



UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

CENTRO DE TECNOLOGIA

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

FAGNER TARGINO SOUZA

**METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÕES USANDO UMA
MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA**

João Pessoa – PB

2018

FAGNER TARGINO SOUZA

**METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÕES USANDO UMA
MAQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA**

Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) Submetido a uma banca do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), como Parte dos requisitos de obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva

João Pessoa – PB

2018

Catálogo na publicação
Seção de Catalogação e Classificação

S729m Souza, Fagner Targino.

METODOLOGIA DE CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÕES USANDO UMA
MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA / Fagner Targino
Souza. - João Pessoa, 2018.

77 f.

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

1. Blocos Padrões. 2. Máquina de Medição Por
Coordenada. 3. Calibração. 4. Incerteza. I. Silva, João
Bosco de Aquino. II. Título.

UFPB/BC

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, autor e consumidor da minha fé.

A minha esposa e grande amor, companheira que me deu apoio, incentivo nas horas difíceis, de desânimo e cansaço.

A minha Mãe e irmão pelo amor e exemplo de perseverança e fé.

Ao meu orientador Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva pelo ensino, dedicação e auxílio para conclusão desta etapa.

E a todos que direta ou indiretamente fizeram parte da minha formação meu muito obrigado.

RESUMO

Os Blocos Padrões assumiram o papel de padronizar o conceito de comprimento e a materialização na análise dimensional, esforços na busca da qualidade e minimização dos erros tem sido um desafio na busca da qualificação da medição. Primeiramente com Eli Whitney entusiasta que implantou na ideia de Intercambialidade na indústria manufatureira e posteriormente Johansson dando o passo inicial mesmo enfrentando obstáculos na construção inovou e até hoje tem essa invenção como padrão mundial e referência de qualidade. Paralelo a isso tem-se o desenvolvimento técnico científico que, a fim de dar uma maior credibilidade através da qualidade na manufatura viu a necessidade de padronizar a produção industrial, com isso a criação de unidades reguladoras, dessa forma tem-se o surgimento de inúmeros órgãos que regimenta e padroniza a atividade técnica de forma a adequar a padrões internacionais, no Brasil tem-se a ABNT órgão fundado em 1940, instituição importante no âmbito nacional na elaboração de normas técnicas, sendo muita das vezes como modelo para outros órgãos colegiados. As mais diversas Normas Técnicas exemplificam praticamente os mesmos pontos, mesmo que com algumas alterações que variam de aplicações e direcionamento, outros pontos como tolerâncias especificadas, conceituação do objeto bem como as técnicas de calibrações que podem ser adotadas e quais as implicações no uso de cada uma são de certa forma iguais, da mesma forma as propriedades mecânicas inerentes ao material de fabricação dos blocos, Dureza, características de expansão e o comportamento do material frente ao ambiente como temperatura e exposição também são especificados e de certa forma padronizados. Existem duas técnicas de calibração especificadas e cada uma com particularidades, que dependendo da aplicação podem ser escolhida uma ou outra. A calibração por comparação consiste na intercomparação entre dimensões de um bloco a calibrar com outro previamente calibrado a um nível mais elevado chamado bloco de referencia, através de um equipamento chamado de comparador mecânico, sendo este usualmente utilizado em quando se deseja obter uma maior rapidez na análise e um custo baixo. Por outro lado o sistema interferométrico mais destinado à calibração de blocos de referencia, esse método resume-se na análise ótica através do comprimento de onda previamente conhecido, determinando as diferenças entre as franjas de interferências incididas em uma superfície inferior que após cálculos verifica-se o desvio dimensional e o comprimento do bloco, esse método é mais sofisticado e indicado quando deseja-se maior exatidão nos resultados. Como proposta para esse trabalho um método alternativo utilizando uma maquina de medição por coordenada (MMC), mostrou ser uma forma viável e bastante qualificada na calibração e análise dos desvios geométricos dos blocos padrões, a tecnologia agregada ao dispositivo e a versatilidade na rastreabilidade do resultado demonstrou a que a medição por coordenada o desenvolvimento de um dispositivo de fixação dos blocos a MMCs e a análise nos resultados frente aos desvios e incertezas o qualificaram ainda mais como uma ótima alternativa na calibração de blocos padrões.

Palavras-chave: Incerteza, Bloco Padrão, Calibração, Máquina de Medição por Coordenada, Interferometria, Comparação Mecânica.

ABSTRACT

The standard blocks assumed the role of standardizing the concept of length and materialization in dimensional analysis, efforts in the pursuit of quality and minimization of errors has been a challenge in the search for qualification of measurement. First with Eli Whitney enthusiast who implanted in the idea of interchangeability in the manufacturing industry and subsequently Johansson taking the initial step even facing obstacles in construction innovated and until today has this invention as a world standard and Quality reference. Parallel to this we have the scientific technical development that, in order to give greater credibility through the quality in the manufacture saw the need to standardize the industrial production, with this the creation of regulatory units, so we have the emergence of numerous organs that regiments and standardizes the technical activity in order to adapt to international standards, In Brazil we have the ABNT organ founded in 1940, an important institution at the national level in the elaboration of technical norms, being very often as a model for other collegiate organs. The most diverse technical Norms exemplify practically the same points, even with some changes that vary from applications and targeting, other points as specified tolerances, conceptualization of the object as well as the techniques of calibrations That can be adopted and what the implications in the use of each are somewhat equal, Similarly the mechanical properties inherent to the manufacturing material of the blocks, hardness, expansion characteristics and the behavior of the material facing the environment such as temperature and exposure are also specified and in a certain way standardized. There are two calibration techniques specified and each with particularities, which depending on the application can be chosen one or the other. The calibration by comparison consists of the intercomparison between dimensions of a block to be calibrated with the other one previously gauged at a higher level called the reference block, through an equipment called a mechanical comparator, which is usually Used when you want to get a faster analysis and a low cost. On the other hand, the interferometric system most intended for the calibration of reference blocks, this method is summarized in the optical analysis through the previously known wavelength, determining the differences between the fringes of reflected interferences On a lower surface that after calculations it is verified the dimensional deviation and the length of the block, this method is more sophisticated and indicated when you want greater accuracy in the results. As a proposal for this work an alternative method using a coordinate measuring machine (MMC), proved to be a viable and highly qualified form in the calibration and analysis of the geometric deviations of the standard blocks, the technology aggregated to the Device and the versatility in the traceability of the result demonstrated that the coordinated measurement the development of a block fixation device to MMCs and the analysis of the results in the face of deviations and uncertainties further qualified as a Optimum alternative to standard block calibration.

Key words: Uncertainty, Standard Block, Calibration, Coordinate Measuring Machine, Accuracy vice, Interferometry, Mechanical Comparison.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Fotografia de Carl Edward Johansson (Esquerda) e o Primeiro conjunto de Blocos Padrões (Direita).	12
Figura 2 - Distância do Ponto de medição da superfície superior ao plano adjacente do Bloco.	22
Figura 3 - Nomenclatura das Faces.	23
Figura 5 - Calibrador de bloco padrão no sistema diferencial por comparação mecânica.	27
Figura 6 - Medição do comprimento e do ponto central da superfície de medição do bloco por comparação, em relação à superfície oposta.	29
Figura 7 - Geometria básica de medições usando um comparador mecânico com duas pontas de contatos opostas.	30
Figura 8 - Localização dos pontos de calibração nos blocos padrões pelo método da comparação.	31
Figura 9 - Mudanças no comprimento dos blocos padrões de comprimento 100 mm de diferentes materiais a diversas temperaturas.	32
Figura 10 - Modelo de um interferômetro de bloco padrão baseado no sistema de Fizeau.	36
Figura 11 - Modelo de medição de comprimento por interferência. , (a) Sistema de Fizeau, (b) Twyman e Green, (c) padrão típico de uma superfície de interferométrica.	37
Figura 12 - Primeira Máquina de medição por coordenada desenvolvida pela Ferranti em 1970 (esquerda) e pela Mitutoyo Corporation em 1978 (direita)	41
Figura 13 - Máquina de medição por coordenada modelo ponte.	43
Figura 14 - Sistema de Coordenada Tridimensional.	44
Figura 15 - Fontes de incertezas na medição com MMCs.	47
Figura 16 - Exemplificação de erros paramétricos do Eixo Y.	48
Figura 17 - Cabeçotes Apalpadores do tipo reto TTP.	49
Figura 18 - Máquina de medição por Coordenada do LEP.	54
Figura 19 - Mesa Rotativa Mitutoyo MRT 320.	55
Figura 20 - Bloco padrões utilizados na análise das calibrações.	56
Figura 25 - Tela de menu do sistema computacional de uma MMC.	58
Figura 26 - Fluxograma referente ao sistema de calibração partindo do método de GUM.	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
1.1. OBJETIVOS GERAIS.....	10
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	10
2. DEFINIÇÃO, HISTÓRICO E FUNDAMENTOS DOS BLOCOS PADRÕES.....	10
2.1. A HISTÓRIA E NORMALIZAÇÃO DOS BLOCOS PADRÕES.....	10
2.2. PROPRIEDADE DOS BLOCOS PADRÕES	15
2.2.1. Propriedades Mecânicas	16
2.2.1.1. Expansão térmica	17
2.2.1.2. Dureza	19
2.2.1.3. Estabilidade Dimensional.....	20
2.2.2. Propriedades Metrológicas	22
2.2.2.1. Planicidade e Acabamento superficial.....	23
2.3. TOLERÂNCIAS DOS BLOCOS PADRÕES	24
3. CALIBRAÇÃO DOS BLOCOS PADRÕES	25
4. TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO	26
4.1. CALIBRAÇÃO DE BLOCO PADRÃO POR COMPARAÇÃO MECÂNICA	26
4.1.1. Princípio da comparação	27
4.1.2. Comparadores Mecânicos de blocos padrões.....	30
4.1.3. Incertezas na calibração por comparação	31
4.1.3.1. Calibração do bloco de referência	31
4.1.3.2. Efeitos da temperatura.....	32
4.1.3.3. Deformações Elásticas	33
4.2. CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÕES POR INTERFEROMETRIA	33
4.2.1. Princípio da Interferometria	35
4.2.2. Erros e Incertezas na calibração por interferometria.....	37
5. CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÃO UTILIZANDO MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA.....	39
5.1. DEFINIÇÃO E CONCEITOS	39
5.2. BREVE HISTÓRICO SOBRE AS MMCs	40
5.3. ESTRUTURA DAS MÁQUINAS DE MEDIÇÃO POR COORDENADAS.....	42
5.4. PRINCÍPIO DA MEDIÇÃO COM MMCs.....	44
5.5. RASTREABILIDADE NO SISTEMA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA.....	46
5.6. ERROS E INCERTEZAS NA MEDIÇÃO	47
5.6.1. Erros na Estrutura e geometria	48
5.6.2. Erros no Sistema apalpador	49

5.6.3.	Erros no Sistema de controle.....	50
5.6.4.	Erros relativos à temperatura e ao Ambiente de medição	51
5.6.5.	Erros relativos peça	51
5.6.6.	Redução das fontes de erros nas MMCs	52
5.7.	PRINCIPIO DE CALIBRAÇÃO DOS BLOCOS PADRÕES.....	53
6.1.	MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA MITUTOYO CRYSTA-APEX S.....	53
6.2.	O CONJUNTO DE BLOCOS PADRÕES.....	55
7.	METODOLOGIA DE ANÁLISE E RESULTADOS	57
8.	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	67
9.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	69

1. INTRODUÇÃO

Desde a ideia principal do tema proposto por esse trabalho, o conceito da calibração dos Blocos Padrões por medição por coordenada pareceu um tanto óbvia e fácil haja vista, que a proposta dada as MMCs é exclusiva a rapidez na verificação dimensional e análise de peças de formatos complexos, neste caso a pensar que como um simples bloco retangular de geometria simples de certa forma subestima a capacidade de uma máquina não projetada pra isso especificamente, mas sendo esta previamente capaz de executar a tarefa devido à variabilidade nas funções inseridas. Mas, o que se viu na prática é que não são apenas características dimensionais que devem ser levadas em consideração, outros fatores como propriedades mecânicas, condições ambientais as incertezas introduzidas no processo, torna-se até ainda mais relevantes para qualificar a calibração dos blocos em uma MMC.

Na abordagem do trabalho um breve histórico tanto nas características normativas como no processo de conceituação e desenvolvimento dos blocos padrões, apresentou a importância desse elemento para o desenvolvimento industrial, posteriormente a conceituação sobre o que compõe um bloco como as superfícies de medição, ponto médio, características de dureza, expansão térmica e deformação são bem detalhadas e apresenta vários aspectos prévios que seriam utilizados posteriormente na calibração. Entrando na abordagem do tema a calibração dos blocos abrange normativamente dois métodos; um através da comparação direta e outro através da interação ótica com as superfícies do mensurando; esses métodos até certo ponto confiáveis dentro de um contexto de aplicação, que também apresentam incertezas que se não forem controladas podem gerar variações na medição direta, outro ponto trata-se dos princípios de medição agregados a cada um dos métodos de calibração normalizado cada um com sua particularidade e aplicação. Esse trabalho também destaca a questão das principais informações e características das máquinas de medição compreendendo desde um contexto histórico em relação a como iniciou e quais eram as limitações impostas no contexto da época e o avanço gradativo ao longo do tempo, fala-se também da tecnologia agregada aos sistemas computacionais e a interface adotada pelos fabricantes, bem como uma breve explanação sobre os erros intrínsecos ao maquinário e a Unidade lógica aritmética.

1.1. Objetivos Gerais

Esse trabalho de conclusão de curso tem por objetivo criar uma metodologia alternativa para calibração de blocos padrões utilizando uma Máquina de Medição por Coordenada, bem como análise das medições obtidas e a incerteza atribuída por esse método.

1.2. Objetivos Específicos

- a) Relacionar os métodos tradicionais de calibração com o método de coordenadas tridimensionais;
- b) Verificar a possível viabilidade da medição de Blocos Padrões através do princípio de medição utilizando coordenadas tridimensionais;
- c) Apontar as principais características das MMC;
- d) Obter a partir do método de GUM o resultado final da medição;

2. DEFINIÇÃO, HISTÓRICO E FUNDAMENTOS DOS BLOCOS PADRÕES.

Definimos Blocos padrões como:

"Uma medida de comprimento materializada. Isto é, um corpo rígido em aço, metal sinterizado ou cerâmico resistente ao desgaste, com comprimento definido por duas superfícies planas e paralelas entre si. Estas superfícies são lapidadas com grau de acabamento espelhado, permitindo que ele seja aderido a outros blocos com acabamento similar". (NBR NM 215, 2000).

Os blocos possuem comprimentos na ordem de fração de uma unidade de medida padrão, por exemplo, o metro (Sistema Internacional de Unidades (SI)), Por convenção, o comprimento do bloco é definido como sendo um ponto particular da superfície de medição perpendicularmente a uma superfície plana rígida de mesmo material e acabamento onde ele foi aderido. (ISO 3.650, 1998).

2.1. A História e Normalização dos Blocos padrões

Para entender a história dos Blocos Padrões inicialmente tem que voltar ao Século XIX Século marcado pelo avanço tecnológico e científico, que com o aumento da produção

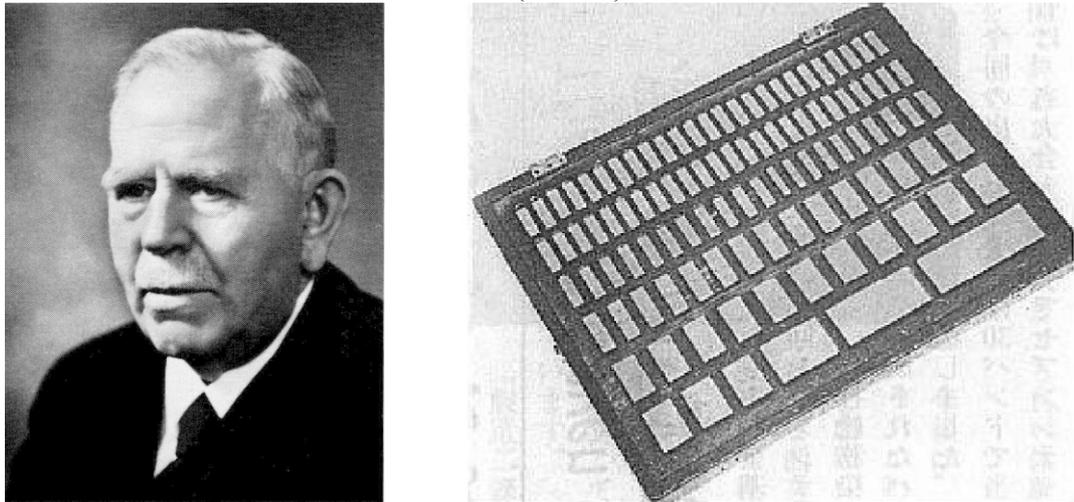
industrial e a imensa quantidade de maquinários se fez necessário à padronização de peças existentes na indústria, daí surgiu o conceito de intercambialidade que devido ao aumento da produção em série o governo pouco a pouco transferia essa responsabilidade de ter uma produção normatizada aos cientistas e estudiosos da época. (DOIRON e BEERS, 1995). Esse modelo de intercambialidade foi introduzido por Eli Whitney um Engenheiro Mecânico por volta de 1798 nos Estados Unidos. Whitney trabalhava em uma fábrica de armamentos, e no auge da possível Guerra entre os Estados Unidos e a França se empenhou em fornecer material bélico ao governo em um curto espaço de Produção, sua relação direta na montagem de diferentes tipos de armas de fogo (Riffes) e com o mesmo conjunto de peças e mecanismos, mesmo sendo de fabricação complexas todas as peças que compunham o conjunto eram produzidas em maquinários diferentes isso aumentava o tempo de produção e o setup na montagem. (MITUTOYO, 2013)

Whitney propôs essa ideia de intercambialidade e foi amplamente aceita pela nação industrial dos Estados Unidos como um facilitador na escolha do método de produção e até na manutenção dos armamentos, mesmo sendo necessária para fabricação mão de obra especializada e um custo mais alto devido a melhor precisão na fabricação das peças. Dentre várias condições de operação uma das desvantagens encontrada nas intercambialidade foi à utilização de instrumentos de medições mais precisos a fim de controlar tolerâncias dimensionais e até a calibração desses instrumentos. Para resolver essa problemática um maquinista Sueco de nome Carl Edvard Johansson em 1896 (Figura 1), que trabalhava também em uma fábrica de armas a Carl Gustafs Stads Rifle Factory em Eskilstuna na Suécia e atuava diretamente com a inspeção e controle de qualidade das Ferramentas de medição usadas na fabricação, naquela época a indústria armamentista estava em grande ascensão e era a principal produção em massa. Devido a dificuldade encontrada com relação aos instrumentos de medição estima-se que cada tipo de arma possuía um tipo específico de ferramentas isso gerava um maior dispêndio no processo produtivo assim como acontecia anteriormente, naquela época o micrômetro fabricado pela Brown & Sharpe Corporation era o instrumento com maior exatidão, cerca de 0,001 inch ou 0,0254 milímetros que após determinado tempo de uso era necessária sua calibração, sendo esta feita pelos próprios funcionários sem nenhum padrão de aferição. (MITUTOYO, 2013)

Johansson propôs o conceito de um conjunto de blocos padrões capaz de medir com exatidão qualquer medida de comprimento de um número relativo de peças, a medição composta da soma dessas combinações poderia ser reduzida a quantidade de blocos. Em

outras palavras Johansson formulou que a combinação de diferentes medidas de blocos formaria um padrão final de comprimento. Após desenvolvimentos na área Johansson descobriu que se duas faces opostas sendo estas lapidadas de um pequeno bloco de aço tendo estes um perfeito paralelismo entre as faces, que devido à mínima rugosidade superficial causaria uma atração intermolecular entre as superfícies das faces. Essa idéia foi amplamente aceita pela indústria até mesmo por grandes influenciadores da administração moderna como Henry Ford. Johansson iniciou com a produção de um conjunto de 102 Blocos (Figura 1) que combinados deram um total de 20 mil combinações diferentes que iam desde 1 a 201 milímetros com o acréscimo de $0,001\text{ mm}$, o que ele chamou de conjunto de Blocos padrões. (DOIRON e BEERS, 1995)

