

GUILHERME BERNARDES RODRIGUES

**CONTROLE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO DE CORPOS DE
PROVA UTILIZADOS EM REPARO POR ATRITO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2017

GUILHERME BERNARDES RODRIGUES

**CONTROLE DIMENSIONAL E GEOMÉTRICO DE CORPOS DE PROVA
UTILIZADOS EM REPARO POR ATRITO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado à Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **bacharel em engenharia mecânica**.

Área de concentração: Metrologia Dimensional.

Orientadora: Profa. Dra. Rosenda Valdés Arencibia.

UBERLÂNDIA - MG

2017

AGRADECIMENTOS

À professora Rosenda Valdés Arencibia por ter me orientado de forma segura, responsável e cuidadosa, apoiando e dando todo o suporte necessário para a realização deste trabalho de conclusão de curso e contribuindo para meu enriquecimento científico e pessoal.

Ao engenheiro Raphael Rezende Pires pelo auxílio e apoio.

Ao doutorando José Eduardo Silveira Leal por todo o apoio técnico.

A toda a equipe de alunos e técnicos que contribuem para o funcionamento do Laboratório de Ensino em Metrologia.

Aos meus amigos, em especial, Fernanda Ferreira Rossi, Mariana Leal Cunha e Daniel Braga de Oliveira por estarem presentes nos momentos mais difíceis de toda a minha trajetória e me fazerem acreditar em mim mesmo. Além de outros tão importantes como Lurian Vieira Sousa, João Pedro Bernardes Amaral, Valdeir Antônio Ribeiro Junior, Nanci Aparecida Fujimori e Vítor Silva Medeiros por sincera amizade.

Em especial aos meus pais, irmão e familiares, que confiaram em mim e me deram todo o suporte emocional para traçar esse caminho.

RODRIGUES, G. B., Controle dimensional e geométrico de corpos de prova utilizados em reparo por atrito. 2017. 125 p. Trabalho de conclusão de curso de graduação em engenharia mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG.

Resumo

Este trabalho objetivou definir procedimentos de medição para efetuar o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova utilizados no reparo por atrito e verificar, se os mesmos, se encontraram dentro das tolerâncias indicadas em projeto. Para alcançar o objetivo proposto foram identificados os corpos de prova (pinos e blocos). Em seguida foi efetuado um estudo minucioso dos desenhos técnicos visando a identificação dos mensurandos de interesse e dos sistemas de medição a serem utilizados em cada caso. Posteriormente, foi efetuado o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova, bem como o cálculo da incerteza de medição. Por fim, foram elaborados os procedimentos de medição de todos os mensurandos de cada um dos corpos de prova. Ao finalizar o trabalho foi possível concluir que: dos oito mensurandos avaliados, quatro não atenderam a tolerância de projeto (mensurandos 1, 2, 10 e 11); os desvios observados entre os valores medidos e as tolerâncias de projeto foram significativos; e a repetibilidade dos resultados de medição foi adequada, assumindo na pior condição $\pm 0,012$ mm para uma confiabilidade de 95,45 % (mensurandos 7, 10 e 11).

Palavras-chave: *Tolerâncias, máquina de medir por coordenadas, projetor de perfil, incerteza.*

RODRIGUES, G. B., Dimensional and geometric control of test bodies used in repair by friction. 2017. 125 p. Undergraduate thesis in mechanical engineering, Federal University of Uberlandia, Uberlândia-MG.

Abstract

This work aimed to define the measurement procedures to perform the dimensional and geometric control of the test bodies used in the repair by friction and verify if they meet the tolerances indicated in the project. To reach the proposed objective, the test bodies (pins and blocks) were identified. In order to identify all measurands and the most adequate measurement system in each case, a wide study of the technical drawings was carried out. Subsequently, the dimensional and geometric control of the test bodies was carried out, as well as the measurement uncertainty evaluation. Finally, the measuring procedures for all the measurands were elaborated. It was possible to conclude that: four measurands did not meet the project tolerance (measurands 1, 2, 10 and 11); the observed deviations between the measured values and project tolerances were significant; and the repeatability of the measurement results was adequate, assuming in the worst condition ± 0.012 mm for a reliability of 95.45 % (measurands 7, 10 and 11).

Keywords: *Tolerances, coordinate measuring machine, profile projector, uncertainty.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1:	Cadeia de rastreabilidade de um paquímetro usado em um laboratório de metrologia	8
Figura 2.2:	Diagrama de causa e efeito para uma máquina de medir por coordenadas (WECKENMANN; KNAUER; KILLMAIER, 2001)	11
Figura 2.3:	Distribuição retangular (BIPM et al., 2008)	14
Figura 2.4:	Distribuição triangular (BIPM et al., 2008)	15
Figura 2.5:	Dimensão nominal e dimensões máxima e mínima (ABNT, 1995)	19
Figura 2.6:	Representação esquemática das posições dos afastamentos (ABNT, 1995)	20
Figura 2.7:	Representação geral de um campo de tolerância (ABNT, 1995)	21
Figura 2.8:	(a) Desvio de paralelismo entre dois planos; (b) Interpretação do desvio de paralelismo (ABNT, 1997)	22
Figura 2.9:	(a) Tolerância de simetria; (b) Interpretação do desvio de simetria (Modificada de ABNT, 1997)	23
Figura 2.10:	Esquema processo de soldagem por atrito convencional. (a) Rotação de uma das peças; (b) Aplicação de força axial; (c) Início da soldagem; (d) Fim do processo (AWS, 1991)	24
Figura 2.11:	Divisão das fases durante processo de reparo por atrito (MEYER, 2004)	26
Figura 2.12:	Etapas do processo FTPW (RODRIGUES, 2016)	28
Figura 3.1:	Vista superior da peça 1 (Bloco metal base – junta de 16 mm), dimensões em milímetros (FRANCO, 2017)	30
Figura 3.2:	Vista A-A da peça 1 (Bloco metal base – junta de 16 mm), dimensões em milímetros (FRANCO, 2017)	30
Figura 3.3:	Vista superior da peça 2 (Bloco metal base tubo junta soldada), dimensões em milímetros (FRANCO, 2017)	31

Figura 3.4:	Vista A-A da peça 2 (Bloco metal base tubo junta soldada), dimensões em milímetros (FRANCO, 2017)	31
Figura 3.5:	Vista frontal peça 3 (Pino de soldagem), dimensões em milímetros (FRANCO, 2017)	32
Figura 3.6:	Vista superior da peça 3 (Pino de soldagem), dimensões em milímetros (FRANCO, 2017)	32
Figura 3.7:	Origem do sistema de coordenadas da peça 1	35
Figura 3.8:	Origem do sistema de coordenadas da peça 2	35
Figura 3.9:	Origem do sistema de coordenadas da peça 3	36
Figura 3.10:	Distribuição de 21 pontos em um plano e 15 pontos em um círculo....	37
Figura 3.11:	Distribuição de 15 pontos em um cone	37
Figura 3.12:	Corpo de prova 3 posicionado no projetor de perfil e mensurandos a serem medidos	38
Figura 4.1:	Indicação dos mensurandos no desenho técnico do corpo de prova 1	44
Figura 4.2:	Indicação dos mensurandos no desenho técnico do corpo de prova 2	44
Figura 4.3:	Indicação dos mensurandos no desenho técnico do corpo de prova 3	45

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1:	Grupos de dimensões (ABNT, 1995)	19
Tabela 2.2:	Qualidades de trabalho de IT1 a IT18 (ABNT, 1995)	20
Tabela 2.3:	Vantagens e limitações do processo de soldagem por atrito	27
Tabela 3.1:	Estratégias de medição	37
Tabela 3.2:	Informações para cálculo da incerteza padrão combinada em medições lineares com MMC	40
Tabela 3.3:	Informações para cálculo da incerteza padrão combinada em medições angulares com MMC	41
Tabela 3.4:	Informações para cálculo da incerteza padrão combinada em medições lineares com projetor de perfil	42
Tabela 4.1:	Dimensões e tolerâncias do corpo de prova 1	43
Tabela 4.2:	Dimensões e tolerâncias do corpo de prova 2	44
Tabela 4.3:	Dimensões e tolerâncias do corpo de prova 3	45
Tabela 4.4:	Resolução do sistema de medição exigida	46
Tabela 4.5:	Valores obtidos para todos os mensurandos “diâmetro”	47
Tabela 4.6:	Valores obtidos para todos os mensurandos “profundidade”	47
Tabela 4.7:	Valores obtidos para todos os mensurandos “distância”	48
Tabela 4.8:	Valores obtidos para todos os mensurandos “ângulos”	49
Tabela 4.9:	Valores obtidos para o mensurando “paralelismo”	49
Tabela 4.10:	Comparação dos valores medidos e os valores teóricos	50
Tabela 4.11:	Leituras no projetor de perfil para mensurando 11	51
Tabela 4.12:	Resultados obtidos para mensurando 11	51

LISTA DE ABREVIATURAS

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas
AWS: American Welding Society
BIPM: Bureau International des Poids et Mesures
FHPP: Friction Hydro Pillar Processing
FPPW: Friction Pull Plug Welding
FTPW: Friction Tapered Plug Welding
FTSW: Friction Tapered Stitch Welding
GUM: Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
HRC: Hardness Rockwell C
IEC: International Electrotechnical Commission
INMETRO: Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO: International Organization for Standardization
IT: ISO Tolerance
JCGM: Joint Committee for Guides in Metrology
LTAD: Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste
LEMETRO: Laboratório de Ensino em Metrologia
MMC: Máquina de Medir por Coordenadas
NBR: Norma Brasileira Regulamentadora
RM: Resultado de Medição
SI: Sistema Internacional de Unidades
UNS: Unified Numbering System
VIM: Vocabulário Internacional de Metrologia

LISTA DE SÍMBOLOS

a_+	- Limite superior de uma distribuição
a_-	- Limite inferior de uma distribuição
C	- Mensurando comprimento linear medido na MMC
D	- Desvio de simetria
D_n	- Desvio de simetria n calculado
e_i	- Afastamento inferior em eixos
E_i	- Afastamento inferior em furos
e_s	- Afastamento superior em eixos
E_s	- Afastamento superior em furos
f	- Relação funcional que modela a medição de um mensurando
k	- Fator de abrangência
L_0	- Valor do mensurando
L_n	- Leitura n no sistema de medição
L_{dir}	- Leitura da face direita do corpo de prova 3
L_{esq}	- Leitura da face esquerda do corpo de prova 3
n	- Número de elementos da amostra
$r(x_i, x_j)$	- Coeficiente de correlação entre duas variáveis de entrada x_i e x_j
R_{SM}	- Resolução do sistema de medição
s	- Desvio-padrão experimental
s^2	- Variância experimental
$s(L)$	- Valor médio dos valores lineares indicados pelo sistema de medição
$s(\alpha)$	- Valor médio dos ângulos indicados pela MMC
t	- Valor da tolerância
Tol	- Tolerância de projeto
U	- Incerteza expandida

X_i	- Variáveis de entrada
$\bar{x}$	- Valor médio aritmético experimental
α	- Ângulo teórico de projeto
α_{MMC}	- Coeficiente de expansão térmica linear das escalas da MMC
α_{Pe}	- Coeficiente de expansão térmica linear do material da peça
β	- Valor entre 0 e 1 que determina o quanto a distribuição é trapezoidal.
ΔA_I	- Correção devido ao aumento da lente do projetor de perfil
ΔE_A	- Correção associada ao erro de apalpamento da MMC
ΔI	- Correção devido à incerteza da calibração do sistema de medição
ΔR	- Correção devido à resolução do sistema de medição
ΔT	- Afastamento da temperatura ambiente com relação à 20°C
δT	- Variação de temperatura durante as medições
Φt	- Valor da tolerância no diâmetro
$\mu(x_i)$	- Incerteza-padrão associada a variável x_i
$u_{GRANDEZA}$	- Incerteza-padrão associada a grandeza em questão
$u_c(y)$	- Incerteza-padrão combinada do mensurando y
$u_c^2(y)$	- Variância combinada do mensurando y
ν	- Número de graus de liberdade
$\nu_{efetivo}$	- Número de graus de liberdade efetivo

SUMÁRIO

Capítulo 1 -	Introdução	1
1.1 -	Objetivo principal	2
1.2 -	Objetivos secundários	2
1.3 -	Justificativa	3
Capítulo 2 -	Revisão Bibliográfica	5
2.1 -	Requisitos técnicos para competência de laboratórios de ensaio e calibração (Norma Brasileira ABNT NBR ISO/IEC 17025)	5
2.1.1 -	Fatores humanos	6
2.1.2 -	Acomodações e condições ambientais	6
2.1.3 -	Métodos de ensaio e calibração e validação de métodos	7
2.1.4 -	Equipamentos	7
2.1.5 -	Rastreabilidade de medição	8
2.1.6 -	Amostragem	9
2.1.7 -	Manuseio de itens de ensaio e calibração	9
2.1.8 -	Garantia da qualidade e apresentação de resultados	9
2.2 -	Incerteza de medição	10
2.2.1 -	Incerteza-padrão	11
2.2.1.1 -	Avaliação da incerteza-padrão do Tipo A	12
2.2.1.2 -	Avaliação da incerteza-padrão do Tipo B	13
2.2.2 -	Incerteza-padrão combinada	15
2.2.3 -	Incerteza expandida	16
2.3 -	Controle dimensional e geométrico de peças	17
2.3.1 -	Tolerância dimensional	18
2.3.2 -	Tolerância geométrica	21
2.3.2.1 -	Desvios de orientação: Paralelismo	22
2.3.2.2 -	Desvios de posição: Simetria	22
2.4 -	Reparo por atrito	23
2.4.1 -	Soldagem por atrito	23

2.4.2 -	Geração de calor e parâmetros do processo	24
2.4.3 -	Fases do processo	25
2.4.4 -	Vantagens e limitações do processo	27
2.4.5 -	Tipos de soldagem por atrito com pinos consumíveis	27
Capítulo 3 -	Metodologia	29
3.1 -	Identificação dos pinos e blocos usados no reparo por atrito	29
3.2 -	Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova	33
3.2.1 -	Identificação das dimensões, tolerâncias dimensionais e tolerâncias geométricas	33
3.2.2 -	Identificação e descrição do sistema de medição	33
3.2.3 -	Definição dos procedimentos de medição na MMC	34
3.2.4 -	Definição dos procedimentos de medição no projetor de perfil	38
3.3 -	Avaliação da incerteza de medição	39
3.3.1 -	Avaliação da incerteza dos mensurandos medidos na MMC	39
3.3.2 -	Avaliação da incerteza dos mensurandos medidos no projetor de perfil.....	41
Capítulo 4 -	Resultados e discussão	43
4.1 -	Resultados do controle dimensional e geométrico dos corpos de prova	43
4.1.1 -	Identificação das dimensões, tolerâncias dimensionais e tolerâncias geométricas	43
4.1.2 -	Resultado das medições com a MMC	46
4.1.3 -	Comparação entre os valores medidos e os de projeto	50
4.1.4 -	Resultado das medições com o projetor de perfil	50
4.2 -	Discussão dos resultados	52
Capítulo 5 -	Conclusão	53
Capítulo 6 -	Trabalhos futuros	54
Capítulo 7 -	Referências bibliográficas	55
Apêndice A1 -	Procedimentos de medição para o corpo de prova 1	58
Apêndice A2 -	Procedimentos de medição para o corpo de prova 2	66
Apêndice A3 -	Procedimentos de medição para o corpo de prova 3	74
Apêndice B -	Procedimentos de determinação da incerteza de medição	84
Anexo A -	Desenhos técnicos dos corpos de prova	96
Anexo B -	Certificado de calibração da MMC	100
Anexo C -	Certificado de calibração do projetor de perfil	105
Anexo D -	Certificado de calibração do termo-higrômetro	110

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O desenvolvimento científico e tecnológico propiciou aos engenheiros uma maior variabilidade de materiais a serem utilizados para uma determinada aplicação. Consequentemente, as técnicas de processamento dos materiais têm sido aprimoradas. Por meio desse crescimento tecnológico, surgiram diversos procedimentos que são aplicados em diferentes setores industriais. Neste contexto, destaca-se o estudo da viabilização da técnica do reparo por atrito para correção de falhas em equipamentos e máquinas usadas em vários setores, dentre eles as tubulações e reservatórios usados pela indústria petrolífera (FRANCO, 2017).

Estas tubulações, normalmente, são submetidas a ambientes muito hostis. Em decorrência disso, essas estruturas podem apresentar falhas frequentemente. As falhas observadas são em sua maioria oriundas de processos de fadiga, de desgaste e do aparecimento de trincas. É importante destacar que a ocorrência de falhas frequentes implica em altos custos de manutenção, que associados ao tempo de parada necessário para a realização da mesma, podem causar perdas significativas de produção. Essas perdas podem alcançar a ordem de milhões de dólares por dia, se tratando da indústria do petróleo (BLAKEMORE, 1993).

De acordo com Meyer (2004), há décadas o principal método utilizado no reparo de estruturas, como essas tubulações, é a soldagem a arco voltaico. Essa técnica exige a parada da produção, pois durante sua aplicação há um risco enorme de incêndio se for aplicada em ambientes com elementos inflamáveis. Portanto, passou-se a estudar a viabilidade das técnicas de soldagem por atrito como métodos alternativos no reparo das tubulações anteriormente citadas, com o objetivo principal de fomentar métodos que pudessem ser utilizados em condições diferentes da técnica

convencional, propiciando uma maior variabilidade de possibilidades ao se reparar o desgaste nessas tubulações.

Para esta finalidade, geralmente, são utilizados pinos consumíveis que são submetidos a uma determinada velocidade de rotação e são comprimidos contra os furos (previamente abertos com uma geometria característica), preenchendo-os e cobrindo o desgaste ali presente (AWS, 1991).

Durante o estudo da viabilização do reparo por atrito, foram fabricados dois blocos e um pino (FRANCO, 2017), denominados de corpos de prova. Para que o reparo por atrito seja materializado esses corpos de prova devem ser projetados de forma adequada. Para tanto, tolerâncias dimensionais e geométricas foram indicadas em seus desenhos técnicos. Entretanto, após a fabricação dos corpos de prova se faz necessário efetuar o controle dimensional e geométrico visando identificar se os corpos de prova atendem às especificações de projeto.

1.1 Objetivo Principal

Este trabalho objetivou definir e elaborar procedimentos de medição para efetuar o controle dimensional e geométrico dos corpos de prova utilizados no reparo por atrito, no caso, o bloco metal base – junta de 15 mm, o bloco metal base tubo junta soldada e o pino de soldagem.

1.2 Objetivos secundários

- Elaborar estratégias de medição adequadas a cada mensurando dos corpos de prova avaliados;
- Elaborar procedimentos para cálculo da incerteza de medição associada as mensurandos avaliados;
- Diminuir os erros de medição.

1.3 Justificativa

Os corpos de prova utilizados no reparo por atrito são complexos geometricamente. Eles apresentam superfícies cônicas, rasgos e raios de curvatura que exigem o uso de sistemas de medição complexos e de difícil operação como as Máquinas de Medir por Coordenadas (MMC). Apesar das conhecidas vantagens destas máquinas diversos fatores podem afetar seu desempenho.

Phillips (2011) agrupa os fatores de influência que levam à incerteza de medição com MMC em cinco categorias principais: *hardware*, peça, estratégia de medição, seleção e implementação do algoritmo. De acordo com May (2007), estratégias de amostragem inadequadas podem resultar em erros significativos durante a medição dos desvios de forma macrogeométricos da peça. Uma vez que a maioria das estratégias de medição emprega um número relativamente pequeno de pontos para determinar a geometria substituta, deve-se considerar que este resultado é baseado em informações incompletas da geometria real da peça (PHILLIPS, 2011).

De acordo com Hocken, Raja e Uppliappan (1993), na maioria das vezes os erros causados pelo número inadequado de pontos apalpados são menores quando se utilizam 50 ou mais pontos para definir a geometria substituta. No entanto, no cenário atual do processo de inspeção e fabricação, é necessário que as peças sejam medidas o mais rápido possível. Assim, surge a necessidade de otimizar a estratégia de medição, com a finalidade de minimizar os erros a ela associados e o volume de dados a serem coletados e analisados, bem como o tempo e os custos envolvidos. Portanto, antes de realizar qualquer medição é necessário definir a estratégia de medição a ser utilizada que resultará em um processo eficaz. A elaboração e documentação dos procedimentos de medição contribuirá para a redução dos erros de medição.

Para melhor compreensão do processo de estudo e pesquisa, este trabalho está organizado da seguinte forma:

No Capítulo II, é apresentada uma revisão bibliográfica sobre o assunto dando ênfase nos requisitos técnicos necessários para competência de laboratórios em ensaio e calibração, incerteza de medição, controle dimensional e geométrico de peças e finalmente o reparo por atrito.

No Capítulo III, é apresentada a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho seguindo as etapas de identificação dos pinos e blocos usados no reparo

por atrito, controle dimensional e geométrico dos corpos de prova, definição dos procedimentos de medição e tratamento estatístico dos resultados das medições.

No Capítulo IV, apresentam-se os resultados obtidos acompanhados das respectivas discussões.

No Capítulo V, se encontram as principais conclusões do trabalho e as propostas para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo apresenta a revisão bibliográfica dos tópicos necessários para desenvolvimento do trabalho, são eles: requisitos técnicos para competência de laboratórios em ensaio e calibração (ABNT NBR ISO/IEC 17025), incerteza de medição, controle dimensional e geométrico de peças e reparo por atrito.

2.1 Requisitos técnicos para competência de laboratórios e ensaio e calibração (Norma Brasileira ABNT NBR ISO/IEC 17025)

A norma ABNT NBR ISO/IEC 17025 (ABNT, 2005) tem como principal objetivo especificar os requisitos gerais para garantir a obtenção de resultados válidos durante a realização de ensaios e/ou calibrações. Esta norma se aplica a todas e quaisquer organizações que realizem tais atividades como laboratórios de metrologia. Ao seguir essa norma o laboratório atende as especificações necessárias para ser capaz de produzir resultados tecnicamente válidos, além de ter um sistema de gestão implementado. Ainda, essa norma facilita e padroniza a troca de conhecimento entre laboratórios e até mesmo entre países.

Esta norma traz os requisitos técnicos que devem ser atendidos para garantir a confiabilidade dos resultados de ensaios e/ou calibrações. Obviamente, vale ressaltar que a forma e a extensão com que cada um desses fatores interfere na incerteza total

de medição, varia de acordo com o tipo de ensaio ou de calibração realizado. Estes requisitos técnicos estão dispostos a seguir.

2.1.1 Fatores humanos

O laboratório é responsável por assegurar a competência de todo o pessoal que opera qualquer equipamento sob sua jurisdição, realiza ensaio e/ou calibração, assina um relatório de ensaio e certificados de calibração e que avaliam resultados de trabalhos desenvolvidos. Cabe também ao laboratório definir e supervisionar uma capacitação específica para o pessoal que irá realizar qualquer atividade. Além disso, deve ser verificado se as pessoas que realizam tarefas específicas têm formação, capacitação e experiência para realizar tais atividades, bem como se necessário requisitar certificados para ensaios que exijam mais técnica específica como ensaios não-destrutivos.

Ao pessoal que é responsável por emitir e elaborar relatórios de ensaio e/ou certificados de calibração deve-se cobrar conhecimento da tecnologia utilizada em todo o processo, de materiais, das amostras ensaiadas, dos métodos utilizados, bem como conhecimento da legislação e normas que regem tais procedimentos.

Vale ressaltar que todo o controle de pessoal e sua qualificação, assim como as capacitações aplicadas são competências da direção do laboratório.

2.1.2 Acomodações e condições ambientais

As condições ambientais no interior do laboratório, bem como a acomodação, fontes de energia, de luz e vibração mecânica, por exemplo, devem ser devidamente tratadas e controladas de forma a propiciar ensaios e/ou calibrações corretas e válidas, evitando qualquer interferência nas medições realizadas. Esse controle envolve o monitoramento contínuo das condições ambientais e o registro dos resultados.

Os principais parâmetros que devem ser verificados são:

- Temperatura;
- Nível sonoro e vibratório;
- Poeira e esterilidade biológica;
- Distúrbios e fontes eletromagnéticas;
- Radiação;

- Umidade;
- Eletricidade.

Ao notar-se qualquer anormalidade ou condição inapropriada os ensaios e/ou calibrações devem ser interrompidos.

2.1.3 Métodos de ensaio e calibração e validação de métodos

O laboratório deve sempre adotar métodos e procedimentos corretos e apropriados para seus ensaios e/ou calibrações, definindo de forma adequada a maneira como se armazenam os itens de ensaio e calibração, a fabricação e preparação das amostras e o manuseio dos equipamentos. Ainda o laboratório deve especificar métodos de uso do ferramental, além de definir os passos e procedimentos das medições a serem realizadas, incluindo do cálculo das incertezas associadas às mesmas.

Cabe ao laboratório também selecionar o método a ser utilizado. Existem métodos normalizados, entretanto se for o caso, podem-se utilizar de métodos não-normalizados ou até mesmo algum que tenha sido desenvolvido pelo próprio laboratório. Essa seleção de métodos pode ser especificada pelo cliente, obviamente, apenas em casos onde não haja essa especificação que o laboratório pode selecionar o método.

Vale ressaltar que ao usar-se de um método não-normalizado, deve-se definir uma série de informações, como por exemplo: identificação adequada dos procedimentos a serem realizados, incerteza de medição do método, condições ambientais requeridas, descrições dos itens ensaiados, definição dos parâmetros de referência, dentre vários outros, e ser validado.

2.1.4 Equipamentos

Os equipamentos do laboratório devem ser todos registrados, bem como os seus *softwares*. Além disso, ao se escolher um método de ensaio deve verificar se o laboratório possui todos os dispositivos necessários.

