  | Planeza                   | 50                                        | 53,9                                                | -3,9 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 6</b>  | Planeza                   | 50                                        | 14,8                                                | 35,2 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 7</b>  | Planeza                   | 50                                        | 4,8                                                 | 45,2 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 8</b>  | Planeza                   | 50                                        | 51,5                                                | -1,5 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 9</b>  | Planeza                   | 50                                        | 21,7                                                | 28,3 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 10</b> | Planeza                   | 50                                        | 0,3                                                 | 49,7 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 11</b> | Planeza                   | 50                                        | 9,2                                                 | 40,8 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Plano 12</b> | Planeza                   | 50                                        | 5,1                                                 | 44,9 $\mu\text{m}$ de distância do limite |

**Fonte: Próprio Autor.**

Dessa forma, conclui-se que os planos 5 e 8 não estão em conformidade com a métrica estabelecida, pois ultrapassaram o limite em 3,9 e 1,5  $\mu\text{m}$ , respectivamente, enquanto os demais planos atendem aos requisitos do projeto, em destaque para os planos 3 e 10 que apresentaram uma grande margem de segurança em relação ao limite, sendo assim, bem próximo de uma geometria perfeitamente plana.

### 4.3 Avaliação da tolerância de circularidade

Ainda segundo as tolerâncias de forma, foi analisado a circularidade dos furos do projeto com uma métrica de 80  $\mu\text{m}$ . Os resultados apresentados na Tabela 2 mostram que a maioria dos círculos está dentro da tolerância, porém ainda assim, muitos estão fora.

Tabela 2 - Análise Circularidade

| Elemento         | Tipo de Tolerância | Métrica ( $\mu\text{m}$ ) | Variação da Forma ( $\mu\text{m}$ ) | Observações                                |
|------------------|--------------------|---------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------|
| <b>Círculo 1</b> | Circularidade      | 80                        | 63,3                                | 16,7 $\mu\text{m}$ de distância do limite  |
| <b>Círculo 2</b> | Circularidade      | 80                        | 86,2                                | -6,2 $\mu\text{m}$ de distância do limite  |
| <b>Círculo 3</b> | Circularidade      | 80                        | 39,3                                | 40,7 $\mu\text{m}$ de distância do limite  |
| <b>Círculo 4</b> | Circularidade      | 80                        | 87,8                                | -7,8 $\mu\text{m}$ de distância do limite  |
| <b>Círculo 5</b> | Circularidade      | 80                        | 161,5                               | -81,5 $\mu\text{m}$ de distância do limite |
| <b>Círculo 6</b> | Circularidade      | 80                        | 88,3                                | -8,3 $\mu\text{m}$ de distância do limite  |
| <b>Círculo 7</b> | Circularidade      | 80                        | 66,0                                | 14,0 $\mu\text{m}$ de distância do limite  |
| <b>Círculo 8</b> | Circularidade      | 80                        | 59,1                                | 20,9 $\mu\text{m}$ de distância do limite  |
| <b>Círculo 9</b> | Circularidade      | 80                        | 70,9                                | 9,1 $\mu\text{m}$ de distância do limite   |

Fonte: Próprio Autor.

Os círculos 2, 4 e 6 ultrapassaram o limite em 6,2; 7,8 e 8,3  $\mu\text{m}$ , respectivamente. Apesar disso, o excesso é pequeno, dando uma ideia de que estão apenas ligeiramente fora da tolerância e podem demandar atenção em processos futuros. Por outro lado, o círculo 5 ultrapassou o limite em um valor significativo (81,5  $\mu\text{m}$ ).

O círculo 3 apresenta menor variação de forma (39,3  $\mu\text{m}$ ), indicando a melhor adequação ao critério de circularidade.

#### 4.4 Avaliação da tolerância de posição

Ainda para os círculos, utilizando a MMC, foram definidas as posições reais para analisar a tolerância de acordo com a métrica estabelecida em relação ao datum A (eixo central do círculo 1). O resultado se encontra disposto na Tabela 3.