Figura1 - Fotografia de Carl Edward Johansson (Esquerda) e o Primeiro conjunto de Blocos Padrões (Direita)



Fonte: Encyclopedia of Engineering

Mesmo sendo um grande avanço na época encontrou algumas dificuldades com relação a sua patente ficando ela arquivada inicialmente no ano de 1898 pelo Governo Norte Americano, onde só conseguiu a patente posteriormente no ano de 1908 após pedido a família Real Sueca. Apesar de alguns sucessos na produção experimental dos blocos Johansson desfrutou de alguns contratemplos no processo de fabricação que eram feito inicialmente artesanalmente, como exemplo os primeiros blocos produzidos por volta de 1900 levavam em tornos de 2 anos para serem fabricados, o que de acordo com o passar do tempo obrigou a necessidade de um nível de produção mais aprimorado, o processo de produção inicial consistia na Fundição, Tratamento Térmico, Lapidação e Inspeção até uma máquina de costura foi adaptada para dar polimento e acabamento final aos blocos. Os Primeiros Blocos produzidos tinham um formato retangular de dimensões $9 \times 28\text{ mm}$ eram feitos de uma chapa

de aço utilizada na fabricação de armamentos de 10 *mm* de espessura. (MITUTOYO, 2013) Porém esse material era um tanto susceptível ao uso e a corrosão e também causava certa instabilidade dimensional em um curto espaço de tempo, após anos de aprimoramento no processo de produção Johansson passou a selecionar o material depois de convênio com metalúrgicas Suecas onde naquela época produziam o ferro de mais alta qualidade e ate um melhor aprimoramento no processo de tratamento térmico. (WEBBER, 2000),

Nos Estados Unidos o uso de blocos padrões foi amplamente aceito na Ford Motor Company, mais tarde no auge da Primeira guerra mundial houve uma ascensão na produção bélica o uso desses blocos de calibração nessas indústrias foi de grande preocupação por parte dos órgãos governamentais para assegurar a disponibilidade de equipamento militares tendo em vista que os únicos fornecedores de Blocos Padrões concentravam-se na Europa. A precisão encontrada nos primeiros blocos padrões produzida por Johansson era um assunto de grande relevância na comunidade industrial naquela época, após desenvolvimento e aprimoramento no processo de produção Johansson afirmava que a precisão encontrada nos blocos que ele fabricava girava na ordem de 0,001 *mm*, tal certificação foi apresentada em 1903 pela International Bureau of Weights and Measures (Escritório Internacional de Pesos e Medidas, BIPM) uma das três organizações estabelecidas que mantém o Sistema Internacional de Unidades (SI) a qual mediu um bloco retangular de 100 *mm* de comprimento a 20°C confirmando o que foi proposto por Johansson dando um erro de 0,1µm a esta temperatura, desvio aceitável nas condições da época, Mas só a partir de 1908 após realizar uma pesquisa científica sobre os blocos produzidos por Johansson certificou favoravelmente o produto como de alta confiabilidade. (MITUTOYO, 2013)

Nesta altura tanto os Estados Unidos quanto o Reino Unido estavam com o conceito de polegada bem definido, cerca de 25,4000508 mm a uma temperatura de aferição de 20°C (68°F), isso implicou a Johansson estabelecer o valor de 25,4 mm valor padrão devido ao arredondamento de casas decimais o que fez dele um dos idealizadores do conceito atual de polegada. Já em 1917, um inventor chamado William Hoke apresentou um processo de fabricação dos blocos muito similar a o proposto por Johansson, ele conseguiu produzir 50 conjuntos de 81 peças com auxilio da NBS (National Bureal of Standards), seu maior desafio foi em relação à planicidade e o paralelismo entre as faces, Hoke propôs a criação de um furo central no bloco isso evitaria o surgimento do formato trapezoidal devido às irregularidades no processo de uniformização da superfície, ate hoje existe blocos padrões produzidos com esse furo central de vários formatos similares aos feitos pela NBS esses blocos são chamados

de “Blocos de Hoke”. (DOIRON e BEERS, 1995). Em 1918 a National Physical Laboratory na Inglaterra após experimentos conseguiu com sucesso a fabricação de Blocos padrões onde posteriormente também empresas que fabricavam instrumentos de medição como Pitter Gauge & Precision Tool Company e a Hommel Corporation, deram início a produção e comercialização dos blocos padrões no âmbito Mundial. (DOIRON, 1994)

Com o objetivo de facilitar a concepção entre os usuários e os fabricantes dos Blocos foi necessária a produção de Normas técnicas que e regimenta e direcionam os parâmetros dos blocos tais como: tolerância, acabamento superficial, dureza, o paralelismo entre as faces lapidadas, a secção transversal do bloco e etc. (CRISTOFOLETTI e ABACKERLI, 2011) A insegurança na compra ou utilização de serviços por parte do consumidor e o aumento do desperdício tanto de produtos acabados como de matéria-prima por parte dos produtores, incentivaram a criação de normas específicas para determinados fins. (VARGAS, 2013)

Partindo para um contexto da evolução dos blocos padrões no âmbito normativo inicia-se pelo documento DIN 861 de 1927, “Especifica as características dimensionais e qualitativas mais importantes dos blocos padrões com secção transversal retangular e comprimento Nominal variando de 0,5 a 1000 *mm*”. Em 1940, houve a publicação da Primeira norma Britânica a BS 888 revisada em 1950, que incluía outras três classes dentre as existentes, classe de blocos voltados à calibração de instrumentos de medição, Blocos direcionados a inspeção de instrumentos e a Classe voltada à verificação de controle de qualidade no âmbito industrial. Já em 1959, a Norma DIN 851 após revisões incluiu especificações referente aos materiais utilizados na fabricação dos blocos padrões. A Bureal National of Standard (NBS) em 1964, publicou uma norma que especificava a tolerância e expansão térmica de acordo com os diferentes materiais utilizados, mencionava também a importância do controle de temperatura no momento da calibração tudo isso de acordo com a classe de exatidão específica do bloco. Em 1978 ISO publicou a Norma 3.650 que dentre tudo isso que foi citado detalhava características inerente ao material e propriedades físicas tais como constantes elásticas, tolerâncias referente à forma, posição e variação do comprimento. A American National Standard (ANSI) publicou a norma ANSI B89. 1.9 M-1984 e revisada em 1989, Especifica as tolerâncias de acordo com as dimensões transversais de cada bloco e a padronização dos furos centrais (Blocos de Hoke) e estabeleceu classes de precisão (Tabela 4), todas as normas subsequentes nacionais e internacionais cumprem com essas especificações. (CRISTOFOLETTI e ABACKERLI, 2011). No Brasil a Norma de

procedimento NBR NM 215: 2000 foi publicada padronizando o uso e características dos blocos padrões no âmbito do Mercosul.

Fazendo um paralelo com a Norma Brasileira citada anteriormente vale discursar sobre a ABNT, órgão técnico regulador que visa facilitar o acesso científico, compreensão normativa no contexto geral. Na História da ABNT nem tudo foi como esperado desde a sua criação em 1937, ascensão e crises financeiras fizeram parte da história, hoje a associação demonstra estabilidade financeira e tem reconquistado a credibilidade no âmbito social. A ABNT hoje tem um papel muito importante dentro da ISO, ela faz parte de Seletto Grupo de 12 países que integram a Technical Management Board da International Organization for Standardization – ISO/TMB que tem a missão de coordenar o trabalho Técnico dentro da ISO e Monitorar as atividades desenvolvidas pelos comitês, sendo responsáveis também pelas escolhas de secretários e programas de trabalho No Auge do desenvolvimento Industrial no Brasil em 1962, a ABNT foi considerada como um órgão de utilidade pública, reconhecimento dado pelo poder público as instituições, em conformidade com o seu objetivo sociais sendo estas prestadoras de serviços à coletividade, o que fez com o que posteriormente de fosse reconhecido como Único Foro Nacional de Normalização pela CONMETRO (Conselho Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial). (ABNT, 2006)

2.2. Propriedade dos Blocos Padrões

O objetivo principal do uso dos Blocos Padrões é conseguir um valor final de um comprimento específico através da combinação de elementos individuais chamados blocos de calibração, a associação desses blocos de calibração resulta em uma dimensão real dentro de determinados limites especificados, dependendo da aplicação particular desejada obtém-se a dimensão nominal. Para obter esse objetivo algumas condições devem ser satisfeitas tais como:

a) Os blocos individuais devem estar acessíveis a combinações entre si, ou seja, tamanhos e formas quando unidas precisam estar em acordo para se obter o valor correspondente final;

b) A precisão dimensional de cada bloco individual deve ser em todos os aspectos significativa para alcançar a dimensão dentro dos limites especificados;

c) O comprimento final da combinação dos blocos padrões devem ser a soma dos valores individuais de cada bloco, ou seja, a junção entre os blocos deve ser tal que não haja espaço entre as faces, e que a montagem e desmontagem frequente não danifique suas propriedades dimensionais e não cause dano nos blocos subsequentes.

Existem quatro principais características que juntas são necessárias para o Bloco Padrão, o Grau de acabamento superficial, a resistência ao desgaste, precisão e estabilidade dimensional. Dentre estes existem outros fatores que juntos determinam a Estabilidade Física do material a resistência à corrosão, dureza, condutividade térmica e o coeficiente de expansão térmica.

No processo de fabricação dos blocos padrões o estagio final torna-se mais critico devido à quantidade de etapas e precisão no procedimento de aferição das dimensões finais, Já as operações que antecedem trata-se apenas de operações usuais de usinagem. No entanto o processo de tratamento térmico de endurecimento e sucessivos estágios de Estabilização por Recozimento aumentam a usinabilidade do bloco garantindo que as etapas seguintes apresentem uma maior qualidade e melhoria substancialmente reduzindo o empenamento tornando-os regular geometricamente ate em blocos de espessuras mais finas. O polimento e a retifica do bloco visa particularmente à aproximação das formas finais com tolerâncias que chegam ate 0,0005 inch, também a planeza e o paralelismo entre as faces estejam bem definidos dentro dos padrões especificados. (FARAGO e CURTIS, 1994)

2.2.1. Propriedades Mecânicas

Desde o inicio da produção e desenvolvimento dos Blocos Padrões por Johansson em 1896, a ideia de aplicação de novos materiais na produção dos blocos já haviam sendo discutidas, a busca por melhores propriedades somada com o conhecimento metalúrgico da época convergiram a Johansson utilizar materiais mais específicos na produção, é o caso do Aço com o mesmo padrão e características utilizadas na produção de rolamentos, que devido à presença maior de carbono como consequência melhores propriedades de resistências mecânicas e os rudimentares processos de tratamento térmico tornava-se uma ótima opção para época, em contrapartida esse material tornava-se um pouco vulnerável a corrosão e também em curto prazo de tempo o uso excessivo potencializava a instabilidade dimensional. O avanço nas técnicas metalúrgicas e os estudos na formação de ligas metálicas potencializaram o controle e a qualidade nos processos de tratamento térmico, o

aprimoramento das propriedades físicas e químicas dos materiais melhoraram as condições de produção. (WEBBER, 1984)

2.2.1.1. Expansão térmica

Sabes-se que o problema de tratamento térmico era visível na época, e alguns Fabricantes tenderam a buscar materiais que possuíam coeficientes de expansão mais próximos aos encontrados no chão de fábrica. Na década de 60 após vários desenvolvimentos na área metalúrgica optaram pelo uso do Aço Cromo SAE 52100 aço com alto teor de carbono e alta resistência ao desgaste, a adição de tungstênio e carboneto de cromo melhoraram as propriedades de resistência, anti corrosão e expansão térmica. Como justificativa para essa adição vemos que o carboneto de tungstênio possui um coeficiente de expansão muito baixo cerca de 1/3 do aço, já o carboneto de cromo tem um coeficiente de dilatação térmica de 2/3 do aço para a mesma densidade, com isso a soma dos dois componentes equilibra as características físicas do material. (MEYERSON, 1960)

Hoje em dia o uso de materiais cerâmicos tem crescido devido a algumas propriedades similares ou até melhores que a dos aços, em especial o coeficiente de expansão térmica algumas empresas vem apostando nos materiais cerâmicos tais como a zircônia mineral sinterizada similar ao diamante em propriedades, tem condutividade térmica praticamente zero e coeficiente de dilatação térmica cerca de $9,2 \pm 0,5 \mu m / C$ aproximadamente 20% menor que o aço, Resistência a abrasão devido a sua estrutura atômica torna-se até dez vezes maior que o aço, Resistência a choques que mesmo com a sua alta dureza são resistentes a impactos, e o antimagnetismo ficando praticamente livres de partículas metálicas que poderiam aderir a superfície prejudicando a medição e danificando o bloco. (MITUTOYO, 2014)

O impacto que a temperatura afetará a medição dependerá de dois fatores o tamanho do bloco e o material a qual ele é feito, como exemplo temos o aço 52100 que desde o início mostrou uma boa opção para construção dos blocos padrões, possuindo um coeficiente de expansão térmica na faixa de $6,4 \mu in$ por cada grau fahrenheit a qual esta submetida, a principio isso pode parecer pouco quando pensamos em um bloco de dimensões grandes, mas por outro lado pode ser extremamente relevante essa dimensão quando pensamos em blocos pequenos. (MEYERSON, 1960) De acordo com a Norma ISO 3650, 1998 “*The coefficient of thermal expansion of steel gauge blocks in the temperature range 10 °C to 30 °C shall be $(11,5 \pm 1,0 \times 10^{-6}) \times ^\circ C^{-1}$* ”, ou seja, como regra a uma faixa de temperatura 10 a 30° C o

coeficiente de expansão térmica do material a que esta produzido o bloco deverá ser no mínimo o valor do coeficiente de expansão dos blocos de Aço.

A tabela abaixo faz uma comparação entre diferentes coeficientes de dilatação térmica dos materiais comumente utilizados:

Quadro 1 - Coeficiente de dilatação térmica médio dos materiais comumente usado na fabricação de blocos Padrões.

Material	Coeficiente de dilatação térmica ($\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$)
Bloco padrão de Aço (< 25 mm)	11,5
Bloco padrão de Aço (500 mm)	10,6
Carboneto de Tungstênio	4,5
Carboneto de Cromo	8,4
Sílica Fundida	0,55
Invar*	1,2
Alumínio	24
Bloco Padrão cerâmico (zircônia)	9,2
<p>Formula para calculo da correção dos valores medidos, para materiais diferentes a uma temperatura superior a 68 °F (~20°C).</p> $MD = L(\Delta K)(\Delta t)$ <p><i>MD = Variação do comprimento [μin]</i> <i>L = Comprimento Inicial</i> <i>ΔK = Coeficiente de dilatação Linear do bloco padrão</i> <i>Δt = Variação de temperatura</i></p> <p>*Liga composta de Ni e Fe, descoberta em 1896 por Charles-Edouard Guillaume mundialmente conhecida por ser a liga com menor coeficiente de expansão térmica.</p>	

Fonte: Autor

Em casos que Δt é muito pequeno considera-se que o coeficiente de dilatação térmica mantém-se constante haja vista que esse coeficiente depende da temperatura absoluta do material, e mesmo o aço sendo um dos materiais que possuem um dos maiores coeficiente de expansão térmica ainda é o mais utilizado devido à maioria das maquinas, equipamentos de medição e de fabricação serem feitos de aço, estima-se que os efeitos térmicos de ambos tendem a se cancelar devido à similaridade dos materiais. Isso implica dizer que a diferença nos coeficientes de expansão entre a peça de trabalho e bloco é importante, pois ao analisar a tabela acima e fazendo uma comparação entre o aço e o alumínio o coeficiente desse ultimo torna-se ate duas vezes maior quando comparado com o aço, o que faz dependendo da temperatura que esta submetido, a variação nos valores seriam observados na medição. Idealmente teria de ser utilizados blocos de alumínio nesse caso, o que seria impossível,

dentre as diversas razões as mais importantes seria a produção de blocos padrões a partir de materiais macios haja vista que feito isso a superfície seria danificada e sua vida útil reduzida e a outra era a impensável tecnologia de produção Alumínio e plástico na primeira metade do século, tempo onde foi desenvolvido os Blocos Padrões. A partir disto sabe-se que um bloco padrão pode ser utilizado para medir qualquer material se forem feitas as correções na diferença dos coeficientes dos dois materiais utilizando a equação:

$$MD = L(\Delta K_{\text{alumínio}} - \Delta K_{\text{aço}})(\Delta t) \quad (2.1)$$

Hoje é aconselhável aos fabricantes informar qual a temperatura de referencia e qual o coeficiente de expansão térmica do conjunto de blocos padrões pois, dependendo do uso o usuário venha a compensar as Dilatações e as contrações existentes em ambientes de temperatura diferente a de 20 °C. (DOIRON e BEERS, 1995)

2.2.1.2. Dureza

As garantias de dureza que são atribuídas aos blocos padrões derivam de uma têmpera uniforme e controlada, mesmo em blocos que apresentam têmpera superficial, isso implica numa maior resistência ao desgaste, seja através do contato com outro bloco no processo de combinação para determinação de uma dimensão ou o contato com outros equipamentos rígidos no instante da medição. Após o processo de têmpera os blocos padrões passam por um processo de retifica para as eliminações de partes micro carbonadas oriunda do tratamento térmico, esse processo deve ser controlado e com extremo cuidado, pois a o aumento da temperatura superficial da face no processo de retifica altera as características microestruturais reduzindo a dureza obtida no tratamento térmico. (CRISTOFOLETTI e ABACKERLI, 2011) A norma ISO 3560; 1998 afirma que “The measuring faces of steel gauge blocks shall have a Vickers hardness of not less than 800 HV 0,5”, A dureza das faces de medição não pode ser inferior a 800 HV ou aproximadamente 64 HRC . Já a Norma americana explica que a dureza dos blocos padrões segue a regra geral que não deve ser menor que 62 HRC para aos aços Ligas, 68 HRC para o aço cromo e 70HRC para os blocos feitos de metal duro. (GGGG-15c, 1976).

Os fatores de maior importância nos padrões de dureza aplicada aos blocos padrões são a homogeneidade com que a dureza esta distribuída tanto superficialmente quando apenas aplicada, quanto em toda a extensão do bloco. Hoje em dia os blocos cerâmicos ganham cada

vez mais espaço devido dentre as suas propriedades mecânicas muitas das vezes melhores que o aço com a qualidade da dureza que estimada em 74 a 76 HRC.

2.2.1.3. Estabilidade Dimensional

Nenhum material é completamente estável, tanto no processo de usinagem quanto no acabamento as alterações dimensionais faz com que os materiais tendam a aumentar e diminuir de tamanho, mesmo até variações mínimas em um bloco de alta precisão, torna-se um problema no resultado qualitativo das medições. Um Elemento ter estabilidade dimensional em outras palavras significa dizer que os coeficientes intrínsecos ao material que tem relações de variação dependente com o tempo são essencialmente zero. O NIST (National Institute of Standard and Technology) após estudos feitos com amostras de blocos padrões comprovou que as variações dimensionais dos blocos estão intimamente interligadas a microestrutura e pelo nível de dureza do material, tanto as tensões internas quanto a decomposição da fase metaestável Martensita em fases estáveis de Ferrita e Cementita são causas comprovadamente plausíveis para explicar o processo de Instabilidade dimensional fruto das possíveis tensões residuais que ocorre nos blocos padrões. Devido a isso muitos fabricantes têm estabelecido normas com a intenção de minimizar deformações dimensionais no comprimento. (MEYERSON et. al., 1968)

A redução nas tensões residuais ocorre gradativamente, como solução para essa problemática aconselha-se o procedimento de aquecimento uniforme e controlado do aço a uma temperatura adequada que não ultrapasse a temperatura crítica do material, seguido por um resfriamento lento e uniforme a fim de relaxar as tensões e não afetar a microestrutura do bloco. Outra propriedade bastante importante nos blocos padrões é a aderência entre as superfícies lapidadas, isso acontece devido ao alto grau de uniformidade superficial através das faces que se unem através das forças atrativas entre as moléculas da combinação entre blocos, que a partir de uma pequena quantidade de fluido lubrificante da ordem de 5 a 20 *nm*, essa força atrativa pode atingir até 300N dependendo do material. (LEACH AND SMITH, PG 155). O quadro abaixo menciona cada uma dessas normas sendo estas divididas em classes de exatidão bem como a variação permissível no comprimento, isso ao longo de um tempo:

Quadro 2 - Estabilidade dimensional.