Para atender as especificações e exatidões requeridas pelo ensaio e o cliente, os equipamentos devem sempre estar calibrados e passar por calibrações em determinados períodos de tempo.

A utilização dos equipamentos deve ser autorizada apenas ao pessoal competente para tal, e se necessário dispor sempre de manuais ou instruções de uso

dos mesmos. Caso se verifiquem resultados não-conformes ou defeitos em algum equipamento, ele deve ser retirado de uso até que se realize o conserto e uma nova calibração.

2.1.5 Rastreabilidade de medição

Na realização de ensaios, o laboratório deve atender aos mesmos requisitos ao realizar uma calibração, no que se refere a rastreabilidade ao SI. A não ser que se verifique que não ocorra uma influência das incertezas da calibração na incerteza total das medições. Esses requisitos básicos definem que essa rastreabilidade é realizada por meio de uma cadeia ininterrupta de calibrações e comparações, ligando sempre os instrumentos e padrões de medição do laboratório a padrões primários das unidades de medida do SI (Fig. 2.1). Essa ligação ocorre ao realizar uma comparação a padrões nacionais primários, isto é, realizações primárias das unidades SI ou representações acordadas em constantes físicas fundamentais, ou podem ser secundários, quando esses padrões são obtidos por uma outra instituição nacional de metrologia.

Quando a rastreabilidade ao SI não for possível, deve-se usar de padrões de referência e/ou materiais de referência. Portanto, o laboratório deve possuir um programa de calibração desses padrões/materiais, além de garantir um correto transporte, manuseio e armazenamento dos mesmos.



Figura 2.1 - Cadeia de rastreabilidade de um paquímetro.

Na Figura 2.1, a cadeia de rastreabilidade do paquímetro passa pela calibração feita por blocos-padrão de comprimentos de um laboratório. Sendo que estes passam por uma calibração rastreável feita por um interferômetro laser, o qual é rastreável a um sistema que calibra seu comprimento de onda de acordo com um sistema padrão laser de uma instituição creditada. Este último, por sua vez, deve ser rastreável ao padrão internacional de comprimentos, o metro.

2.1.6 Amostragem

O laboratório deve definir o seu plano e procedimentos de amostragem, quando for utilizar de amostras para realização de ensaios e/ou calibrações. Esses planos de amostragem devem ser baseados em métodos estatísticos verificados e abranger todos os fatores a serem levados em conta, como condições ambientais requeridas, preparação da amostra, seleção do produto, retirada da amostra, dentre outros. Ao realizar um bom plano de amostragem, assegura-se a validade dos resultados dos ensaios/calibrações.

2.1.7 Manuseio de itens de ensaio e calibração

Devem existir procedimentos para manuseio, transporte, remoção e armazenamento de itens de ensaio e/ou calibração, os quais devem ser claramente identificados e padronizados. Além disso, o laboratório deve possuir instalações que evitem a deterioração dos itens, e quando se fizer necessário, mantê-los em condições ambientais específicas e em segurança.

2.1.8 Garantia da qualidade e apresentação de resultados

O laboratório deve possuir procedimentos e planos para garantir a qualidade dos resultados de ensaios e calibrações. Os resultados obtidos devem ser sempre registrados e, se possível, submetidos a tratamento estatístico para verificação e análise. Além disso, deve-se usar de materiais e/ou padrões de referência, ensaios ou calibrações replicadas se usando de mesmo ou diferente método, ou experiências e participações em programas interlaboratoriais.

A apresentação dos resultados deve ser a mais clara e objetiva possível, sem demonstrar ambiguidade e relatar especificamente e detalhadamente todos os métodos usados no ensaio e/ou calibração. Normalmente, os resultados são relatados em um relatório de ensaio, ou se for calibração, em um certificado de calibração. Esse

relatório deve conter todas as informações pertinentes ao cliente, além de todos os dados necessários à compreensão e interpretação dos resultados obtidos.

As informações básicas que devem estar contidas no relatório de ensaio são:

- a) Título;
- b) Nome e endereço do laboratório, e onde se realizou o ensaio;
- c) Identificação unívoca do relatório, número de série por exemplo;
- d) Nome e endereço do cliente;
- e) Identificação do método usado;
- f) Descrição, identificação e condição dos itens ensaiados;
- g) Data de recebimento de itens de ensaio, quando isso for relevante para a validade do ensaio;
- h) Planos de amostragem adotados;
- i) Resultados do ensaio com corretas unidades de medida;
- j) Nome, função e assinatura das pessoas autorizadas a emitir o relatório de ensaio;
- k) Uma declaração de que os resultados obtidos se referem apenas aos itens ensaiados.

Em relatórios onde se utilizou de amostragem deve-se incluir:

- a) Data da amostragem;
- b) Identificação do material e da peça amostrada;
- c) Local da amostragem;
- d) Plano de amostragem;
- e) Condições ambientais de amostragem e armazenamento das amostras.

Deve-se usar de cabeçalhos organizados e leiaute apropriado nestes relatórios.

2.2 Incerteza de Medição

De acordo com o Vocabulário Internacional de Metrologia, (INMETRO, 2012a), incerteza de medição é conceituada como um parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, grandeza que se pretende medir, com base nas informações utilizadas. O JCGM 100 (BIPM et al., 2008) declara que a incerteza do resultado de uma medição reflete a falta de conhecimento exato do valor do mensurando. Portanto, a incerteza de medição é uma indicação

quantitativa que reflete a qualidade do resultado de uma medição, de forma a garantir às pessoas que o utilizam uma confiabilidade relevante.

De acordo com o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), para determinar a incerteza de medição deve-se definir corretamente o mensurando e após isso, identificar todas as variáveis que podem afetar o resultado de medição. A Fig. 2.2 mostra as variáveis que podem afetar o resultado de uma máquina de medir por coordenadas.

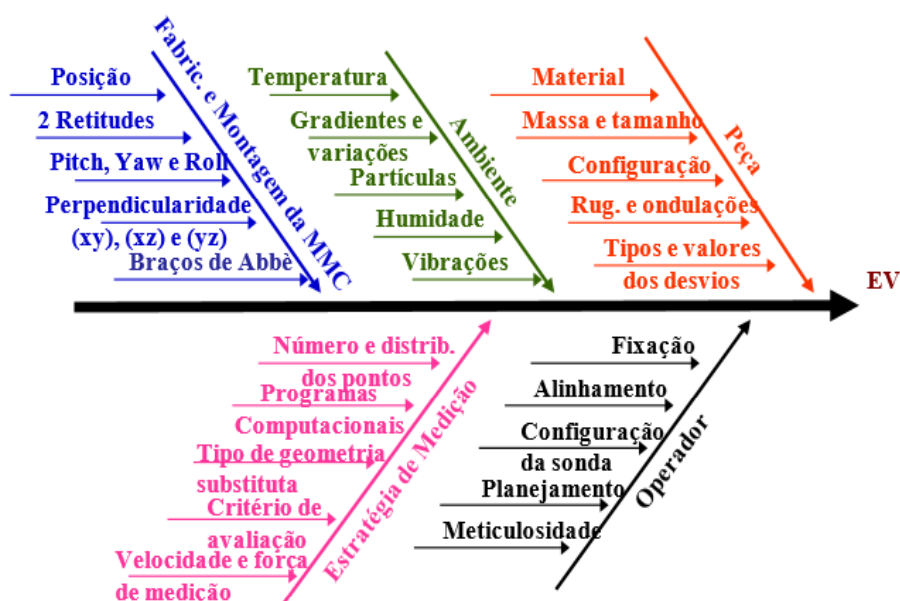


Figura 2.2 - Diagrama de causa e efeito para uma máquina de medir por coordenadas (WECKENMANN; KNAUER; KILLMAIER, 2001).

O JCGM 100 (BIPM et al., 2008) classifica a incerteza em: incerteza padrão, incerteza padrão combinada e incerteza expandida, que devem ser avaliadas separadamente.

2.2.1 Incerteza-padrão

De acordo com o INMETRO (2012), incerteza-padrão é definida como a incerteza de medição expressa na forma dum desvio-padrão.

Ao verificar a existência de todas as variáveis que podem influenciar no resultado da medição, deve-se construir um modelo matemático que as associe ao mensurando. De acordo com o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), esse modelo é, normalmente, uma relação funcional que associa as N variáveis $X_1, X_2, \dots, X_N$ ao mensurando Y , conforme Eq. (2.1).

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (2.1)$$

Uma estimativa do mensurando Y , descrito como y , é obtida pela Eq. (2.1), usando estimativas de entrada $x_1, x_2, \dots, x_N$ das grandezas $X_1, X_2, \dots, X_N$. Assim:

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2.2)$$

Ainda de acordo com o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), essas grandezas $X_1, X_2, \dots, X_N$ podem ser consideradas mensurandos e depender de outras grandezas. Assim, cada estimativa x_i está associada à sua incerteza-padrão $\mu(x_i)$ são obtidas através de uma distribuição de valores possíveis da grandeza de entrada X_i . Essa distribuição de probabilidade pode estar baseada na frequência, avaliação do Tipo A, ou pode ser uma distribuição *a priori*, avaliação do Tipo B.

2.2.1.1 Avaliação da incerteza-padrão do Tipo A

A avaliação da incerteza-padrão do Tipo A, segundo o INMETRO (2012), é dita como a avaliação de uma componente da incerteza de medição por uma análise estatística dos valores medidos, obtidos sob condições definidas de medição, sendo essas condições de repetibilidade, de precisão intermediária e de reprodutibilidade. Essa análise estatística é basicamente o uso de funções densidade de probabilidade e distribuições de frequência, normalmente assumindo a distribuição normal, para obter o valor da incerteza-padrão.

De acordo com o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), para uma medição bem caracterizada sob controle estatístico, uma estimativa combinada ou agrupada da variância (ou um desvio-padrão experimental agrupado) que caracteriza a medição pode estar disponível. Nesse caso, quando o valor do mensurando é determinado a partir de N observações independentes x_i , a variância experimental da média aritmética das observações é estimada por $s^2(\bar{x}) = s^2(x)/n$, e a incerteza-padrão

$$\mu(x) = \sqrt{s^2(\bar{x})}, \text{ ou seja:}$$

$$\mu(x) = \sqrt{\frac{s^2(x)}{n}} = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

Onde $s(x)$ é o desvio-padrão experimental, $s^2(x)$ é a variância experimental e n é o número de elementos da amostra, isto é, número de observações do mensurando.

2.2.1.2 Avaliação da incerteza-padrão do Tipo B

A avaliação da incerteza-padrão do Tipo B, segundo o VIM (INMETRO, 2012), é dita como a avaliação de uma componente da incerteza de medição determinada por meios diferentes daquele adotado para uma avaliação do Tipo A da incerteza de medição. Existem várias situações, nas quais o uso de métodos estatísticos para realizar uma estimativa do desvio-padrão experimental, e consequentemente, da incerteza a ele associada. Neste caso, de acordo com o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), utiliza-se de outras informações como:

- Especificações do fabricante;
- Dados de medições prévias;
- Dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados;
- Incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais; dentre outros.

Assim, se a estimativa x_i for obtida através de uma especificação do fabricante, certificado de calibração, manual técnico ou outra fonte e a sua incerteza for declarada como um valor múltiplo de um desvio-padrão, a incerteza-padrão $\mu(x_i)$ é encontrada ao dividir o valor mencionado pelo multiplicador.

No entanto, em muitos casos é possível determinar apenas as fronteiras, isto é, limites inferior e superior, para X_i . Neste caso, determina-se que a probabilidade de que o valor de X_i esteja dentro do intervalo $a -$ até $a +$ é um e fora é zero. Ainda, se não há conhecimento específico sobre os valores possíveis de X_i dentro do intervalo, assume que o seu valor segue uma distribuição retangular, como a mostrada na Fig. 2.3.

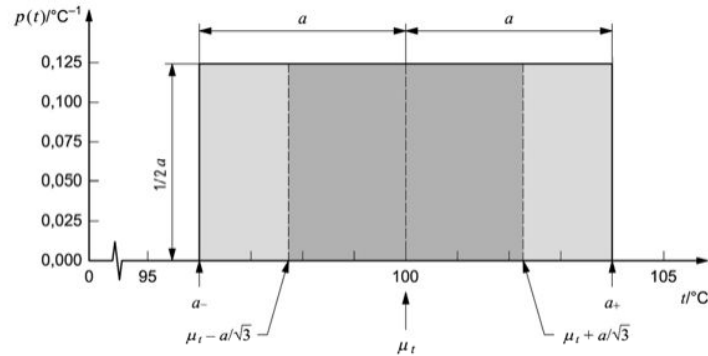


Figura 2.3 - Distribuição retangular ((BIPM et al., 2008).

Se a diferença entre os limites a_+ e a_- é designada por $2a$, pode se definir que a incerteza-padrão associada é dada pela Eq. (2.4).

$$\mu(x) = \frac{a}{\sqrt{3}} \quad (2.4)$$

Em outros casos, é mais conveniente esperar que valores próximos aos limites inferior e superior tenham uma probabilidade menor de ocorrerem do que os que estejam perto do ponto médio. Logo, utiliza-se, no lugar de uma distribuição retangular, uma distribuição trapezoidal simétrica de base $a_+ - a_- = 2a$ e um topo de largura $2a\beta$, onde $0 \leq \beta \leq 1$. Quanto mais próximo β de 1, mais próxima de uma distribuição retangular é a distribuição trapezoidal, enquanto que, quanto β próximo de 0, mais próxima de uma distribuição triangular ela é.

Portanto, ao se tomar uma distribuição trapezoidal a incerteza-padrão é determinada ao se realizar a raiz positiva da variância associada ao valor de X_i , Eq. (2.5).

$$\mu^2(x) = \frac{a^2(1 + \beta^2)}{6} \quad (2.5)$$

Assumindo $\beta = 0$, tem-se uma distribuição triangular (Fig. 2.4).

$$\mu^2(x) = \frac{a^2}{6} \quad (2.6)$$

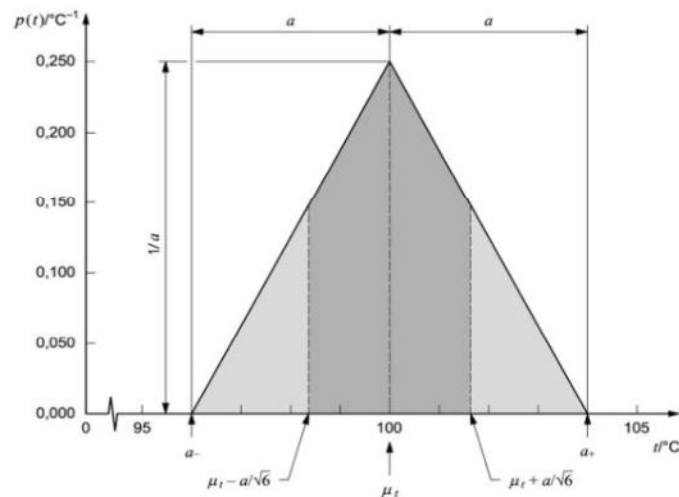


Figura 2.4 - Distribuição triangular (BIPM et al., 2008).

Outro caso muito recorrente, é quando a incerteza citada define um intervalo tendo um nível da confiança de 90 %, 95 % ou 99 %. Neste caso, a não ser que seja indicado um modo de analisar esses dados, deve-se supor uma distribuição normal. Assim, para calcular a incerteza-padrão de x_i , basta dividir o valor citado da incerteza pelo fator apropriado para a distribuição normal (1,64; 1,96 ou 2,58 respectivamente).

2.2.2 Incerteza-padrão combinada

A incerteza-padrão da estimativa y do mensurando Y , ou seja, o resultado de uma medição qualquer, é obtida por meio da combinação de incertezas-padrão das estimativas de entrada $x_1, x_2, \dots, x_N$. Esta incerteza-padrão combinada é representada pela simbologia $u_c(y)$ (BIPM et al., 2008).

Para determinação da incerteza-padrão combinada é necessário antes, verificar se há ou não dependência entre as várias estimativas de entrada. Quando as mesmas são independentes, determina-se o valor da incerteza-padrão combinada através da raiz quadrada positiva da variância combinada, a qual é mostrada na Eq. (2.7).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) \quad (2.7)$$

Sendo f , a relação funcional que modela a medição do mensurando, Eq. (2.2).

No entanto, quando as estimativas de entrada estão, de alguma forma, correlacionadas, a expressão que deve ser utilizada é

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left[\frac{\partial f}{\partial x_i} \right]^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} u(x_i, x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (2.8)$$

Onde x_i e x_j são as estimativas de X_i e X_j , $u(x_i, x_j) = u(x_j, x_i)$ é a covariância estimada e $-1 \leq r(x_i, x_j) \leq 1$ é o coeficiente de correlação entre x_i e x_j . Vale ressaltar que quando as variáveis são independentes, $r(x_i, x_j) = 0$ e, portanto, a incerteza-padrão combinada volta a ser definida pela Eq. (2.7).

2.2.3 Incerteza expandida

Segundo o JCGM 100 (BIPM et al., 2008), como a incerteza-padrão combinada é obtida fundamentalmente por desvios-padrão, a confiabilidade que é obtida ao se usar essa é incerteza é de 68 %, entretanto, em alguns casos necessita-se de um nível de confiança maior e, portanto, se faz necessário o uso da incerteza expandida, a qual confere uma confiabilidade acima de 95 %. Neste caso, é necessário utilizar uma incerteza expandida capaz de definir um intervalo em torno do resultado da medição, com o qual se visa abranger uma extensa fração da distribuição de valores que poderiam ser razoavelmente atribuídos ao mensurando. Em outras palavras, a incerteza expandida U , obtida multiplicando a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ por um fator de abrangência k , visa determinar um intervalo $y - U$ a $y + U$, com o qual se busca abranger uma extensa fração da distribuição dos valores que podem ser apropriadamente atribuídos ao resultado de medição Y . Pode-se também representar o intervalo de medição como $y - U \leq Y \leq y + U$.

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \quad (2.9)$$

A escolha do fator de abrangência k não é fácil. Normalmente, k é escolhido de acordo com o nível da confiança requerido para o intervalo $y - U$ a $y + U$. Em geral, seu valor estará entre 2,00 e 3,00. Entretanto, na prática, não é fácil relacionar apropriadamente um fator de abrangência k a um nível da confiança. Portanto, como forma de aproximar k de maneira mais simples, recomenda-se que quando a distribuição de probabilidade caracterizada pela estimativa y e $u_c(y)$ é aproximadamente normal e possui os graus de liberdade efetivos de $u_c(y)$

consideravelmente grandes, pode-se aproximar o valor de k para 2,00 (nível da confiança de 95 %) ou para 3,00 (nível da confiança de 99 %).

Outra maneira de se escolher o fator de abrangência k é relacioná-lo com o número de graus de liberdade efetivo. Para isso, calcula-se os graus de liberdade efetivo através da Equação de *Welch-Satterwaite*, Eq. (2.10). Após esse cálculo, é possível encontrar o valor do fator de abrangência k para determinado nível da confiança requerido, através de tabelas *t-student*. Vale ressaltar que, esse tipo de prática pode ser aplicado apenas em situações onde o número de leituras é reduzido.

$$v_{\text{efetivo}} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u^4(y_i)}{v_i}} \quad (2.10)$$

2.3 Controle Dimensional e Geométrico de Peças

No século XVIII se deu início à chamada fabricação seriada, que trata, basicamente, em produzir uma peça com determinada qualidade em grande escala e com o menor custo possível. O que ocorre nos dias atuais não se diferencia muito do processo iniciado séculos atrás. A fabricação dos produtos ocorre cada vez mais rápida e nesse sistema produtivo não há tempo para correções ou reparos. Para isso, todas as peças devem estar em ótimas condições e devem ocupar o seu devido lugar se encaixando, quase que perfeitamente. O controle dimensional e geométrico dessas peças rapidamente tornou-se indispensável e ganhou importância no chão de fábrica.

Na prática, obter peças que possuem exatamente as dimensões descritas nos desenhos técnicos é uma tarefa impossível, tendo em vista que, durante os processos de fabricação sempre acontecerão imperfeições, o que resulta em desvios das medidas nominais, da forma geométrica, do posicionamento relativo e da orientação. Os desvios dimensionais e geométricos podem estar associados à máquina operatriz e sua qualidade e ao desgaste dos seus componentes, à ferramenta de corte, aos instrumentos de medição, ao operador e até mesmo ao material utilizado na fabricação da peça.

2.3.1 Tolerância dimensional

De acordo com a ABNT NBR 6158 (ABNT, 1995) tolerância pode ser descrita como a variação permissível, dada pela diferença entre a dimensão máxima e a dimensão mínima, ou seja, entre o afastamento superior e o afastamento inferior. As tolerâncias dimensionais são aplicadas desde que para o adequado funcionamento e montagem das peças, elas sejam necessárias. Usualmente são aplicadas para peças que se encaixam umas nas outras, isto é, para peças tipo eixos e furos. A ABNT NBR 6158 (ABNT, 1995) define como furo o termo convencional utilizado para descrever uma característica interna de uma peça, incluindo também elementos não cilíndricos; e eixo como o termo utilizado para descrever uma característica externa de uma peça. Esse sistema de análise da tolerância é chamado sistema eixo/furo.

A seguir, são apresentados alguns conceitos importantes sobre tolerâncias dimensionais ABNT NBR 6158 (ABNT, 1995):

- Dimensão nominal: Dimensão a partir da qual são derivadas as dimensões limites pela aplicação dos afastamentos superior e inferior;
- Dimensão efetiva: Dimensão de um elemento obtido pela medição;
- Linha zero: Linha reta que representa a dimensão nominal e serve de origem aos afastamentos em uma representação gráfica de tolerâncias e ajustes;
- Dimensão máxima: A maior dimensão admissível de um elemento;
- Dimensão mínima: A menor dimensão admissível de um elemento;
- Afastamento superior: Diferença algébrica entre a dimensão máxima e a correspondente dimensão nominal. As letras “ES” são designadas para afastamentos em furos e as letras “es” para afastamentos em eixos.
- Afastamento inferior: Diferença algébrica entre a dimensão mínima e a correspondente dimensão nominal. As letras “EI” são designadas para afastamentos em furos e as letras “ei” para afastamentos em eixos.

Alguns desses conceitos são mostrados na Fig. 2.5.

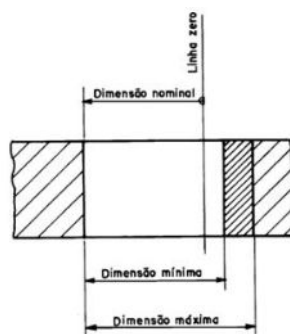


Figura 2.5 - Dimensão nominal e dimensões máxima e mínima (ABNT, 1995).

Vale ressaltar que os afastamentos inferiores e superiores podem ser tanto negativos como positivos. Quando a dimensão máxima ou mínima está acima da linha zero o afastamento correspondente é positivo. Caso a dimensão máxima ou mínima esteja abaixo da linha zero o afastamento é negativo (ABNT, 1995).

O Sistema ISO definiu um conjunto de grupo de dimensões. Desta forma, as dimensões nominais compreendidas entre 1 e 500 mm foram subdivididas em 13 grupos principais e 22 grupos intermediários, Tabela 2.1.

Tabela 2.1 - Grupos de dimensões (ABNT, 1995.).

Grupos Principais		Grupos Intermediários	
Acima	Até e inclusive	Acima	Até e inclusive
-	3	Nenhuma divisão	
3	6		
6	10		
10	18	10 14	14 18
18	30	18 24	24 30
30	50	30 40	40 50
50	80	50 65	65 80
80	120	80 100	100 120
120	180	120 140 160	140 160 180
180	250	180 200 225	200 225 250
250	315	250 280	280 315
315	400	315 355	355 400
400	500	400 450	450 500

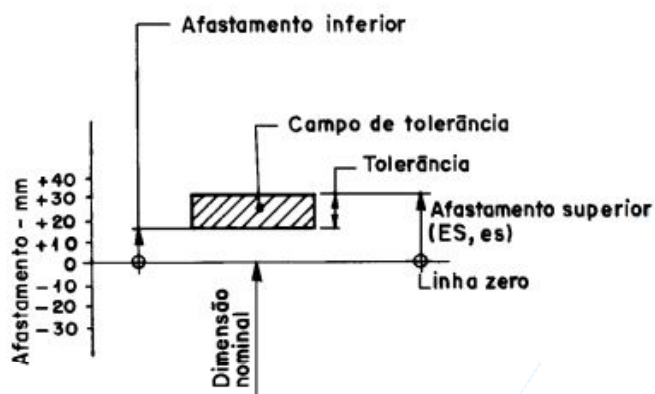


Figura 2.7 - Representação geral de um campo de tolerância (ABNT, 1995).

Uma definição mais precisa da posição dos limites superior e inferior com relação à dimensão nominal, só é obtida ao utilizar o campo de tolerância. Dependendo da aplicação da peça esse campo pode estar localizado mais próximo ou mais afastado da linha zero.

2.3.2 Tolerância geométrica

Assim como as dimensões efetivas das peças devem situar-se dentro de um campo de tolerância, as relações geométricas também devem seguir tolerâncias que limitem os desvios de formas oriundos da fabricação da peça. O limite desses desvios possibilitará maior intercambiabilidade e facilidade no encaixe de peças.

A definição da tolerância geométrica é obtida em função de desvios encontrados entre as formas e posições teóricas pré-definidas e as formas reais.

Diferentemente do que é observado na tolerância dimensional, onde a peça atende a tolerância quando se situar entre dois limites, um inferior e um superior, nas tolerâncias geométricas, a forma de um elemento isolado só será considerada correta, quando o desvio de cada um de seus pontos em relação à uma superfície de forma ideal, for igual ou inferior ao valor da tolerância geométrica definida previamente (GUIMARÃES, 1998).