**Tabela 3 – Análise da posição**

| <b>Elemento</b>  | <b>Tipo de Tolerância</b> | <b>Dimensão</b> | <b>X (mm)</b> | <b>Y (mm)</b> | <b>Diâmetro (mm)</b> |
|------------------|---------------------------|-----------------|---------------|---------------|----------------------|
| <b>Círculo 1</b> | Referência                | -               | 0             | 0             | 29,8625              |
| <b>Círculo 2</b> | Posição                   | Nominal         | 0,0000        | 0,0000        | 67,7811              |
|                  |                           | Medida          | 0,0180        | 0,0446        |                      |
| <b>Círculo 3</b> | Posição                   | Nominal         | 20,0000       | 20,0000       | 7,9172               |
|                  |                           | Medida          | 20,3514       | 20,3250       |                      |
| <b>Círculo 4</b> | Posição                   | Nominal         | 0,0000        | 0,0000        | 47,5310              |
|                  |                           | Medida          | 0,0683        | 0,1580        |                      |
| <b>Círculo 5</b> | Posição                   | Nominal         | 38,0000       | 25,0000       | 17,2731              |
|                  |                           | Medida          | 37,7423       | 24,8026       |                      |
| <b>Círculo 6</b> | Posição                   | Nominal         | 33,0000       | 38,0000       | 19,8579              |
|                  |                           | Medida          | 32,9556       | 38,0394       |                      |
| <b>Círculo 7</b> | Posição                   | Nominal         | 55,0000       | 25,0000       | 7,8374               |
|                  |                           | Medida          | 54,8207       | 24,8559       |                      |
| <b>Círculo 8</b> | Posição                   | Nominal         | 55,0000       | 6,0000        | 7,8899               |
|                  |                           | Medida          | 54,7426       | 5,9357        |                      |
| <b>Círculo 9</b> | Posição                   | Nominal         | 55,0000       | 25,0000       | 7,8164               |
|                  |                           | Medida          | 54,7078       | 24,8748       |                      |

**Fonte: Próprio Autor.**

Após tratar os dados, a tolerância de posição foi aplicada para analisar a distância entre os centros dos círculos 3, 5, 6, 7, 8 e 9 com relação ao círculo de referência 1 assim como para verificar a concentricidade entre os círculos 2 e 4, em relação a mesma referência.

A zona de tolerância é de formato cilíndrico e seu diâmetro é independente da dimensão real da característica na maioria dos círculos. No entanto, para os círculos 7, 8 e 9, foi aplicada a condição de máximo material, determinando o diâmetro da zona de tolerância com a adição do

bônus. Para isso, utilizam-se os diâmetros reais especificados na Tabela 3.

A análise foi separada em três partes, primeiro analisando a posição dos círculos 3,5 e 6 onde a métrica definida é que a zona de tolerância deve ter o diâmetro de 0,2 mm, portanto para estar dentro da tolerância as variações entre a dimensão nominal e a real tem que ser menor que o raio da zona de tolerância nos eixos X e Y.

**Tabela 4 - Avaliação tolerância de posição**

| <b>Elemento</b>  | <b>Ø Zona de tolerância (mm)</b> | <b>Variação máxima permitida (mm)</b> | <b>Delta Posição X (mm)</b> | <b>Delta Posição Y (mm)</b> | <b>Situação</b> |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| <b>Círculo 3</b> | 0,2000                           | 0,1000                                | 0,3514                      | 0,3250                      | Fora            |
| <b>Círculo 5</b> | 0,2000                           | 0,1000                                | 0,2577                      | 0,1974                      | Fora            |
| <b>Círculo 6</b> | 0,2000                           | 0,1000                                | 0,0444                      | 0,0394                      | Dentro          |

**Fonte: Próprio Autor.**

Como resultado os círculo 3 e 5 apresentaram desvios em X e Y superiores à variação máxima permitida (0,1 mm) indicando não conformidade enquanto que o círculo 6 teve variações em X e Y que estão abaixo do limite máximo permitido, indicando que este elemento está dentro das especificações.