Norma	Classe de Exatidão	Varição Permissível do comprimento	Unidade	Planeza
ISO 3650; 1998	K e 0	$\pm (0,02 + 0,25 \times 10^{-6} \times l_n)$	μm/ano	-
NBR NM 215; 2.000	1 e 2	$\pm (0,05 + 0,5 \times 10^{-6} \times l_n)$		-
DIN 861; 1980	00, 0 e K	$\pm (0,05 + 0,5 \times 10^{-6} \times l_n)$		-
	1 e 2	$\pm (0,02 + 0,0005 \times l_n)$		-
BS 4311 Part. 2	Todas*	$\pm (0,02 + 0,0005 \times l_n)^*$		-
JTS B 7506; 1997	K e 0	$\pm (0,02 + 0,00025 \times l_n)$		-
	1 e 2	$\pm (0,05 + 0,0005 \times l_n)$		-
GGG-G 15c	0,5	0,02	μm /25mm/ano	0,03
	1 e 2	0,03	μm /25mm/ano	0,05
	3	0,05	μm /25mm/ano	0,7

*se for mantido a uma temperatura de 10° a 30°;

* l_n é o comprimento Nominal.

Os dados do quadro 2 só são aplicáveis nos blocos que não apresentam problemas físicos como choques mecânicos ou forças mecânicas que danifiquem a integridade física ou em condições de temperatura que afetem as propriedades mecânicas. (ISO 3650,1998).

O quadro 3 apresenta uma comparação entre as propriedades mecânicas dos principais materiais dos blocos padrões.

Quadro 3 - Propriedades Físicas e Mecânicas.

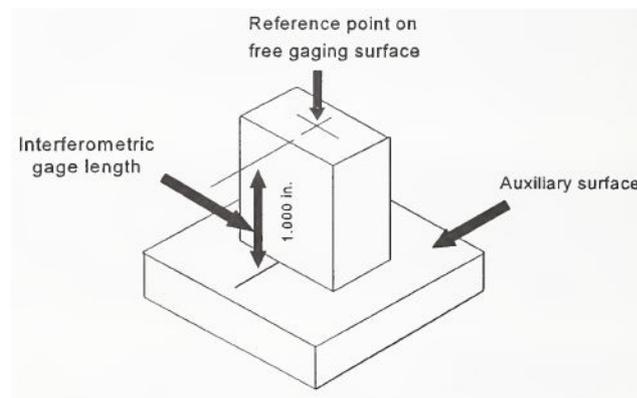
Propriedade do Material	Aço	Cerâmica (Z_r, O_2)	Metal Duro
Resistência à corrosão	Pobre	Excelente	Razoável
Expansão Térmica ($10^{-6}K^{-1}$)	Excelente 11,5 ± 1	Bom 10 ± 1	Pobre 5
Resistência a Abrasão	Razoável	Muito Bom	Excelente
Modulo de Elasticidade ($\times 10^5 N/mm^2$)	2,1	2,1	6,3
Tempo de estabilidade dimensional	Imprevisível	Não há dados concretos	Excelente
Condutividade Térmica ($J/mm \text{ s. K}$)	Muito Bom 0,00293	Pobre 0,0544	Razoável 0,0795
Acabamento Superficial	Pobre (0,7 μin AA)	Muito Bom (0,5 μin AA)	Razoável (~0,6 μin AA)

Fonte: NIST

2.2.2. Propriedades Metrológicas

Das características mecânicas citadas anteriormente que, os blocos padrões possuem também características geométricas que juntas colaboram para que o bloco exerça sua função de referência de medição de comprimentos. O Comprimento de um Bloco Padrão de acordo com a norma brasileira pode ser explicado como a distância do ponto central da face superior de medição a uma superfície plana cujo material é similar ao material do bloco onde o mesmo encontra-se perfeitamente posicionado com a máxima planicidade na junção entre eles. (NBR NM 215, 2000).

Figura 2 - Distância do ponto de medição da superfície superior ao plano adjacente do Bloco.



Fonte NIST.

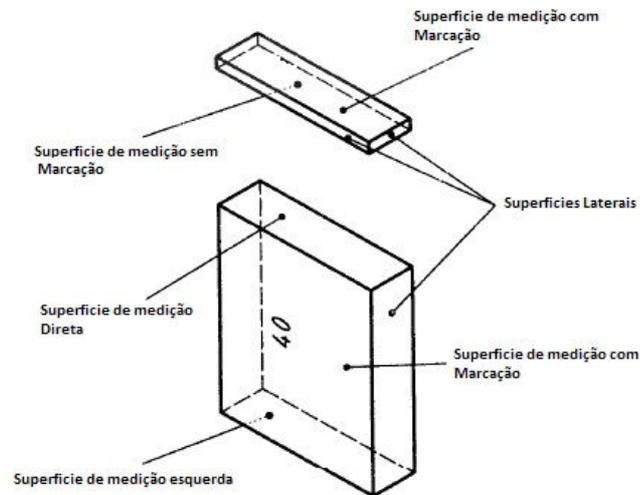
Esse comprimento é determinado através das condições padrão de temperatura e pressão:

- a) Temperatura: 20°C ou 68° F;
- b) Pressão Atmosférica = 101,325 Pa (1 Atm)
- c) Pressão de Vapor da Água = 1,333Pa:

Vale salientar que dificilmente um bloco padrão será medido nessas condições de pressão de vapor, haja vista que a essa pressão consiste em aproximadamente 60% de umidade absoluta isso implica no aumento processo corrosão do metal, e que apenas a temperatura tem significância real no processo de análise dimensional dos Blocos. (ISO 3.650, 1998)(DIN 861 Part. 1, 1980)(JIS B 7.506, 1997)(NBR NM 215, 2000)

Para o melhor entendimento sobre a nomenclatura das superfícies a norma ISO 3650, 1998, padronizou cada uma de acordo com a sua especificidade.

Figura 3 - Nomenclatura das Faces.



Fonte adaptado da norma ISO 3650, 1998

2.2.2.1. Planicidade e Acabamento superficial

A variação de comprimento define-se como a diferença entre a medição máxima e a mínima do comprimento. Como regra geral os erros de planicidade e paralelismo entre as faces de medição não podem ser superior ao intervalo Máximo das tolerâncias para qualquer classe de Bloco Padrão. As ocorrências de problemas na planicidade além de causar problemas na exatidão do comprimento pode impedir a capacidade que o bloco tem de se aderir à outra superfície na combinação entre blocos, reduzindo a área de contato das superfícies e diminuindo a vida útil dos blocos padrões devido a não uniformidade. Com relação ao acabamento superficial o grau de suavidade da superfície esta relacionada com o nível mínimo de rugosidade, as faces de medição dos blocos padrões passam por um processo de lapidação fina e polimento que assegura a retificação da superfície. Existem razões para se atribuir um acabamento superficial fino esta na medição confiável do comprimento por meio de instrumentos de medição por contato que pode ser afetada pela rugosidade superficial, também a presença de uma superfície refletora que auxilia na calibração interferométrica dos blocos, assunto que será discutido mais a diante. (DOTSON, 2014)

A Norma GGG-G15 especificam o limite Máximo de aceitação de marcas e imperfeições nas superfícies de calibrações isso geralmente causado pelos grãos abrasivos durante o processo de lapidação, a presença de rugosidade em excesso pode provocar também a incerteza no valor da medição. Para simplificar o contexto geral das propriedades físicas

junto com as características Geométricas, a Norma dividiu os blocos padrões em classes de exatidão e aplicações, essa divisão separa a aplicação requisitos de controle e normalização de acordo com a sua utilidade e precisão.

Tabela 1 - Classes de tolerâncias e aplicações de acordo com as normas DIN 861 e ISO 3650.

Classe de tolerância	Aplicações
Classe 00	Blocos usados como referencia nos laboratórios de calibração e avaliação de instrumentos.
Classe K	Possui a Mesma aplicação da classe 00
Classe 0	Blocos de altas exigências. Medidas criteriosas no ajuste de maquinas ferramentas. Usado como referencia para calibração dos blocos “1” e “2”.
Classe 1 (Antiga classe AA)	Usados como bloco de referencia para outros blocos onde as tolerâncias não são apertadas, avaliação de padrões e calibração de instrumentos.
Classe 2 (Antiga classe A+)	Blocos usuais de trabalho, usados geralmente em áreas de produção industrial, montagens de ferramentas e dispositivos de medição.

Fonte: NIST

2.3. Tolerâncias dos Blocos Padrões

Como visto anteriormente existem quatro classes de exatidão para os blocos padrões, de acordo com as Normas essa ideia de distribuir os blocos em classes controla o rigor no processo de medição e calibração, porque para cada classe é determinada especificas condições tanto ambientais como físicas para os blocos, facilitando no contexto de aplicação de cada um. A norma Americana GGG-G15c recomenda a calibração dos blocos de classe K e 0 que, devido a exigências criteriosas de medição sejam calibrados a laser (interferometria), também que a geometria do bloco (planeza e paralelismo) sejam rigidamente controlada afim de evitar erros, e as demais classes que compõe o conjunto é da sejam calibrados pelo processo de comparação, por ser classes destinadas a trabalhos mais comuns como calibração de outros instrumentos ou ajustes de comprimento dentro da industria.

Tabela 2 - Limite do comprimento nominal e tolerâncias para a variação no comprimento dos blocos padrões ($\mu\text{m}=0,001\text{mm}$).

Nominal Length, l_n/mm	Calibration Grade K		Grade 0		Grade 1		Grade 2	
	$\pm t_e$ mm/ μm	t_v mm/ μm						
$0.5 \leq l_n \leq 10$	0.2	0.05	0.12	0.1	0.2	0.16	0.45	0.3
$10 < l_n \leq 25$	0.3	0.05	0.14	0.1	0.3	0.16	0.6	0.3
$25 < l_n \leq 50$	0.4	0.06	0.2	0.1	0.4	0.18	0.8	0.3
$50 < l_n \leq 75$	0.5	0.06	0.25	0.12	0.5	0.18	1	0.35
$75 < l_n \leq 100$	0.6	0.07	0.3	0.12	0.6	0.2	1.2	0.35

t_e = Tolerância no comprimento

t_v = Tolerância admissível na planicidade e no paralelismo

Fonte: Adaptada ISO 3650, 1998.

3. CALIBRAÇÃO DOS BLOCOS PADRÕES

A exatidão com que o bloco padrão exerce a sua função esta condicionada ao seu uso, fatores externos podem diminuir consideravelmente suas características rigorosas de exatidão. O manuseio e o uso excessivo, como em qualquer outro instrumento de medição, estão condicionados por um período de tempo ser recalibrado ou passar por uma análise dimensional a fim de aferir suas características metrológicas. Existem 3 fatores podem potencializar esse efeito de desgaste e deterioração, tais como: (DOTSON, 2014)

a) A instabilidade dimensional do material com que o bloco padrão foi construído, materiais com elevados coeficientes de expansão térmica facilitam a variação dimensional (Aços e carbonetos metálicos).

b) Desgaste devido ao atrito com outras superfícies metálicas ou ate mesmo choques ocasionais. O desgaste mesmo sendo um fator inevitável para os blocos torna-se controlável pelo uso consciente dos blocos.

c) Danos causados pelo manuseio e ou durante o armazenamento. (corrosão, oxidação, arranhões superficiais e etc).

Todos esses fatores podem retirar não só a exatidão original do bloco, mas também pode causar desvios nos limites de tolerâncias independente da classe específica do bloco, devido aos níveis tolerâncias apertadas. Dentre essas que foram citadas existem inúmeras causas ambientais como poeira, umidade ou ate mesmo a atmosfera corrosiva de alguns ambientes. Os fabricantes buscam desenvolver materiais que apresentem melhores características tanto dimensionais quanto químicas, esse é o grande desafio no processo de escolha dos materiais. O grau de exatidão com a qual os blocos padrões são classificados, e o nível de deterioração dimensional poderão antecipar a recalibração.

Desde a primeira edição da Norma ISO em 1768 até hoje não houve um cronograma específico de recalibração dos blocos padrões, sabendo dessa questão a ASME em 2002, recomendou alguns períodos de recalibração dos blocos a partir da classe de tolerância. Os blocos da classe K, 0 e 1 é recomendado recalibração anualmente devido ao pouco uso, sofrendo um mínimo desgaste prolongando suas características metroológicas, já os da classe 2 mensalmente ou semi anualmente devido ao uso mais frequentes e a forte solicitação causando desgaste. O NIST (*National Institute of Standards and Technology*) antiga NBS, fundada em 1903, desde a sua criação vem se dedicando no estudo da padronização de pesos e medidas. (DOIRON e BEERS, 1995) Com relação aos blocos padrões desde a ideia formulada por Johansson da criação de padrões de comprimento na virada do século passado o NIST entende que os blocos padrões são o principal padrão de comprimento para a indústria, e que a sua calibração torna-se a mais importante meio de exatidão na metrologia dimensional. Com o passar dos anos os blocos tornaram-se mais exatos e o nível de sofisticação na construção fez com que os laboratórios de calibrações se adequassem aos níveis de precisão. (NIST, 2017)

4. TÉCNICAS DE CALIBRAÇÃO

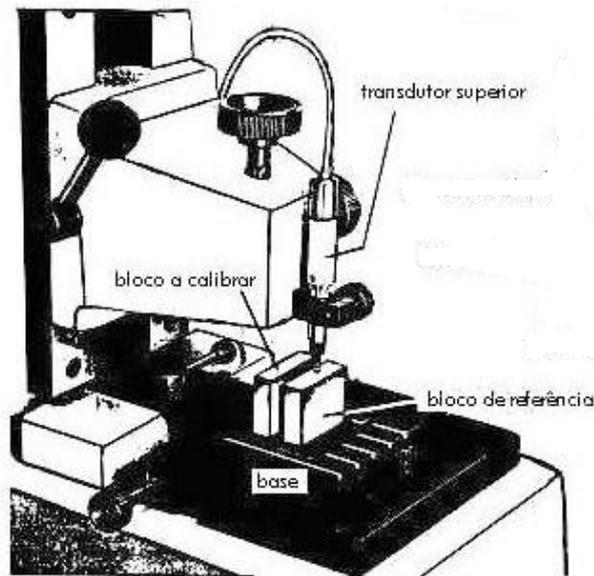
Todas as normas técnicas mencionam dois métodos de calibração dos blocos padrões, um usando procedimento a laser e os outros por comparação mecânica, ambos os métodos possuem características distintas. As características físicas dos blocos são de elevada importância para não haver qualquer alteração no resultado da calibração. Em resumo e que será discutido mais adiante é que processo a laser ou interferométrico as questões ambientais como a temperatura do local e a pressão atmosférica torna-se fatores preponderantes na qualidade final da calibração. Por outro lado no processo de comparação à qualidade e a exatidão dimensional do bloco de referencia bem como também a temperatura são primordiais na execução de uma calibração bem sucedida.

4.1. Calibração de bloco padrão por Comparação Mecânica

O comparador mecânico consiste em um dispositivo capaz de medir diferenças de comprimentos de um objeto a partir de um comprimento padrão ou comprimento de referência, esse bloco de referência necessariamente deve possuir as mesmas características metroológicas do objeto a ser calibrado. Em outras palavras no contexto dos blocos padrões o Método diferencial transfere a rastreabilidade por comparação do bloco a calibrar com um

bloco de classe superior, calibrado a um nível mais elevado de pirâmide de rastreabilidade. (TED DOIRON, 1998).

Figura 4 - Calibrador de bloco padrão no sistema diferencial por comparação mecânica.



Fonte: NIST.

No processo de calibração é imprescindível que os blocos a serem calibrados bem como os blocos de referência estejam limpos e isentos de rebarbas, corrosão e partículas que interfiram na validade da calibração.

4.1.1. Princípio da comparação

O comprimento do bloco a calibrar inicialmente desconhecido é determinado a partir da diferença do valor obtido com o valor de referência, em outras palavras, sendo o comprimento do bloco desconhecido igual à L_d , o valor do comprimento do bloco de referência igual L_r e L_c o comprimento base informado na escala do calibrador e indicado na face do bloco padrão a ser calibrado, com isso: (DOIRON e BEERS, 1995)

$$L_d = L_c + x \quad (4.1)$$

$$L_r = L_c + r \quad (4.2)$$

Onde esse valor de x pode ser tanto um acréscimo ou um decréscimo no valor informado na escala do instrumento de medição. Fazendo um somatório e isolando a incógnita L_d :

$$L_d = L_r + (x - r) \quad (4.3)$$

Ou seja, o comprimento desconhecido do bloco é o comprimento do bloco de referência mais o desvio tanto positivamente quanto negativamente do comprimento base do bloco. Em alguns casos existe o fato de não utilizar um bloco de mesmo material para calibração sendo assim utiliza dois fatores de correção para compensar as deformações elásticas e térmicas nas faces de medição. Fazendo as devidas considerações das deformações obtém-se:

$$L_d = L_r + (x - r) + C_p + C_t \quad (4.4)$$

$$C_t = (\beta_A - \beta_B) \quad (4.5)$$

$$C_p = (\sigma_A - \sigma_B) \quad (4.6)$$

Para:

C_t = Fator de Correção pelas deformações elásticas

C_p = Fator de Correção pela expansão térmica

β = Coeficiente de expansão térmica dos blocos A e B

σ = Fator de deformação elástica dos blocos A e B

O fator de deformação elástica também pode ser chamado de coeficiente de penetração, ele assim como o coeficiente de deformação térmica é específico e depende dos materiais envolvidos na calibração, Alguns laboratórios de calibração fixaram valores de coeficiente de penetração de acordo com a força que o calibrador mecânico exerce sobre o bloco a ser calibrado. Abaixo a tabela % especifica alguns desses valores padronizados

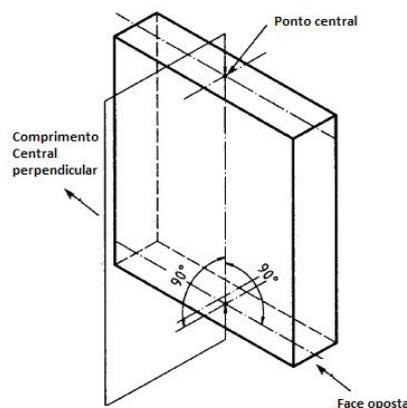
Tabela 3 - Fator de deformação da superfície em μm (μin).