Segundo ABNT NBR 6409 (ABNT, 1997), afim de facilitar o estudo das tolerâncias geométricas, tem-se a seguinte classificação:

- Desvios de forma;
- Desvios de orientação;
- Desvios de posição;
- Desvios de batimento (desvios de movimentação);

2.3.2.1 Desvios de orientação: Paralelismo

Uma série de tolerâncias de paralelismo podem vir a serem indicadas. É possível determinar a tolerância de paralelismo entre uma linha e uma linha de referência, entre uma linha e uma superfície de referência, entre uma superfície e uma linha de referência e entre uma superfície e uma superfície de referência.

Genericamente, o que se observa é que a tolerância de paralelismo é definida de acordo com o elemento controlado em questão e o elemento de referência. No caso de um desvio de uma linha paralela a uma linha de referência, o campo de tolerância é definido por duas linhas afastadas de “t” e paralelas à linha de referência. Ao considerar um plano paralelo a um plano de referência, o campo de tolerância é definido de forma semelhante, entretanto são dois planos afastados de “t” e paralelos ao plano de referência (Fig. 2.8a). Vale ressaltar que, o elemento real deve estar contido entre os elementos afastados de “t”.

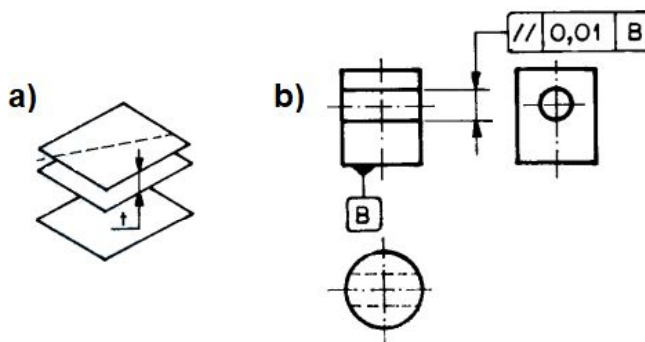


Figura 2.8 – (a) Desvio de paralelismo entre dois planos; (b) Interpretação do desvio de paralelismo (ABNT, 1997).

De acordo com a Fig. 2.8b, a linha de centro do furo deve estar contida entre dois planos afastados em 0,01 mm e paralelos à superfície de referência B.

2.3.2.2 Desvios de posição: Simetria

A tolerância de simetria pode ser considerada como um caso particular do desvio de posição de um elemento, onde os elementos são as arestas simétricas da peça.

Para a tolerância de simetria de um plano médio o campo de tolerância é limitado por dois planos paralelos, distantes “t” e dispostos simetricamente em relação à linha de referência ou plano de referência, Fig. 2.9a.

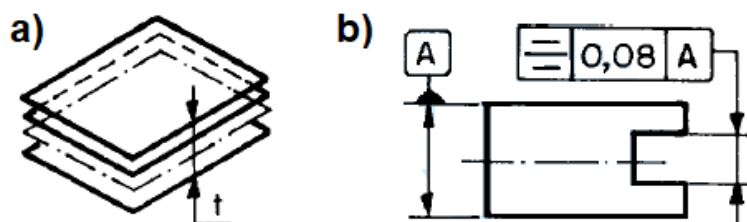


Figura 2.9 – (a) Tolerância de simetria; (b) Interpretação do desvio de simetria (Modificada de ABNT, 1997).

De acordo com a Fig. 2.9b, o plano médio do rasgo deve estar contido entre dois planos paralelos, afastados em 0,08 mm e simetricamente dispostos em torno do plano médio do elemento de referência A.

2.4 Reparo por Atrito

2.4.1 Soldagem por atrito

Foi na União Soviética, ainda no século XIX, que a soldagem por atrito rotacional ganhou força e se desenvolveu, e recentemente tem se estudado o seu uso para técnicas de reparo de componentes que estão sujeitos a desgaste (MEYER, 2004).

De acordo com a *American Welding Society* (AWS, 1991), soldagem por atrito é um processo, no qual, a união dos elementos ocorre em estado sólido e é decorrente do movimento relativo entre as partes, submetendo-as, ou somente uma delas, a uma força de compressão. Nessa técnica ocorre, basicamente, a transformação de energia mecânica em energia térmica, oriunda do calor gerado pelo atrito entre as superfícies de contato das duas peças.

A Figura 2.10 mostra o esquema do processo de soldagem por atrito convencional, onde uma das peças é fixa e a outra gira (Fig. 2.10a). As peças então são colocadas em contato e tem-se o início da aplicação da carga axial (Fig. 2.10b). Com o movimento relativo entre as duas superfícies, há um aquecimento, de forma que, os materiais em contato começam a sofrer deformação plástica. É neste momento que se forma um colar incandescente, chamado popularmente de *flash*, entre as superfícies de contato (Fig. 2.10c). Para finalizar o processo, a rotação é cessada e aplica-se uma força axial ainda maior, podendo, inclusive, ser superior à

força de soldagem. Essa etapa recebe o nome também de etapa de forjamento e visa, basicamente, estabilizar e elevar a adesão da junta que se formou (Fig. 2.10d).

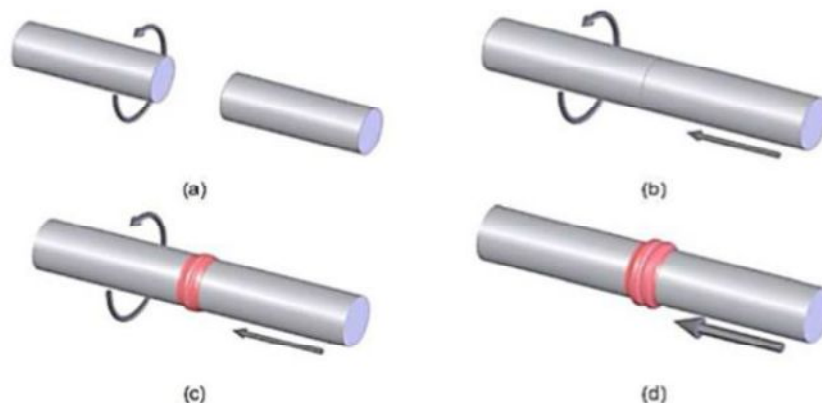


Figura 2.10 - Esquema processo de soldagem por atrito convencional. (a) Rotação de uma das peças; (b) Aplicação da força axial; (c) Início da soldagem; (d) Fim do processo (AWS, 1991).

2.4.2 Geração de calor e parâmetros do processo

O processo de transformação da energia mecânica, empregada pela força de compressão, em energia térmica, está estritamente relacionado ao contato entre as asperidades das superfícies das peças envolvidas. No início da soldagem, ocorre o contato físico, apenas, entre um número muito pequeno de asperidades. Assim, a área de contato real é apresentada por alguns poucos pontos e as ligações possuem baixa resistência mecânica, isso quando há a formação das mesmas. Ao aplicar-se uma carga maior, as asperidades penetram com maior intensidade e se tem início a uma deformação plástica.

O movimento tangencial relativo somado ao contato entre as superfícies intensifica as deformações entre as asperidades, principalmente devido ao cisalhamento que ocorre ao haver esse tipo de movimento.

Existem três parâmetros importantes nesse processo, sendo: Força axial, velocidade de rotação e taxa de queima.

Força axial: A força axial é um parâmetro que interfere diretamente no comprimento de queima, na potência requerida pelo processo e no controle do gradiente de temperatura. Ela deve ser condicionada de forma a manter as superfícies sempre em contato (AWS, 1991).

Velocidade de rotação: Apesar de existir uma larga faixa de variação de velocidades de rotação, não há grandes perturbações na qualidade da solda, decorrente dela (AWS, 1991). Existem velocidades de rotação consideradas ótimas para cada combinação de material e aplicação.

Taxa de queima: É um parâmetro que tem o objetivo de medir a velocidade de deslocamento axial, oriundo do consumo do comprimento das peças que se encontram em contato. A taxa de queima pode, também, ser utilizada para realizar o controle do ciclo de soldagem (definição do início e fim do processo), bem como influenciar a qualidade de união.

2.4.3 Fases do processo

De acordo com Meyer (2004), o ciclo de soldagem por atrito pode ser subdividido em quatro fases. A Figura 2.11 mostra as fases de uma soldagem por atrito convencional.

A primeira fase da soldagem por atrito (Fase I), chamada, normalmente, de fase de atrito, é onde ocorre a interação entre as superfícies das peças que se encontram em contato. Neste momento, ocorre uma deformação plástica acentuada decorrente da aplicação de uma carga axial elevada. Além disso, é importante ressaltar que há um elevado aquecimento local na interface conseguinte do cisalhamento que ocorre entre as asperidades das superfícies em contato. A temperatura pode se elevar a valores bem próximos ao da temperatura de fusão do material (MEYER, 2004).

Na segunda fase do processo (Fase II), designada fase de aquecimento, há o aumento da temperatura do material, que sofrera deformação plástica na forma de anel ainda na fase I, o qual aumentou de tamanho à medida que a fase II acontecia, tendo em vista que o atrito tende a aumentar durante essa etapa.

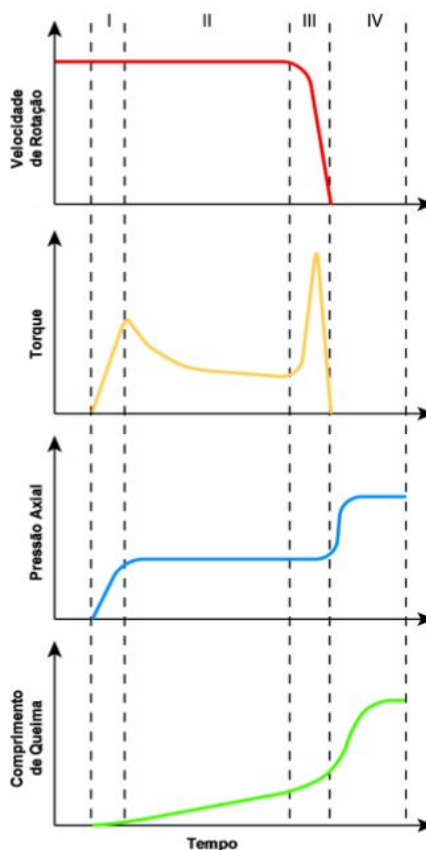


Figura 2.11 - Divisão das fases durante o processo de reparo por atrito (Modificado de MEYER, 2004).

Conforme ocorre uma elevação na temperatura do material e na quantidade de material que sofre compressão, o material começa a ser dirigido para fora da área de atrito formando uma rebarba que recebe o nome de *flash*.

A Fase III, também denominada fase de desaceleração ou frenagem, é caracterizada pela diminuição do valor da velocidade rotacional, resultando em uma maior resistência do material e, consequentemente, maior torque, como observado na Fig. 2.11.

Na última fase (Fase IV), chamada de fase de adesão, ocorre a aplicação de uma força, denominada força de forjamento, a qual tem o objetivo de promover a formação de uma união mais homogênea ao longo de toda a seção da junta. Durante todo o processo, a união não é homogênea, sendo que ela vem a obter essa característica apenas nessa etapa do processo.

2.4.4 Vantagens e limitações do processo

Algumas vantagens e limitações do processo de soldagem por atrito em relação ao processo de soldagem convencional, citadas por Meyer (2004) e Pires (2007), são apresentadas na Tabela 2.3.

Tabela 2.3 – Vantagens e limitações do processo de soldagem por atrito.

Vantagens	Limitações
Não utiliza fluido e/ou gás de proteção	Sistema deve possuir alta rigidez devido às forças axiais elevadas
Não é necessária limpeza	Uma das peças a serem soldadas deve ser simétrica
Não ocorre emissão de gases tóxicos nocivos ao operador	Só pode ser usado para fazer soldas de topo planas ou angulares
Processo pode ser automatizado	O material deve sofrer deformação plástica nas condições da solda realizada
Permite a união de materiais dissimilares	Preparação e alinhamento é determinante no resultado final
Operador não precisa ter habilidades específicas	Investimento elevado

2.4.5 Tipos de soldagem por atrito com pinos consumíveis

Os principais tipos de soldagem por atrito com pinos consumíveis são:

a- FTPW - Friction Tapered Plug Welding: Derivado do processo de soldagem por atrito, é utilizado para fazer reparos, normalmente, em estruturas em condições subaquáticas (MEYER, 2004). Essa técnica recebe uma atenção em especial, devido a sua aplicabilidade em condições subaquáticas, o que a torna muito importante para a indústria petroleira. A técnica se baseia na retirada de material desgastado através de um furo, e a utilização de um pino cônico para preencher a cavidade cônica oriunda da furação. A Fig. 2.12 mostra as etapas desse processo.

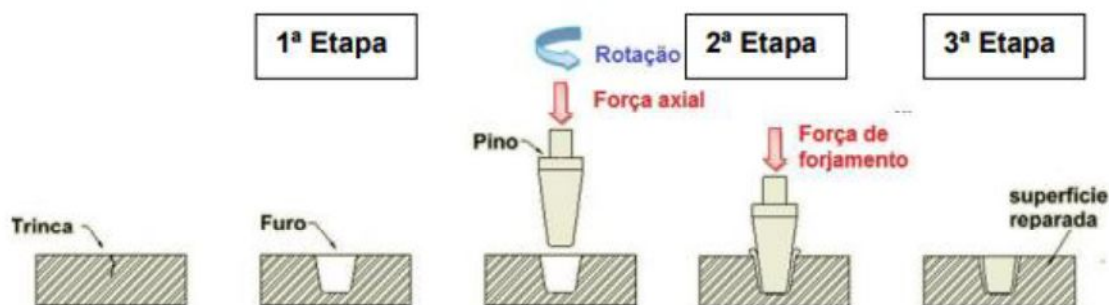


Figura 2.12 - Etapas do processo FTPW (RODRIGUES, 2016).

De acordo com Rodrigues (2016), a primeira etapa é a usinagem de um furo cego na região onde deve ocorrer o reparo. A segunda etapa é na qual ocorre o processo de soldagem por atrito, ou seja, um pino consumível é rotacionado e comprimido contra o furo, anteriormente usinado. E a terceira etapa que se trata, basicamente, do processo de acabamento, no qual se realiza a usinagem do material que não foi processado e do material que foi deformado plasticamente.

b- FHPP - Friction Hydro Pillar Processing: O processo FHPP, é considerado por alguns autores como um processo derivado do FTPW. A principal diferença é que neste processo o formato do furo é cilíndrico.

c- FPPW - Friction Pull Plug Welding: Esse processo é derivado do processo de reparo por atrito FHPP. O diferencial deste processo se encontra na força aplicada no pino, tendo em vista que nas técnicas FTPW e FHPP, a força axial é compressiva e direciona o pino contra a cavidade, enquanto que em FPPW, a força traciona o pino contra a cavidade.

d- FTSW - Friction Tapered Stitch Welding: É considerado como uma variação dos processos FTPW/FHPP, sendo que a diferença se encontra no fato dessa técnica ser, normalmente, utilizada para reparar trincas por atrito, resultado de sobreposições de uma sequência de processamentos de pinos por atrito.

CAPÍTULO 3

METODOLOGIA

Este capítulo apresenta a metodologia utilizada para desenvolvimento do trabalho. Para um melhor entendimento a mesma foi dividida em: identificação dos corpos de prova (pinos e blocos) utilizadas no reparo por atrito; controle dimensional e geométrico das amostras; e cálculo da incerteza de medição.

3.1 Identificação dos pinos e blocos usados no reparo por atrito

Os pinos e blocos usados na simulação de um reparo por atrito são os elementos objetos de estudo neste trabalho. São eles:

- Bloco metal base – junta de 15 mm;
- Bloco metal base tubo junta soldada;
- Pino de soldagem.

Os desenhos técnicos destes componentes estão no ANEXO A. A seguir é mostrada uma breve descrição de cada um deles, iniciando por aquele que apresenta uma menor complexidade dimensional e geométrica.

O bloco metal base – junta de 15 mm (Figs. 3.1 e 3.2) foi produzido em aço inoxidável duplex, o bloco metal base tubo junta soldada (Figs. 3.3 e 3.4) foi retirado diretamente do tubo código LTAD IT13.16 (código interno de identificação dos tubos do Laboratório de Tecnologia em Atrito e Desgaste), cujo material é UNS S32205 e o pino de soldagem (Figs. 3.5 e 3.6) também é produzido em UNS S32205. A nomenclatura designada para os dois blocos está diretamente relacionada a origem do bloco e da forma como ele é soldado, ou seja, o bloco metal base – junta de 15

mm foi retirado de uma barra qualquer metálica e tem profundidade de solda, determinada pela profundidade do furo, de 15 mm. Já o bloco metal base tubo junta soldada foi retirado diretamente do tubo e por isso recebe esse nome. É uma nomenclatura determinada pelos engenheiros LTAD com objetivo de organizar seus projetos. A fim de facilitar a identificação esses três componentes são designados como corpo de prova 1, corpo de prova 2 e corpo de prova 3, respectivamente.

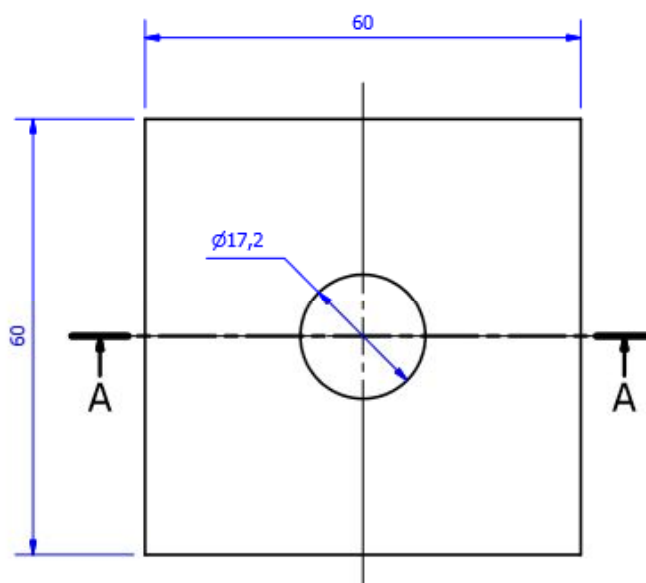


Figura 3.1 - Vista superior do corpo de prova 1 (Bloco metal base – junta de 16 mm), dimensões expressas em milímetros (FRANCO, 2017).

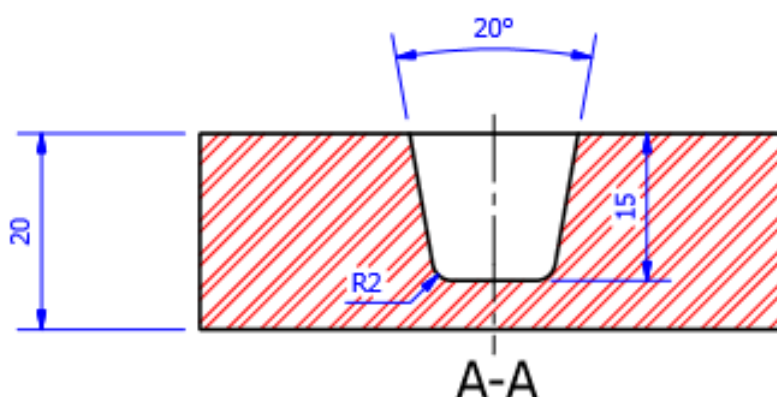


Figura 3.2 - Vista A-A do corpo de prova 1 (Bloco metal base – junta de 16 mm), dimensões expressas em milímetros (FRANCO, 2017).

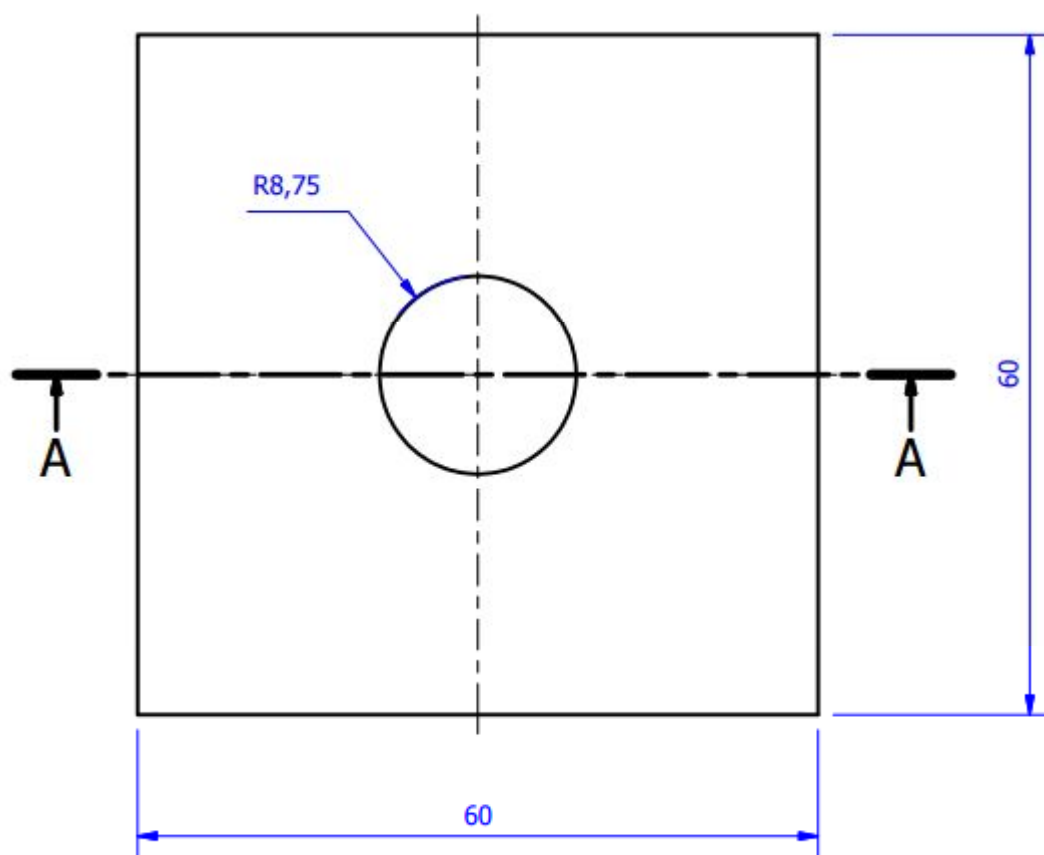


Figura 3.3 - Vista superior do corpo de prova 2 (Bloco metal base tubo junta soldada), dimensões expressas em milímetros (FRANCO, 2017).

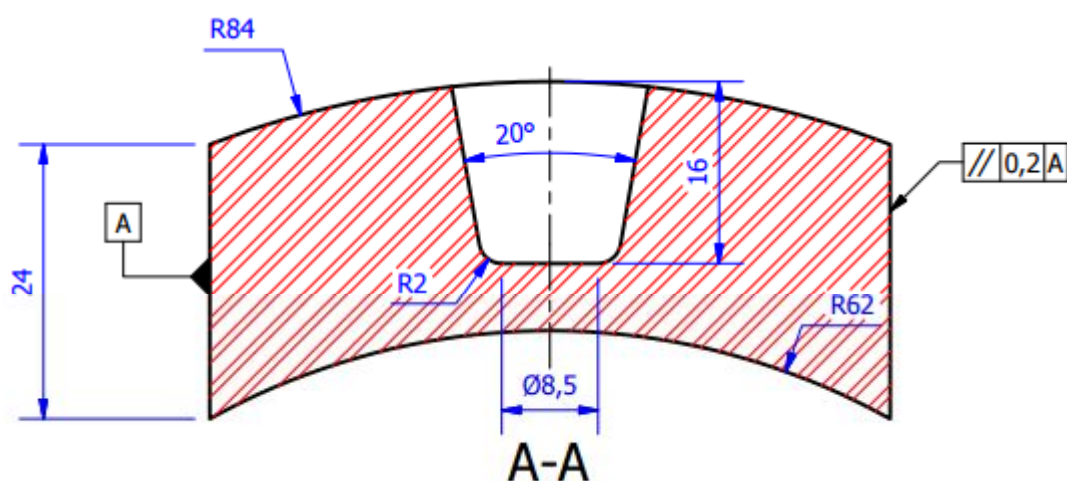


Figura 3.4 - Vista A-A do corpo de prova 2 (Bloco metal base tubo junta soldada), dimensões expressas em milímetros (FRANCO, 2017).

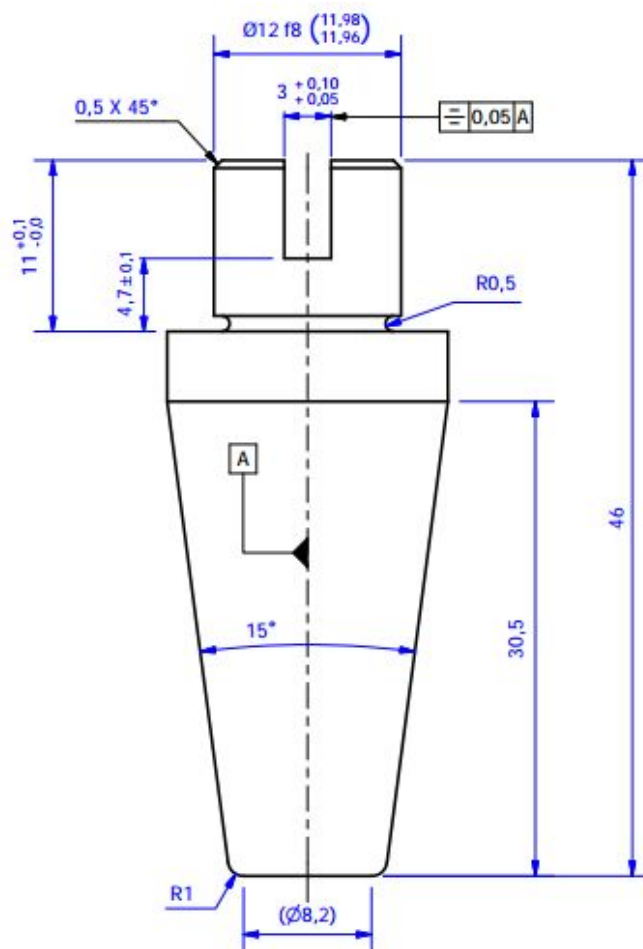


Figura 3.5 - Vista frontal do corpo de prova 3 (Pino de soldagem), dimensões expressas em milímetros (FRANCO, 2017).