A segunda parte foi analisado a concentricidade dos círculos 2 e 4 em relação ao datum A. A métrica estabelecida é que a zona de tolerância deve ter o diâmetro de 0,1 mm, assim sendo, o valor máximo aceitável para a variação de posição em cada eixo é de 0,05 mm.

Tabela 5 - Avaliação concentricidade

| Elemento         | Ø Zona de tolerância (mm) | Variação máxima permitida (mm) | Delta Posição X (mm) | Delta Posição Y (mm) | Situação |
|------------------|---------------------------|--------------------------------|----------------------|----------------------|----------|
| <b>Círculo 2</b> | 0,1000                    | 0,0500                         | 0,0180               | 0,0446               | Dentro   |
| <b>Círculo 4</b> | 0,1000                    | 0,0500                         | 0,0683               | 0,0683               | Fora     |

Fonte: Próprio Autor.

Como resultado o círculo 2 está conforme porque teve deslocamentos em X e Y abaixo do limite máximo permitido enquanto o círculo 4 não está conforme pois ambos os valores de deslocamento superaram o limite.

Na terceira e última análise, os círculos 7, 8 e 9 foram avaliados considerando a aplicação da condição de máximo material. O diâmetro especificado para a zona de tolerância foi de 0,4 mm, então, como os furos estão na condição de máximo material, ou seja, no menor diâmetro permitido, é possível adicionar uma tolerância bônus à medida que o diâmetro real do furo se distancia do MMC. A Tabela 6 apresenta a tolerância bônus correspondente a cada elemento, bem como o diâmetro total da zona de tolerância.

Tabela 6 – Tolerância bônus

| Elemento         | Ø Zona de tolerância (mm) | Diâmetro do furo na condição MMC (mm) | Diâmetro real do furo (mm) | Tolerância bônus (mm) | Diâmetro total da zona de tolerância |
|------------------|---------------------------|---------------------------------------|----------------------------|-----------------------|--------------------------------------|
| <b>Círculo 7</b> | 0,4000                    | 7,8000                                | 7,8374                     | 0,0374                | 0,4374                               |
| <b>Círculo 8</b> | 0,4000                    | 7,8000                                | 7,8899                     | 0,0899                | 0,4899                               |
| <b>Círculo 9</b> | 0,4000                    | 7,8000                                | 7,8164                     | 0,0164                | 0,4164                               |

Fonte: Próprio Autor.

Portanto, pode-se fazer a análise da máxima variação permitida. Pela tabela 7, nota-se que mesmo com o uso do modificador de MMC, dois dos três elementos avaliados não atendem aos requisitos, apenas o Círculo 7 está dentro dos limites especificados, enquanto que os círculos 8 e 9 excederam os limites estabelecidos.

**Tabela 7 -Avaliação da posição com modificador de MMC**

| <b>Elemento</b>  | <b>Ø Zona de tolerância (mm)</b> | <b>Variação máxima permitida (mm)</b> | <b>Delta Posição X (mm)</b> | <b>Delta Posição Y (mm)</b> | <b>Situação</b> |
|------------------|----------------------------------|---------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-----------------|
| <b>Círculo 7</b> | 0,4374                           | 0,2187                                | 0,1793                      | 0,1441                      | Dentro          |
| <b>Círculo 8</b> | 0,4899                           | 0,2450                                | 0,2574                      | 0,0643                      | Fora            |
| <b>Círculo 9</b> | 0,4164                           | 0,2082                                | 0,2922                      | 0,1252                      | Fora            |

**Fonte: Próprio Autor.**

## 5 CONCLUSÃO E SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A aplicação das técnicas de Dimensionamento e Toleranciamento Geométrico associadas ao uso de Máquinas de Medição por Coordenadas demonstrou ser uma estratégia eficaz para aprimorar o controle dimensional de peças usinadas. Por meio da abordagem apresentada neste trabalho, foi possível verificar como o GD&T é especificado no desenho técnico de um projeto para garantir a comunicação clara e confiável, enquanto a MMC garante medições com alta exatidão e repetibilidade.