Material	Força Newtons		
	0,25	0,50	0,75
Vidro	0,13 (5,2)	0,21 (8,3)	0,28(11,2)
Aço	0,07 (2,7)	0,11 (4,4)	0,14 (5,7)
Carboneto de Cromo	0,06 (2,2)	0,12 (3,4)	0,12 (4,6)
Carboneto de Tungstênio	0,04 (1,6)	0,06 (2,5)	0,06 (2,5)

Fonte: NIST, 1995

A intensidade força exercida pela ponta de contato do instrumento no bloco, varia de acordo com o nível de calibração, essa força deve ser tal que o contato com o bloco seja uniforme e não afete tanto a leitura dos dados pelo instrumento quanto a não danificar a superfície de medição do bloco. (DOIRON e BEERS, 1995) Para temperaturas diferentes da normalizada (20°C) o ajuste na temperatura é imprescindível principalmente para blocos mais longos, porque ignorar as condições térmicas poderá causar erros ainda maiores na deformação, do mesmo modo para blocos acima de 100 *mm* a norma americana recomenda que para calibração de blocos o processo mecânico de comparação e que o bloco seja fixado no calibrador na horizontal, com as faces auxiliares bi-apoiada a uma distancia de 0,2115x do comprimento nominal das extremidades. (GGG-G-15c, 1976). Para que prossigamos no entendimento do principio de calibração precisamos compreender a função do ponto e do comprimento central da superfície de medição. O comprimento central do bloco padrão é a distancia perpendicular do ponto central da superfície de medição em relação à face oposta. (ISO 3650, 1998) (Ver FIGURA 6)

Figura 5 - Medição do comprimento e do ponto central da superfície de medição do bloco por comparação, em relação à superfície oposta.



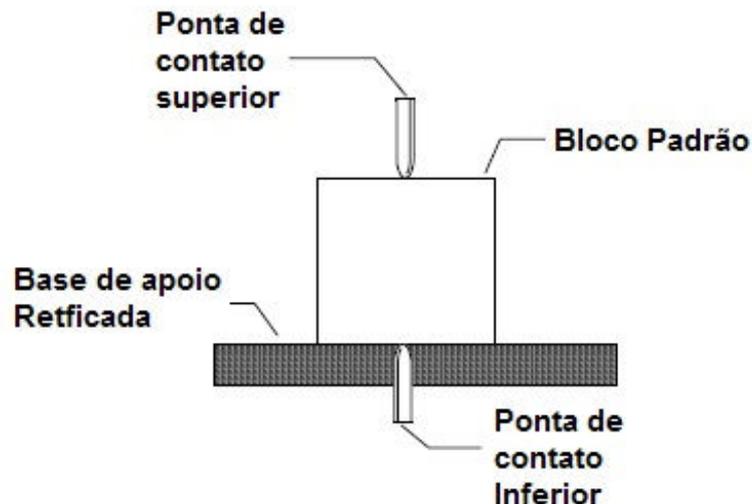
FONTE: ISO 3650, 1998

No processo de calibração existe transferência do comprimento central de um bloco padrão de referencia para ao bloco a ser calibrado, ou seja, antes da calibração o bloco de referencia deve-se necessariamente passar por uma aferição das suas dimensões por interferometria ou ate mesmo passar por vários estágios de comparação mecânica a fim de obter a máxima exatidão dimensional, nesse processo inclui dentro da medida nominal a espessura da película de aderência entre os blocos.

4.1.2. Comparadores Mecânicos de blocos padrões

O instrumento utilizado para calibração dos blocos padrões consiste num calibrador Eletromecânico com alto grau de estabilidade e sensibilidade, o mesmo possui uma ou duas hastes opostas com agulhas feitas de metal duro ou diamante em cada uma das pontas das hastes, essa haste em contato com as faces de medição informa a um circuito que transforma os sinais de entrada mecânicos em elétricos informando o valor medido do paralelismo entre as faces. A rigidez do equipamento deve ser tal que o material de construção deve ter um excelente acabamento e a exata perpendicularidade da haste de medição com o bloco de prova.

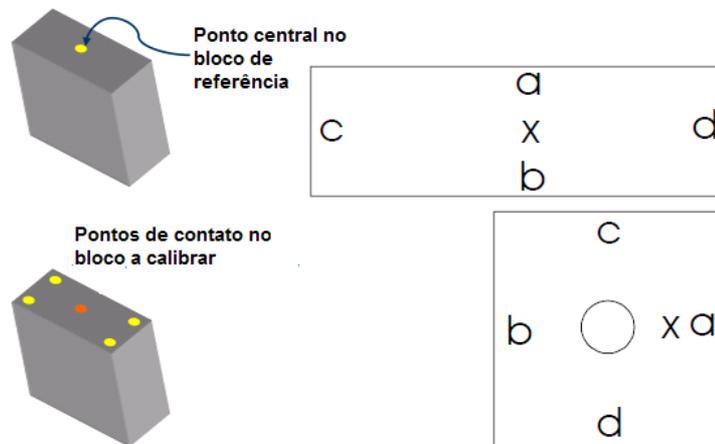
Figura 6 - Geometria básica de medições usando um comparador mecânico com duas pontas de contatos opostas



Fonte: Adaptado NIST Gage Block Handbook

O bloco a ser calibrado fica apoiado em uma base retificada extremamente plana, essa base tem como função evitar que o peso do bloco seja todo na ponta de contato inferior, haja vista que independente do bloco a ser medido, a força exercida pela ponta inferior é pequena diferente da superior, a intensidade da força de penetração superior depende do material a ser calibrado. (Ver tabela 3) No processo de calibração quatro pontos são analisados todos eles um oposto ao outro em no centro das quatro extremidades de cada face de medição, já nos blocos de referencia apenas o ponto central é medido.

Figura 7 - Localização dos pontos de calibração nos blocos padrões pelo método da comparação.



Fonte: Adaptado NIST Gage Block Handbook

Baseado na figura 8 o ponto central é dedicado à análise do comprimento nominal tanto superior como inferior, já os pontos a, b, c e d são destinados a análise de paralelismo entre as faces. Para que seja exata e uniforme recomenda a verificação de cada um dos pontos de forma cruzada, ou seja, primeiro o ponto a, logo após, o b e assim sucessivamente, o resultado do paralelismo é calculado como a diferença na leitura entre os pontos opostos. As tolerâncias no paralelismo seguem os valores descritos como a norma GGG e ANSI. Muitas das vezes devido ao custo inferior e rapidez na calibração, usuários de laboratórios optam pela calibração por comparação.

4.1.3. Incertezas na calibração por comparação

Existem três fontes principais de incertezas nas comparações de blocos padrões, o comprimento nominal real do bloco de referência, os efeitos da temperatura e a deformação elástica, alguns laboratórios especializados como National Institute of Standards and Technology (NIST) vem crescendo os esforços para minimizar esses fatores aplicando conceitos fundamentais de metrologia.

4.1.3.1. Calibração do bloco de referência

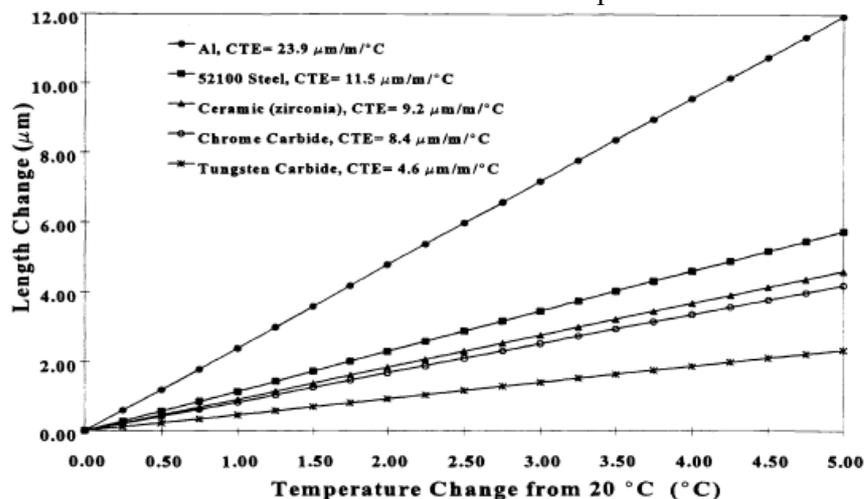
A primeira das três fontes de erros de incertezas deriva da indefinição nos comprimentos reais dos blocos de referencia. Sabemos que o comprimento nominal do bloco base é aferido através do processo de interferometria utilizando laser estabilizado sendo este, o método mais eficaz na determinação do comprimento real, mas embora esse comprimento

seja atribuído através de interferometria, no ato da calibração com o comparador o mesmo é feito através da interação das pontas de contato nas superfícies de medição o que pode causar uma diferença enorme, haja vista que, fatores como a variação na camada de junção entre um bloco e outro, o deslocamento nas fases óticas devido à reflexão da superfície polida, as condições ambientais como o vapor de água e sua interação com a refração e a geometria relativa ao bloco, são problemas associados à interferometria e afeta a medição do comprimento, Neste caso é aconselhável fazer correções para que esses erros não afetem a resultado final.

4.1.3.2. Efeitos da temperatura

A temperatura no ambiente de medição pode influenciar diretamente o resultado da medição, sabemos que todos os materiais através da mudança de temperatura podem se contrair ou expandir (Ver Figura 9). A presença de sensores capazes de regular e relacionar as mudanças de temperatura com a alteração no comprimento torna-se imprescindível. Dentre as várias maneiras de minimização dos erros ocasionados pela expansão térmica em primeiro lugar, a utilização de blocos de materiais semelhantes, isso minimiza os efeitos da mudança de temperatura já que ambos os blocos serão atingidos identicamente pelas variações, também a temperatura de calibração do bloco de referência deverá ser o mais próximo possível da temperatura padronizada quando utilizada no método interferométrico. (FAUST, STOUP e STANFIELD, 1998)

Figura 8 - Mudanças no comprimento dos blocos padrões de comprimento 100 mm de diferentes materiais a diversas temperaturas.



Outro ponto a ser observado dentro da questão temperatura trata-se do gradiente de temperatura entre o bloco e o instrumento de calibração ou até diferenças de temperaturas

entre faces de medição em blocos diferentes, as diferenças entre os coeficientes de expansão facilitam o erro e a incerteza dimensional, existem casos onde não é possível identificar o coeficiente de alguns blocos devido ao não acesso das informações pelo fabricante, assim sendo considera-se a pior situação possível, valores de coeficiente maiores do que o adotado geralmente, isso aumenta a confiança no resultado. Uma idéia prática utilizada em alguns laboratórios é envolver o bloco de medição com dimensões superiores a 25 mm (1 in) em um filme metálico a fim de diminuir os efeitos da radiação e retardar os efeitos do calor radiativo e a transferência de calor entre o ambiente e o bloco, isso em casos onde o ambiente possui temperatura superior ao especificado, existe também a técnica de fazer o bloco estabilizar a sua própria temperatura com a temperatura do meio, em alguns casos deixar o bloco “descansar” toda noite anterior ao dia da calibração. Em estudos esses métodos geraram bons resultados, na pratica isso vem sendo amplamente utilizado favorecendo a qualidade na calibração.

4.1.3.3. Deformações Elásticas

Outro ponto importante a ser observado trata-se das deformações elásticas ocasionadas pelo contato das pontas do comparador com a superfície de medição, mesmo com forças relativamente baixas dependendo das dimensões do bloco, isso pode causar uma diferença considerável na leitura. A questão da deformação nas superfícies tem se tornado um conflito na escolha de uma calibração por comparação mecânica ou interferométrica. Uma maneira pratica de fazer correções neste sentido trata-se controlar as forças envolvidas no processo de medição, o uso de dinamômetros e medidores de forças digitais nas pontas de contato, bem como o ajuste das forças aplicadas, alguns laboratórios chegaram a valores próximos a 0,83N na ponta de contato superior e 0,28N na ponta inferior, tais valores se encaixaram em dentro de um limite elástico da maioria dos materiais a qual os blocos são fabricados. (FAUST, STOUP e STANFIELD, 1998)

4.2. Calibração de blocos padrões por Interferometria

Pelo que foi visto até agora observamos que os Blocos Padrões consistem num instrumento de máxima precisão e é um importante meio qualificado nas medições de comprimento independente do uso. Sabendo disso o que se vê é que a qualidade com que os mesmo devem ser calibrados exige a excelência na exatidão e sobretudo a qualidade ambiental. Assim como na comparação mecânica, o processo de interferometria torna-se um meio viável para o alcance da máxima rastreabilidade de acordo com a unidade de

comprimento, neste caso tanto a Norma americana como a Britânica específica e assegura a qualidade da calibração pelo processo interferométrico. Desde o princípio a interferometria sempre esteve associada em alguns casos a medição de grandezas que demandam altas exatidões, a análise dimensional por interferometria geralmente é utilizada em blocos de referencia ou blocos destinados a utilização em laboratórios de medição, neste caso blocos padrões usados para calibrar outros blocos e ou usados como padrões de comprimento mais exigentes, os efeitos em regra da calibração dos blocos por interferometria geralmente vem ligadas a outros métodos de calibração como por comparação mecânica.

A utilização de laser para caracterizar as propriedades dimensionais nos blocos padrões deriva de varias vantagens muito expressivas, procede do não contato físico entre equipamento de medição neste caso o interferômetro e o dispositivo a ser caracterizado e também vale salientar a análise não destrutiva do elemento a ser observado. No processo de calibração por comparação os desvios nas dimensões no processo são expressos numericamente com valores em Micrometros, já a medição por interferometria as dimensões são expressa através da interpretação de instrumentos ou acessórios que fazem a contagem das franjas oriundas do processo interferométrico obedecendo à máxima precisão, essa leitura dos dados de medição da interferência da luz oferece algumas vantagens. (FARAGO e CURTIS, 1994)

a) O Aumento na exatidão vinda da análise real dos comprimentos de onda, ou seja, o estudo das fontes de luz que geram as franjas de interferência é observado realmente e não há um fator de conversão que possa diminuir a exatidão do resultado.

b) A Versatilidade no processo de calibração ou análise dimensional abre um leque de exploração metrológica do solido mensurado, além da verificação do comprimento nominal, outros parâmetros também podem ser observados e inspecionados tais como: Planicidade, Paralelismo, rugosidade superficial referente a desníveis na superfície e ETC, isso tudo a partir da varredura das franjas na superfície do bloco.

c) A sensibilidade, da ordem de Micrometros ou até valores menores, dependendo do equipamento.

Como definição, o comprimento de um Bloco Padrão para um processo interferométrico é caracterizada como a distância perpendicular da superfície superior do bloco a um ponto de medição na fase inferior de uma placa plana, de material e acabamento

idêntico ao bloco. (ISO 3.650, 1998) Esta definição tem suas vantagens, à primeira especifica rigorosamente o material e o acabamento da superfície plana a qual o bloco esta sobreposta, isso diminui os efeitos das mudanças de fase relativa entre os feixes que incidem sobre a superfície. Outro ponto é que expande o uso e a praticidade de medir blocos juntos ou um conjunto de blocos formando uma combinação de comprimento, aferindo e corrigindo a camada de junção entre blocos de mesmo conjunto.

4.2.1. Principio da Interferometria

A interferometria iniciou-se no começo do século XX, embora que ao longo do tempo tenha sofrido algumas alterações, o processo de calibração hoje não difere muito do que foi proposto no inicio. A interferometria é uma das principais métodos na física experimental e sua utilização se expande em outras áreas da física. O conceito de interferometria surgiu a partir de um físico americano chamado Albert A. Michelson que em 1907 que através de desenvolvimentos em cálculos de medição na velocidade da luz e experimentos relativos ao Movimento da matéria, lhe rendeu o premio Nobel de ciências neste mesmo ano. O principio de aplicação da interferometria consiste num método de medição que utiliza o fenômeno da interferência das ondas (em geral ondas de luz, rádio ou som). As medições podem incluir medições de determinadas características das ondas e também dos materiais com os quais elas interagem. Além disso, a interferometria é utilizada para descrever as técnicas que utilizam ondas de luz para o estudo das alterações em deslocamentos. (RENISHAW, 2017).

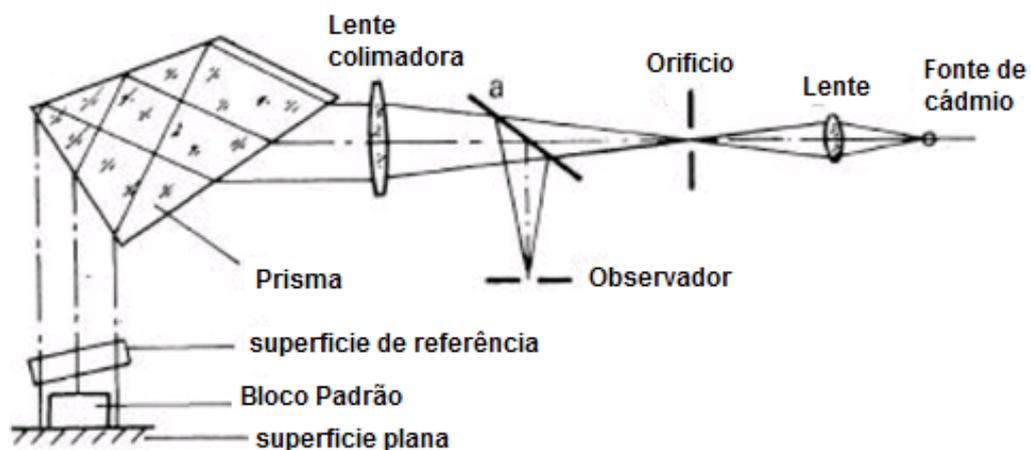
Existem vários tipos de interferômetros alguns mais conhecidos são:

- Interferômetro de FIZEAU, utilizados para medição de planeza e calibração de Blocos padrões;
- Interferômetro do tipo TWYMAN e GREEN para testes ópticos;
- Interferômetro com contagem de franjas;
- Interferômetros de Michelson.

A figura 10 exemplifica o funcionamento básico de um interferômetro do modelo Fizeau, um dos mais utilizados para calibração dos blocos padrões. Primeiramente uma luz de cádmio passa por uma lente que é focalizada em um pequeno orifício um pouco a frente da fonte luminosa, seguidamente os feixes de luzes são convertidas em paralelas espalhando-se lentamente através de uma lente colimadora passando por um prisma que desvia a luz para a superfície plana e o bloco, esse prisma determina o comprimento de onda que passa pela

superfície de referência superior. Posteriormente a imagem retorna para o observador posicionado posterior a lente colimada. Existe um espaço entre a superfície de referência e a superfície da placa plana, esse espaço é determinado pelo tamanho do bloco, essa separação leva a duas observações: uma são em relação às franjas de interferências formadas entre a superfície de referência e a placa plana, essas franjas são faixas escuras, causadas por feixes de luz que estão em fase ou fora de fase entre si, essas faixas são produzidas entre a superfície de referência e a superfície do bloco padrão e só será vista se o comprimento do bloco for menor que a metade do comprimento da luz, outro ponto a ser entendido é que sendo um sistema que tenha duas ou mais franjas de interferência, os contrastes produzidos serão diferentes, tendo em vista que o caminho das trajetórias não será igual.

Figura 9 - Modelo de um interferômetro de bloco padrão baseado no sistema de Fizeau



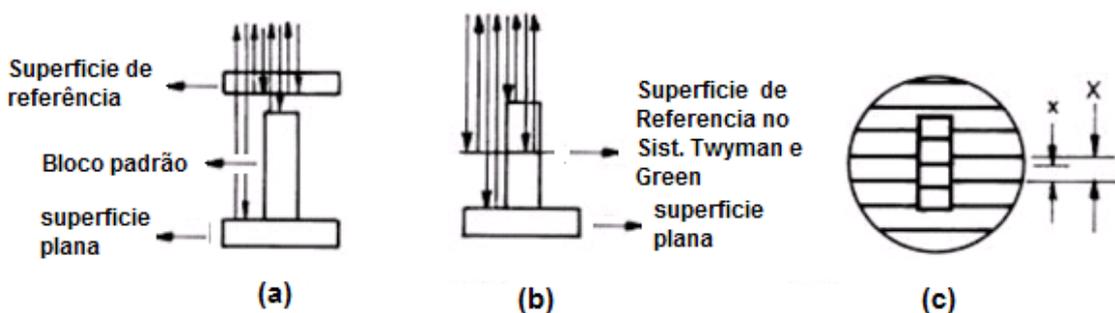
Fonte: Adaptado Optical Components, Techniques, and Systems in Engineering.