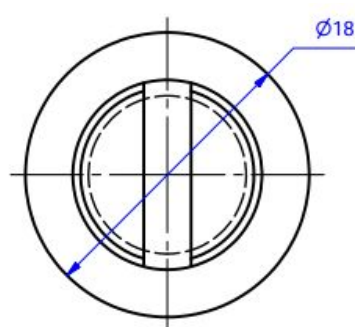


Figura 3.6 - Vista superior do corpo de prova 3 (Pino de soldagem), dimensões expressas em milímetros (FRANCO, 2017).

O material UNS S32205 é um aço inoxidável duplex (ferrítico/austenítico) com limite de escoamento de 450 MPa, limite de resistência de 655 MPa e dureza de 31 HRC (FRANCO, 2017).

3.2 Controle dimensional e geométrico dos corpos de prova

3.2.1 Identificação das dimensões, tolerâncias dimensionais e tolerâncias geométricas.

A partir dos desenhos técnicos dos corpos de prova foram identificadas as dimensões, as tolerâncias dimensionais e geométricas que devem ser verificadas durante o controle dimensional e geométrico. Cada uma destas dimensões e tolerâncias foram denominadas de mensurandos e foram numeradas.

3.2.2 Identificação e descrição do sistema de medição.

Nesta etapa, para cada mensurando foi identificado o sistema de medição a ser utilizado. Para tanto foi aplicada a “regra de ouro da metrologia” expressa na Eq. (3.1).

$$R_{SM} \leq \frac{Tol}{10} \quad (3.1)$$

De acordo com esta regra a resolução do sistema de medição (R_{SM}) deve ser menor ou igual a um décimo do valor da tolerância da peça (Tol) a ser verificada. Aplicando este critério, bem como observando outros fatores como dimensões, geometria e massa dos corpos de prova, bem como a faixa nominal do sistema de medição, foram definidos os sistemas de medição necessários para cada tarefa.

O sistema de medição mais adequado em quase todos os casos foi a máquina de medir por coordenadas (MMC). Desta forma foi utilizada uma MMC do fabricante Mitutoyo, modelo BRM443, tipo ponte móvel, manual. Esta máquina possui uma resolução de 0,001 mm e um volume de trabalho máximo de 400 mm x 400 mm x 300 mm, definido pela faixa nominal das escalas dos eixos X, Y e Z, respectivamente. Para medição de ângulos a resolução da máquina é de 00° 00' 01". O *software* dedicado à máquina é o MCosmos® 3.0, que permite o gerenciamento de todas as tarefas de medição. De acordo com o certificado de calibração da MMC, disponível no ANEXO B, a incerteza linear associada ao eixo X é $(0,8 + L/1500) \mu\text{m}$ ($k = 2,03$), para o eixo Y é $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$ ($k = 2,08$), enquanto que para o eixo Z é $(0,9 + L/2900) \mu\text{m}$ ($k =$

2,11), onde L representa o valor da coordenada correspondente. O erro de apalpação é de $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$ ($k = 2,00$) e a probabilidade de abrangência é de 95 %.

Todas as medições foram efetuadas utilizando uma ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro e comprimento da haste de 20 mm.

Entretanto, sabendo que a realização de medição de simetria por meio da MMC é um procedimento muito complicado, utilizou-se nesse caso o projetor de perfil PJ-A3000, fabricado pela Mitutoyo, com resolução de 0,001 mm para as medições lineares e faixa nominal definida pela capacidade dos eixos X e Y , sendo de 50 mm, respectivamente. Este equipamento possui certificado de calibração N.12137/12 (ANEXO C). O certificado de calibração do projetor de perfil declara uma incerteza-expandida associada à calibração para medidas lineares utilizando o eixo X de 0,002 mm. O fator de abrangência (k) é igual a 2,03 com 99 graus de liberdade efetivos. Este certificado declara, também, a incerteza associada ao aumento da lente, como sendo 0,01 % do valor do mensurando, para um fator de abrangência (k) igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade.

A temperatura ambiente foi mantida em $(20,0 \pm 1,0) ^\circ\text{C}$, de forma a atender a ABNT NM-ISO 1 (1997). Durante os experimentos a temperatura foi monitorada por meio de um termo-higrômetro digital com resolução de $0,1 ^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $(-20,0 \text{ a } 60,0) ^\circ\text{C}$. O termo-higrômetro possui certificado de calibração N. R4996/13 e foi emitido pelo Laboratório de Temperatura e Umidade da Elus Instrumentação (ANEXO D). Para a temperatura a incerteza expandida é de $0,3 ^\circ\text{C}$ para k igual a 2,00 e infinitos graus de liberdade. Tanto os corpos de prova quanto os dispositivos de medição e a MMC foram deixados doze horas à temperatura padrão para atingirem o equilíbrio térmico.

3.2.3 Definição dos procedimentos de medição na MMC.

Antes de realizar as medições, foi efetuada uma limpeza cuidadosa dos corpos de prova e da mesa de medição da MMC, bem como uma análise visual para detectar a presença de rebarbas e outros defeitos que poderiam comprometer o resultado da medição. Em seguida os corpos de prova foram posicionados e fixados na mesa de medição por meio dos dispositivos de fixação.

Posteriormente se transferiu a origem do sistema de coordenadas da máquina para o corpo de prova. Para as medições realizadas no corpo de prova 1, selecionou-se a opção plano/linha/linha para o alinhamento da peça, no qual, para sua definição

é necessário determinar um plano, apalpando 4 pontos, nesse caso, foi escolhido o plano superior do corpo de prova, uma linha no sentido positivo do eixo X da máquina, no caso, a face anterior do corpo de prova, por meio de 3 pontos, e uma linha no sentido positivo do eixo Y , sendo esta na face lateral esquerda do corpo de prova, também apalpando 3 pontos. Assim, a origem do sistema de coordenadas ficou posicionada no local indicado na Fig. 3.7.

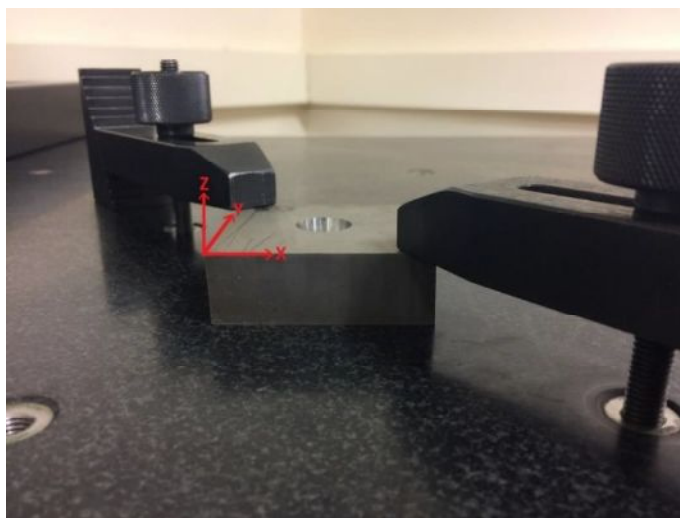


Figura 3.7 - Origem do sistema de coordenadas do corpo de prova 1.

Para as medições realizadas no corpo de prova 2, selecionou-se a mesma opção, porém neste caso, o plano superior do corpo de prova deve ser apalpado cuidadosamente, pois o corpo de prova possui uma curvatura, portanto, se visou tocar 4 pontos muito próximos pelos quais foi ajustado um plano (Fig. 3.8).

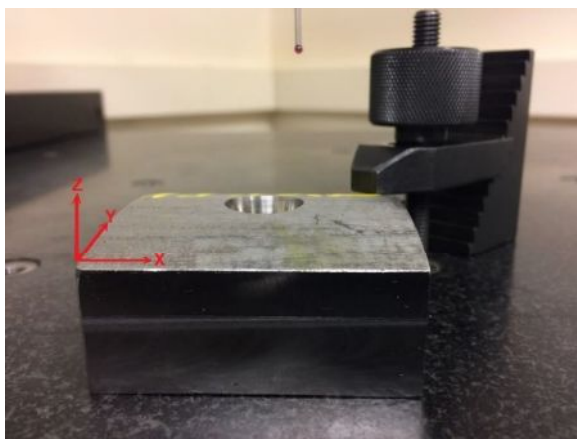


Figura 3.8 - Origem do sistema de coordenadas do corpo de prova 2.

Já para as medições no corpo de prova 3, utilizou-se a opção plano/círculo/linha, no qual, para o alinhamento do corpo de prova se fez necessário determinar um plano, apalpando 4 pontos, neste caso, no plano superior do encaixe do pino, um círculo, apalpando 4 pontos ao longo do diâmetro do encaixe do pino e uma linha no sentido positivo do eixo X da máquina, no caso, uma das faces interiores do rasgo de encaixe do corpo de prova, por meio de 3 pontos. Assim, a origem do sistema de coordenadas ficou posicionada no local indicado na Fig. 3.9.



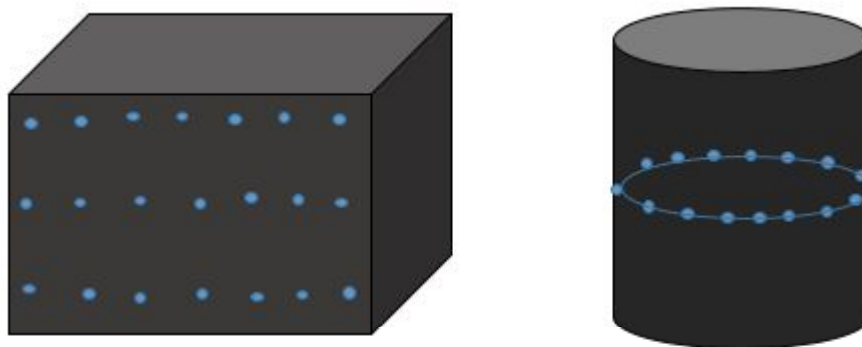
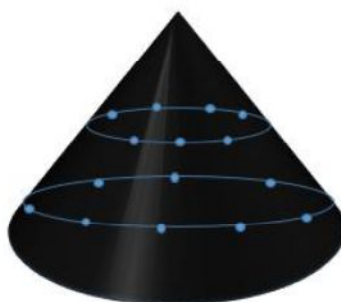
Figura 3.9 - Origem do sistema de coordenadas do corpo de prova 3.

Além disso, foi necessário fazer um estudo para definir a melhor estratégia de medição em cada caso. Para tanto foram realizadas medições utilizando diferentes estratégias de medição, onde apenas o número de pontos apalpados foi alterado. A escolha da melhor estratégia foi efetuada com base nos valores da média e do desvio padrão dos valores indicados pela MMC, e consequente pelo valor da incerteza expandida (95 %) associada a cada medição. Em todos os casos, foram realizados cinco ciclos de medições para cada mensurando. A escolha da melhor estratégia foi feita verificando a partir de qual quantidade de pontos apalpados a média e a incerteza expandida tenderam à estabilização. A partir dos resultados obtidos foi definida a melhor estratégia de medição como mostra a Tabela 3.1.

Tabela 3.1 - Estratégias de medição.

Geometria	Nº de Pontos	Forma de distribuição
Planos de comprimentos maiores e mais simples	21 pontos	Distribuídos uniformemente por todo o plano
Planos de comprimentos médios	15 pontos	Distribuídos uniformemente por todo o plano
Planos de comprimentos menores e mais complexos	9 pontos	Distribuídos uniformemente por todo o plano.
Cones	15 pontos	Apalpados em dois círculos em alturas diferentes do cone
Círculo	15 pontos	Distribuídos em uma seção transversal da peça

As Figuras 3.10 e 3.11 mostram a distribuição em cada um dos casos, ou seja, para plano, círculo ou cone.

**Figura 3.10** - Distribuição de 21 pontos em um plano e 15 pontos em um círculo.**Figura 3.11** - Distribuição de 15 pontos em um cone.

Cinco ciclos de medição foram efetuados para cada um dos mensurandos avaliados.

Procedimentos de medição foram elaborados para todos os mensurandos. Estes são apresentados nos Apêndices A1, A2 e A3 separados por corpos de prova 1, 2 e 3.

3.2.4 Definição dos procedimentos de medição no projetor de perfil.

Para avaliar a simetria das duas faces internas do rasgo com relação ao eixo central do corpo de prova 3 (mensurando 11), como mostrado na Fig. (3.5) foi utilizado o projetor de perfil. Durante a medição foram utilizadas uma lente de aumento de 10x e a iluminação diascópica.

O corpo de prova 3 foi posicionado na mesa de medição do projetor como mostrada na Fig. (3.12). Desta forma, o cabeçote do eixo X foi utilizado para efetuar as medições. As linhas em vermelho na Fig. (3.12) indicam quais foram os mensurandos medidos e posteriormente comparados para a avaliar a simetria das duas faces internas.

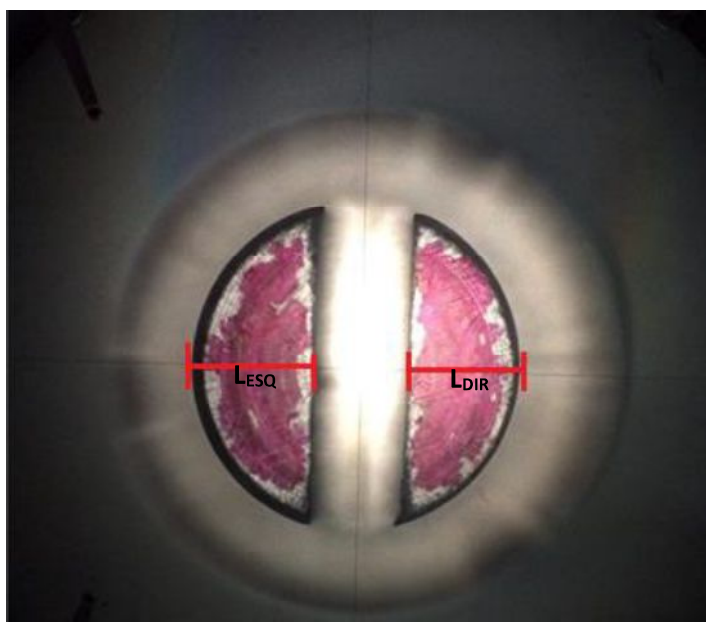


Figura 3.12 - Corpo de prova 3 posicionado no projetor de perfil e mensurandos a serem medidos.

O desvio de simetria (D) foi determinado pela Eq. (3.2).

$$D = L_{Esq} - L_{DIR} \quad (3.2)$$

3.3 Avaliação da incerteza de medição

3.3.1 Avaliação da incerteza dos mensurandos medidos na MMC.

A incerteza de medição foi estimada aplicando o método GUM proposto pelo BIPM *et al.*, (2008). Os modelos matemáticos usados para esta finalidade na medição de dimensões lineares e de ângulo na MMC são apresentados nas Eqs. (3.6) e (3.7), respectivamente.

$$C = \bar{L} + \Delta R + \Delta I + \Delta E_A + L_0 \cdot \Delta T (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC}) + L_0 \cdot \delta T (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC}) \quad (3.6)$$

$$A = \bar{\alpha} + \Delta R + \Delta I + \Delta E_A \quad (3.7)$$

Na Eq. (3.6), C é o mensurando; $\bar{L}$ é o valor médio dos valores indicados pela MMC; ΔR é a correção devido à resolução da MMC; ΔE_A é a correção associada ao erro de apalpamento da MMC; ΔI é a correção devido à incerteza da calibração da MMC; ΔT é o afastamento da temperatura ambiente com relação à 20°C; δT é a variação de temperatura durante as medições; α_{MMC} é o coeficiente de expansão térmica linear das escalas da MMC; α_{Pe} é o coeficiente de expansão térmica linear do material do corpo de prova; e L_0 o valor do mensurando. Já na Eq. (3.7), A é o mensurando, no caso, angular, $\bar{\alpha}$ é o valor médio dos valores indicados pela MMC, ΔR é a correção devido à resolução da MMC; ΔE_A é a correção associada ao erro de apalpamento da MMC; ΔI é a correção devido à incerteza da calibração da MMC. Observe que a temperatura não é um fator que influencia nas medições de ângulos.

Aplicando a lei da propagação de incertezas nos modelos matemáticos apresentados pelas Eqs. (3.6) e (3.7) estima-se a incerteza padrão combinada u_c , com nível de abrangência de 68 % para ambos os casos, ou seja, quando se trata de mensurandos lineares ou angulares. Observe as Eqs. (3.8) e (3.9).

$$u_c^2(C) = \left(\frac{\partial C}{\partial \bar{L}}\right)^2 \cdot (u_{\bar{L}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot (u_{\Delta R})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta E_A}\right)^2 \cdot (u_{\Delta E_A})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \alpha_{Pe}}\right)^2 \cdot (u_{\alpha_{Pe}})^2 +$$

$$+ \left(\frac{\partial C}{\partial \alpha_{MMC}}\right)^2 \cdot (u_{\alpha_{MMC}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta T}\right)^2 \cdot (u_{\Delta T})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \delta T}\right)^2 \cdot (u_{\delta T})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta I}\right)^2 \cdot (u_{\Delta I})^2 \quad (3.8)$$

$$u_c^2(A) = \left(\frac{\partial A}{\partial \bar{\alpha}}\right)^2 \cdot (u_{\bar{\alpha}})^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot (u_{\Delta R})^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta E_A}\right)^2 \cdot (u_{\Delta E_A})^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta I}\right)^2 \cdot (u_{\Delta I})^2 \quad (3.9)$$

É necessário, portanto, avaliar cada uma das grandezas de influência na incerteza de medição. Cada uma delas apresenta um tipo de distribuição de probabilidade, um número de graus de liberdade e um coeficiente de sensibilidade (vale ressaltar que, coeficiente de sensibilidade, quando diferente de 1, deve ser estimado de acordo com as expressões apresentadas). As Tabelas 3.2 e 3.3 trazem as informações utilizadas para o cálculo da incerteza padrão combinada.

Tabela 3.2 - Informações para cálculo da incerteza padrão combinada em medições lineares com MMC.

Grandeza de influência	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade	Coef. de sensibilidade
$\bar{L}$	Normal	n -1, onde n é o número de leituras realizadas	1
ΔR	Retangular	∞	1
ΔI	Normal	Definido pelo valor de k apresentado no certificado de calibração	1
ΔE_A	Triangular	∞	1
ΔT	Normal	V_{eff}	$L_0 \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC})$
δT	Normal	V_{eff}	$L_0 \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC})$
α_{MMC}	Retangular	∞	$L_0 \cdot (\Delta T + \delta T)$
α_{Pe}	Retangular	∞	$L_0 \cdot (\Delta T + \delta T)$

Tabela 3.3 - Informações para cálculo da incerteza padrão combinada em medições angulares com MMC.

Grandeza de influência	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade	Coef. de sensibilidade
$\bar{\alpha}$	Normal	n -1, onde n é o número de leituras realizadas	1
ΔR	Retangular	∞	1
ΔI	Normal	Definido pelo valor de k apresentado no certificado de calibração	1
ΔE_A	Triangular	∞	1

É importante ressaltar que o coeficiente de dilatação linear indicado pelo símbolo α_{MMC} nas equações anteriormente citadas, é o coeficiente de dilatação do material das escalas internas da MMC. Essas escalas são normalmente fabricadas em vidro, e, portanto, o valor aproximado de α_{MMC} é $8.10^{-6} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$.

3.3.2 Avaliação da incerteza dos mensurandos medidos no projetor de perfil..

Assim como na MMC, a incerteza de medição foi estimada aplicando o método GUM proposto pelo BIPM *et al.*, (2008), sendo que o modelo matemático usado para esta finalidade na medição de dimensões lineares no projetor de perfil é apresentado na Eq. (3.10).

$$L = \bar{L} + \Delta R + \Delta I + \Delta A I \quad (3.10)$$

Na Eq. (3.10), L é o mensurando; $\bar{L}$ é o valor médio dos valores lidos no projetor de perfil; ΔR é a correção devido à resolução do projetor de perfil; ΔI é a correção devido à incerteza da calibração do projetor de perfil; e $\Delta A I$ é a correção devido à incerteza associada ao aumento da lente do projetor de perfil.

Aplicando a lei da propagação de incertezas no modelo matemático apresentado pela Eq. (3.10), estima-se a incerteza padrão combinada u_c , com nível de abrangência de 68 %. Observe a Eq. (3.11).

$$u_c^2(L) = \left(\frac{\partial L}{\partial \bar{L}}\right)^2 \cdot (u_{\bar{L}})^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot (u_{\Delta R})^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta I}\right)^2 \cdot (u_{\Delta I})^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta Al}\right)^2 \cdot (u_{\Delta Al})^2 \quad (3.11)$$

Na Tabela 3.4 se encontram as informações equivalentes à cada uma das grandezas de influência do modelo matemático da incerteza de medição de dimensões lineares do projetor de perfil.

O procedimento completo do cálculo da incerteza de medição associada a cada um dos mensurandos se encontra no Apêndice B. O cálculo foi efetuado utilizando as planilhas do Excel desenvolvidas por Moraes (2011).

Tabela 3.4 - Informações para cálculo da incerteza padrão combinada em medições lineares com projetor de perfil.

Grandeza de influência	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade	Coef. de sensibilidade
$\bar{L}$	Normal	n -1, onde n é o número de leituras realizadas	1
ΔR	Retangular	∞	1
ΔC	Normal	Definido pelo valor de k apresentado no certificado de calibração	1
ΔAl	Normal	∞	1

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados obtidos. Para tanto o mesmo foi dividido em duas etapas, que são: resultados do controle dimensional e geométrico dos corpos de prova e a discussão dos resultados.

4.1 Resultados do controle dimensional e geométrico dos corpos de prova

4.1.1 Identificação das dimensões, tolerâncias dimensionais e tolerâncias geométricas.

Nas Tabelas 4.1, 4.2 e 4.3 se encontram todos os mensurandos dos corpos de prova 1, 2 e 3, respectivamente, o valor nominal da dimensão, o tipo de tolerância que ela possui e o valor da mesma. Observe que todos os mensurandos foram numerados. As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 mostram as indicações dos mensurandos nos desenhos técnicos dos corpos de prova 1, 2 e 3, respectivamente,

Tabela 4.1 - Dimensões e tolerâncias do corpo de prova 1.

Mensurando	Característica	Valor nominal	Tipo de tolerância	Tolerância
1	Diâmetro do furo na superfície superior	17,2 mm	—	—
2	Profundidade do furo	15 mm	—	—
3	Ângulo do cone	20°	—	—

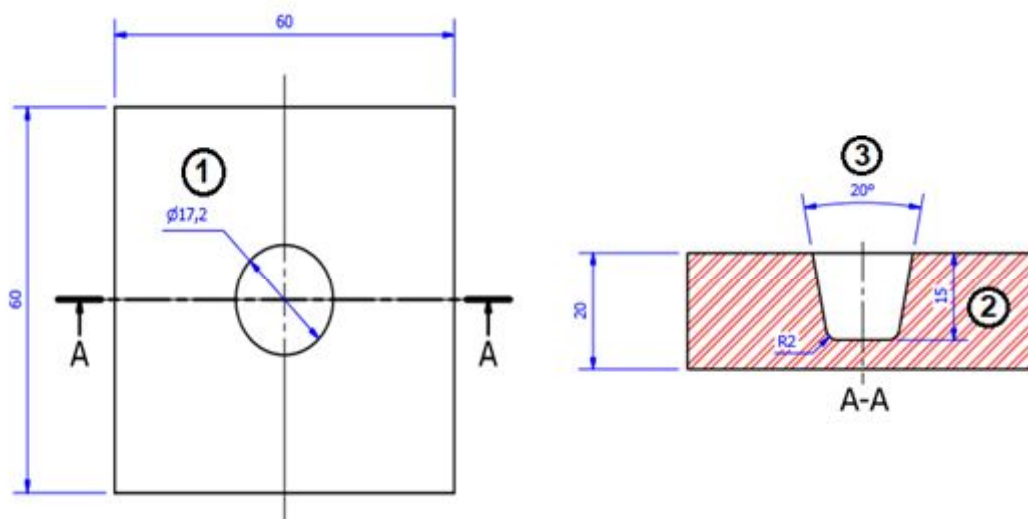


Figura 4.1 - Indicação dos mensurandos no desenho técnico do corpo de prova 1.

Tabela 4.2 - Dimensões e tolerâncias do corpo de prova 2.