Os resultados obtidos com a peça evidenciam o potencial dessa integração entre engenharia de projeto e metrologia avançada. A utilização do software MCOSMOS com o módulo GEOPAK mostrou-se eficiente na interpretação dos dados medidos de forma extremamente rápida possibilitaram as seguintes conclusões:

- A maioria das dimensões medidas está dentro das tolerâncias dimensionais especificadas, exceto três características (Círculos 2, 4 e 5), que não estão conformes, indicando problemas dimensionais nesses pontos específicos;
- Dos doze planos avaliados, dez atendem à métrica estabelecida, com destaque para os planos 3 e 10, que estão muito próximos de uma geometria perfeitamente plana. No entanto, os planos 5 e 8 ultrapassaram ligeiramente o limite, dando a possibilidade de revisão da especificação da tolerância ou a confirmação da não conformidade;
- A maioria dos furos está dentro da tolerância de circularidade, mas os círculos 2, 4 e 6 ultrapassaram ligeiramente o limite, sugerindo necessidade de atenção futura. O círculo 5 apresentou um desvio significativo, indicando uma falha relevante nessa característica;
- A análise da posição dos círculos em relação ao datum A revelou que os círculos 3, 4 e 5 estão fora da tolerância de posição, com variações superiores ao limite máximo permitido juntamente com os círculos 8 e 9, mesmo após a aplicação da tolerância bônus;
- Apenas os círculos 2, 6 e 7 estão dentro da tolerância de posição;
- Em relação a essas tolerâncias especificadas no projeto a peça seria reprovada.

Como sugestões para trabalhos futuros, recomenda-se os seguintes tópicos para aprofundamento e continuidade da pesquisa:

- Avaliar peças fabricadas por outros processos, como fundição.

- Comparar os resultados obtidos com peças produzidas por diferentes métodos de fabricação, como usinagem CNC e manufatura aditiva;
- Investigar o uso de GD&T em modelos CAD com Model-Based Definition (MBD).

## 6 REFERÊNCIAS

ALBERTAZZI, Armando; SOUSA, André Roberto de. **Fundamentos de metrologia científica e Industrial**. [S.l.]: Manole, 2008.

ARENHART, Rodrigo S.; PIZZOLATO, Morgana. Análise de Sistemas de Medição em uma Máquina de Medir por Coordenadas. **Revista FSA**, v. 17, n. 6, p. 182–203, 2020.

ASME B89.4.10360.2. **Acceptance Test and Reverification Test for Coordinate Measuring Machines (CMMs) Part 2: CMMs used for measuring linear dimensions** (technical report). [S.l.], 2008. Disponível em: <https://www.asme.org/codes-standards/find-codes-standards/acceptance-test-and-reverification-test-for-coordinate-measuring-machines-%28cmms%29-part-2-cmms-used-for-measuring-linear-dimension-%28technical-report%29?form=MG0AV3>. Acesso em: 29 de Janeiro de 2025.

ASME Y14.5. **Dimensioning and Tolerancing**: Engineering product definition and related documentation practices. New York, NY, USA, 2018.

FERREIRA, F. A. M.; GUERRA, H. A. G. Os desafios da metrologia por coordenadas nos processos controle das especificações dimensionais e geométricas de componentes técnicos, no novo paradigma da indústria 4.0. **Revista Produção e Desenvolvimento**, v. 4, n. 1, p. 125–132, 2018.