A planicidade dos blocos padrões é analisada a partir de diversos padrões das franjas de interferências que, dependendo dos desvios ou irregularidades na superfície de medição do bloco apresentam-se de formas diferentes. No uso de luz que apresentam apenas umas frequências chamadas de luzes monocromáticas, alguns valores de comprimento de onda são conhecidos como exemplo à luz de sódio que tem o $\lambda = 0,575\mu\text{m}$ a distancia entre as franjas podem ser calculadas numericamente sendo estas a igual a o espaçamento em $\frac{\lambda}{2}$. (BEERS, 1975)

O comprimento é determinado inicialmente com a fixação do mesmo em uma placa de vidro altamente plana onde, todos os feixes óticos vindos do prisma incidem igualmente sobre a superfície formando as franja de interferência, para o sistema Fizeau existe uma superfície

de referência posicionada superiormente a face de medição do bloco. Na figura 11 (c) observa-se o deslocamento das franjas de interferência uma na placa plana e outro na superfície superior do bloco. Olhando para as imagens abaixo vemos que o comprimento do bloco não é um múltiplo da metade do comprimento de onda, a razão entre as diferenças $\frac{x}{X} = c$ e a fração $\frac{\lambda}{2}$ da superfície do bloco é muito maior que a metade do comprimento de onda incidida pelo laser interferométrico. Neste caso as franjas do bloco coincidirão uma com as outras se o comprimento do bloco for à metade do valor do comprimento de onda. Como exemplo, temos que um bloco de 10 mm possui aproximadamente 30 metades de comprimentos de onda. (SIROHI e KOTHIYAL, 1990).

Figura 10 - Modelo de medição de comprimento por interferência. , (a) Sistema de Fizeau, (b) Twyman e Green, (c) padrão típico de uma superfície de interferométrica.



Fonte: Adaptado Optical Components, Techniques, and Systems in Engineering.

4.2.2. Erros e Incertezas na calibração por interferometria

Assim como no método diferencial de calibração, o método interferométrico apresenta fatores que podem ocasionar o erro e as incertezas na calibração de blocos padrões, erros associados a condições ambientais ou ate mesmo no ajuste do equipamento podem provocar a inexatidão na análise do comprimento. A maioria dos erros proporcionais ao comprimento do bloco está mais potencializados em blocos de dimensões maiores, como um exemplo pratico: o erro na medição da temperatura do ar em $0,1^{\circ}\text{C}$ causa um erro sistemático de 1 parte em 107 resultados aleatórios neste caso para um bloco de 100 mm o erro será de 10 nm um erro grave em relação ao comprimento, já para um bloco de 10 mm o erro apresentado será de apenas 1 nm, um erro pequeno quando comparado com o anterior. Abaixo está alguns fatores que potencializam dos erros na interferometria. (DOIRON e BEERS, 1995)

1- Comprimento de onda;

- Problemas nos comprimentos de onda relativos ao vácuo;
- Determinação dos índices de refração; Medição na temperatura do ar, pressão atmosférica e umidade relativa.

2- Interferômetro;

- Alinhamento;
- Abertura da luz;
- Obliquidade e inclinação.

3- Blocos padrão;

- Temperatura do bloco;
- Expansões térmicas;
- Diferenças no deslocamento de fases entre o bloco e a superfície plana.

Com relação ao bloco padrão uma das maiores incertezas parte da expansão térmica, esse parâmetro pode ser minimizado controlando a temperatura do ambiente próxima a 20°C, e também como visto anteriormente, esse coeficiente é dependente do comprimento nominal, blocos maiores possuem coeficientes maiores com isso um maior erro significativo final. Existem também erros eventuais que surgem no processo de medição e na variância da camada de junção, para melhorar esse aspecto, muitas vezes o mesmo bloco é medido varias vezes diminuindo a repetitividade nos valores, ocasionado pela aderência das superfícies. A norma ISO 3650 cita algumas correções para medição por interferometria:

- Correções nos cálculos de pressão atmosférica, umidade relativa e no comprimento de onda:
- Variação na temperatura:
- Correção na aderência da camada de junção entre o bloco e a superfície plana, principalmente para de materiais diferentes;
- Acabamento superficial da superfície de medição e as mudanças de fase óticas ocasionadas pelo reflexo das ondas de luz:
- Tamanho do diafragma e comprimento focal nas posições das franjas de interferências;

- A compressão ocasionada pelo peso do bloco posicionado na vertical, isso para medições de blocos maiores de que 100 mm;

Como visto neste capítulo a interferometria apresentou suas vantagens tanto na precisão, quanto na qualidade do equipamento no processo de medição, mas por outro lado assim como no processo mecânico fatores externos e intrínsecos ao equipamento podem causar erros e incertezas na mensuração do comprimento dos blocos, posteriormente será feita uma análise uma técnica de calibração que une tecnologia de medição por coordenadas, a rastreabilidade desses valores obtidos em comparação com modelos matemáticos ideais, a capacidade de produção de múltiplas tarefas relativas à medição, executadas de acordo com a pré-disposição de um software agregado à máquina, bem como a avaliação metrológica do sólido tipo forma, tamanho, localização espacial utilizando configuração única no Sistema coordenado. Consiste na medição por coordenadas, tecnologia iniciada na década de 50 que e ate hoje vem ganhando espaço na área da calibração.

Vale salientar que esses dois métodos abordados trata-se de procedimentos tradicionais de Calibração de blocos padrões utilizados mundialmente, mas o que se observa é que com o aumento da tecnologia e o advento das MMCs a flexibilidade e exatidão nas medições mostra-se um meio perfeitamente factível para calibração, o que será aprofundado nas próximas seções.

5. CALIBRAÇÃO DE BLOCOS PADRÃO UTILIZANDO MÁQUINA DE MEDIÇÃO POR COORDENADA

5.1. Definição e Conceitos

As Máquinas de Medição por Coordenadas consistem em um sistema de medição mais adaptável e um dos mais eficientes no contexto de medição de peças independente da geometria. Com o crescimento das máquinas ferramentas comandadas numericamente o conceito de inspeção, calibração e preservação da precisão dimensional têm sido mudada, e pouco a pouco a interação da tecnologia de arquitetura e design assistido por computador (CAD) e a fabricação assistida por computador (CAM) entra no controle dimensional sendo uma forma rápida, precisa e eficiente no contexto metrológico. Segundo Lima Jr (2007):

“Uma MMC pode ser definida como uma máquina que é composta por uma série de elementos mecânicos dotados de movimentos, um apalpador ou sensor transdutor e uma mesa metrológica sobre a qual são fixadas as peças a serem medidas,” (2007, p29).

Esse conceito deixam claras as características do equipamento e as partes que compõem o conjunto. A tecnologia de medição por coordenada consiste em um dos recursos mais poderosos na área da garantia de qualidade, sua alta informatização e automação têm sido amplamente utilizadas para o controle dimensional em uma análise de elementos em serie.

Um sistema de medição hoje em dia para que ele atenda as exigências do mercado manufatureiro, ele deve apresentar alguns requisitos básicos, dentre esses em especial a incerteza de medição do equipamento deve ser compatível com as tolerâncias da peça que será mensurada, Esse ponto é importante para o processo de calibração dos blocos padrões devido o grau de tolerâncias apertadas, o que nas técnicas de calibrações convencionais não são capazes de atender em todas as suas extensões a essa exigência, mesmo o processo de interferometria que de certa forma torna-se o mais indicado para blocos de referencia que precisem estar em um grau de perfeição segundo a Norma, mesmo assim a presença de incertezas relacionadas ao equipamento e as características do ambiente interferem diretamente no resultado da calibração. De forma geral, uma MMC pode ser vista como um conjunto de Sistemas funcionando de forma integrada, que, movimentando-se nos eixos um sistema coordenado cartesiano para determinação das coordenadas espaciais da peça ou do bloco a ser medido.

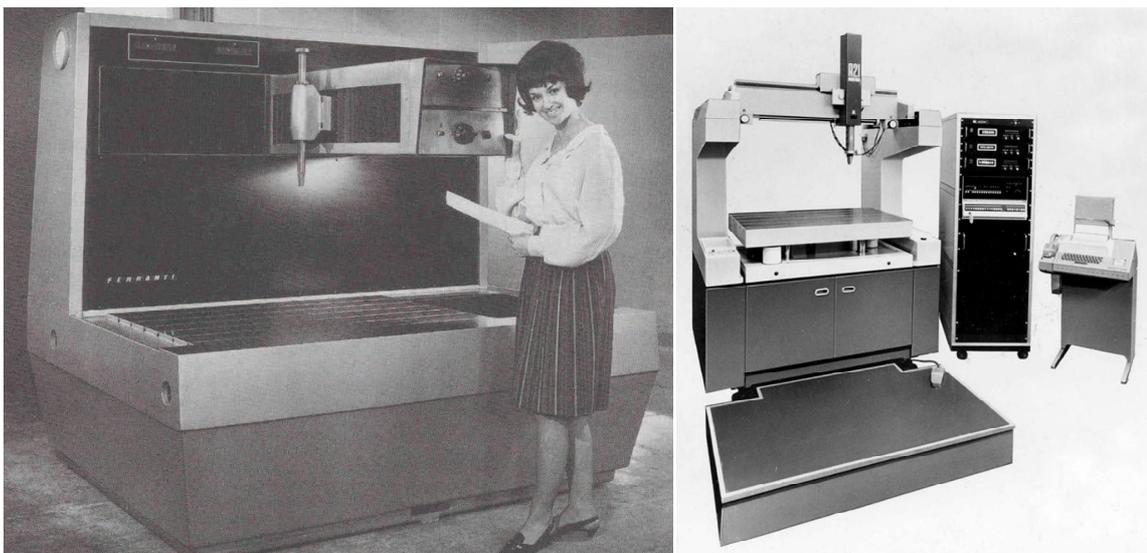
5.2. Breve histórico sobre as MMCs

O primeiro equipamento que se enquadra na categoria das MMC foi desenvolvida pela Ferranti Ltd. Em meados de 1955, A Ferranti era uma empresa britânica dedicada ao desenvolvimento na área de engenharia elétrica e equipamentos computacionais, vale salientar que essa empresa foi uma das primeiras a desenvolver computador comercial o chamado Ferranti Mark 1. O primeiro protótipo da MMC foi desenvolvido inicialmente como um produto complementar ao grupo de máquinas de usinagem controlado numericamente (CNC) que, devido ao aumento do custo da mão de obra, a ideia do equipamento começou a se popularizar anos depois, o que é interessante nesse contexto é que a Ferranti não era especializada na produção de equipamentos de medição, o desenvolvimento surgiu pelo

aumento e necessidade de medições mais precisas e flexíveis sem falar da rapidez mensuração dimensional.

Em 1956 e após anos de pesquisas a Ferranti (Figura 12) inventou um protótipo da maquina de inspeção, na parte pratica a nova maquina fazia a inspeção de peças vinda das maquinas de usinagens de controle numérico em questão de minutos, mudando o aspecto econômico na inspeção de peças, e reduzindo o tempo e a habilidade do operador para realização da tarefa, o primeiro modelo propriamente de uso industrial foi apresentado na Feira Internacional de máquinas de Paris em 1960. Como característica, a primeira MMC dispunha de movimentos no Eixo X e Y de dimensões de 610 mm e 381 mm respectivamente, com uma precisão de $0,0025\text{ mm}$ e resolução de $0,0012$ era equipada com um sistema de apalpação cônico e travas nos eixos coordenados X e Y. Anos depois em 1962, a medição no eixo Z foi feita adicionando um acessório acoplado à estrutura mecânica, que com uma régua graduada fazia o movimento em conjunto com os demais eixos. Essa maquina foi um grande avanço no mercado industrial e dimensional, o que levou ao desenvolvimento de maquinas semelhante com maiores capacidades, melhores precisões e resoluções. Em 1992 a Ferranti encerrou suas atividades, vendendo suas ações se tornando a International Metrology System grupo coreano que ate hoje comercializa MMCs, mas de forma discreta. (HOCKEN e PEREIRA, 2012)

Figura 11 - Primeira Maquina de medição por coordenada desenvolvida pela Ferranti em 1970 (esquerda) e pela Mitutoyo Corporation em 1978 (direita)



Fonte: Mitutoyo Corporation e *Coordinate Measuring Machines and Systems*

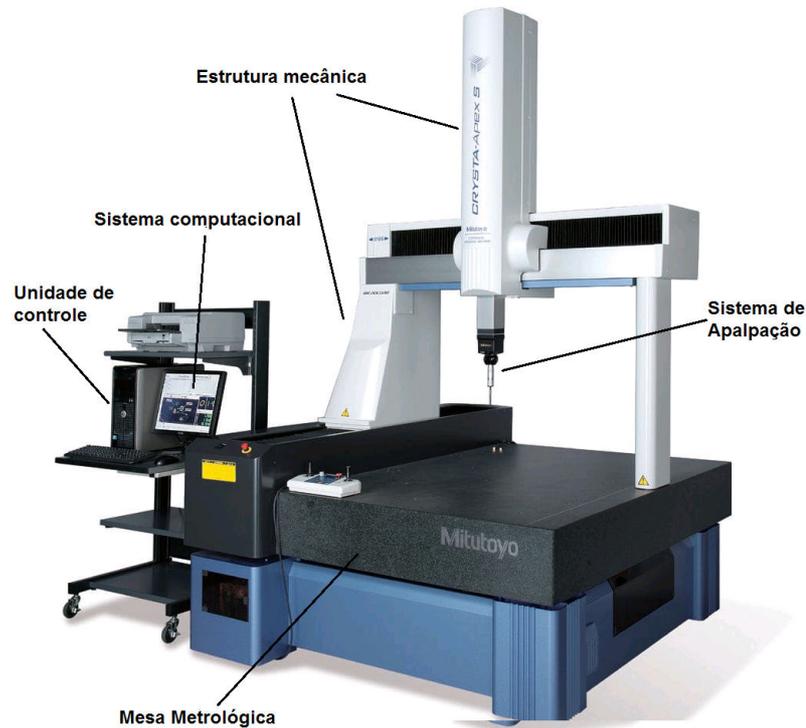
A Mitutoyo iniciou o desenvolvimento das MMCs em 1968, embora inicialmente apenas com movimentos nos eixos X e Y, esta máquina foi desenvolvida a pedido de um fabricante de eletrodomésticos, que inicialmente dedicados à aferição de furos em seus produtos, demonstrou grande eficácia e desempenho na medição a qual foi projetada. Anos depois a Mitutoyo reconheceu o potencial da máquina de medição e de pronto começou o desenvolvimento das MMCs já com movimentos no eixo Z, chamada de Modelo A1 (Figura 12) foi vendida comercialmente. A partir daí os avanços na área só cresceram, em 1980 a Mitutoyo apresentou a primeira MMC controlada por computador tendo mesmo uma interface rústica e simplificada, na época apresentou um avanço na metrologia dimensional. A Mitutoyo hoje apresenta uma das maiores variedades de equipamentos, interface de operação e configurações, projetada para atender as necessidades dos clientes, sendo hoje como um dos principais fornecedores mundiais de MMCs.

Mesmo com o avanço tecnológico alguns recursos não mudaram muito desde o seu desenvolvimento inicial, dentro desses quase 70 anos de desenvolvimento das MMCs, o uso de materiais mais estáveis à temperatura como granito, Fibra de carbono e a cerâmica são exemplos de materiais que permaneceram coerentes durante a história, em contra partida a questão do sistema computacional (software) de medição agregado ao equipamento tem avançado, modelos de simulação, e redução de incerteza e aprimoramento dos algoritmos matemáticos nos valores de referência são exemplos de recursos que de acordo com especialistas continuará se tornando mais precisa, acessível e padronizada. (HOCKEN e PEREIRA, 2012)

5.3. Estrutura das Máquinas de Medição por Coordenadas

As MMCs são máquinas que apresentam representações nos eixos cartesianos, retilíneos e tridimensionais, nesta máquina ocorre à movimentação em três eixos coordenados para que se determinem as coordenadas espaciais do objeto a ser medido, cada eixo é caracterizado por meio de um sistema com mancais aerostáticos, escalas óticas ou com sistema a laser. A figura 13 mostra uma composição básica de uma MMC. (NOBREGA, 2011).

Figura 12 - Máquina de medição por coordenada modelo ponte.



Fonte: Mitutoyo, 2013.

Os componentes que compõe o conjunto básico de uma MMCs

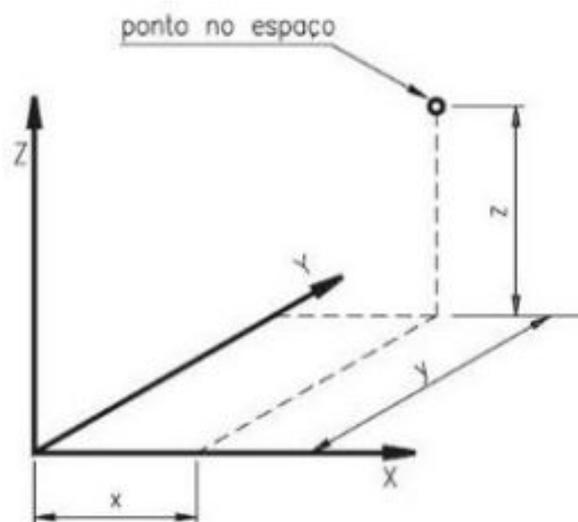
- Estrutura mecânica: Responsável pela sustentação e movimento do Braço Móvel, nela esta inserida os mancais aerostaticos responsáveis pelo movimento suave e preciso do cabeçote apalpador;
- Sistema de apalpação: Um dos principais elementos das MMCs consiste, de uma unidade com um uma haste fina e um sensor na ponta, que através do contato com a superfície da peça envia um pulso elétrico ao sistema de controle que lê as informações processa determinando a localização do ponto no sistema cartesiano. Existem também sistemas de coleta de pontos a lasers que utiliza princípios óticos e eletrônicos para determinação da posição do ponto mensurado.
- Unidade de controle: Responsável pela movimentação e acionamento dos eixos coordenados.
- Mesa metrológica; Superfície plana, estável e de elevada dureza, responsável pelo suporte da peça no conjunto.
- Sistema computacional da MMC: Sistema que envia as informações para a unidade de controle, gerenciando os movimentos relativos a maquina.

Existem algumas configurações que difere da que foi apresentada na imagem anterior, a Norma britânica BS 6808-1 1987, especifica a disposição do braço a qual vai acoplado o sistema de apalpação coluna que depende do tipo de operação e das dimensões do objeto que esta sendo medido, podendo ser horizontal móvel, horizontal fixa ou do tipo coluna. Independente do tipo de maquina utilizada a credibilidade do resultado da medição esta associada a como o operador esta aplicando as praticas de metrologia, o fator humano no processo ainda torna-se importante como exemplo à escolha dos pontos e a distribuição na superfície ainda são decisões e estratégias, visto que o processamento matemático das informações muita das vezes só terá o pleno sucesso se o agente externo dotar de certo conhecimento.

5.4. Princípio da medição com MMCs

A definição dimensional de uma peça medida é determinada geometricamente em um espaço tridimensional a partir de eixos perpendiculares entre si (X Y Z). Tomando como referencial a interseção desses eixos chamado ponto de origem, no processo de medição após coleta dos dados necessários, é esboçado no plano sua orientação é definida sua posição no espaço em relação aos eixos coordenados.

Figura 13 - Sistema de Coordenada Tridimensional.