Mensurando	Característica	Valor nominal	Tipo de tolerância	Tolerância
4	Diâmetro do furo	17,5 mm	—	—
5	Profundidade do furo	16 mm	—	—
6	Ângulo do cone	20°	—	—
7	Faces Laterais	—	Paralelismo	200 µm

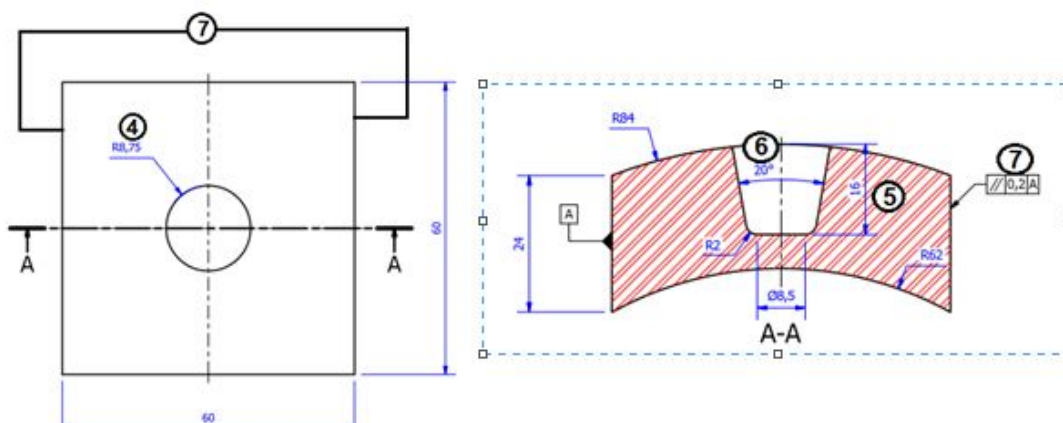
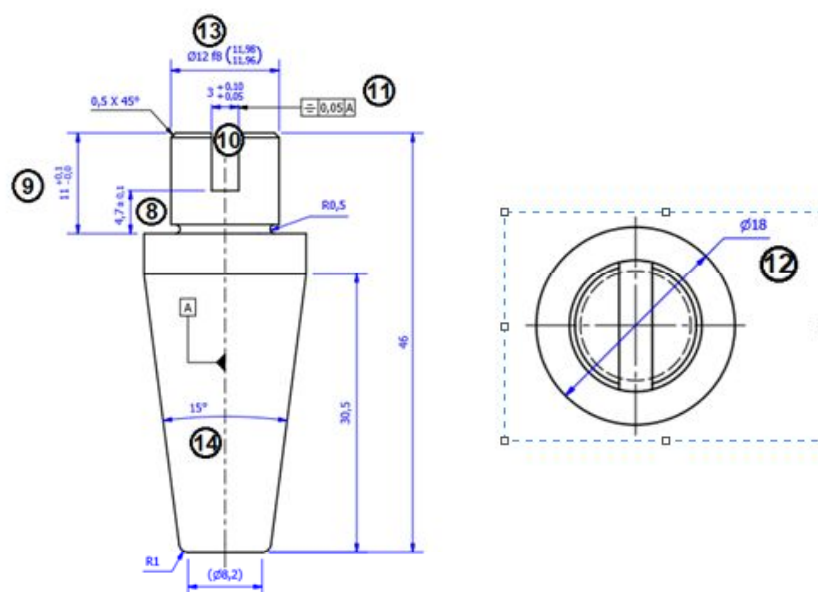


Figura 4.2 - Indicação dos mensurandos no desenho técnico do corpo de prova 2.

Tabela 4.3 - Dimensões e tolerâncias do corpo de prova 3.

Mensurando	Característica	Valor nominal	Tipo de tolerância	Tolerância
8	Distância entre rasgo de encaixe e corpo do pino	4,7 mm	Dimensional	$\pm 100 \mu\text{m}$
9	Distância entre parte superior do encaixe e corpo do pino	11 mm	Dimensional	$100 \mu\text{m}$
10	Distância faces internas do rasgo de encaixe	3 mm	Dimensional	$100 \mu\text{m}$ $50 \mu\text{m}$
11	Faces interna do rasgo de encaixe	—	Simetria	$50 \mu\text{m}$
12	Diâmetro do encaixe	12 mm	Dimensional	$-40 \mu\text{m}$ $-20 \mu\text{m}$
13	Diâmetro da parte cilíndrica do pino	18 mm	—	—
14	Ângulo do cone	15°	—	—

**Figura 4.3** - Indicação dos mensurandos no desenho técnico do corpo de prova 3.

A partir das Tabelas 4.1 a 4.3 se conclui que as dimensões verificadas reuniam diâmetro de furos e de eixos, distância e ângulo de cone. Dentre as tolerâncias geométricas foram verificadas duas tolerâncias de orientação, quais sejam paralelismo e simetria.

A Tabela 4.4 mostra os valores de resolução requeridos para a medição de cada um dos mensurandos avaliados. É importante ressaltar que nesta etapa, aplicou-se a Eq. (3.1) apenas para os mensurandos que possuíam indicação de tolerâncias dimensionais ou geométricas.

Tabela 4.4 - Resolução do sistema de medição exigida.

Mensurando	Tolerância	Resolução exigida
7	200 μm	20 μm
8	$\pm 100 \mu\text{m}$	20 μm
9	100 μm	10 μm
10	100 μm 50 μm	5 μm
11	50 μm	5 μm
12	40 μm 20 μm	2 μm

4.1.2 Resultados das medições com a MMC.

Nas Tabelas 4.5 a 4.9 são apresentados os valores indicados pela máquina junto da média, do desvio padrão (68 %) e dos valores de incerteza expandida obtidos em cada caso (95 %), além dos graus de liberdade e do fator de abrangência calculado. Os mensurandos foram agrupados de acordo com sua geometria.

Observando os dados da Tabela 4.5 é possível verificar que a repetibilidade das medições foi suficiente para obter bons resultados em todos os 4 mensurandos, entretanto, percebe-se que no mensurando 4 o desvio padrão foi consideravelmente maior, quando comparado ao desvio padrão dos outros mensurandos. Apesar da incerteza expandida associada a medição não ter sido muito superior, pode-se justificar que o erro de medição foi maior devido à curvatura da peça e sua difícil fixação.

Tabela 4.5 - Valores obtidos para todos os mensurandos “diâmetro”.

	Mensurando 1	Mensurando 4	Mensurando 12	Mensurando 13
L1 (mm)	17,018	17,491	11,978	17,977
L2 (mm)	17,016	17,496	11,979	17,977
L3 (mm)	17,018	17,496	11,977	17,977
L4 (mm)	17,016	17,488	11,977	17,977
L5 (mm)	17,016	17,498	11,978	17,974
Média (mm)	17,017	17,494	11,978	17,976
s (68 %) (mm)	0,001	0,004	0,001	0,001
U (mm)	0,004	0,005	0,004	0,004
k	2,26	2,23	2,26	2,26
v_{eff}	9,19	10,17	9,22	9,19

Tabela 4.6 - Valores obtidos para os mensurandos “profundidade”.

	Mensurando 2	Mensurando 5
L1 (mm)	14,594	16,048
L2 (mm)	14,601	16,053
L3 (mm)	14,597	16,062
L4 (mm)	14,603	16,058
L5 (mm)	14,596	16,055
Média (mm)	14,598	16,055
s (68 %) (mm)	0,004	0,005
U (mm)	0,005	0,006
k	2,23	2,31
v_{eff}	10,16	8,39

De acordo com os resultados apresentados na Tabela 4.6 é possível verificar que a repetibilidade das medições foi suficiente para obter bons resultados. Justifica-

se o fato do desvio padrão da segunda profundidade ser maior devido à curvatura da peça. Entretanto, apesar disso, em ambos os casos, os valores foram bem similares.

Analisando a Tabela 4.7 conclui-se que os valores obtidos para o mensurando 8 tiveram menor variabilidade com relação à média. Já os mensurando 9 e 10 apresentaram maiores desvios padrão e por isso pode-se dizer que a repetibilidade das medições não foi suficiente para obter ótimos resultados. Justifica-se o fato dos desvios padrão encontrados serem maiores devido à complexidade das medições dos mensurandos e ao fato da peça se encontrar levemente desgastada nas regiões utilizadas para realizar os procedimentos de medição dos mesmos, o que pode justificar, parcialmente, o fato de se ter obtido um desvio padrão duas vezes maior no mensurando 10.

Tabela 4.7 - Valores obtidos para todos os mensurandos “distância”.

	Mensurando 8	Mensurando 9	Mensurando 10
L1 (mm)	4,665	11,067	3,387
L2 (mm)	4,665	11,080	3,396
L3 (mm)	4,666	11,075	3,400
L4 (mm)	4,662	11,073	3,395
L5 (mm)	4,670	11,072	3,388
Média (mm)	4,666	11,073	3,393
s (68 %) (mm)	0,003	0,005	0,006
U (mm)	0,005	0,006	0,007
k	2,20	2,31	2,36
V_{eff}	11,89	8,37	7,11

De acordo com os valores da Tabela 4.8 é possível verificar que os fatores de abrangência e os graus de liberdade efetivos foram semelhantes para todos os mensurandos angulares. Além disso, se chegou a desvios padrão e incertezas relativamente baixas comparados aos valores da média, resultando em uma repetibilidade boa.

Tabela 4.8 - Valores obtidos para todos os mensurandos “ângulo”.

	Mensurando 3	Mensurando 4	Mensurando 12
L1 (mm)	19°59'01''	20°04'07''	14°57'47''
L2 (mm)	20°01'16''	20°03'38''	14°58'49''
L3 (mm)	19°57'46''	20°01'13''	14°58'33''
L4 (mm)	20°00'59''	20°04'49''	14°59'01''
L5 (mm)	19°57'01''	20°04'26''	14°59'27''
Média (mm)	19°59'13''	20°03'39''	14°58'43''
s (68 %) (mm)	0°01'53''	0°01'25''	0°00'37''
U (mm)	0°04'41''	0°3'31''	0°01'32''
k	4,30	4,30	4,30
v_{eff}	2,00	2,00	2,00

Observando os valores da Tabela 4.9 é possível verificar que o fator de abrangência e o grau de liberdade efetivo foram semelhantes quando comparados aos valores encontrados para os outros mensurandos. Além disso, se chegou em uma repetibilidade boa.

Tabela 4.9 - Valores obtidos para o mensurando “paralelismo”.

	Mensurando 7
L1 (mm)	0,170
L2 (mm)	0,169
L3 (mm)	0,163
L4 (mm)	0,178
L5 (mm)	0,174
Média (mm)	0,171 mm
s (68 %) (mm)	0,006 mm
U (mm)	0,007 mm
k	2,36
v_{eff}	7,10

4.1.3 Comparação entre os valores medidos e os de projeto.

O objetivo principal ao realizar o controle dimensional e geométrico de peças é verificar se as peças obedecem às tolerâncias indicadas em projeto. Na Tabela 4.10, são apresentados os valores medidos e os valores de projeto. A partir destes dados é possível concluir quais mensurando foram corretamente fabricados, ou seja, se encontraram dentro dos valores aceitáveis.

Tabela 4.10 - Comparação dos valores medidos e os valores teóricos.

Mensurando	Tolerância	Valor nominal	Resultado da medição	
7	200 μm	—	0,171 $\pm$ 0,007 mm	OK
8	$\pm$ 100 μm	4,7 mm	4,666 $\pm$ 0,005 mm	OK
9	100 μm	11 mm	11,073 $\pm$ 0,006 mm	OK
10	100 μm 50 μm	3 mm	3,393 $\pm$ 0,007 mm	X
12	-40 μm -20 μm	12 mm	11,978 $\pm$ 0,004 mm	OK

É possível observar que dos 5 mensurandos que possuíam tolerâncias, sejam dimensionais ou geométricas, medidos com a MMC, 4 se encontraram dentro dos limites estabelecidos em projeto. Entretanto, o mensurando 10, teve resultados de medição que não se enquadraram nos valores aceitáveis.

4.1.4 Resultados das medições com o projetor de perfil.

Os valores das leituras das distâncias entre as duas faces e o diâmetro, pressuposto do cálculo do desvio de simetria Eq. (3.2) se encontram na Tabela 4.11. Posteriormente, na Tabela 4.12 se encontram os desvios pressuposto do valor médio, desvio padrão, incerteza expandida, fator de abrangência e graus de liberdade efetivos.

Tabela 4.11 - Leituras no projetor de perfil para mensurando 11.

L_{esq} (mm)	L_{dir} (mm)	D=L_{esq} – L_{dir} (mm)
3,885	4,312	0,427
3,889	4,321	0,432
3,888	4,325	0,437
3,880	4,321	0,441
3,877	4,317	0,440

Tabela 4.12 - Resultados obtidos para mensurando 11.

	Desvio de Simetria
D1 (mm)	0,427
D2 (mm)	0,432
D3 (mm)	0,437
D4 (mm)	0,441
D5 (mm)	0,440
Média (mm)	0,435
s (68 %) (mm)	0,006
U (mm)	0,007
k	2,78
v_{eff}	4,00

Observando os valores encontrados para L_{esq} e L_{dir} já se concluiu que a peça não respeitava a tolerância de simetria, tendo em vista que a mesma especificava um limite máximo de 0,05 mm e a diferença entre os valores eram muito elevados (essa diferença é visivelmente perceptível ao se observar a Fig. (3.10). O desvio padrão das medidas foi semelhante ao encontrado utilizando a MMC, em outras dimensões, então se concluiu que a repetibilidade das medições foi suficiente para obter bons resultados. Por meio da média se concluiu, portanto, que o mensurando 11 se encontra fora da tolerância de projeto.

4.2 Discussão dos resultados

Os valores discrepantes podem ser justificados por possíveis erros de leitura dos desenhos técnicos dos corpos de prova, a utilização de processos de fabricação inviáveis para a obtenção das tolerâncias requeridas, parâmetros de fabricação incorretos, desgaste dos corpos de prova até a realização do controle dimensional e geométrico dos mesmos, dentre outros. Obviamente, ao longo de todas as medições, foram tomados cuidados para minimizar a ocorrência de erros de medição que influenciassem consideravelmente nos resultados medidos.

Tratando-se dos mensurandos 1 e 2, é possível dizer que, apesar de não possuírem tolerâncias dimensionais, os valores encontrados durante a realização das medições estão diferentes dos valores de projetos, o que, provavelmente, está associado diretamente à fabricação do furo cônico do corpo de prova 1, tendo em vista que tanto o diâmetro superior do furo quanto a profundidade furo tiveram valores medidos muito discrepantes do que se era requerido em projeto. Agora, o mensurando 10, também apresenta um erro, quando comparado ao valor nominal. Esse erro deve estar associado ao fato de se tratar de uma distância muito pequena entre as faces internas do rasgo, dificultando a fabricação da mesma com alta exatidão e dentro da tolerância.

No que tange ao mensurando 11, o fato das duas faces se encontrarem tão assimétricas pode ser justificado pelo fato de serem muito pequenas e de difícil a fabricação. Além disso, as bordas das superfícies utilizadas durante a medição apresentavam desvios de retitude e de paralelismo significativos, o que pode ter interferido consideravelmente nos resultados obtidos.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas de forma sucinta as principais e mais relevantes conclusões obtidas por meio deste trabalho:

1. Dos sete mensurandos avaliados com a MMC, três não atenderam a tolerância de projeto (casos dos mensurando 1, 2 e 10);
2. O desvio de simetria medido com o projetor de perfil (mensurando 11) excedeu a tolerância de projeto;
3. Os desvios entre os valores medidos para os mensurandos 1, 2 10 e 11 e os valores de projeto foram consideravelmente elevados. Desta forma é possível concluir que os processos de fabricação dos corpos de prova não foram adequados, ou erros de interpretação dos desenhos técnicos de projeto podem ter acontecido. Além disso, os corpos de prova apresentavam regiões com pintura e defeitos devido à manipulação inadequada dos mesmos que podem comprometer os resultados das medições;
4. Apesar de alguns resultados não serem satisfatórios quando comparados aos valores de projeto, a repetibilidade dos mesmos foi adequada, assumindo na pior condição $\pm 0,012$ mm para uma confiabilidade de 95,45 % (mensurandos 7, 10 e 11);
5. Sendo assim, os mensurandos que apresentaram maiores valores de incerteza expandida associada às suas medições foram os mensurandos 7, 10 e 11, sendo que o valor da incerteza expandida para os três mensurandos foi de 0,007 mm.

CAPÍTULO 6

TRABALHOS FUTUROS

Ao finalizar a pesquisa as seguintes propostas de trabalhos futuros são formuladas:

1. Efetuar a medição do desvio de simetria na MMC;
2. Verificar se os processos de fabricação dos corpos de prova avaliados são adequados para a exatidão de fabricação exigida e estudá-los.

CAPÍTULO 7

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR NM ISO 1: **Temperatura Padrão de Referência para Medições Industriais de Comprimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 2 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR ISO 4287. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2002. 18 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR ISO 4288. **Especificações geométricas do produto (GPS) – Rugosidade: método do perfil – Termos, definições e parâmetros de rugosidade**. Rio de Janeiro: ABNT, 2008. 10 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR ISO 6158. Sistemas de tolerâncias e ajustes**. Rio de Janeiro: ABNT, 1995. 79 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). **NBR ISO 6409. Tolerâncias geométricas - Tolerâncias de forma, orientação, posição e batimento - Generalidades, símbolos, definições e indicações em desenho**. Rio de Janeiro: ABNT, 1997. 19 p.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas). NBR ISO/IEC 17025. **Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração**, 2ª Ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2005. 31 p.

AWS - AMERICAN WELDING SOCIETY. **Welding Handbook**. 8. ed. Miami, 1991. v. 2.

BIPM (Bureau International des Poids et Measures). 2008. **Evaluation of Measurement Data – Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement**. Geneva Switzerland. 2008. 134 p.

BLAKEMORE, G. R. Friction Stud Welding in Hazardous Areas. **Welding & Metal Fabrication**, p. 428-430, Nov./Dec. 1993.

FRANCO, S. D. **Reparo por Soldagem no Estado Sólido**. Uberlândia, 2017. Relatório Técnico Parcial Interno, LTAD.

GUIMARÃES, Vagner Alves. **Controle Dimensional e Geométrico: Uma Introdução à Metrologia Industrial**. Passo Fundo: Universidade de Passo Fundo, 1998. 145 p.

HOCKEN, R.J.; RAJA, J.; UPPLIAPPAN, B. **Sampling Issues in Coordinate Metrology**. Manufacturing Review. v. 6. p. 282-294. 1993.

INMETRO. **Avaliação de dados de medição - Guia para a expressão de incerteza de medição GUM**. 2012. 126 p.

INMETRO. **Vocabulário Internacional de Metrologia: Conceitos Fundamentais e Gerais e Termos Associados**. Rio de Janeiro: Luso-brasileira, 2012. 95 p.

Disponível em: <http://inmetro.gov.br/inovacao/publicacoes/vim_2012.pdf>. Acesso em: 29 abr. 2017.

MAY, F.P. **Incerteza na Medição por Coordenadas com Ênfase na Contribuição da Forma da Peça e da Estratégia de Medição**. 2007. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

MEYER, A. **Friction Hydro Pillar Processing**. 2004. 123 p. Dr.-Ing. Thesis an der Technischen Universität Braunschweig, Hamburg, 2004.

MORAES, M.A.F., **Desenvolvimento de planilhas eletrônica para calcular incerteza de medição**. 2011. Trabalho de Conclusão de Curso. (Graduação em Engenharia mecatrônica) - Universidade Federal de Uberlândia.

PHILLIPS, S.D. Performance Evaluation. In: HOCKEN, R.J.; PEREIRA, P.H. **Coordinate Measuring Machines and Systems**. 2.ed. New York: CRC Press, 2011. 592 p.

PIRES, R. R., **Effects of the Geometrie, of the Axial Force and of the Rotation in the Friction Welding Repair**. 2007. 67 f. Master Dissertation in Mechanical Engineering, Federal University of Uberlândia, Uberlândia - MG.

PIRES, R. R., **Desenhos técnicos dos corpos de provas usados em reparo por atrito**. 2016, Universidade Federal de Uberlândia – LTAD.

RODRIGUES, F. B. **Desenvolvimento, Projeto e Construção de Sistemas e Acessórios Mecânicos Destinados à Automação de um Cilindro de Reparo por Atrito**. 2016. 191 f. Dissertação de Mestrado - Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

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

Apêndice A1

	Data: 04/12/2017	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Guilherme B. Rodrigues	8 páginas
Procedimento de Medição do corpo de prova 1 - PME 01		

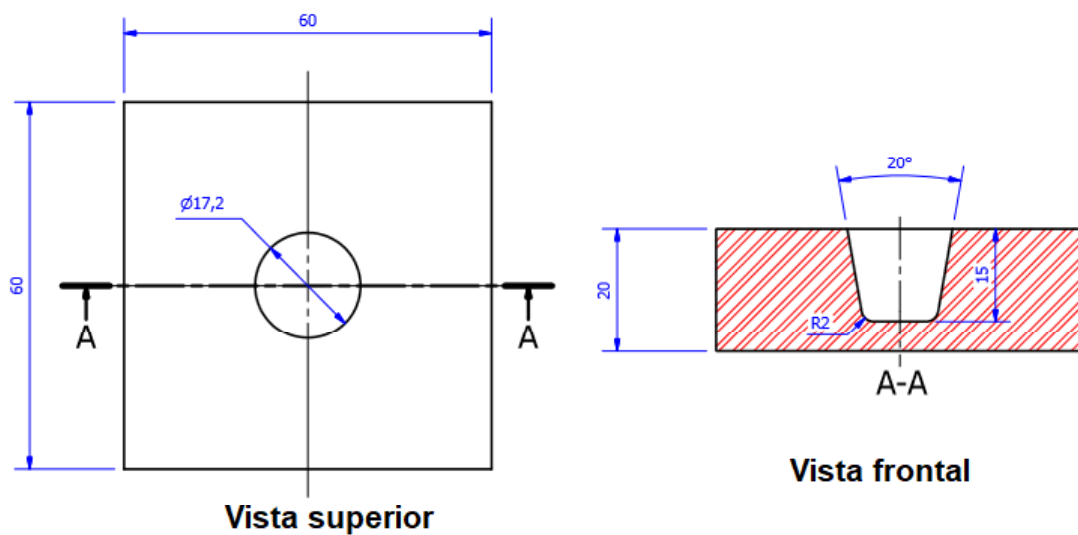
Este documento apresenta o roteiro geral para o controle dimensional e geométrico do corpo de prova 1 (bloco metal base – junta 16 mm) com MMC.

1. Objeto

Verificação das cotas especificadas a seguir:

- Diâmetro do furo na superfície superior da peça;
- Profundidade do furo;
- Ângulo do cone;

Na figura abaixo se encontra o desenho da peça 1.

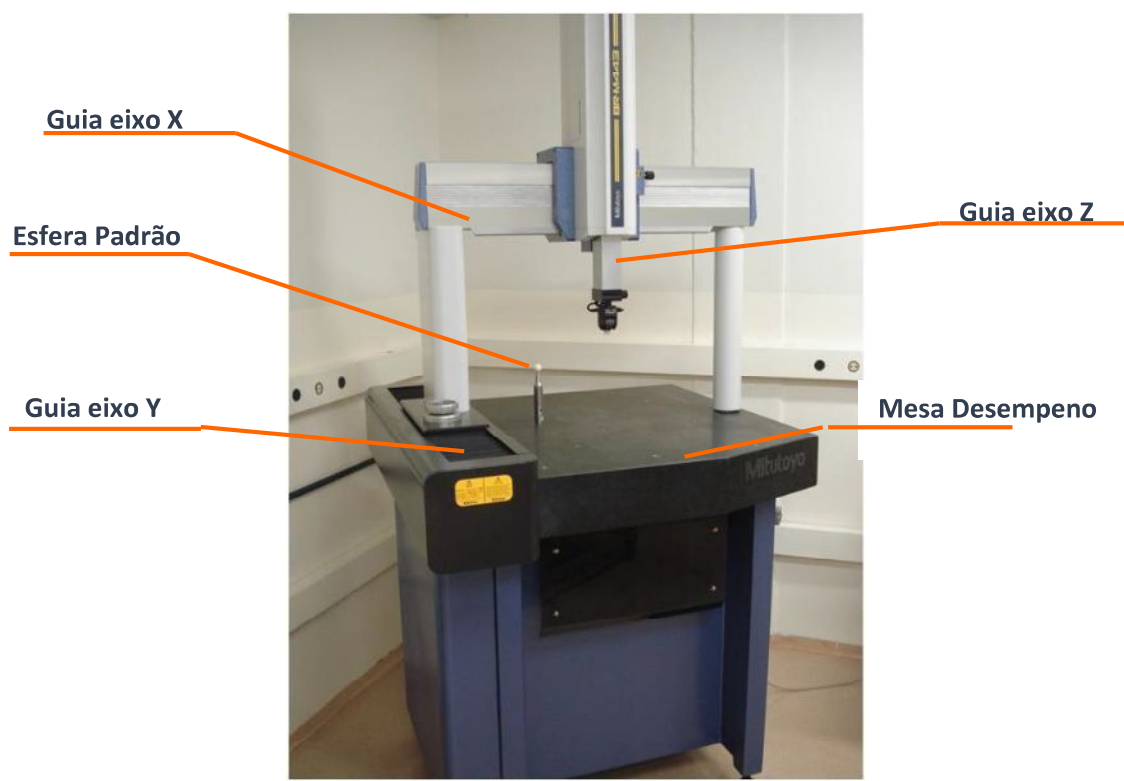


2. Materiais utilizados

- Flanela;
- Luvas;
- Álcool Etílico Hidratado 96 ou Álcool em Gel 65 %;
- Máquina de medir por coordenadas;
- Ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro e comprimento da haste de 20 mm.

3. MMC

Fazer a identificação completa da MMC. Devem ser registradas as seguintes informações: tipo de máquina, fabricante, modelo, resolução, faixa de indicação para cada eixo, tipo de ponta e diâmetro da esfera.