FERREIRA, Fernando A. M.; OLIVA, Jesus de Vicente y; PEREZ, Angel M. Sanchez. Evaluation of the performance of coordinate measuring machines in the industry, using calibrated artefacts. **Procedia Engineering**, 2013.

GAIKWAD Siddhant R.; PAWAR Nikhil H.; SAPKAL Sagar U. Comparative evaluation of 3D printed components for deviations in dimensional and geometrical features. **Materials Today: Proceedings**, 2022.

GUIMARÃES, Osvaldo Sena. **Engenharia no Século XXI**. [S.l.]: Poisson, 2021. v. 23.

GUST Peter; SERSCH Alina. Geometrical Product Specifications (GPS): A Review of Teaching Approaches. **Procedia CIRP**, 2020.

HEXAGON. **Gantry CMMs**. 2025. Disponível em: <https://hexagon.com/products/product-groups/measurement-inspection-hardware/coordinate-measuring-machines/gantry-cmms>. Acesso em: 12 de Março de 2025.

HEXAGON. **Leitz Infinity**: Most accurate CMM within its class. 2025. Disponível em: <https://hexagon.com/products/leitz-infinity>. Acesso em: 12 de Março de 2025.

HOCKEN, Robert J.; PEREIRA, Paulo H. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. 2. ed. [S.l.]: CRC Press, 2012.

HOFMANN Robert; GRÖGER Sophie. Closed loop geometrical tolerance engineering with measuring data for reverse information processing. **Procedia CIRP**, 2019.

HUMIENNYA Zbigniew. State of art in standardization in the geometrical product specification area a decade later. **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 2021.

HUMIENNYA Zbigniew; BERTAB Marcin. GPS training tool. **Procedia CIRP**, 2020.

JODAR, Jose; FRANCO, Patricio. Equivalent error-based modelling for prediction and analysis of measuring accuracy in 3-axis fxyz coordinate measuring machines from position, repeatability and reversibility errors. **International Journal of Precision Engineering and Manufacturing**, 2024.

KRULIKOWSKI Alex. **The Ultimate GD&T Pocket Guide**: A companion to the ASME Y14.5-2009 Dimensioning & Tolerancing Standard. 2. ed. [S.l.]: Effective Training Inc., 2009.

KRULIKOWSKI Alex. Fundamentals of Geometric Dimensioning and Tolerancing. [S.l.]: Cengage Learning, 2012.

LIRA, Francisco Adval de. **Metrologia Dimensional**: Técnicas de medição e instrumentos para controle e fabricação industrial. [S.l.]: Érica, 2015.

MALTAURO Mattia; MORSE Edward. Towards a Definition of “Geometric Verification Specifications” Within the ISO GPS System. **Procedia CIRP**, 2023.

MITUTOYO. **CRYSTA-APEX S SERIES**: High-performance, low-price cnc coordinate measuring machine meets global standards. 2018. Disponível em: [https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/CRYSTA\\_ApexS-\\_2202.pdf](https://www.mitutoyo.com/webfoo/wp-content/uploads/CRYSTA_ApexS-_2202.pdf). Acesso em: 06 de Abril de 2025.

MITUTOYO. **Catálogos de Novos Produtos**. 2019. Disponível em: [https://www.mitutoyo.com.br/download/catalogogeral/p2019/M%C3%A1quina%20de%20medir%20por%20Coordenadas\\_6.pdf](https://www.mitutoyo.com.br/download/catalogogeral/p2019/M%C3%A1quina%20de%20medir%20por%20Coordenadas_6.pdf). Acesso em: 15 de fevereiro de 2025.

MOHAMMED Shafi K.; ARBO Mathias H.; TINGELSTAD Lars. Using semantic geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) information from step ap242 neutral exchange files for robotic applications. **International Journal on Interactive Design and Manufacturing**, 2023.