Fonte: Google,2018

Em uma MMC a geometria da peça é determinada através de pontos obtidos na superfície da peça mediante apalpação, cada ponto é convertido em coordenadas, essa forma

de obtenção dessas informações não avalia os parâmetros da peça como furos, ângulos e etc, ou seja, a obtenção dos pontos não informa diretamente o formato da peça, o que acontece é que, a partir das informações coletadas pelo sistema existe uma conversão em formas geométricas ideais através da aplicação de algoritmos que melhor ajustam os pontos medidos. As medições com MMC obedece a quatro passos: (ISO 10360-1, 2000)

1. A calibração da ponta de medição utilizando medidas padrões como referencia;
2. Após o posicionamento da peça sobre a mesa metrológica, posteriormente ocorre a identificação dos eixos coordenados com relação à disposição do objeto;
3. Medição dos pontos coordenados nas superfícies de referencia;
4. Transformações das medições nos sistemas coordenados em resultados através do Sistema computacional.

As principais vantagens das MMCs são a flexibilidade na inspeção de peças com formatos complexos, a detecção de possíveis erros na geometria, a não movimentação da peça em relação ao sistema coordenado, o aumento da exatidão, a não deformação ou agressão da superfície da peça quando em contato com o instrumento e a facilidade de manuseio bastando apenas que o operador tenha um treinamento feito pelo fabricante e conhecimentos básicos de metrologia. Em contrapartida o elevado custo na implantação e a dificuldade na análise dos erros são exemplos de desvantagens inerentes ao equipamento. (ORREGO, 2000).

Fazendo uma comparação com metrologia convencional que utiliza instrumentos de medições diferentes para operações diferentes os elementos geométricos são medidos separadamente; tipo paquímetros para medidas de distancias e transferidores para medições de ângulos; as MMCs utilizam sistemas de referencia, vale salientar que, na calibração de blocos padrões a geometria do bloco é comparada com modelos matemáticos e valores de referencia previamente Normalizados. A tabela 6 explica uma comparação entre a metrologia convencional e metrologia por coordenadas

Quadro 4 - Comparação entre metrologia convencional e metrologia por Coordenadas

Metrologia Convencional	Metrologia por Coordenadas
Alinhamento manual.	Alinhamento computadorizado
Instrumento de Medição com funções dedicadas.	Múltiplas tarefas podem ser utilizadas através da capacidade de adaptação do software.
Comparação de blocos padrões com medidas materializadas.	Comparação dos blocos padrões com modelos matemáticos ideais.
Medições de geometria, formas e tamanhos são feitas através de instrumentos auxiliares.	Avaliação de formas, geometrias e tamanhos são feitas através de uma única configuração no Sistema coordenado.

Fonte: Autor

Mesmo tendo várias vantagens quando comparado com outros métodos de medição, o processo de análise dimensional por coordenadas também possui incertezas, esses erros podem ser divididos em Máquina, Ambiente, Peça, método de medição e o operador, e raramente esses erros são produzidos isoladamente, na seção seguinte veremos quais são essas incertezas e como podem ser minimizadas.

5.5. Rastreabilidade no sistema de medição por coordenada

No Sistema de calibração independente do método utilizado sempre se utiliza o princípio da comparação para determinar o valor do mensurando, tanto o objeto a ser calibrado como a medida materializada precisa que os seus valores sejam comparados com medidas de referencia. De Acordo com ALBERTAZZI:

“Rastreabilidade é a propriedade do resultado de uma medição ou do valor de um padrão estar relacionado a referencias estabelecidas, geralmente padrões nacionais ou internacionais, por meio de uma cadeia contínua de comparações, todas tendo incertezas estabelecidas”. (2008, p.141).

Historicamente falando a Rastreabilidade tem um significado importante na produção de certificados de calibração que vai desde o objeto a ser calibrado ate aos padrões adotados em laboratórios de calibração de referências, sendo esta uma característica muito importante na padronização dos sistemas de medição. (ALBERTAZZI, 2008).

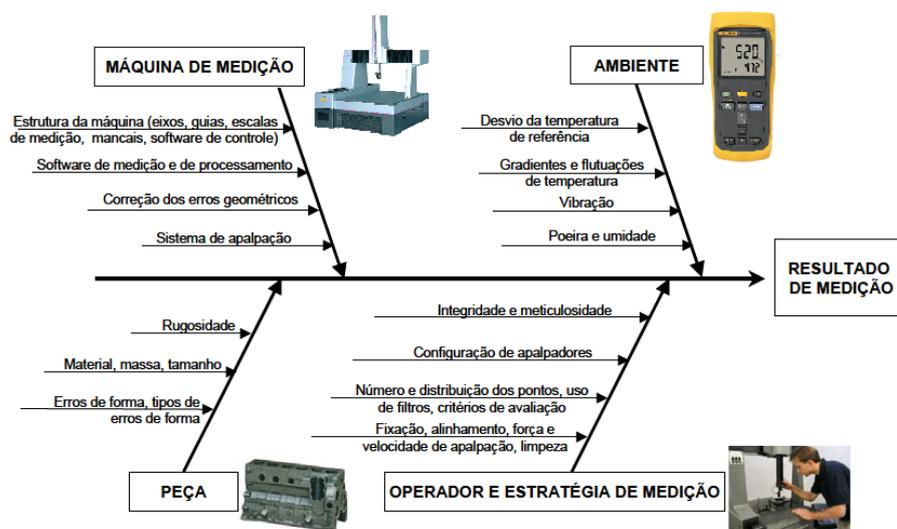
Essa comparação entre referências internacionais (Sistema internacional) e valores obtidos em laboratórios pode ocasionar certas ligações diretas com a incerteza da medição e a calibração. Hoje o tema de rastreabilidade nas MMCs tem sido discutidas e é alvo para

pesquisas que pouco apouco vem sendo esclarecidas mas há muito a se demonstrar, haja vista que o procedimento e análise das incertezas de medição para as MMCs estão limitados a peças com geometrias usuais (Regulares) não abordando de certa forma geometrias mais complexas, isso é observado na Norma ISO 15530-3, 2004 que fala da Metodologia para estimar incerteza na medição, utilizando modelos padrões iguais a peças utilizadas nas medições normais das MMCs, isso aponta uma rastreabilidade mesmo que parcial no processo de medição. Neste caso para uma análise dimensional de um furo sua incerteza de medição poderá se alterar dependendo da máquina que estará utilizando, as condições físicas e ambientais e também da técnica adotada pelo operador na obtenção dos pontos. Hoje os fabricantes de segue padrões de Normas internacionais de verificação da MMC, por exemplo, a Norma ISO 10360-2 que trata do erro Maximo permitido bem como a EAL G17 que fala da calibração e desempenho das MMCs, No Brasil a Associação Brasileira de Normas Técnica - ABNT faz o uso de guias internacionais para se fundamentar.

5.6. Erros e Incertezas na medição

De acordo com Albertazzi Jr e Souza (2008), as fontes de erros num sistema de medição por coordenadas podem ocorrer interna, ou seja, dentro do processamento das informações da máquina, ocasionadas por agentes externos que influenciam, alteram ou interagem com o resultado das análises dimensionais; nisto inclui o objeto a ser medido ou também por influência do meio onde esteja inserido o equipamento. Como visto anteriormente as fontes de incertezas são classificadas em: (ARENHART, 2007)

Figura 14 - Fontes de incertezas na medição com MMCs.

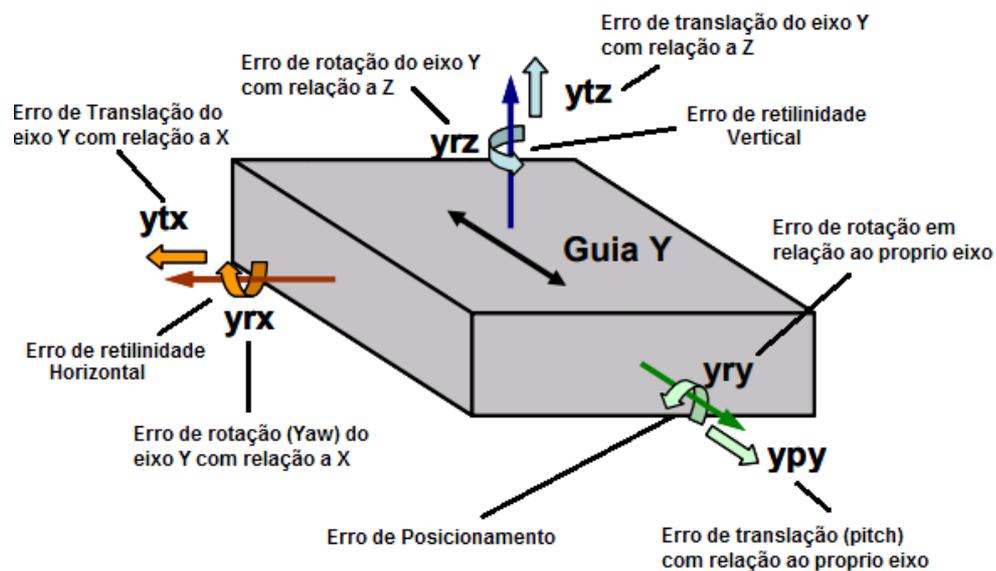


Fonte: Adaptado ARENHART, 2007.

5.6.1. Erros na Estrutura e geometria

Os erros na estrutura se dividem em dois; erros de caráter dinâmico e ou erro de caráter estático (desvios geométricos ou de montagem do equipamento), as fontes de erros estruturais são normalmente constituídas por aspectos mecânicos envolvendo (guias, mancais ou escalas). Geometricamente, considerando que uma máquina possui 3 eixos coordenados (X, Y e Z), isso significa dizer que um total de 18 erros paramétricos haja vista que cada eixo possui 6 graus de liberdade (três graus de rotação e três graus de translação), admitindo que para cada eixo ocorra erro de perpendicularidade entre as guias e mancais que compõe o conjunto, teremos um total de 21 componentes de erros geométricos (SILVA, 1996). Esses Desvios geométricos podem estar relacionados com a fabricação (erros de planeza, e retilinidade), montagem ou desgastes de componentes. A figura abaixo exemplifica bem o que foi falado tomando como base o eixo Y tem-se:

Figura 15 – Exemplificação de erros paramétricos do Eixo Y.



Fonte: Adaptado ARENHART, 2007.

À medida que a estrutura se movimentava sobre o ponto de medição o esforço pode vir a provocar uma movimentação do centro de gravidade da máquina, ocasionando variações e até desníveis dos estados de deformações, ou seja, o esforço ocasionado pelas guias e pelos mancais devido ao peso do cabeçote apalpador pode gerar erros geométricos dependendo do esforço e da velocidade de manuseio. Esse efeito produzido pelos próprios componentes pode ser eliminado ou até minimizado através de correções no sistema computacional. (LIMA JR., 2007).

5.6.2. Erros no Sistema apalpador

Como visto até agora as informações enviadas ao sistema computacional sobre o formato da peça a ser medida é feita pelo sistema de apalpação, muitas vezes chamado de cabeçote apalpador (figura 17). Quando numa análise metrológica o resultado da medição por apalpação compreende tantos erros sistemáticos como erros aleatórios, haja vista que o primeiro pode ser invalidado caso haja uma melhor operação do cabeçote apalpador por parte do operador, a severidade de uso, o manuseio e o tempo são exemplos de condições que se potencializadas aumenta os efeitos das incertezas. Grande parte dos efeitos sistemáticos é compensado no ato de calibração do apalpador, mas por outro lado mesmo existindo uma compensação, os erros residuais oriundos da inclinação exagerada da haste de apalpação isso para hastes mais longas, bem como a não uniformidade da esfera padrão de calibração e os erros referente a repetitividade torna-se erros muito maiores e dificilmente controlados pois estão intrínsecos a análise inicial da medição.(OLIVEIRA, 2013).

Figura 16 - Cabeçotes Apalpadores do tipo reto TTP.



Fonte: RENISHAW.

Existem também erros aleatórios que dependendo do tipo não há como prever se haverá ou não mudanças no resultado de uma nova medição com base no resultado obtido anteriormente. (NOBREGA, 2016).

- a) Erro oriundo do sistema eletrônico. Pode ocorrer no processamento das informações um delay (atraso) na resposta dos circuitos eletrônicos que compõem o cabeçote apalpador, haja vista que internamente ao cabeçote existe

micro atuadores eletrônicos que, de acordo com o movimento da haste os contatos elétricos mandam sinais ao sistema de controle.

- b) Efeitos térmicos. Dependendo da temperatura a qual está inserido o equipamento, a alteração brusca de temperatura pode ocasionar a dilatação da haste, mesmo fabricada geralmente de carboneto de tungstênio e rubi, pode acontecer à deformação dos componentes mesmo que mínimas.
- c) Erros Geométricos. Durante a utilização do apalpador pode ocorrer limitações oriundas do processo de fabricação tipo, em uma peça de ferro fundido pode ocorrer à abrasão da ponta de rubi com o material do objeto, isso se chama desgaste abrasivo, esse fenômeno ocorre devido à afinidade química entre os dois materiais. Para uma minimização desse erro pode-se utilizar pontas de zircônia evitando assim acúmulo de material na ponta do apalpador.

5.6.3. Erros no Sistema de controle

A Realização das tarefas automáticas é feita através do sistema computadorizado, e mesmo com a alta tecnologia agregada as MMCs a ocorrência de erros no processamento dos dados se tornam até de certas formas inevitáveis. (LIMA Jr. 2007). A coleta dos dados da superfície são processados e convertidos na geometria procurada, existem diversos métodos matemáticos tais como: métodos dos mínimos quadrados e método da zona mínima, esse processamento e escolha do algoritmo dependem do fabricante.

Alguns testes feitos por instituições como a NIST verificou o desempenho dos sistemas computacionais atuais, após estudos apenas 37% dos sistemas apresentavam resultados adequados. Na análise feita o cálculo dos parâmetros geométricos de um círculo em coordenada X e Y e comparado com dados com um modelo de referência, alguns sistemas apresentaram erros acima do esperado diminuindo a confiabilidade. Outra fonte de erros é relativa aos algoritmos utilizados em compensações, os métodos de ajuste dependem muito do fabricante onde hoje não há uma regra para validação desses algoritmos. (ARENHART, 2007)

5.6.4. Erros relativos à temperatura e ao Ambiente de medição

A vibração, temperatura e a presença de partículas de poeira no ambiente influencia diretamente na análise dos dados obtidos, podendo provocar a antecipação de ajustes no equipamento ou até mesmo a degradação antecipada dos componentes. As partículas Sólidas em suspensão provoca a inexatidão na medição, haja vista a sensibilidade no sistema de apalpação, e a degradação das guias e suportes da MMC, como opção de minimização seria a obtenção de uma diferença de pressão entre o ambiente externo e o interno onde encontra a máquina, facilitando o fluxo de ar por insuflamento e um maior sistema de exaustão. A temperatura do ambiente apresenta três formas de influenciar diretamente no resultados: a variação do valor médio Normalizado (20°C), pelas oscilações nas temperaturas ou pela troca térmica com outros objetos constantes no recinto, Algumas máquinas normalmente apresentam um gradiente de temperatura a qual elas podem ser submetidas, de acordo com estudos feitos pelos fabricantes, à falta de cuidado com a temperatura no ambiente compromete o desempenho e direciona os resultados das medições a valores diferentes ao declarado pelo fabricante.

Hoje em dia as máquinas dispõe de mecanismos de compensações dessas variações, os erros no que tange as temperaturas torna-se muito complexos e difíceis de ser tratados, pois não causa uma distorção linear na estrutura. Para uma minimização destes erros o uso de materiais com melhores e adequados coeficientes de expansão e condutividade torna-se desejável. Outro ponto é em relação à troca térmica com objetos ou até pessoas no ambiente, a proximidade com computadores e o acúmulo de pessoas no ambiente a presença de iluminação excessiva fora dos padrões técnicos e a Presença de janelas e a ausência de uma ante-sala , ar condicionados mal dimensionados e dificuldade na circulação de ar são exemplos de situações que contribuem com a variação térmica. O uso de Amortecimento ou bases inerciais bem como o afastamento do equipamento de áreas de produção ou de rodovias, são exemplos de soluções que minimizam a os efeitos das vibrações. O ambiente de medição deve ser controlado termicamente e a exatidão nas medições depende de um ambiente limpo e seco. (ORREGO, 2000)

5.6.5. Erros relativos peça

A peça a ser medida também pode influenciar diretamente no resultado das medições, o acabamento superficial, a deficiência nas propriedades físicas e térmicas bem como os erros no formato geométrico pode definir a qualidade na avaliação. Os efeitos térmicos oriundos do

ambiente como visto anteriormente pode afetar diretamente as propriedades do material. Sabemos que peças com menores rigidezes podem se deformar no momento em que é fixado, o uso de suportes com elevadas pressões facilitam a deformações elásticas se não utilizados de forma correta. O que é interessante é que geralmente os fatores que influenciam na medição normalmente são externos as condições do objeto (temperatura, umidade do ambiente e etc), mas a rugosidade superficial os erros no formato são características do processo de produção e do projeto que, muita das vezes não podem ser minimizada ao nível da metrologia.

Como exemplo tem-se o coeficiente de expansão térmica, que às vezes pelo projeto o material utilizado necessariamente precisa ser um mais característico e de certa forma intolerante à variação brusca de temperatura, o aumento do potencial desse efeito só é às vezes influente no âmbito da medição se a exposição do material for continua climatização precária ou se a falta de exposição à estabilização térmica for insuficiente. Outro exemplo vê a questão dos erros no formato da peça que, muita das vezes só é relevante quanto afeta a repetitividade do processo de medição, nesse caso informará resultados diferentes. (WECKENMANN, 2001)

5.6.6. Redução das fontes de erros nas MMCs

Mesmo Apresentando varias fontes de erros os fabricantes buscam meios de contornar essa problemática no projeto de construção das MMCs. (NORONHA e SCHNEIDER, 2001)

- a) A busca por componentes mais eficientes e com a máxima precisão na fabricação tendo como objetivo a melhoria significativa na incerteza.
- b) A implementação de métodos de correção de erros frequentes e persistentes (sistemáticos). Esses métodos são característicos por corrigir erros de linearidade das guias de movimento, afastamento dos padrões de perpendicularidade e outros, podendo ser implantado no sistema computacional podendo ser atualizados periodicamente.
- c) Melhorias na parte dos efeitos de temperatura: Uso de materiais com alta condutividade térmica e resistentes a gradientes de temperatura, materiais com Baixo coeficiente de expansão.

5.7. Princípio de calibração dos blocos padrões

O princípio de calibração de blocos padrões segue exatamente o modo para o qual a máquina foi projetada, a posição, fixação e de análise dos pontos segue a mesma ideia de como é executado a medição em uma peça mecânica ou similar. Para o melhor entendimento de como é análise dimensional de um bloco padrão, veremos o que é relevante dentro da medição por MMC, que é a análise do comprimento entre duas faces do bloco. A Norma ISO 286-1, 2010 que trata das especificações geométricas dos produtos e define o tamanho como sendo: “Um número que expressa, em sua unidade em particular, o valor numérico de uma dimensão linear.”, de acordo com o que norma define outras características não podem entrar no conceito de tamanho como ângulos e etc. Diferente de uma geometria complexa que necessita muita das vezes de elementos substituídos (planos, cilindros, etc.) para comparação, a medição de um bloco padrão não requer muita complexidade, pois a medida real é obtida através da diferença entre duas faces.

A medição de geometrias livres em uma MMC para um bloco padrão discorre de uma medição indireta e necessariamente o princípio da comparação terá que ser utilizada, a obtenção de pontos nas superfícies do bloco e posteriormente os erros geométricos serão determinados a partir dos resultados encontrados em comparação com valores de referência, neste caso como os valores obtidos são expressos categoricamente, a incerteza na medição é geralmente menor quando comparada com a comparação direta. (NEROSKY, 2001)

6. MATERIAIS E MÉTODOS

6.1. Máquina de medição por coordenada MITUTOYO CRYSTA-APEX S

O laboratório de Engenharia de precisão (LEP UFPB) foi criado em 1998 com o intuito de proporcionar uma maior qualidade e desenvolvimento na área metrológica. Sob a coordenação do Prof. Dr. João Bosco de Aquino Silva, o laboratório está inserido no centro de tecnologia e faz parte do Departamento de Engenharia Mecânica, dentre as áreas de atuação e pesquisa destaca-se a Engenharia de precisão e Nanometrologia.