4. Referências Normativas

NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, 2005.

NBR NM-ISO 1 – Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento, 1997.

Mitutoyo, Manual do Usuário da MMC modelo BR –M443. 41p.

Mitutoyo, GEOPAK-WIN, Programa de medição geométrica 3D para Máquinas de Medir Coordenadas. 140p.

5. Preparação da MMC:

5.1 Realizar a limpeza da mesa de medição da máquina com um pano embebido em álcool.

5.2 Efetuar a limpeza da peça a ser medida.

5.3 Ligar o sistema de condicionamento de ar instalado na sala da MMC e manter a MMC e a peça expostas por doze horas à temperatura de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$.

5.4 Ligar o ar comprimido, verificar se a pressão de alimentação está entre 0,5 e 0,9 Mpa.

5.5 Verificar a indicação do manômetro da unidade reguladora de ar localizada na parte frontal da máquina. O mesmo deve indicar 0,4 Mpa.

5.6 Posicionamento da peça a ser medida. Posicione a peça a ser medida na mesa de medição e fixe-a se necessário. Para tanto utilize o kit de fixação. De preferência posicione a peça no centro da mesa de medição da máquina. Ao utilizar o kit de fixação certifique-se de que os pontos de medição desejados não estejam ocupados pela fixação. Durante a fixação os parafusos devem ser apertados manualmente, o torque máximo para as inserções roscadas é de 9,8 Nm. Deve-se verificar se a mesma foi devidamente fixada.

5.7 Escolher a ponta de medição ou apalpador e fixar a mesma no cabeçote. A colocação ou remoção do apalpador deverá ser efetuada sempre com o eixo Z travado. Rosquear a ponta de medição no apalpador e aplicar um pequeno torque com a chave correspondente. Fixar o apalpador no eixo Z, encaixando conforme geometrias gravadas no mesmo e no eixo.

5.8 Ligar o computador, abrir o programa MCosmos e executar a inicialização do sistema mecânico seguindo as instruções exibidas na tela do programa. Antes de movimentar os eixos da MMC certificar-se de que os mesmos não estão travados. Cada eixo deve ser deslocado para o início do curso. Assim, movimente o eixo X para a esquerda, o eixo Y para si e o eixo Z para baixo.

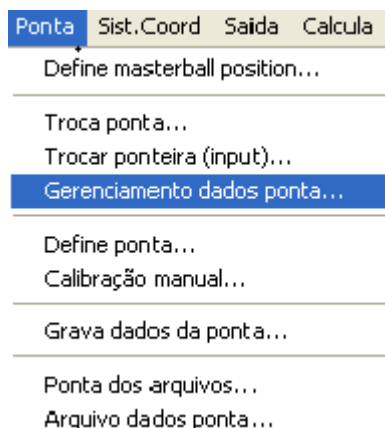
5.9 Criar um programa de medição e atribuída um nome ao mesmo.



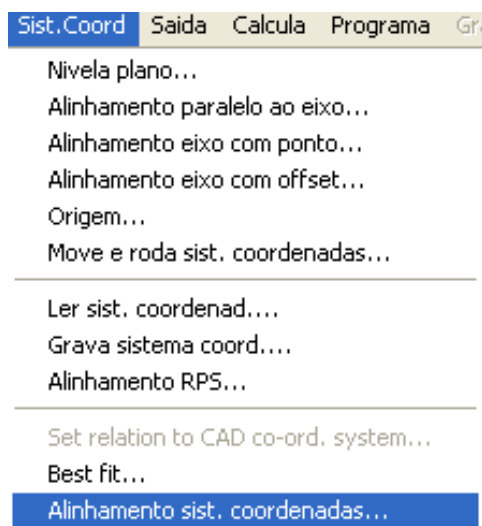
5.10 Utilize a opção simples ou ensina para abrir o programa criado e executar a medição.



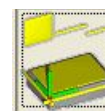
5.11 Criar a ponta e efetuar a calibração da mesma utilizando a esfera padrão e o ícone correspondente no menu do programa, opções Ponta e Gerenciamento dados ponta.



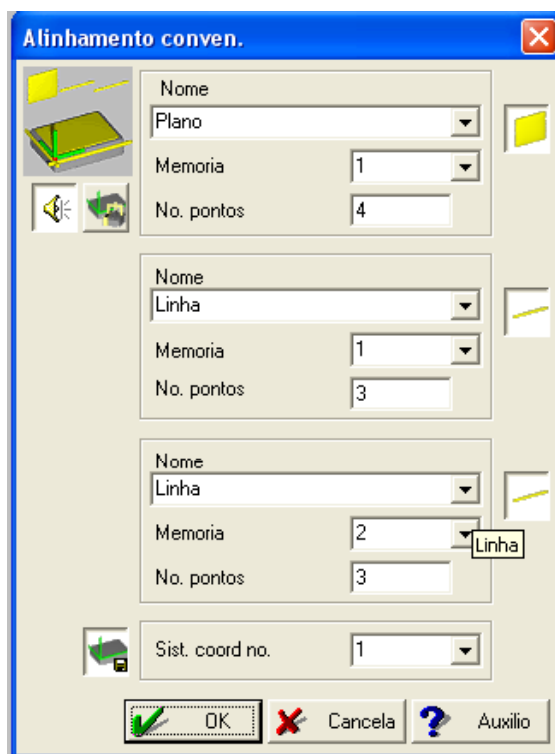
5.12 Efetuar o alinhamento da peça utilizando o ícone correspondente no menu do programa, opções Sist. Coordenadas e alinhamento do sistema de coordenadas.



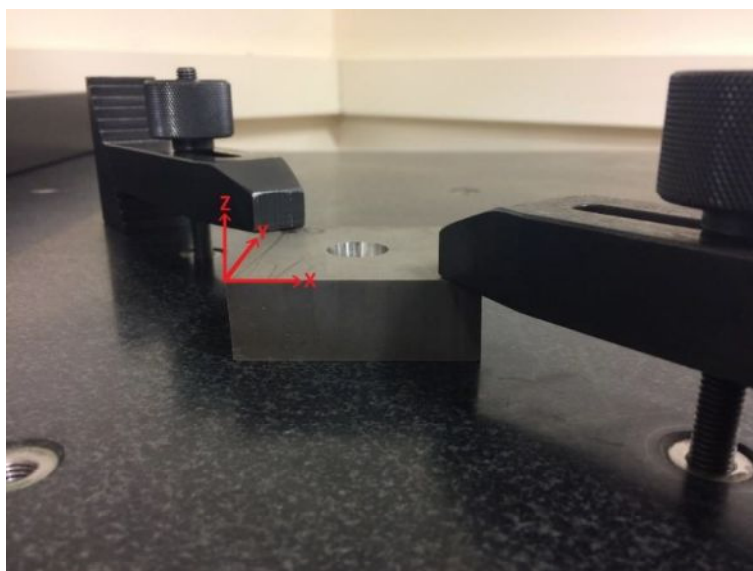
5.13 Ao clicar na opção alinhamento do sistema de coordenadas, deve-se selecionar a opção mais apropriada para definição do mesmo. No caso, utiliza-se a opção Plano/linha/linha.



5.14 Feita a seleção da opção do item anterior, define-se uma quantidade de 4 pontos a serem apalpados no plano e 3 pontos nas linhas que definirão as direções dos eixos X e Y.

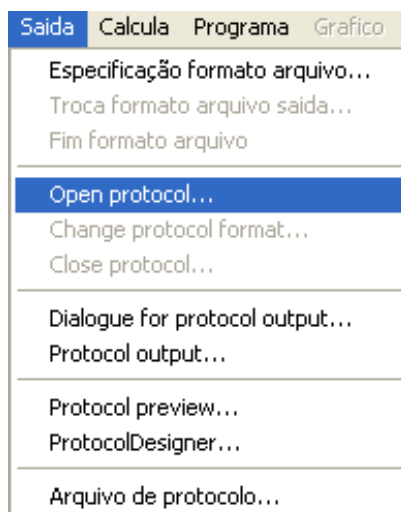


5.15 Posicionamento da origem do sistema de coordenadas como na figura abaixo.



5.16 Após efetuar o alinhamento posicione a ponta do apalpador perto do local onde deve estar a origem do sistema de coordenadas.

5.17 Se necessário, ativar a opção Saída e *open* protocolo para definir o tipo de relatório a ser gerado durante a medição.



5.18 Identificar as geometrias no menu superior, de acordo com os ícones apresentados na tabela a seguir.

Geometria	Ícone
Ponto	
Círculo	
Plano	
Cone	
Distância	
Intersecção	

5.19 Em cada caso, definir o número de pontos a serem apalpados.

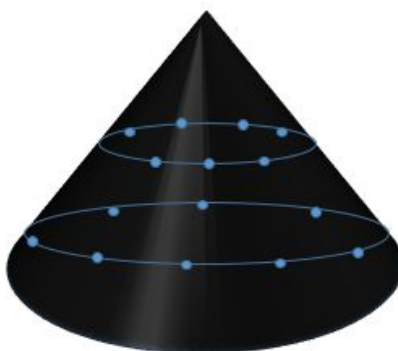
5.20 Ativar a opção repete. 

5.21 Efetue cinco ciclos de medição. Para tanto distribua os pontos de forma adequada na superfície apalpada.

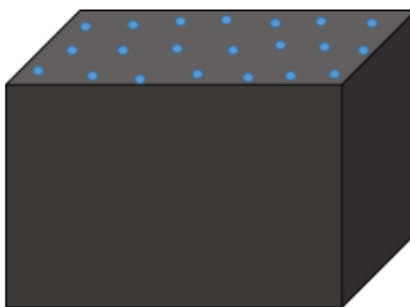
6. Medições:

6.1 *Diâmetro do furo na superfície superior da peça:* Na medição do diâmetro interno utiliza as opções “plano ” e “cone”. Primeiramente apalpam-se 21 pontos na face superior da peça, de forma a determinar um plano. Após isso, mede-se o furo cônico, usando a opção “cone” e apalpando-se o mesmo em 15 pontos que são

distribuídos em dois círculos em alturas diferentes do cone, de forma a determinar sua geometria substituta. Posteriormente, utiliza-se a opção “círculo” seguida pela opção “intersecção entre plano e cone” e assim, pelo método dos mínimos quadrados, determina-se o diâmetro do interno do furo na face superior da peça através do plano e cone, anteriormente determinados. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes. A figura abaixo mostra como foram apalpados os pontos no cone.



6.2 *Profundidade do furo:* Utiliza as opções “plano” e “ponto”. Primeiramente apalpam-se 21 pontos na face superior da peça, de forma a determinar um plano, e um ponto na superfície que se encontra no fundo do furo cônico. Após isso, utiliza-se a opção “distância” que calcula, pelo método dos mínimos quadrados, a distância perpendicular entre o plano e o ponto, anteriormente apalpados. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes. A figura abaixo mostra esquematicamente como foram apalpados os 21 pontos na face superior da peça.



6.3 *Ângulo do cone:* Utiliza apenas a opção “cone”. Apalpam-se 15 pontos que são distribuídos em dois círculos em alturas diferentes do cone, de forma a determinar sua geometria substituta. O valor do ângulo do cone é mostrado na tela do *software* assim que se finaliza a medição do cone, indicado pela letra “A”. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes.

7. Após a medição:

- 7.1 Registre os valores de cada mensurando manualmente.
- 7.2 Fechar o programa.
- 7.3 Desligar o ar, retirar a ponta de medição e retirar a peça. Para remover o apalpador, inicialmente trave os eixos da máquina em uma posição que facilite a operação. Retire o apalpador e a ponta de medição, removendo-a do apalpador.
- 7.4 A ponta de medição deve ser guardada no seu respectivo estojo, os dispositivos de fixação na caixa e a peça deve ser lubrificada, caso necessário, para evitar a oxidação da mesma.

8. Tratamento estatístico:

Em qualquer procedimento de medição se faz necessário a aplicação de um tratamento estatístico a fim de possibilitar uma melhor interpretação dos resultados das medições.

Definida a estratégia e realizando os 5 ciclos de medição de cada mensurando, determinaram-se a média aritmética ($\bar{x}$) e o desvio padrão (s) das medidas, dados pelas Eqs. 1 e 2, respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Onde, n indica o número total de ciclos de medições.

9. Estimativa da incerteza de medição:

Estimar a incerteza de medição conforme PIM (Apêndice B).

Apêndice A2

	Data: 04/12/2017	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Guilherme B. Rodrigues	8 páginas
Procedimento de Medição do corpo de prova 2 - PME 02		

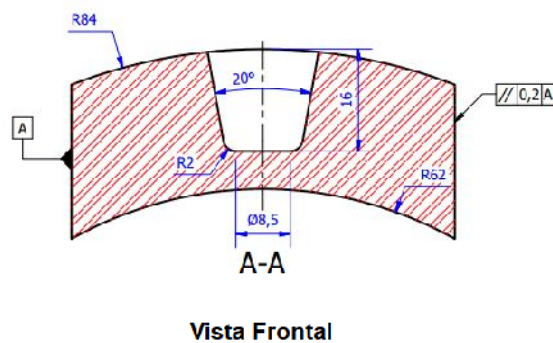
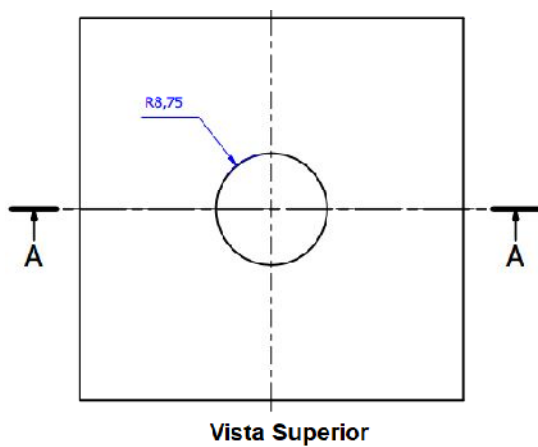
Este documento apresenta o roteiro geral para o controle dimensional e geométrico do corpo de prova 2 (bloco metal base tubo junta soldada) com MMC.

1. Objeto

Verificação das cotas especificadas a seguir:

- Raio do furo na superfície superior;
- Profundidade do furo;
- Ângulo do cone;
- Faces laterais.

Na figura abaixo se encontra o desenho da peça 2.

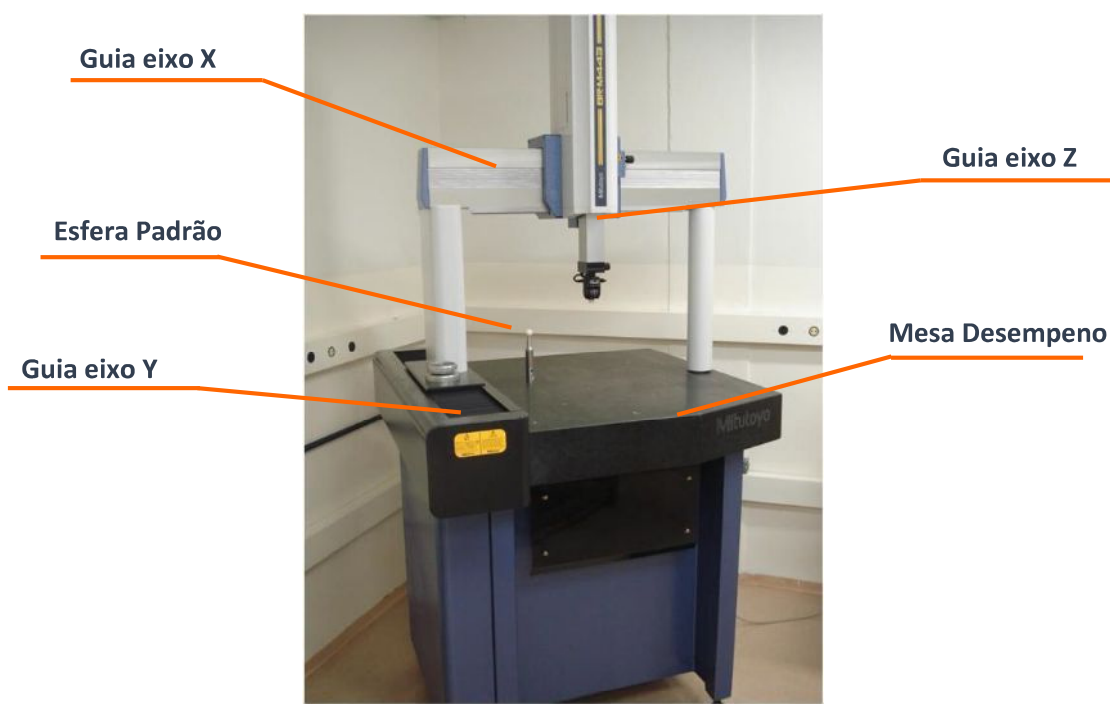


2. Materiais utilizados

- Flanela;
- Luvas;
- Álcool Etilico Hidratado 96 ou Álcool em Gel 65 %;
- Máquina de medir por coordenadas;
- Ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro e comprimento da haste de 20 mm.

3. MMC

Fazer a identificação completa da MMC. Devem ser registradas as seguintes informações: tipo de máquina, fabricante, modelo, resolução, faixa de indicação para cada eixo, tipo de ponta e diâmetro da esfera.



4. Referências Normativas

NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, 2005.

NBR NM-ISO 1 – Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento, 1997.

Mitutoyo, Manual do Usuário da MMC modelo BR –M443. 41p.

Mitutoyo, GEOPAK-WIN, Programa de medição geométrica 3D para Máquinas de Medir Coordenadas. 140p.

5. Preparação da MMC:

5.1 Realizar a limpeza da mesa de medição da máquina com um pano embebido em álcool.

5.2 Efetuar a limpeza da peça a ser medida.

5.3 Ligar o sistema de condicionamento de ar instalado na sala da MMC e manter a MMC e a peça expostas por doze horas à temperatura de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$.

5.4 Ligar o ar comprimido, verificar se a pressão de alimentação está entre 0,5 e 0,9 Mpa.

5.5 Verificar a indicação do manômetro da unidade reguladora de ar localizada na parte frontal da máquina. O mesmo deve indicar 0,4 Mpa.

5.6 Posicionamento da peça a ser medida. Posicione a peça a ser medida na mesa de medição e fixe-a se necessário. Para tanto utilize o kit de fixação. De preferência posicione a peça no centro da mesa de medição da máquina.

5.7 Ao utilizar o kit de fixação certifique-se de que os pontos de medição desejados não estejam ocupados pela fixação. Durante a fixação os parafusos devem ser apertados manualmente, o torque máximo para as inserções roscadas é de 9,8 Nm. Deve-se verificar se a mesma foi devidamente fixada.

5.8 Escolher a ponta de medição ou apalpador e fixar a mesma no cabeçote. A colocação ou remoção do apalpador deverá ser efetuada sempre com o eixo Z travado. Rosquear a ponta de medição no apalpador e aplicar um pequeno torque com a chave correspondente. Fixar o apalpador no eixo Z, encaixando conforme geometrias gravadas no mesmo e no eixo.

5.9 Ligar o computador, abrir o programa MCosmos e executar a inicialização do sistema mecânico seguindo as instruções exibidas na tela do programa. Antes de movimentar os eixos da MMC certificar-se de que os mesmos não estão travados. Cada eixo deve ser deslocado para o início do curso. Assim, movimente o eixo X para a esquerda, o eixo Y para si e o eixo Z para baixo.

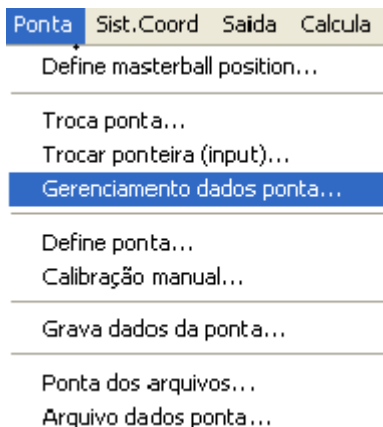
5.10 Criar um programa de medição e atribua um nome ao mesmo.



5.11 Utilize a opção simples ou ensina para abrir o programa criado e executar a medição.



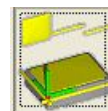
5.12 Criar a ponta e efetuar a calibração da mesma utilizando a esfera padrão e o ícone correspondente no menu do programa, opções Ponta e Gerenciamento dados ponta.



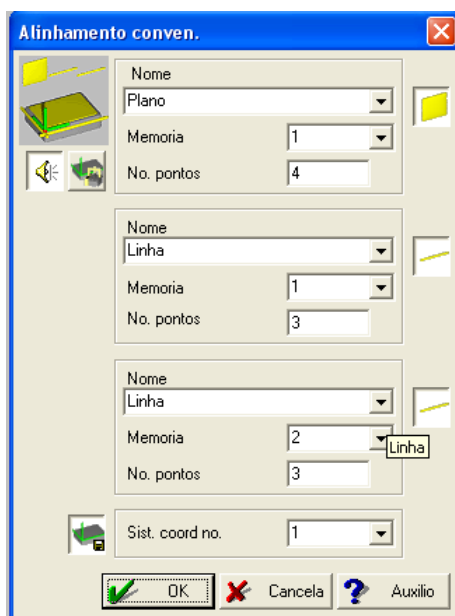
5.13 Efetuar o alinhamento da peça utilizando o ícone correspondente no menu do programa, opções Sist. Coordenadas e alinhamento do sistema de coordenadas.



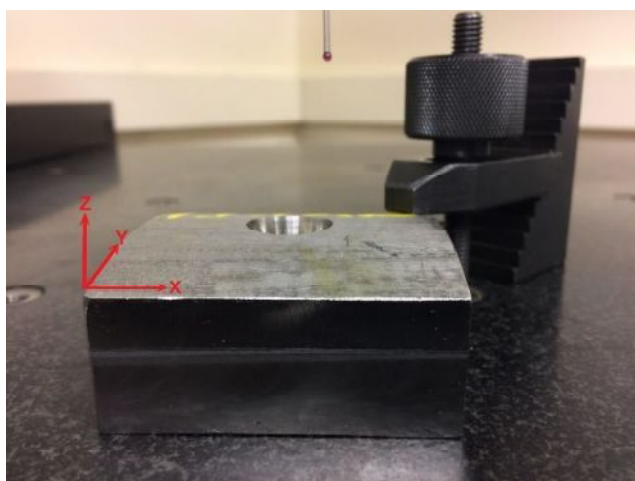
5.14 Ao clicar na opção alinhamento do sistema de coordenadas, deve-se selecionar a opção mais apropriada para definição do mesmo. No caso, utiliza-se a opção Plano/linha/linha.



5.15 Feita a seleção da opção do item anterior, define-se uma quantidade de 4 pontos a serem apalpados no plano e 3 pontos nas linhas que definirão as direções dos eixos X e Y.

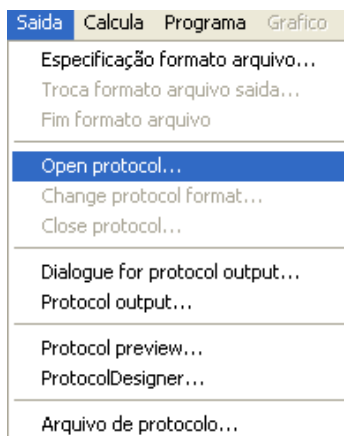


5.16 Posicionamento da origem do sistema de coordenadas como na figura abaixo.



5.17 Após efetuar o alinhamento posicione a ponta do apalpador perto do local onde deve estar a origem do sistema de coordenadas.

5.18 Se necessário, ativar a opção Saída e *open* protocolo para definir o tipo de relatório a ser gerado durante a medição.



5.19 Identificar as geometrias no menu superior, de acordo com os ícones apresentados na tabela a seguir.

Geometria	Ícone
Ponto	
Intersecção	
Plano	
Cone	
Distância	
Círculo	
Paralelismo	

5.20 Em cada caso, definir o número de pontos a serem apalpados.

5.21 Ativar a opção repete.



5.22 Efetue cinco ciclos de medição. Para tanto distribua os pontos de forma adequada na superfície apalpada.

6. Medições:

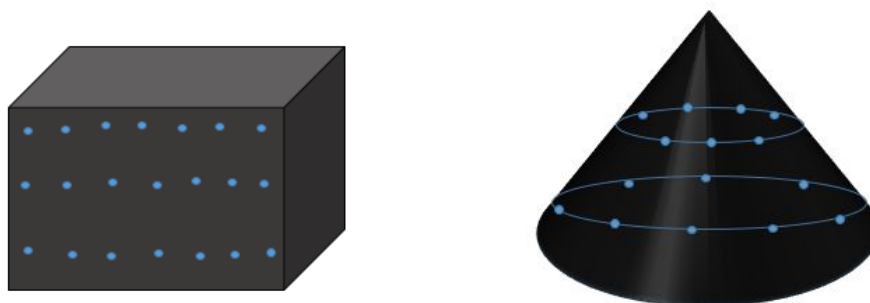
6.1 *Diâmetro do furo na superfície superior da peça:* Na medição do diâmetro interno utiliza as opções “plano ” e “cone”. Primeiramente apalpam-se 9 pontos na face mais superior da peça, de forma a determinar um plano (deve-se ter muito cuidado neste momento, pois a peça apresenta curvatura, portanto, visa-se tocar 9 pontos que se encontram em um mesmo plano o mais superior possível). Após isso, mede-se o furo cônico, usando a opção “cone” e apalpando-se o mesmo em 15 pontos que são distribuídos em dois círculos em alturas diferentes do cone, de forma a determinar sua geometria substituta. Posteriormente, utiliza-se a opção “círculo” seguida pela opção “intersecção entre plano e cone” e assim, pelo método dos mínimos quadrados, determina-se o diâmetro do interno do furo na face superior da peça através do plano e cone, anteriormente determinados. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes.