MOONA, Girija *et al.* Measurement uncertainty assessment of articulated arm coordinate measuring machine for length measurement errors using Monte Carlo simulation. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology**, 2022.

MORSE Edward. Opportunities and Constraints in the Standardization of Geometrical Product Specification. **Procedia CIRP**, 2020.

NIKAM, Rohit Raju. COORDINATE MEASURING MACHINE (CMM). **International Journal of Mechanical and Industrial Technology**, v. 6, n. 2, p. 13–19, 2019. ISSN 2348-7593.

ORREGO, Roxana M. Martinez; GIACOMO, Benedito Di; ABACKERLI, Alvaro J. Fontes de erros em metrologia a três coordenadas: considerações gerais. **Revista de Ciência & Tecnologia**, v. 8, n. 16, p. 43–56, 2000.

PEI Eujin *et al.* A review of geometric dimensioning and tolerancing (GD&T) of additive manufacturing and powder bed fusion lattices. **Progress in Additive Manufacturing**, 2022.

PISCOPO Gabriele; SALMI Alessandro; ATZENI Eleonora. Investigation of dimensional and geometrical tolerances of laser powder directed energy deposition process. **Precision Engineering**, 2024.

PORATH, M. de C.; SOUSA, A. R. de. A tecnologia de medição por coordenadas no ciclo de desenvolvimento de produtos plásticos. **Fundação CERTI**, 2002.

RENISHAW. **PH10M PLUS / PH10MQ PLUS**: motorised indexing probe head. 2018. Disponível em: <https://www.renishaw.com/cmmsupport/knowledgebase/en/ph10m-plus-ph10mq-plus-motorised-indexing-probe-head--22148>. Acesso em: 06 de Abril de 2025.

RUPAL Baltej Singh; RAMADASS Kamalakannan; QURESHI Ahmed Jawad. Investigating the effect of motor micro-stepping on the geometric tolerances of fused filament fabrication printed parts. **Procedia CIRP**, 2020.

SCHULDT Juliane; GRÖGER Sophie. The assessment of the ISO GPS system implementation with a GPS maturity model. **Procedia CIRP**, 2022.

SILVA NETO, João Cirilo da. **Metrologia e Controle Dimensional**. [S.l.]: Elsevier Editora LTDA, 2012.

SOUSA, André R.; WANDECK, M. Desafios operacionais e metrológicos da medição por coordenadas no ambiente de manufatura digital. **2º CONGRESSO INTERNACIONAL DE METROLOGIA MECÂNICA**, 2011.

SOUSA, André Roberto de. Integração de sistemas de medição por coordenadas na medição em linhas de produção. **8º Congresso Brasileiro de Engenharia de Fabricação**, 2015.

STAR Market. **Desmistificando CMM**: Entendendo os fundamentos das máquinas de medição por coordenadas. 2024. Disponível em: <https://www.3d-scantech.com/pt/the-basics-of-coordinate-measuring-machines/>. Acesso em: 15 de Fevereiro de 2025.

STIUSO Vito *et al.* Benchmarking analysis of digital light processing resins in terms of dimensional accuracy and geometric tolerances. **Materials Today: Proceedings**, 2022.

SUN Wangping; GAO Yanqing. The Rule-based Specification of the Datum-based Model for Geometric Dimensioning & Tolerancing. **Procedia CIRP**, 2022.

TORNINCASA, Stefano. **Technical Drawing for Product Design**: Mastering ISO GPS and ASME GD&T. [S.l.]: Springer, 2024.

TORO Javier Villena; WIBERG Anton; TARKIAN Mehdi. Optical character recognition on engineering drawings to achieve automation in production quality control. **Frontiers in Manufacturing Technology**, 2023.

UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA. **Laboratório de Engenharia de Precisão**. 2017. Disponível em: <http://www.ct.ufpb.br/ctdem/contents/paginas/laboratorios/laboratorio-de-engenharia-de-precisao>. Acesso em: 06 de Abril de 2025.