O laboratório dispõe desde 2013 de uma Máquina de medição por coordenada do tipo CNC Mitutoyo CRYSTA-APEX S, Máquina de Alta exatidão que garante um erro Máximo de $MPE_E = (1,7 + 3L/1000)$ muito superior aos padrões de MMCs atuais, desempenho e alta velocidade por volta de 520 mm/s com uma aceleração máxima de 2.309 mm/s^2 . Além disso possui um sistema de compensação de temperatura que garante a exatidão de medição

em condições de temperatura de 16 a 26 °C através de sensores instalados em cada uma das escalas, esse sistema efetua a compensação simulando como se a peça estivesse a 20 °C isso levando em conta o coeficiente de expansão do material quando especificado. A CRYSTA-APEX S também possui uma Estrutura estável e rígida, possuindo mancais aerostáticos minimizam a vibração mesmo no aumento na Aceleração e velocidade da estrutura, isso garante o movimento linear e suave. (MITUTOYO, 2013)

Figura 17 - Máquina de medição por Coordenada do LEP.



Fonte: Autor

Desde a ideia principal de calibração dos blocos padrões com a MMC a questão da fixação do bloco no conjunto tornou-se um desafio que, mesmo visto como simples, requereu certa dedicação no que tange a qualidade da medição. Mesmo não havendo qualquer especificação técnica nem Norma dedicada à calibração de blocos padrões por esse método, a ideia inicial pareceu promissora haja vista que a máquina dedica-se a analisar peças com

geometrias complexas e diversificada características dimensionais com facilidade. A posição e a inclinação do bloco em relação ao apalpador devem ser levadas em consideração, pois dependendo de onde se posicione as faces de medição, no deslocamento do cabeçote apalpador e na movimentação da estrutura da máquina pode haver certa dificuldade na obtenção dos pontos, mesmo que existam dentro dos softwares computacionais compensações na variação de posição em relação aos eixos para uma análise em serie de blocos com dimensões fixas no caso dos blocos padrões, a fixação padronizada da peça surgiu como interesse principal para rapidez e a diminuição dos erros sistemáticos.

Figura 18 - Mesa Rotativa Mitutoyo MRT 320.



Fonte: Autor

O projeto inicial foi posicionar os blocos de forma livre apenas com apoios em uma face inferior, no sentido de elevar um pouco o bloco da mesa rotativa (Figura 19) aproximando-se ao cabeçote apalpador, essa posição permitiu que as duas superfícies de medição ficassem na horizontal paralelas uma com a outra, após uma rápida análise dimensional com essa configuração verificou um pequeno movimento do bloco na hora da obtenção dos pontos, isso se refletiu diretamente no resultado da medição devido ao deslocamento mesmo que pouco do sistema de coordenadas do bloco em relação ao obtido no início da operação. A partir daí surgiu o conceito da construção de um dispositivo de fixação dos blocos na mesa rotativa, capaz de segurar de forma rápida, intercambiável e eficiente, sem prejudicar a estrutura física do bloco.

6.2. O Conjunto de Blocos Padrões

O conjunto de blocos disponibilizado para calibração segue o modelo universal no sistema métrico, todos no formato retangular num total de 112 peças, classe 0, feitos de aço, a

marca não foi identificada mas trata-se de um conjunto de ótima qualidade pela construção do mesmo. Como características principais observa-se a orientação estável tanto verticalmente como horizontalmente, a lapidação precisa de ambas as faces de medição, o range de combinações e a ampla gama de aplicações torna-se esse modelo viável para análise dimensional. Em anexo ao conjunto observa-se um certificado de inspeção (Ver anexos) que será utilizado para comparação direta entre o valor encontrado e o valor medido pela MMC.

Figura 19 - Bloco padrões utilizados na análise das calibrações.



Fonte: Autor

A distribuição de medidas do conjunto dividi-se em:

- 1 Bloco de 1,0005mm;
- 9 Blocos de 1,001 a 1,009 mm, com acréscimo de 0,001 mm;
- 49 Blocos de 1,01 a 1,49 mm, com acréscimo de 0,01 mm;
- 49 Blocos de 0,5 a 24,5 mm, com acréscimo de 0,5 mm;
- 4 Blocos de 25 a 100 mm, com acréscimo de 25 mm;

Como visto em capítulos anteriores Blocos padrões da classe 0 geralmente são destinados ao uso em laboratórios de calibração, ou seja para Blocos de altas exigências, em medições criteriosas no ajuste de máquinas ferramentas, usado como referencia para calibração dos blocos da classe 1 e 2. A data de fabricação dos blocos de acordo com a placa anexada, consta o ano de 2010, e como visto na Norma ASME blocos da classe 0 deve

necessariamente ser calibrado anualmente, o que mostra a real necessidade de calibração devido ao tempo.

7. METODOLOGIA DE ANÁLISE E RESULTADOS

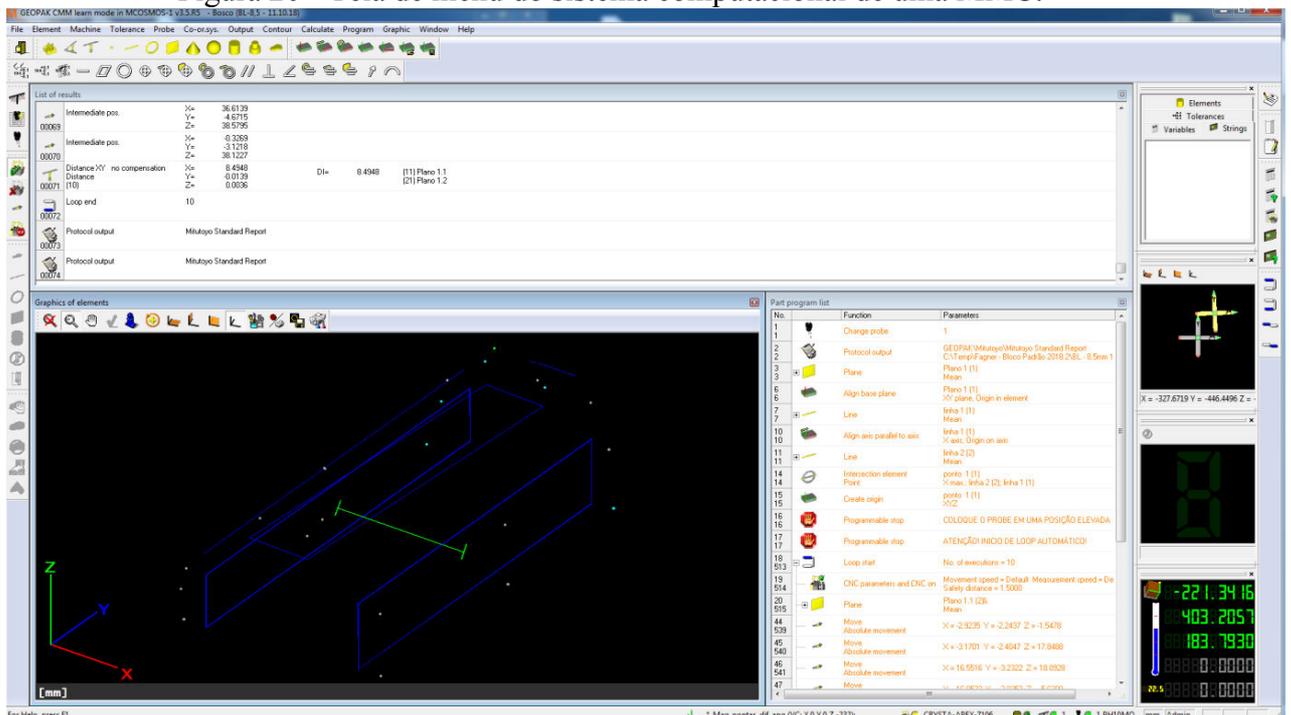
Com o objetivo de se obter a calibração com alto controle dimensional e que o range englobe toda extensão do tamanho dos Blocos constantes na proposta do trabalho, a escolha dos blocos seguiu a ideia de uma maior variabilidade das dimensões sendo escolhido para metodologia as dimensões de 100, 50, 21,5, 16 e 8,5 mm, no decorrer do processo a estabilização da temperatura foi gradativa iniciado na análise com 23,3 °C para o bloco de 100 mm chegando a 19,1 °C para o bloco de 8,5mm, vale salientar que para o momento não será feita nenhum tipo de correção na temperatura com a temperatura normalizada (20 °C) essa questão será abordada mais adiante. O processo de medição consistiu na realização de 10 ciclos de medição dos blocos dando uma maior variabilidade nos resultados obtidos e nas fontes de Incertezas.

Na parte do controle do sistema operacional da Máquina alguns passos são executados a fim de regular estrutura física para uma posterior automatização do processo, trata-se de um referenciamento manual do apalpador na superfície buscando a posição dos eixos e a origem do sistema, não havendo qualquer tipo de mudança da orientação do bloco após isso, esses procedimentos realizados para uma sequencia de medições se faz necessário para que posteriormente a máquina execute os movimentos automaticamente a fim de reduzir o tempo total na avaliação, vale salientar também que o fator operador nesse caso não entrou também como influencia direta na análise haja vista que o mesmo possuía plena capacidade na execução da tarefa. Como resumo do procedimento term-se:

- 1) Definição do sistema de coordenadas local no Bloco;
- 2) Determinação da origem, criada a partir de um ponto de intersecção entre a linha 1 e linha 2 definida nos eixos coordenados;
- 3) Determinação do eixo x perpendicular a linha 1, Medido do ponto mais próximo da origem para direita;
- 4) Medição de 6 pontos distribuídos em cada extremidade de ambas as faces do bloco;
- 5) Ciclo de 10 medições para cada bloco.

A figura 25 Mostra o menu do sistema computacional e gerencial da MMC no caso em questão é utilizado o MCOSMOS (Controlled Open System for Modular Operation Support). Sistema que permite a integração de todas as características e aplicações melhorando a eficiência da MMC e a produtividade das funções no controle de qualidade. A mesma possui uma interface simplificada e intuitiva, que proporciona ao operador confiança no processo de medição.

Figura 20 - Tela de menu do sistema computacional de uma MMC.

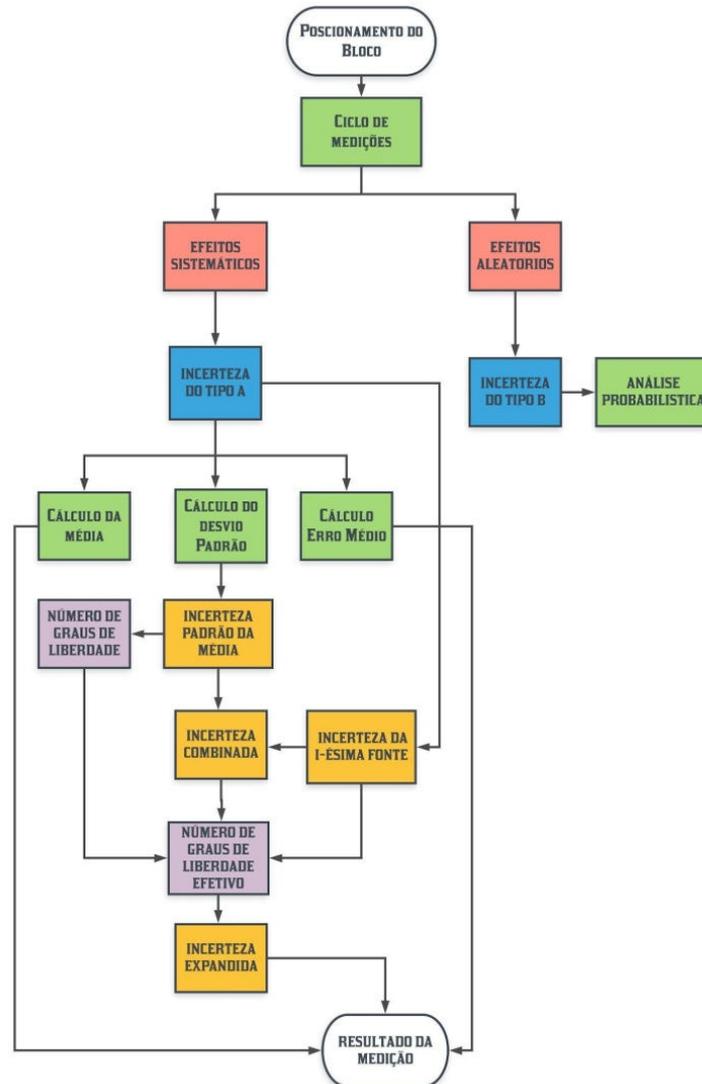


Fonte: Autor

Para o cálculo das incertezas a metodologia de calculo de GUM foi utilizada haja vista que hoje os laboratórios de metrologia amplamente faz uso dessa técnica para estimativa de incerteza na análise de um mensurando, a criação do método de GUM veio para facilitar o entendimento e a implementação nas mais variadas áreas da metrologia. O Seu principio de funcionamento baseia-se na demonstração da incerteza total, em uma a alise dimensional ela inclui dentro da análise diversas fontes de incertezas, que aparecem devido a efeitos aleatórios ou sistemáticos. O método de GUM tem como base a lei de propagação das incertezas, isto é, no processo de análise a presença de incertezas incorporadas em cada fator ou etapa no andamento é conduzida para a incerteza final da medição seguindo um modelo de distribuição normal ou do tipo t-Student que depende da intensidade do grau de liberdade aplicado à medição. A incerteza aplicada foi a do tipo A, incertezas obtidas através de meios estatísticos caracterizada por desvios padrões experimentais. (GUM 2008) O fluxograma abaixo

exemplifica como será feito o cálculo do resultado da medição, partindo desde o posicionamento do bloco junto a Máquina de medição passando pela determinação dos resultados obtidos até observações das incertezas intrínsecas ao longo da análise.

Figura 21 - Fluxograma referente ao sistema de calibração partindo do método de GUM.



Fonte: Autor

A melhor estimativa do valor medido de uma variável repetida n vezes é obtida através de uma média aritmética chamada \bar{q} sendo esta o passo inicial para determinação estatística. A equação abaixo exemplifica a média de um número n de observações:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (6.1)$$

\bar{q} = Média Aritmética das n indicações;

q_k = Resultado independente;

$n =$ Numero de observações independentes;

Para o cálculo da variância experimental de um numero finito de medições repetidas de um mesmo avaliando, a estimativa do desvio padrão da amostra determinada por:

$$s(q_k) = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (q_k - \bar{q})^2}{n - 1}} \quad (6.2)$$

$\bar{q} =$ Média Aritmétrica das n indicações;

$q_k = i -$ ésima indicação;

$n =$ numero de medições repetidas;

$s =$ desvio – padrão da amostra;

O desvio padrão da amostra é uma estimativa derivada do desvio padrão e mostra o desvio do conjunto de dados indicando em média qual o erro (desvio) cometido em torno da média \bar{q} . O passo seguinte é a determinação dos erros sistemáticos ou a tendência aplicada a cada bloco padrão, diante disso para que esse erro seja conhecido é necessário o conhecimento do valor verdadeiro de cada determinando, para os blocos em questão o valor real do bloco consiste na dimensão efetiva da diferença de ambas as faces de medição e que é especificada pelo fabricante. Esse é calculado por:

$$E_s = \bar{q} - VV \quad (6.3)$$

$E_s =$ Erro médio ou sistematico;

$\bar{q} =$ Média Aritmétrica das n indicações;

$VV =$ valor verdadeiro do mensurando;

A tabela 5 exemplifica os dados estatísticos obtidos nas medições:

Tabela 4 - Resultado das dimensões efetuadas pela MMC, em destaque a média, desvio padrão da amostra e o Erro médio.

	100 mm	50 mm	21,5 mm	16 mm	8,5 mm
Medição	Dimensão [mm]	Dimensão [mm]	Dimensão [mm]	Dimensão [mm]	Dimensão [mm]
1	100,0082	50,0001	21,5024	16,0000	8,4942
2	100,0034	49,9993	21,4990	15,9975	8,4949
3	100,0036	49,9994	21,4987	15,9977	8,4946
4	100,0034	49,9993	21,4963	15,9976	8,4947
5	100,0036	49,9991	21,4984	15,9979	8,4946
6	100,0036	49,9990	21,4962	15,9978	8,4944
7	100,0031	49,9994	21,4982	15,9977	8,4945
8	100,0039	49,9988	21,4984	15,9977	8,4944
9	100,0034	49,9992	21,4985	15,9979	8,4947
10	100,0037	49,9992	21,4984	15,9976	8,4948
Média [mm]	100,0036	49,9993	21,4984	15,9977	8,4946
Erro Médio* [µm]	4,00	-0,72	-1,55	-2,06	-5,42
D. Padrão [µm]	1,49	0,34	1,69	0,74	0,21

*Também conhecido como Erro Sistemático, tendência ou Correção combinada alterando o sinal correspondente.

Fonte: Autor

Aqui se considerou as componentes que compõe as fontes de incertezas susceptíveis dentro da análise da medição, desta forma para o meio metodológico apenas os erros relativos a análise dimensional e a incerteza expandida da Máquina de medição por coordenada foram consideradas sendo estes fatores determinantes na qualidade do resultado. Como visto anteriormente a incerteza relacionada à temperatura não foi implementada no cálculos, mesmo sabendo do valor através se sensores localizados na Máquina, e o controle mínimo da temperatura no ambiente, para o caso em questão dificilmente ocorreria a estabilização da temperatura do bloco com a temperatura do meio, considerando-se que o condicionamento do mensurando dentro da caixa para o qual foi projetada diminui uma possível troca térmica e a passagem de ar para dentro evitando a oxidação. Vale salientar que o próprio sistema de controle e software incorporado a MMC faz a compensação matemática da temperatura tendo como base também de calculo o coeficiente de expansão térmica inserida pelo operador. Para o caso em questão não houve esse procedimento de compensação devido à metodologia, o objetivo principal do trabalho e a não especificação por parte do fabricante do coeficiente de expansão efetivo dos blocos, servindo até como sugestão para análises dimensionais futuras, contudo o que se viu na pratica foi uma tendência positiva nos resultados tanto dos erros como nas incertezas consideradas para um valor próximo ao especificado.

Continuando determina-se agora a incerteza padrão da média esta indica a dispersão dos resultados das medições em torno de um valor médio obtido para n medições repetidas, como temos um mensurando invariável neste caso o bloco padrão, podemos aplicar a formula:

$$U(\bar{q}) = \frac{s(q_k)}{\sqrt{n}} \quad (6.4)$$

Já o numero de graus de liberdade corresponde ao numero de medições efetuadas menos um. Alguns casos em especial o numero de graus de liberdade é considerado infinito dependendo do numero de repetições na medição e valor relativo ao desvio padrão. (ALBERTAZZI, 2008)

$$v = n - 1 \quad (6.5)$$

$v =$ Graus de liberdade com o que a incerteza padrão é determinada;

Aplicando para cada bloco o grau de liberdade 9 a incerteza para padrão média para repetitividade na medição tem os resultados iguais a:

$$U(\bar{q})_{Re,100} = \frac{1,49}{\sqrt{10}} = 0,4712 \mu m$$

$$U(\bar{q})_{Re,50} = \frac{0,34}{\sqrt{10}} = 0,1075 \mu m$$

$$U(\bar{q})_{Re,21,5} = \frac{1,69}{\sqrt{10}} = 0,5344 \mu m$$

$$U(\bar{q})_{Re,16} = \frac{0,74}{\sqrt{10}} = 0,2340 \mu m$$

$$U(\bar{q})_{Re,8,5} = \frac{0,21}{\sqrt{10}} = 0,0664 \mu m$$

A incerteza expandida da MMC é especificada através do método de desempenho normalizado, a maquina utilizada na analise dispõe de aferições periódicas do erro de acordo com o fabricante a fim de dar maior qualidade às medições executadas, A disposição de informações foram repassada e consistiram em:

Incerteza expandida da medição; $U_{MMC} = (0,6 + L/900) \mu m$.