6.2 *Profundidade do furo:* Utiliza as opções “plano” e “ponto”. Primeiramente apalpam-se 9 pontos na face superior da peça, de forma a determinar um plano que esteja na parte mais superior da peça (deve-se ter muito cuidado neste momento, pois a peça apresenta curvatura, portanto, visa-se tocar 9 pontos que se encontram em um mesmo plano o mais superior possível), e um ponto na superfície que se encontra no fundo do furo cônico. Após isso, utiliza-se a opção “distância” que calcula, pelo método dos mínimos quadrados, a distância perpendicular entre o plano e o ponto, anteriormente apalpados. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes.

6.4 *Ângulo do cone:* Utiliza apenas a opção “cone”. Apalpam-se 15 pontos que são distribuídos em dois círculos em alturas diferentes do cone, de forma a determinar sua geometria substituta. O valor do ângulo do cone é mostrado na tela do *software* assim que se finaliza a medição do cone, indicado pela letra “A”. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes. A figura abaixo mostra como foram apalpados os pontos no cone.

6.3 *Faces laterais:* Utiliza a opção “plano”. Apalpam-se 21 pontos que são distribuídos ao longo de uma das faces laterais. Após, isto, na outra face, são apalpados também 21 pontos. Determinados esses dois planos, utiliza-se a opção “paralelismo”. Por meio do método dos mínimos quadrados, o *software* determina o valor da tolerância de paralelismo entre os planos anteriormente apalpados. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes.

A figura abaixo mostra como foram apalpados os 21 pontos nas faces laterais do corpo de prova e os 15 pontos na medição do ângulo do cone:



7. Após a medição:

7.5 Registre os valores de cada mensurando manualmente.

7.6 Fechar o programa.

7.7 Desligar o ar, retirar a ponta de medição e retirar a peça. Para remover o apalpador, inicialmente trave os eixos da máquina em uma posição que facilite a operação. Retire o apalpador e a ponta de medição, removendo-a do apalpador.

7.8 A ponta de medição deve ser guardada no seu respectivo estojo, os dispositivos de fixação na caixa e a peça deve ser lubrificada, caso necessário, para evitar a oxidação da mesma.

8. Tratamento estatístico:

Em qualquer procedimento de medição se faz necessário a aplicação de um tratamento estatístico a fim de possibilitar uma melhor interpretação dos resultados das medições.

Definida a estratégia e realizando os 5 ciclos de medição de cada mensurando, determinaram-se a média aritmética ($\bar{x}$) e o desvio padrão (s) das medidas, dados pelas Eqs. 1 e 2, respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Onde, n indica o número total de ciclos de medições.

9. Estimativa da incerteza de medição:

Estimar a incerteza de medição conforme PIM (Apêndice B).

Apêndice A3

	Data: 04/12/2017	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Guilherme B. Rodrigues	10 páginas
Procedimento de Medição do corpo de prova 3 - PME 03		

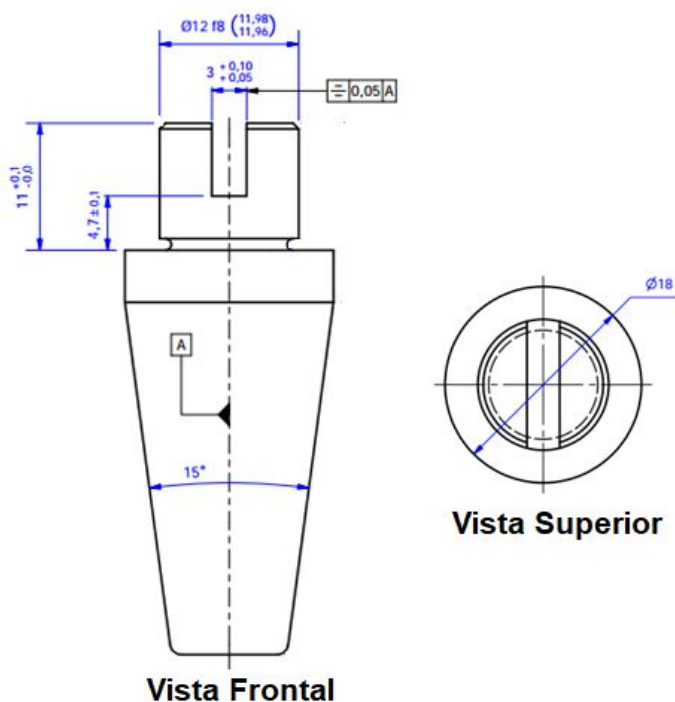
Este documento apresenta o roteiro geral para o controle dimensional e geométrico da peça 3 (pino de soldagem) com MMC e com projetor de perfil.

1. Objeto

Verificação das cotas especificadas a seguir:

- Distância entre rasgo de encaixe e corpo do pino;
- Distância entre parte superior do encaixe e corpo do pino;
- Distância faces internas do rasgo de encaixe;
- Faces interna do rasgo de encaixe;
- Diâmetro do encaixe;
- Diâmetro da parte cilíndrica do pino;
- Ângulo do cone;

Na figura abaixo se encontra o desenho da peça 3.



2. Materiais utilizados

- Flanela;
- Luvas;
- Álcool Etilico Hidratado 96 ou Álcool em Gel 65 %;
- Máquina de medir por coordenadas;
- Ponta única com esfera de rubi de 2 mm de diâmetro e comprimento da haste de 20 mm;
- Projetor de perfil;
- Lente de aumento de 10 vezes.

3. Sistemas de medição

Fazer a identificação completa da MMC e do projetor de perfil. Devem ser registradas as seguintes informações: tipo de máquina, fabricante, modelo, resolução, faixa de indicação para cada eixo, tipo de ponta e diâmetro da esfera utilizadas, luz utilizada no projetor de perfil e aumento da lente.

4. Referências Normativas

NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, 2005.

NBR NM-ISO 1 – Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento, 1997.

Mitutoyo, Manual do Usuário da MMC modelo BR –M443. 41p.

Mitutoyo, GEOPAK-WIN, Programa de medição geométrica 3D para Máquinas de Medir Coordenadas. 140p.

5. Preparação da MMC:

5.1 Realizar a limpeza da mesa de medição da máquina com um pano embebido em álcool.

5.2 Efetuar a limpeza da peça a ser medida.

5.3 Ligar o sistema de condicionamento de ar instalado na sala da MMC e manter a MMC e a peça expostas por doze horas à temperatura de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$.

5.4 Ligar o ar comprimido, verificar se a pressão de alimentação está entre 0,5 e 0,9 Mpa.

5.5 Verificar a indicação do manômetro da unidade reguladora de ar localizada na parte frontal da máquina. O mesmo deve indicar 0,4 Mpa.

5.6 Posicionamento da peça a ser medida. Posicione a peça a ser medida na mesa de medição e fixe-a se necessário. Para tanto utilize o kit de fixação. De preferência posicione a peça no centro da mesa de medição da máquina.

5.7 Ao utilizar o kit de fixação certifique-se de que os pontos de medição desejados não estejam ocupados pela fixação. Durante a fixação os parafusos devem ser apertados manualmente, o torque máximo para as inserções roscadas é de 9,8 Nm. Deve-se verificar se a mesma foi devidamente fixada.

5.8 Escolher a ponta de medição ou apalpador e fixar a mesma no cabeçote. A colocação ou remoção do apalpador deverá ser efetuada sempre com o eixo Z travado. Rosquear a ponta de medição no apalpador e aplicar um pequeno torque com a chave correspondente. Fixar o apalpador no eixo Z, encaixando conforme geometrias gravadas no mesmo e no eixo.

5.9 Ligar o computador, abrir o programa MCosmos e executar a inicialização do sistema mecânico seguindo as instruções exibidas na tela do programa. Antes de movimentar os eixos da MMC certificar-se de que os mesmos não estão travados. Cada eixo deve ser deslocado para o início do curso. Assim, movimente o eixo X para a esquerda, o eixo Y para si e o eixo Z para baixo.

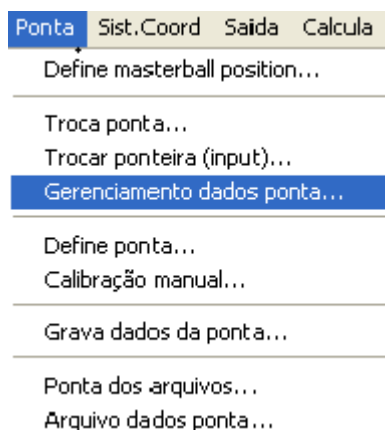
5.10 Criar um programa de medição e atribua um nome ao mesmo.



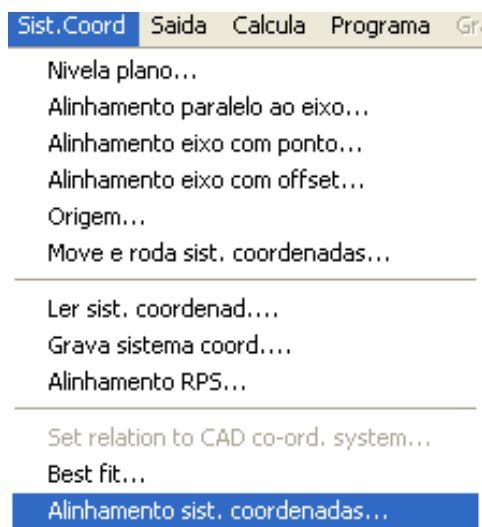
5.11 Utilize a opção simples ou ensina para abrir o programa criado e executar a medição.



5.12 Criar a ponta e efetuar a calibração da mesma utilizando a esfera padrão e o ícone correspondente no menu do programa, opções Ponta e Gerenciamento dados ponta.



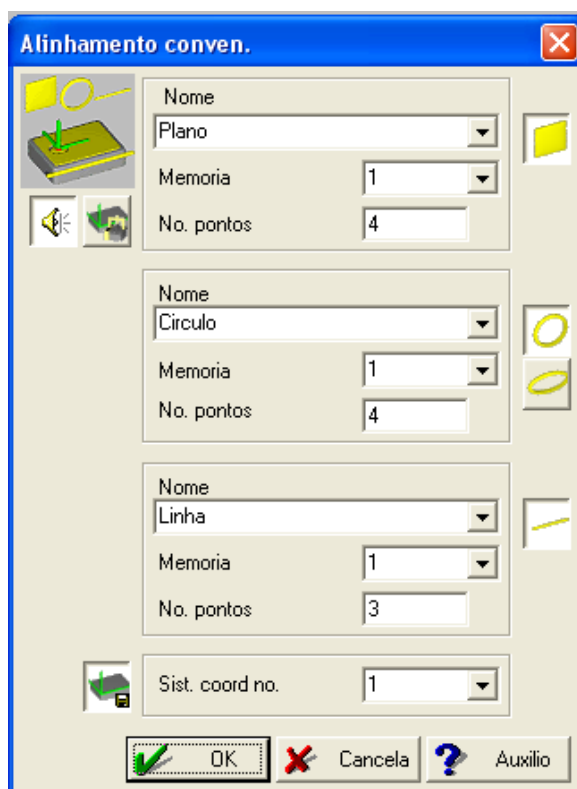
5.13 Efetuar o alinhamento da peça utilizando o ícone correspondente no menu do programa, opções Sist. Coordenadas e alinhamento do sistema de coordenadas.



5.14 Ao clicar na opção alinhamento do sistema de coordenadas, deve-se selecionar a opção mais apropriada para definição do mesmo. No caso, utiliza-se a opção Plano/Círculo/linha.



5.15 Feita a seleção da opção do item anterior, define-se uma quantidade de 4 pontos a serem apalpados no plano superior do rasgo de encaixe, 4 pontos no círculo que forma o rasgo e 3 pontos em linha em uma das faces internas do rasgo.

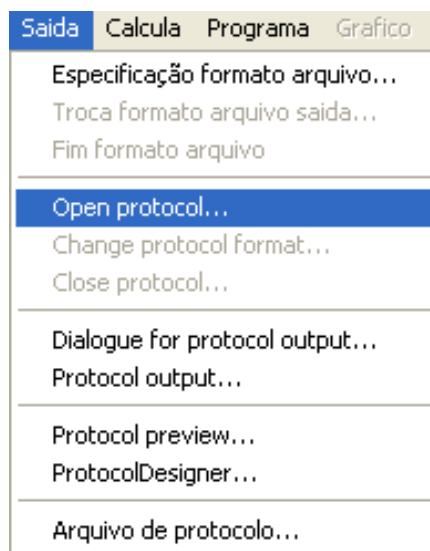


5.16 Posicionamento da origem do sistema de coordenadas como na figura abaixo.



5.17 Após efetuar o alinhamento posicione a ponta do apalpador perto do local onde deve estar a origem do sistema de coordenadas.

5.18 Se necessário, ativar a opção Saída e *open* protocolo para definir o tipo de relatório a ser gerado durante a medição.



5.19 Identificar as geometrias no menu superior, de acordo com os ícones apresentados na tabela a seguir.

Geometria	Ícone
Ponto	
Círculo	
Plano	
Distância	
Cone	
Simetria	

5.20 Em cada caso, definir o número de pontos a serem apalpados.

5.21 Ativar a opção  repete.

5.22 Efetue cinco ciclos de medição. Para tanto distribua os pontos de forma adequada na superfície apalpada.

6. Preparação do projetor de perfil:

6.1 Realizar a limpeza da mesa de medição do projetor de perfil máquina com um pano embebido em álcool.

6.2 Efetuar a limpeza da peça a ser medida.

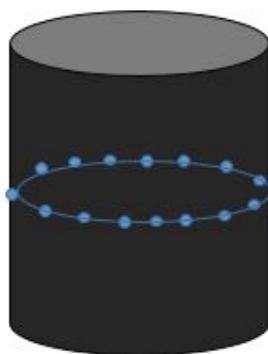
- 6.3 Ligar o sistema de condicionamento de ar instalado na sala do projetor de perfil e manter o mesmo e a peça expostos por doze horas à temperatura de (20 ± 1) °C.
- 6.4 Posicionar a peça sobre a mesa de medição do projetor.
- 6.5 Escolher corretamente o tipo de luz (episcópica ou diascópica) a ser utilizada.
- 6.6 Escolher o aumento da lente a ser utilizada, no caso, 10 vezes.
- 6.7 Verificar o posicionamento das linhas que determinam o centro na tela de medição do projetor.
- 6.8 Identificar a geometria a ser medida e a direção em que a medição ocorrerá.
- 6.9 Efetuar cinco ciclos de medição.

7. Medições com MMC:

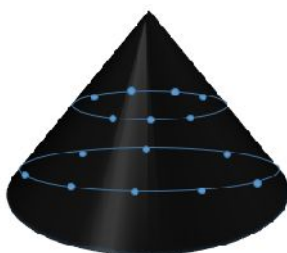
- 7.1 *Distância entre rasgo de encaixe e corpo do pino:* Utiliza as opções “plano” e “ponto”. Primeiramente apalpam-se 15 pontos na face superior do corpo do pino, de forma a determinar um plano, e um ponto na superfície que se encontra no fundo do rasgo de encaixe. Após isso, utiliza-se a opção “distância” que calcula, pelo método dos mínimos quadrados, a distância perpendicular entre o plano e o ponto, anteriormente apalpados. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes.
- 7.2 *Distância entre parte superior do encaixe e corpo do pino:* Utiliza as opções “plano” e “ponto”. Primeiramente apalpam-se 15 pontos na face superior do corpo do pino, de forma a determinar um plano, e um ponto na superfície que se encontra na superfície superior do encaixe. Após isso, utiliza-se a opção “distância” que calcula, pelo método dos mínimos quadrados, a distância perpendicular entre o plano e o ponto, anteriormente apalpados. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes.
- 7.3 *Distância faces internas do rasgo de encaixe:* Utiliza as opções “plano” e “ponto”. Primeiramente apalpam-se 9 pontos em uma das faces internas do rasgo de encaixe do pino, de forma a determinar um plano, e um ponto na superfície da outra face interna do rasgo de encaixe. Após isso, utiliza-se a opção “distância” que calcula, pelo método dos mínimos quadrados, a distância perpendicular entre o plano e o ponto, anteriormente apalpados. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes.

7.4 Diâmetro do encaixe: Utiliza a opção “círculo”. Apalpam-se 15 pontos ao longo do encaixe, de forma a distribuir esses pontos por todo o comprimento do círculo que se deseja medir a circunferência. Nesse caso, para obter um melhor resultado, fixa-se o eixo Z, ou seja, apenas se movimenta em X e Y. Após determinar o círculo, automaticamente na tela do *software*, é apresentado o diâmetro da circunferência apalpada. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes.

7.5 Diâmetro da parte cilíndrica do pino: Utiliza a opção “círculo”. Apalpam-se 15 pontos ao longo do corpo do pino, de forma a distribuir esses pontos por todo o comprimento do círculo que se deseja medir a circunferência. Nesse caso, para obter um melhor resultado, fixa-se o eixo Z, ou seja, apenas se movimenta em X e Y. Após determinar o círculo, automaticamente na tela do *software*, é apresentado o diâmetro da circunferência apalpada. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes. A figura abaixo mostra como foram distribuídos e apalpados os 15 pontos para a medição desse mensurando.

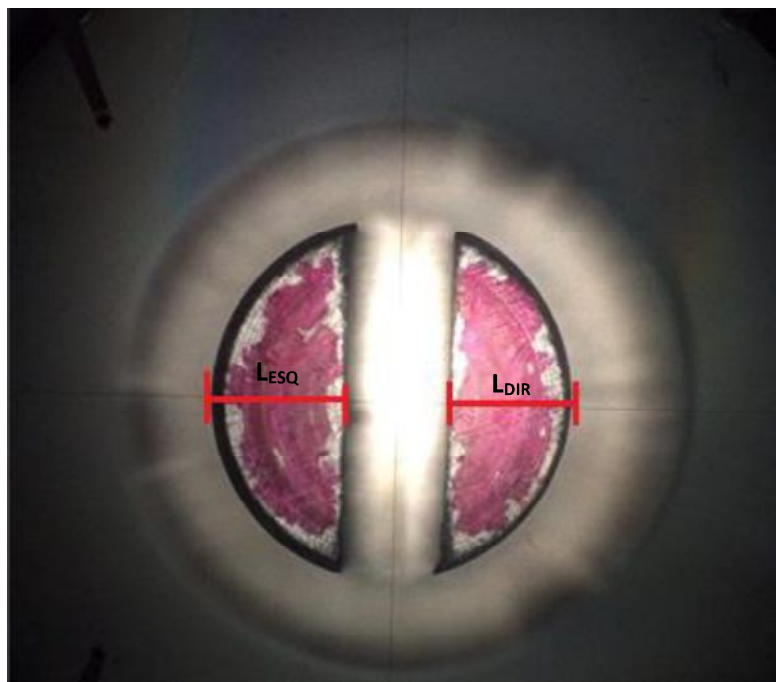


7.6 Ângulo do cone: Utiliza apenas a opção “cone”. Apalpam-se 15 pontos que são distribuídos em dois círculos em alturas diferentes do cone, de forma a determinar sua geometria substituta. O valor do ângulo do cone é mostrado na tela do *software* assim que se finaliza a medição do cone, indicado pela letra “A”. Repete-se o processo de acordo com o número de ciclo de medições, no caso, 5 vezes. A figura abaixo mostra como foram apalpados os 15 pontos no cone.



8. Medições com o projetor de perfil:

8.1 *Simetria das faces internas:* Mede-se a distância das duas faces com relação ao diâmetro do eixo (lado direito e lado esquerdo). O desvio de simetria é dado pela diferença entre essas duas distâncias. Quanto mais próximo de zero esse valor, mais simétrico o corpo de prova.



9. Após a medição:

9.1 Registre os valores de cada mensurando manualmente.

9.2 No caso da MMC, deve-se fechar o programa, desligar o ar, retirar a ponta de medição e retirar a peça. Para remover o apalpador, inicialmente trave os eixos da máquina em uma posição que facilite a operação. Retire o apalpador e a ponta de medição, removendo-a do apalpador. A ponta de medição deve ser guardada no seu respectivo estojo, os dispositivos de fixação na caixa e a peça deve ser lubrificada, caso necessário, para evitar a oxidação da mesma.

9.3 No caso do projetor de perfil, deve-se retirar a peça da mesa de medição, desligar as luzes utilizadas e retirar a lente de aumento, guardando-a com cuidado. Posteriormente desliga-se o projetor da rede elétrica.

10. Tratamento estatístico:

Em qualquer procedimento de medição se faz necessário a aplicação de um tratamento estatístico a fim de possibilitar uma melhor interpretação dos resultados das medições.

Definida a estratégia e realizando os 5 ciclos de medição de cada mensurando, determinaram-se a média aritmética ($\bar{x}$) e o desvio padrão (s) das medidas, dados pelas Eqs. 1 e 2, respectivamente.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \sum_{i=1}^n \frac{x_i}{n} \quad (1)$$

$$s = \sqrt{\sum_{i=1}^n \frac{(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2)$$

Onde, n indica o número total de ciclos de medições.

11. Estimativa da incerteza de medição:

Estimar a incerteza de medição conforme PIM (Apêndice B).

Apêndice B

	Data: 04/12/2017	Edição/Revisão 01/00
	Emitido por Guilherme B. Rodrigues	11 páginas
Procedimento para avaliação da incerteza de medição dos corpos de prova - PIM		

Este documento apresenta o roteiro geral para a avaliação da incerteza de medição para medições lineares e angulares com a MMC e medições lineares com o projetor de perfil.

1. Referências Normativas

NBR ISO/IEC 17025 – Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração, 2005

NBR NM-ISO 1 – Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento, 1997

INMETRO – Guia para Expressão da Incerteza de Medição, 1ª. Edição Luso-Brasileira, 2012. 95p

2. Medições Lineares com MMC

2.1. Identificação das Grandezas de Influência:

As grandezas que exercem influência sobre o resultado das medições com a MMC são:

- Variabilidade dos valores da geometria avaliada;
- Resolução da MMC;
- Incerteza padrão associada à calibração da MMC, nas direções consideradas durante a medição;

- Erro de apalpamento da MMC;
- Variação de temperatura durante as medições;
- Afastamento da temperatura em relação a 20 °C.

2.2. Definição do Modelo Matemático:

O modelo matemático para o cálculo da incerteza de medição com a MMC é definido considerando as variáveis de influência citadas (Eq. 1)

$$C = \bar{L} + \Delta R + \Delta I + \Delta E_A + L_0 \cdot \Delta T (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC}) + L_0 \cdot \delta T (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC}) \quad (1)$$

Onde:

- $\bar{L}$: desvio padrão dos valores do mensurando;
- ΔR : correção devido à resolução da MMC;
- ΔI : correção associada à incerteza padrão da calibração da MMC, nas direções consideradas durante a medição;
- ΔE_A : correção devido ao erro de apalpamento da MMC;
- ΔT : afastamento da temperatura ambiente com relação a 20 °C;
- δT : variação de temperatura durante as medições;
- α_{MMC} : coeficiente de expansão térmica linear das escalas da MMC;
- α_{Pe} : coeficiente de expansão térmica linear do material da peça;
- L_0 : valor do mensurando.

2.3. Definição dos Parâmetros relacionados às Grandezas de Influência:

Cada variável de influência apresenta uma distribuição de probabilidade, grau de liberdade e coeficiente de sensibilidade. O coeficiente de sensibilidade, quando diferente de 1, deve ser estimado de acordo com as expressões apresentadas. A tabela abaixo traz de forma sucinta essas informações.

Grandeza de influência	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade	Coef. de sensibilidade
$\bar{L}$	Normal	n -1, onde n é o número de leituras realizadas	1
ΔR	Retangular	∞	1
ΔI	Normal	Definido pelo valor de k apresentado no certificado de calibração	1
ΔE_A	Triangular	∞	1
ΔT	Normal	V_{eff}	$L_0 \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC})$
δT	Normal	V_{eff}	$L_0 \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC})$
α_{MMC}	Retangular	∞	$L_0 \cdot (\Delta T + \delta T)$
α_{Pe}	Retangular	∞	$L_0 \cdot (\Delta T + \delta T)$

2.4. Cálculo das Incertezas Padrão:

As incertezas padrão são estimadas pelas equações apresentadas com um nível de abrangência de 68 %.

2.4.1. Variabilidade das leituras ($\bar{L}$)

$$u(\bar{L}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (2)$$

Onde:

- s : desvio padrão das leituras realizadas com o relógio comparador;
- n : número de leituras da mesma dimensão efetuadas.

Observação 1: se não houver variação entre as leituras, ou seja, o desvio padrão for zero, deve ser usada a resolução do sistema de medição no numerador da Eq. (3).