YAN Yiqing *et al.* Complementing and enhancing definitions of position tolerance for a real point based on ISO geometrical product specifications (GPS). **CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology**, 2018.

## Anexos

### ANEXO A – ARQUIVO DE RESULTADOS EXPORTADO PELO SOFTWARE DA MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS



Protocol number (0)

User name

Admin

13.05.2024 09:12

Part name

Novo treinamento2023

| 1       | 2      | 3                        | 4        |                          |                        |                         |                                |          |
|---------|--------|--------------------------|----------|--------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|----------|
| El. No. | Lin No | Element                  | Pnt. Ref | X-Coord. X-Angle Nominal | Y-Coord. Y-Angle Up/Lo | Z-Coord. Z-Angle Actual | Diameter Dist./Ang. Dev./Error | Variance |
| 1       | 3      | Plano 1 Mean             | 4        | -0.4127<br>90.0784       | -0.3845<br>90.0731     | 301.4815<br>0.1072      |                                | 0.0253   |
| 1       | 7      | Linha 1                  | 2        | -5.0501<br>0.8964        | 322.7640<br>89.1036    | 0.0000<br>90.0000       | 322.8035                       |          |
| 1       | 11     | Circulo 1 Mean           | 4        | 338.0875                 | 367.7518               | 294.1449                | 29.8625                        | 0.0633   |
| 2       | 15     | Circulo 2 Mean           | 4        | -0.0180                  | -0.0446                | 6.1946                  | 67.7811                        | 0.0862   |
| 3       | 18     | Circulo 3 Mean           | 4        | -20.3514                 | 20.3250                | -2.7512                 | 7.9172                         | 0.0393   |
| 4       | 21     | Circulo 4 Mean           | 4        | -0.0683                  | -0.1580                | 1.3479                  | 47.5310                        | 0.0878   |
| 2       | 24     | Linha 2                  | 2        | -0.0527<br>0.5885        | 5.1314<br>89.4115      | 0.0000<br>90.0000       | 5.1317                         |          |
| 3       | 27     | Linha 3                  | 2        | 0.0121<br>0.1365         | -5.0750<br>89.8635     | 0.0000<br>90.0000       | 5.0750                         |          |
| 1       | 30     | Distance no compensation |          | 0.1033                   | -10.0537               | 0.0000                  | 10.0542                        |          |
| 5       | 31     | Circulo 5 Mean           | 4        | -37.7423                 | 24.8026                | 4.8318                  | 17.2731                        | 0.1615   |
| 6       | 34     | Circulo 6 Mean           | 4        | -32.9556                 | -38.0394               | 6.3485                  | 19.8579                        | 0.0883   |
| 2       | 37     | Plano 2 Mean             | 4        | -0.0017<br>89.9638       | 0.0019<br>90.0400      | -2.7316<br>0.0539       |                                | 0.0135   |
| 2       | 40     | Distance no compensation |          | 0.0000                   | 0.0000                 | -10.0665                | 10.0665                        |          |
| 3       | 41     | Plano 3 Mean             | 4        | 0.0172<br>89.9780        | -44.8248<br>179.2894   | -0.5557<br>90.7103      |                                | 0.0007   |
| 4       | 44     | Plano 4 Mean             | 4        | -0.0104<br>90.0134       | 44.3777<br>4.6101      | 3.5784<br>85.3899       |                                | 0.0293   |
| 3       | 47     | Distance no compensation |          | -0.0343                  | 89.1608                | 1.1053                  | 89.1677                        |          |
| 5       | 48     | Plano 5 Mean             | 4        | -59.6559<br>178.2114     | 0.1690<br>89.8378      | -1.8552<br>91.7812      |                                | 0.0539   |
| 6       | 51     | Plano 6 Mean             | 4        | 104.6157<br>0.4340       | -0.3026<br>90.1657     | -0.7323<br>90.4011      |                                | 0.0148   |
| 4       | 54     | Distance no compensation |          | 164.0724                 | -0.4647                | 5.1023                  | 164.1523                       |          |
| 7       | 55     | Plano 7 Mean             | 4        | -49.5991<br>179.0196     | 0.1249<br>89.8558      | -0.8396<br>90.9698      |                                | 0.0048   |
| 5       | 58     | Distance no compensation |          | 9.9861                   | -0.0283                | 0.3105                  | 9.9910                         |          |
| 8       | 59     | Plano 8 Mean             | 4        | 45.7292<br>0.0449        | -0.0358<br>90.0449     | -0.0016<br>90.0021      |                                | 0.0515   |
| 6       | 62     | Distance no compensation |          | 95.4084                  | -0.2402                | 1.6150                  | 95.4224                        |          |
| 9       | 63     | Plano 9 Mean             | 4        | 94.7494<br>179.5011      | -0.2417<br>89.8539     | -0.7889<br>89.5230      |                                | 0.0217   |
| 7       | 66     | Distance no compensation |          | 9.8925                   | -0.0252                | -0.0824                 | 9.8929                         |          |
| 10      | 67     | Plano 10 Mean            | 4        | 84.4659<br>0.1638        | -0.2355<br>90.1598     | -0.0533<br>90.0361      |                                | 0.0003   |
| 8       | 70     | Distance no compensation |          | -10.1239                 | 0.0258                 | 0.0843                  | 10.1243                        |          |