Fator de Abrangência; $K = 2$.

Graus de Liberdade; $V_{MMC} = \infty$.

Substituindo os valores dos comprimentos temos:

Quadro 5 - Valores relativos à incerteza expandida da MMC.

	Bloco Padrão				
	100 mm	50 mm	21,5 mm	16 mm	8,5 mm
U_{MMC}	0,356	0,328	0,312	0,309	0,305

*Valores das incertezas em μm .

Fonte: Autor

A incerteza combinada é determinada a partir das incertezas padrões de cada fonte, a combinação entre elas depende ou não do tipo de correlação, podendo ser ligadas a efeitos aleatórios ou a variações que possuam certo sincronismo entre si. Para que seja determinada a incerteza combinada usa-se a equação: (ALBERTAZZI, 2008)

$$U_c^2 = U_1^2 + U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots + U_i^2 \quad (6.6)$$

U_c = Incerteza combinada;

U_i = incerteza da i – ésima fonte.

A incerteza combinada é calculada, a partir das incertezas-padrão de cada fonte de incerteza, como segue:

$$U_c = \sqrt{(U_1^2) + (U_{MMC}^2)} \quad (6.7)$$

Aplicando os valores obtidos a cada um das incertezas;

Quadro 6 - Valores relativos à incerteza combinada.

	Bloco Padrão				
	100 mm	50 mm	21,5 mm	16 mm	8,5 mm
U_{MMC}	0,356	0,328	0,312	0,309	0,305
U_c	0,591	0,345	0,619	0,387	0,312

*Valores das incertezas em μm .

Fonte: Autor

O Método ISO GUM Recomenda o cálculo do número de graus de liberdade Efetivo através da equação de Welch-Stterthwaite, O número de graus de liberdade é equivalente da incerteza combinada, neste caso temos:

$$V_{eff} = \frac{U_c^4}{\sum \frac{U^4(x_i)}{V_i}} = \frac{U_c^4}{\frac{U_{MMC}^4}{\infty} + \frac{U_1^4}{v}} \quad (6.8)$$

Em Geral o numero do V_{eff} não é inteiro, neste caso deve-se arredondar para o valor inteiro mais próximo;

Quadro 7 - Valores relativos ao grau de liberdade efetivo.

	Bloco Padrão				
	100 mm	50 mm	21,5 mm	16 mm	8,5 mm
U_{MMC}	0,356	0,328	0,312	0,309	0,305
U_c	0,5961	0,345	0,619	0,387	0,312
V_{eff}	23	928	16	69	4397

*Valores das incertezas em μm .

Fonte: Autor

Como observado Alguns valores dos graus de liberdade efetivos deram bem superiores quando comparado com a grandeza obtida na incerteza padrão media, para isso para a obtenção do fator de abrangência K_p precisa-se ajustar os dados obtidos com a tabela t-Student (tabela encontra-se em anexo ao trabalho) para uma confiabilidade de 95,45%. O que se vê na pratica é uma tendência a partir de um determinado numero de graus de liberdade valores próximos do coeficiente de Student $t = 2,00$, no caso em questão fixamos o valor acima ou próximo de 1000 para melhor arredondamento matemático, e para valores abaixo não coincidentes uma interpolação tendo em vista que a tabela apresenta apenas valores múltiplos de zero e cinco.

Quadro 8 - Valores relativos ao coeficiente t-Student.

	Bloco Padrão				
	100 mm	50 mm	21,5 mm	16 mm	8,5 mm
U_{MMC}	0,356	0,328	0,312	0,309	0,305
U_c	0,356	0,345	0,619	0,387	0,312
V_{eff}	23	928	16	69	4397
t^*	2,122	2,00	2,169	2,036	2,00

*Coeficiente de Student para 95,45% de probabilidade

Fonte: Autor

De posse dos valores do coeficiente de Student, a próxima etapa finalmente é o calculo da incerteza expandida, tal Incerteza determina dessa forma, uma quantidade similar á

repetitividade da ação combinada das várias fontes de incertezas. A incerteza expandida U é calculada multiplicando a incerteza combinada pelo respectivo coeficiente t-Student encontrado para cada bloco anteriormente, Logo:

$$U = t \cdot U_c \quad (6.9)$$

U = Incerteza expandida do processo de medição

U_c = Incerteza combinada

t = Coeficiente de Student correspondente ao numero de graus de liberdade efetivo e a 95,45% de probabilidade.

Fazendo uso dessas informações ate aqui calculada e de posse da equação acima tem-se:

Quadro 9 - Valores relativos à Incerteza expandida.

	Bloco Padrão				
	100 mm	50 mm	21,5 mm	16 mm	8,5 mm
U_{MMC}	0,356	0,328	0,312	0,309	0,305
U_c	0,591	0,345	0,619	0,387	0,312
V_{eff}	23	928	16	69	4397
t	2,133	2,00	2,169	2,036	2,00
U	1,3	0,7	1,3	0,8	0,6

*Valores das incertezas em μm .

Fonte: Autor

Deste modo calculamos a incerteza expandida pelo método de GUM (2008), e como vemos acima apenas uma casa decimal foi considerada haja vista que o sistema de medição conta com uma resolução de 0,1 μm desta forma temos uma concordância em ambos os resultados, também como metodologia se faz necessário o arredondamento do numero de casas decimais para o mesmo numero de casas decimais obtida na incerteza expandida. A representação do resultado da medição é expressa através da soma entre a media obtida na analise a tendência e a parcela da incerteza expandida, Desta forma Teremos para o resultado final da medição igual à equação abaixo:

$$RM = \bar{q} + C_c \pm U \quad (6.10)$$

RM = Resultado da Medição;

C_c = Correção combinada, Erro médio ou Erro Sistemático;

U = Incerteza Expandida.

Com tais parâmetros, sendo os blocos padrões um mensurando invariável, temos para o resultado da medição calculado como:

$$RM_{100} = 100,0036 + (-0,004) \pm (0,00122) \text{ mm}$$

$$RM_{50} = 49,9993 + (0,000072) \pm (0,00007) \text{ mm}$$

$$RM_{21,5} = 21,4984 + (0,00155) \pm (0,0013) \text{ mm}$$

$$RM_{16} = 15,9977 + (0,00206) \pm (0,0008) \text{ mm}$$

$$RM_{8,5} = 8,4946 + (0,00542) \pm (0,0006) \text{ mm}$$

Quadro 10 - Resultado final da medição.

Bloco Padrão					
	100 mm	50 mm	21,5 mm	16 mm	8,5 mm
RM	99,99961 ± 0,0012	49,9994 ± 0,0007	21,49995 ± 0,0013	15,9998 ± 0,0008	8,50002 ± 0,0006

Fonte: Autor

Planilha do balanço de incertezas da medição dos blocos padrões:

Processo de medição: Análise dimensional das faces de medição de Blocos Padrões						Unidade: μm
Fonte de incerteza:		Efeitos Sistemáticos	Efeitos Aleatórios			
Símbolo	Descrição	Correção	Distribuição	u	v	
$Re, 100$	Repetitividade natural do bloco de 100 mm	-	Normal	0,4712	9	
$Re, 50$	Repetitividade natural do bloco de 50 mm	-	Normal	0,1075	9	
$Re, 21,5$	Repetitividade natural do bloco de 21,5 mm	-	Normal	0,5344	9	
$Re, 16$	Repetitividade natural do bloco de 16 mm	-	Normal	0,2340	9	
$Re, 8,5$	Repetitividade natural do bloco de 8,5 mm	-	Normal	0,0664	9	
$U_{MMC,100}$	Incerteza Padrão da MMC para o bloco de 100mm	-	Normal	0,356	∞	
$U_{MMC,50}$	Incerteza Padrão da MMC para o bloco de 50mm	-	Normal	0,328	∞	
$U_{MMC,21,5}$	Incerteza Padrão da MMC para o bloco de 21,5mm	-	Normal	0,312	∞	
$U_{MMC,16}$	Incerteza Padrão da MMC para o bloco de 16mm	-	Normal	0,309	∞	
$U_{MMC,8,5}$	Incerteza Padrão da MMC para o bloco de 8,5mm	-	Normal	0,305	∞	
$U_{c,100}$	Incerteza Combinada do bloco de 100 mm	-	Normal	0,591	23	
$U_{c,50}$	Incerteza Combinada do bloco de 50 mm	-	Normal	0,345	928	
$U_{c,21,5}$	Incerteza Combinada do bloco de 21,5 mm	-	Normal	0,619	16	
$U_{c,16}$	Incerteza Combinada do bloco de 16 mm	-	Normal	0,387	69	
$U_{c,8,5}$	Incerteza Combinada do bloco de 8,5 mm	-	Normal	0,312	4397	
$C_{c,100}$	Correção Combinada do bloco de 100 mm	4,00	-	-	-	
$C_{c,50}$	Correção Combinada do bloco de 50 mm	-0,72	-	-	-	
$C_{c,21,5}$	Correção Combinada do bloco de 21,5 mm	-1,55	-	-	-	
$C_{c,16}$	Correção Combinada do bloco de 16 mm	-2,06	-	-	-	
$C_{c,8,5}$	Correção Combinada do bloco de 8,5 mm	-5,45	-	-	-	
U_{100}	Incerteza Expandida do bloco de 100 mm	-	Normal	1,3	-	
U_{50}	Incerteza Expandida do bloco de 50 mm	-	Normal	0,7	-	
$U_{21,5}$	Incerteza Expandida do bloco de 21,5 mm	-	Normal	1,3	-	
U_{16}	Incerteza Expandida do bloco de 16 mm	-	Normal	0,8	-	
$U_{8,5}$	Incerteza Expandida do bloco de 8,5 mm	-	Normal	0,6	-	

Comparando o resultado obtido na medição com o valor verdadeiro o que se vê é uma coerência quando comparado com o certificado de calibração apresentado pelo fabricante, em especial a tendência de aproximação dos resultados, como exemplo para o bloco de 16,5 que no certificado consta como valor Máximo permissível 16,0005 mm na calibração com a MMC tendeu para valor igual a 16,0006 mm cerca de $0,1\mu m$, aceitável no ponto de vista da norma ISO que determina que o comprimento Máximo não ultrapasse os $0,14\mu m$, da mesma forma para o bloco de 100 mm que a norma especifica um desvio Máximo de $\pm 0,3\mu m$ e na medição deu um desvio de $0,12\mu m$ mesmo não levando em consideração os fatores térmicos que podem facilmente ser mensurados em conjunto com o sistema computacional, a aproximação dos comprimentos geraram resultados consistentes e realistas. É importante destacar que as incertezas inseridas por este procedimento de medição não são totalmente de fato representativas em toda sua totalidade, pois desconsiderou a variabilidade inserida por fatores diferentes como o manuseio da peça no momento da fixação, a qualificação do dispositivo de fixação projetado e os desvios de forma proveniente do processo de produção o que neste caso não foram considerados. É bom entender também que a metodologia aplicada pelo GUM à medida que se insere dentro dos cálculos incertezas a confiabilidade cai, sendo que até o arredondamento das casas decimais quando não usados com prudência alteram o valor final.

8. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Muitas são as aplicações dos blocos padrões no âmbito industrial desde a descoberta e posterior aprimoramento tem sido um modelo para a materialização do comprimento e como referencia quanto na calibração de instrumentos de medição. Foi apresentada neste trabalho uma metodologia de calibração de blocos padrões em uma máquina de Medição por Coordenada incluindo o projeto de um dispositivo de fixação dos Blocos Padrões, análise de incertezas inseridas no processo incluindo os cálculos da medição que mostraram a competência desse método através dos resultados extremamente coerentes que convergiram para resultados de tolerâncias especificados. A apresentação dessa nova alternativa na calibração dos blocos padrões veio com a análise dos métodos tradicionais de calibração como por comparação mecânica e por interferometria, ambos os métodos consolidados, mas que apresentam certas limitações e incertezas atreladas à medição, também foi apresentado uma breve dissertação sobre o histórico dos blocos padrões, normalização no Brasil e algumas características metrológicas e propriedades mecânicas dos blocos.

Como Recomendação para futuros trabalhos é sugerido o aprimoramento do dispositivo para fixação de blocos de dimensões menores, a análise de incertezas no que diz respeito à temperatura do ambiente e o controle da mesma bem como suas influencias no tocante a o resultado da medição, por ultimo uma alternativa de medição sem o uso do cabeçote apalpador podendo ser através do Sensor de Câmera integrado a maquina ou outro dispositivo capaz de fazer a leitura dimensional do Bloco.

9. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERTAZZI, A. SOUSA: 2008. “*Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial*”. Editora Manole. 1ª Edição.

ANDRADE, J. S. “Desenvolvimento de uma Metodologia par determinação e análise da incerteza de uma maquina de medição por Coordenadas com Sensor de Câmera”, 2018. Tese de Doutorado, Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

ARENHART, F. A. “*Desempenho Metrológico de Máquina de Medição por Coordenada no Âmbito Industrial Brasileiro*”. 2007. 190 f. Trabalho submetido à ABCM para participação do Prêmio ABCM - Yehan Numata, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, João Pessoa, PB, Brasil.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT 65 anos. 1 ed. Rio de Janeiro, Outubro, 2006.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 215: Blocos Padrões: Referências. Rio de Janeiro, 2000.

BEERS, J. S.; TAYLOR J.E. “*Contact deformation in Gauge Block Comparisons*,” NBS Technical Note 962, 1978.

BEERS, J. S.; TUCKER C. D. “*Gage Block Flatness and Parallelism Measurement*” NBS Technical Note 236, 1973.

DOIRON, T.; BEERS, J.S.; 1995, NIST MONOGRAPH 180 – “*The Gage Block Handbook*”, NIST, Washington, USA,

DOTSON, Connie L. “*Fundamentals of Dimensional Metrology*”. 6. ed. Boston: Cengage learning, 2016.

DIN 861-1: 1980; Gauge Blocks; Term and Definition, Technical Requirements measurement, German Institute for Standardization, Berlim, Germany, 17pp

FARAGO, F.T.; CURTIS, M. A., “*Handbook of Dimensional Measurement*”, 3 ed, New York, Industrial Press Inc., 1994.

GGG-G-15c: 1976; Gage Blocks and Accessories, US Government, August 1976, Washington, USA, 29pp.

HOCKEN, R. J.; PEREIRA. P. H., 2012, “*Coordinate Measuring Machines and Systems*”, CRC Press, 2 ed, Flórida, EUA.

ISO 10360-1:2000, Geometrical Product Specifications (GPS) — Acceptance and revivification tests for coordinate measuring machines (CMM), Part 1, Geneva, Switzerland.

ISO 3650:1998, ISO Geometrical Product Specifications (GPS) — Length standards — Gauge blocks, Geneva, Switzerland.

JIS B 7506: 1997; Gauge Blocks, JIS – Japanese Industrial Standard, Tokyo, Japan, 26pp.

LIMA JÚNIOR. J. C.; 2003, “*Determinação da Planeza das mesas Metrológicas das Máquinas de Medição por Coordenadas*”. Dissertação de mestrado. Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

LIMA JÚNIOR. J. C.; 2007, “*Aplicação de Redes neurais Artificiais para Determinar parâmetros de geometrias Substitutas em MMC*”. Tese de Doutorado. Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

MEYERSON, M. R.; YOUNG T. H., “*Gage Blocks of Superior Stability: Initial Developments in Materials and Measurement,*” JOURNAL OF RESEARCH of the National Bureau of Standards - Vol. 64C, No.3, September 1960.

MITUTOYO CORPORATION. “*The History of Gauge Block*”. 1 ed. Japan, January, 2013.

MITUTOYO. Manual: CRYSTA-Apex S Séries. Disponível em: https://www.mitutoyo.com/wp-content/uploads/2013/01/2097_CRYSTA_ApexS.pdf. Acesso 19 de Fevereiro de 2018.

NOBREGA, L. H. “*Desenvolvimento de uma estratégia de medição, baseada em NURBS, para determinação do desvio total de perfil F_α de engrenagens cilíndricas de dentes retos usando a MMCs*”, 2016. 63 f. Tese de Doutorado, Programa de Pós graduação em Engenharia Mecânica (PPGEM), UFPB, João Pessoa, PB, Brasil.

NBR 215, 2000, Blocos Padrões, ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas, Rio de Janeiro, Brasil, 13pp.

ORREGO, R. M. M. GIACOMO, B. ABACKERLI, A. J. “*Fontes de Erros em Metrologia a Três Coordenadas: Considerações Gerais*”. Revista de Ciência e Tecnologia, Vol. 8, No 16, pp 43-56, 2000.

PETERS C. G.; BOYD H. S. B., “*Methods for Standardizing and Testing Precision Gage Blocks*”, Sci. Pap. Bur. Stand. 17, 677-713 (1922).

WEBBER GAGE DIVISION (The L.S.Starrett Co.); 2000, “*Precision Gage Blocks, Standard Reference Bars*” 159A, 45pp, Cleveland - OH - USA, Jun.

ANEXOS

CERTIFICAT OF INSPECTION
GAGE BLOCKS

TYPE - Rect
STANDARD - ISO 3650

DATE - 27-03-2010
GRADE - 0

MATERIAL - Steel
SET NO - 112 PÇS

	Tolerância (μm)	Tamanho Nominal (mm)	Tolerância (μm)	Tamanho Nominal (mm)	Tolerância (μm)
1,0005	+0,05	1,290	+0,07	9,0	+0,05
1,001	+0,02	1,300	0,00	9,5	0,00
1,002	+0,05	1,310	+0,04	10,0	+0,05
1,003	+0,04	1,320	+0,03	10,5	+0,02
1,004	+0,01	1,330	+0,03	11,0	+0,03
1,005	+0,03	1,340	+0,02	11,5	0,00
1,006	+0,06	1,350	+0,04	12,0	+0,05
1,007	+0,00	1,360	-0,02	12,5	0,00
1,008	+0,05	1,370	+0,02	13,0	+0,05
1,009	0,00	1,380	0,00	13,5	+0,04
1,010	0,00	1,390	0,00	14,0	0,00
1,020	0,00	1,400	+0,05	14,5	+0,02
1,030	0,00	1,410	+0,04	15,0	+0,05
1,040	+0,03	1,420	+0,06	15,5	-0,03
1,050	+0,02	1,430	+0,04	16,0	+0,05
1,060	+0,04	1,440	+0,01	16,5	+0,03
1,070	+0,03	1,450	+0,01	17,0	+0,03
1,080	+0,01	1,460	0,00	17,5	-0,02
1,090	+0,05	1,470	+0,04	18,0	+0,03
1,100	+0,00	1,480	+0,05	18,5	+0,05
1,110	-0,03	1,490	+0,05	19,0	0,00
1,120	+0,04	0,500	-0,03	19,5	0,00
1,130	0,00	1,000	0,00	20,0	-0,04
1,140	0,00	1,500	+0,02	20,5	+0,05
1,150	+0,02	2,000	+0,02	21,0	+0,05
1,160	0,00	2,500	+0,06	21,5	0,00
1,170	+0,06	3,000	-0,02	22,0	0,00
1,180	+0,02	3,500	+0,03	22,5	+0,06
1,190	+0,05	4,000	+0,03	23,0	0,00
1,200	+0,02	4,500	0,00	23,5	0,00
1,210	+0,05	5,000	+0,01	24,0	0,00
1,220	0,00	5,500	+0,03	24,5	+0,03
1,230	0,00	6,000	-0,03	25,0	+0,06
1,240	0,00	6,500	0,00	50,0	+0,08
1,250	+0,07	7,000	0,00	75,0	+0,05
1,260	+0,05	7,500	0,00	100,0	-0,10
1,270	0,00	8,000	+0,05		
1,280	-0,05	8,500	0,00		