| 1       |        |                          |          |                          |                        |                         |                                |          |
|---------|--------|--------------------------|----------|--------------------------|------------------------|-------------------------|--------------------------------|----------|
| 2       |        |                          |          |                          |                        |                         |                                |          |
| 3       |        |                          |          |                          |                        |                         |                                |          |
| 4       |        |                          |          |                          |                        |                         |                                |          |
| El. No. | Lin No | Element                  | Pnt. Ref | X-Coord. X-Angle Nominal | Y-Coord. Y-Angle Up/Lo | Z-Coord. Z-Angle Actual | Diameter Dist./Ang. Dev./Error | Variance |
| 7       | 71     | Circulo 7 Mean           | 4        | 54.8207                  | 24.8559                | -8.9789                 | 7.8374                         | 0.0660   |
| 8       | 74     | Circulo 8 Mean           | 4        | 54.7426                  | 5.9357                 | -9.2853                 | 7.8899                         | 0.0591   |
| 9       | 77     | Circulo 9 Mean           | 4        | 54.7078                  | -24.8748               | -9.2073                 | 7.8164                         | 0.0709   |
| 11      | 80     | Plano 11 Mean            | 4        | 0.0007                   | -0.0015                | 2.3639                  |                                | 0.0092   |
|         |        |                          |          | 89.9827                  | 90.0372                | 0.0411                  |                                |          |
| 12      | 83     | Plano 12 Mean            | 4        | -0.0004                  | 0.0000                 | -0.2629                 |                                | 0.0051   |
|         |        |                          |          | 89.9112                  | 90.0006                | 0.0888                  |                                |          |
| 9       | 86     | Distance no compensation |          | -0.0008                  | 0.0017                 | -2.6272                 | 2.6272                         |          |
| 10      | 87     | Distance no compensation |          | 0.0015                   | -0.0032                | 4.9739                  | 4.9739                         |          |
| 13      | 88     | Plano 13 Mean            | 4        | 0.0010                   | 0.0006                 | -1.6830                 |                                | 0.0085   |
|         |        |                          |          | 90.0330                  | 90.0193                | 0.0383                  |                                |          |
| 11      | 91     | Distance no compensation |          | -0.0008                  | -0.0005                | 1.4214                  | 1.4214                         |          |
| 12      | 92     | Distance no compensation |          | -0.0023                  | -0.0014                | 4.0472                  | 4.0472                         |          |