2.4.2. Resolução da MMC (ΔR)

$$u(\Delta R_{MMC}) = \frac{RESOLUÇÃO}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

2.4.3. Incerteza relacionada à calibração da MMC (ΔI)

$$u(\Delta I) = \frac{U}{k} \quad (4)$$

2.4.3.1. Para medições lineares na direção de um determinado eixo se considera a incerteza associada à calibração nesse eixo. Para a direção dos eixos X, Y e Z tem-se, respectivamente:

$$I_{(x)} = \frac{U_{Px}}{k} \quad (5)$$

$$I_{(y)} = \frac{U_{Py}}{k} \quad (6)$$

$$I_{(z)} = \frac{U_{Pz}}{k} \quad (7)$$

2.4.3.2. Se a medição for efetuada no plano, então, devem ser utilizadas as seguintes equações:

$$I_{(x,y)} = \sqrt{I_{(x)}^2 + I_{(y)}^2} \quad (8)$$

$$I_{(x,z)} = \sqrt{I_{(x)}^2 + I_{(z)}^2} \quad (9)$$

$$I_{(y,z)} = \sqrt{I_{(y)}^2 + I_{(z)}^2} \quad (10)$$

2.4.3.3. Enquanto que, para medições volumétricas, a incerteza associada à calibração da máquina considera a incerteza declarada para os três eixos coordenados, conforme a seguinte equação:

$$I_{(x,y,z)} = \sqrt{I_{(x)}^2 + I_{(y)}^2 + I_{(z)}^2} \quad (11)$$

2.4.4. Incerteza relacionada ao erro de apalpamento da MMC (ΔE_A)

$$u(\Delta E_A) = \frac{\text{Erro de Apalpamento}}{\sqrt{6}} \quad (12)$$

2.4.5. Coeficiente de expansão térmica do material da escala da MMC (α_{MMC})

$$u(\alpha_{MMC}) = \frac{0,1 \cdot \alpha_{MMC}}{\sqrt{3}} \quad (13)$$

2.4.6. Coeficiente de expansão térmica do material da peça medida (α_{Pe})

$$u(\alpha_{Pe}) = \frac{0,1 \cdot \alpha_{Pe}}{\sqrt{3}} \quad (14)$$

2.4.7. Correção associada ao afastamento da temperatura ambiente em relação a 20 °C (ΔT)

$$u(\Delta T) = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} \quad (15)$$

$$u(sensor) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \Delta L_s}\right)^2 \cdot u(\Delta L_s)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta R_s}\right)^2 \cdot u(\Delta R_s)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta I_s}\right)^2 \cdot u(\Delta I_s)^2} \quad (16)$$

$$u(\Delta T) = \sqrt{(u(sensor))^2 + (u(\Delta T))^2} \quad (17)$$

Onde:

- ΔL_s : correção devido à variabilidade das leituras de temperatura;
- ΔR_s : correção devido à resolução do sensor de temperatura;
- ΔI_s : correção devido à incerteza relacionada à calibração do sensor de temperatura considerando-se um nível de abrangência de 68%.

2.4.8. Correção associada à variação da temperatura durante o processo de medição (δT)

$$u(\delta T) = \frac{\delta T}{\sqrt{3}} \quad (18)$$

$$u(sensor) = \sqrt{\left(\frac{\partial T}{\partial \Delta L_s}\right)^2 \cdot u(\Delta L_s)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta R_s}\right)^2 \cdot u(\Delta R_s)^2 + \left(\frac{\partial T}{\partial \Delta I_s}\right)^2 \cdot u(\Delta I_s)^2} \quad (19)$$

$$u(\delta T) = \sqrt{(u(sensor))^2 + (u(\delta T))^2} \quad (20)$$

2.5. Cálculo da Incerteza Padrão Combinada:

Aplicando a lei da propagação de incertezas no modelo matemático apresentado pela Eq. (1) estima-se a incerteza padrão combinada u_c , com nível de abrangência de 68 % (Eq. 21).

$$\begin{aligned} u_c^2(C) = & \left(\frac{\partial C}{\partial \bar{L}}\right)^2 \cdot (u_{\bar{L}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot (u_{\Delta R})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta E_A}\right)^2 \cdot (u_{\Delta E_A})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \alpha_{pe}}\right)^2 \cdot (u_{\alpha_{pe}})^2 + \\ & + \left(\frac{\partial C}{\partial \alpha_{MMC}}\right)^2 \cdot (u_{\alpha_{MMC}})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta T}\right)^2 \cdot (u_{\Delta T})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \delta T}\right)^2 \cdot (u_{\delta T})^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta I}\right)^2 \cdot (u_{\Delta I})^2 \end{aligned} \quad (21)$$

3. Medições angulares com MMC

3.1. Identificação das Grandezas de Influência:

As grandezas que exercem influência sobre o resultado das medições angulares com a MMC são:

- Variabilidade dos valores angulares da geometria avaliada;
- Resolução da MMC;
- Incerteza padrão associada à calibração da MMC, nas direções consideradas durante a medição;
- Erro de apalpamento da MMC;

3.2. Definição do Modelo Matemático:

O modelo matemático para o cálculo da incerteza de medição com a MMC é definido considerando as variáveis de influência citadas (Eq. 22)

$$A = \bar{\alpha} + \Delta R + \Delta I + \Delta E_A \quad (22)$$

Onde:

- $\bar{\alpha}$: desvio padrão dos valores do mensurando;
- ΔR : correção devido à resolução da MMC;
- ΔI : correção associada à incerteza padrão da calibração da MMC, nas direções consideradas durante a medição;
- ΔE_A : correção devido ao erro de apalpamento da MMC;

3.3. Definição dos Parâmetros relacionados às Grandezas de Influência:

Cada variável de influência apresenta uma distribuição de probabilidade, grau de liberdade e coeficiente de sensibilidade. O coeficiente de sensibilidade, quando diferente de 1, deve ser estimado de acordo com as expressões apresentadas.

Grandeza de influência	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade	Coef. de sensibilidade
$\bar{\alpha}$	Normal	n -1, onde n é o número de leituras realizadas	1
ΔR	Retangular	∞	1
ΔI	Normal	Definido pelo valor de k apresentado no certificado de calibração	1
ΔE_A	Triangular	∞	1

3.4. Cálculo das Incertezas Padrão:

As incertezas padrão são estimadas pelas equações apresentadas com um nível de abrangência de 68 %.

3.4.1. Variabilidade das leituras ($\bar{\alpha}$)

$$u(\bar{\alpha}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (23)$$

Onde:

- s: desvio padrão das leituras realizadas com o relógio comparador;

- n : número de leituras da mesma dimensão efetuadas.

Observação 2: se não houver variação entre as leituras, ou seja, o desvio padrão for zero, deve ser usada a resolução do sistema de medição no numerador da Eq. (24).

3.4.2. Resolução da MMC (ΔR)

$$u(\Delta R_{MMC}) = \frac{RESOLUÇÃO}{\sqrt{3}} \quad (24)$$

3.4.3. Incerteza relacionada à calibração da MMC (ΔI)

$$u(\Delta I) = \frac{U}{k} \quad (25)$$

3.4.3.1. Para medições lineares na direção de um determinado eixo se considera a incerteza associada à calibração nesse eixo. Para a direção dos eixos X, Y e Z tem-se, respectivamente:

$$I_{(x)} = \frac{U_{Px}}{k} \quad (26)$$

$$I_{(y)} = \frac{U_{Py}}{k} \quad (27)$$

$$I_{(z)} = \frac{U_{Pz}}{k} \quad (28)$$

3.4.3.2. Se a medição for efetuada no plano, então, devem ser utilizadas as seguintes equações:

$$I_{(x,y)} = \sqrt{I_{(x)}^2 + I_{(y)}^2} \quad (29)$$

$$I_{(x,z)} = \sqrt{I_{(x)}^2 + I_{(z)}^2} \quad (30)$$

$$I_{(y,z)} = \sqrt{I_{(y)}^2 + I_{(z)}^2} \quad (31)$$

3.4.3.3. Enquanto que, para medições volumétricas, a incerteza associada à calibração da máquina considera a incerteza declarada para os três eixos coordenados, conforme a seguinte equação:

$$I_{(x,y,z)} = \sqrt{I_{(x)}^2 + I_{(y)}^2 + I_{(z)}^2} \quad (32)$$

3.4.4. Incerteza relacionada ao erro de apalpamento da MMC (ΔE_A)

$$u(\Delta E_A) = \frac{\text{Erro de Apalpamento}}{\sqrt{6}} \quad (33)$$

3.5. Cálculo da Incerteza Padrão Combinada:

Aplicando a lei da propagação de incertezas no modelo matemático apresentado pela Eq. (22) estima-se a incerteza padrão combinada u_c , com nível de abrangência de 68 % (Eq. 34).

$$u_c^2(A) = \left(\frac{\partial A}{\partial \bar{\alpha}} \right)^2 \cdot (u_{\bar{\alpha}})^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta R} \right)^2 \cdot (u_{\Delta R})^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta E_A} \right)^2 \cdot (u_{\Delta E_A})^2 + \left(\frac{\partial A}{\partial \Delta I} \right)^2 \cdot (u_{\Delta I})^2 \quad (34)$$

4. Medições lineares com projetor de perfil

4.1. Identificação das Grandezas de Influência:

As grandezas que exercem influência sobre o resultado das medições lineares com o projetor de perfil são:

- Variabilidade dos valores lineares da geometria avaliada;
- Resolução do projetor de perfil;
- Incerteza padrão associada à calibração do projetor de perfil, nas direções consideradas durante a medição;
- Erro associado ao aumento da lente;

4.2. Definição do Modelo Matemático:

O modelo matemático para o cálculo da incerteza de medição com a MMC é definido considerando as variáveis de influência citadas (Eq. 35)

$$L = \bar{L} + \Delta R + \Delta I + \Delta Al \quad (35)$$

Onde:

- $\bar{L}$: desvio padrão dos valores do mensurando;
- ΔR : correção devido à resolução do projetor de perfil;
- ΔI : correção associada à incerteza padrão da calibração do projetor de perfil, nas direções consideradas durante a medição;
- ΔAl : correção devido ao erro associado ao aumento da lente do projetor de perfil;

4.3. Definição dos Parâmetros relacionados às Grandezas de Influência:

Cada variável de influência apresenta uma distribuição de probabilidade, grau de liberdade e coeficiente de sensibilidade. O coeficiente de sensibilidade, quando diferente de 1, deve ser estimado de acordo com as expressões apresentadas.

Grandeza de influência	Distribuição de probabilidade	Graus de liberdade	Coef. de sensibilidade
$\bar{L}$	Normal	n -1, onde n é o número de leituras realizadas	1
ΔR	Retangular	∞	1
ΔC	Normal	Definido pelo valor de k apresentado no certificado de calibração	1
ΔAl	Normal	∞	1

4.4. Cálculo das Incertezas Padrão:

As incertezas padrão são estimadas pelas equações apresentadas com um nível de abrangência de 68 %.

4.4.1. Variabilidade das leituras $(\bar{L})$

$$u(\bar{L}) = \frac{s}{\sqrt{n}} \quad (36)$$

Onde:

- s : desvio padrão das leituras realizadas com o relógio comparador;
- n : número de leituras da mesma dimensão efetuadas.

Observação 3: se não houver variação entre as leituras, ou seja, o desvio padrão for zero, deve ser usada a resolução do sistema de medição no numerador da Eq. (37).

4.4.2. Resolução do projetor de perfil (ΔR)

$$u(\Delta R) = \frac{RESOLUÇÃO}{\sqrt{3}} \quad (37)$$

4.4.3. Incerteza relacionada à calibração do projetor de perfil (ΔI)

$$u(\Delta I) = \frac{U}{k} \quad (38)$$

4.4.3.1. Para medições lineares na direção de um determinado eixo se considera a incerteza associada à calibração nesse eixo. Para a direção dos eixos X e Y tem-se, respectivamente:

$$I_{(x)} = \frac{U_{Px}}{k} \quad (39)$$

$$I_{(y)} = \frac{U_{Py}}{k} \quad (40)$$

4.4.3.2. Se a medição for efetuada no plano, então, devem ser utilizadas as seguintes equações:

$$I_{(x,y)} = \sqrt{I_{(x)}^2 + I_{(y)}^2} \quad (41)$$

4.4.4. Incerteza relacionada ao erro associado ao aumento da lente do projetor de perfil (ΔAl)

$$u(\Delta Al) = \frac{U(Al)}{k} \quad (42)$$

4.5. Cálculo da Incerteza Padrão Combinada:

Aplicando a lei da propagação de incertezas no modelo matemático apresentado pela Eq. (35) estima-se a incerteza padrão combinada u_c , com nível de abrangência de 68 % (Eq. 43).

$$u_c^2(L) = \left(\frac{\partial L}{\partial \bar{L}}\right)^2 \cdot (u_{\bar{L}})^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta R}\right)^2 \cdot (u_{\Delta R})^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta I}\right)^2 \cdot (u_{\Delta I})^2 + \left(\frac{\partial L}{\partial \Delta Al}\right)^2 \cdot (u_{\Delta Al})^2 \quad (43)$$

5. Cálculo do Grau de Liberdade Efetivo da Medição para a MMC e o Projetor de Perfil:

O Grau de Liberdade Efetivo v_{eff} da medição é calculado de pela Equação de Welch-Satterwaite (Eq. 44).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \left(\frac{u_i^4(x_i)}{v_i} \right)} \quad (44)$$

6. Definição do Valor de k :

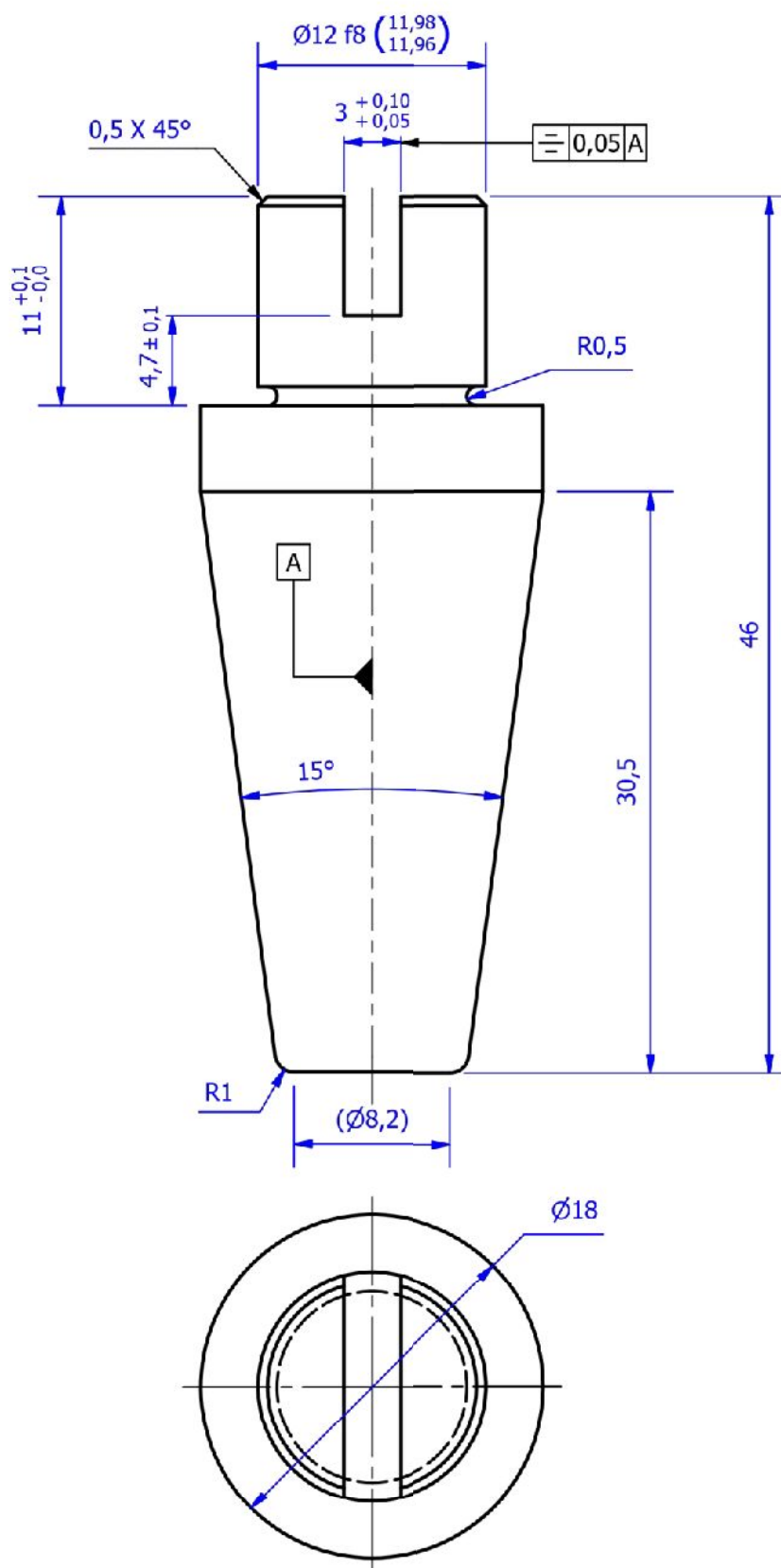
O valor do fator k é obtido na tabela da distribuição *t-Student*. Em função do grau de liberdade efetivo, procura-se o valor correspondente ao nível de abrangência de 95,45 %.

7. Cálculo da Incerteza Expandida:

A incerteza expandida U é calculada para um nível de abrangência de 95 %, Eq. (45).

$$U = k \cdot u_c \quad (45)$$

ANEXO A



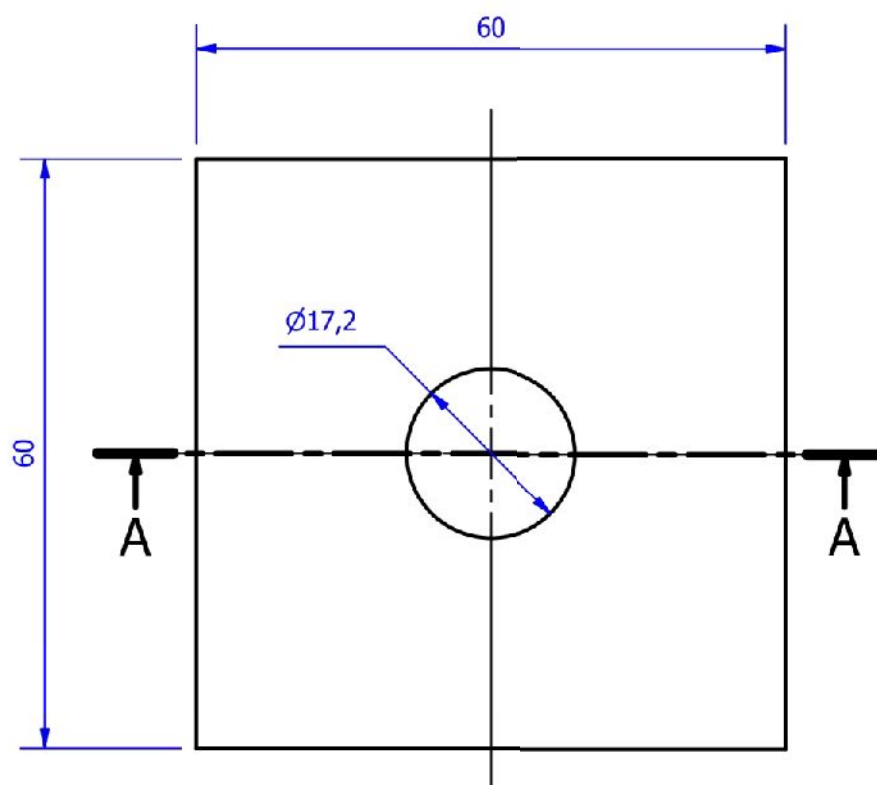
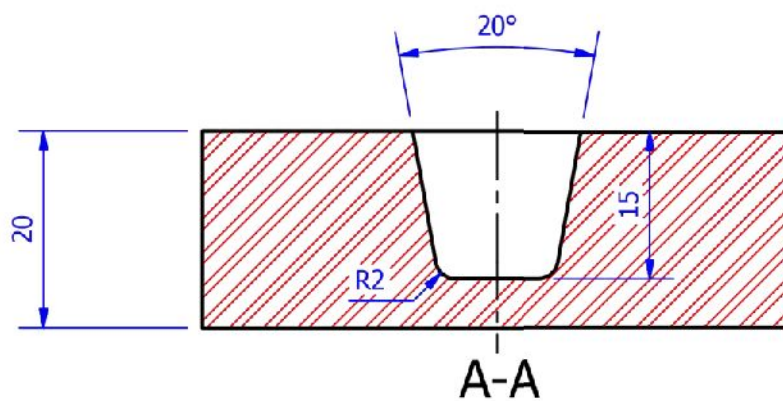
***UNS S32205 - Aço inoxidável duplex (ferrítico/austenítico)**

Limite de escoamento: 450 MPa

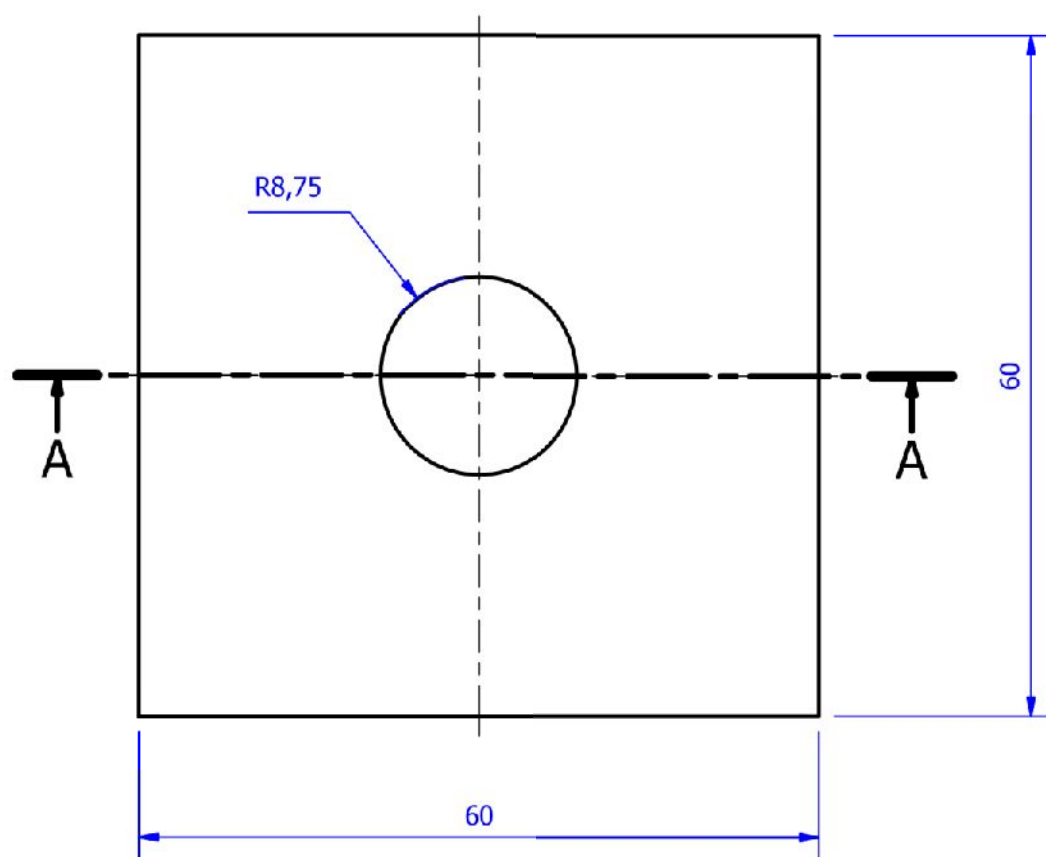
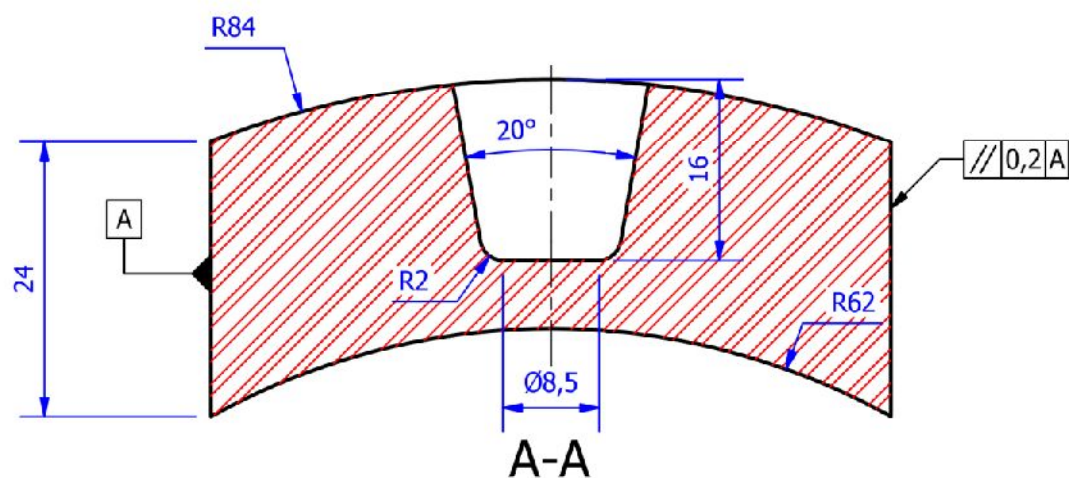
Limite de resistência: 655 MPa

Dureza: 31 HRC

Desenhado Por: Eng. Raphael Pires	Aprovado Por: Eng. Raphael Pires	Material: UNS S32205*	Quant. 70	Data 11/08/2016	Massa 0,1 kg	Escala 2:0,75
Projeto			Item Pino de soldagem			
 FTPW Laboratório de Tecnologia em Aço e Design			Equipamento UPPA X		Revisão 1	Folha 01/02



Desenhado Por: Eng. Raphael Pires	Aprovado Por: Eng. Raphael Pires	Material: Inoxidável Duplex	Quant. 4	Data 08/03/2017	Massa 0,1 kg	Escala 1,3:1
Projeto		Item Metal de Base - Junta 15 mm				
		Equipamento UPPA X			Revisão 1	Folha 01/01



* Material deverá ser retirado de tubo código LTAD IT13.16

Desenhado Por: Eng. Raphael Pires	Aprovado Por: Eng. Raphael Pires	Material: UNS S32205*	Quant. 6	Data 11/10/2016	Massa 0,6 kg	Escala 1,5:1
Projeto			Item Metal Base Tubo Junta Soldada			
 FTPW			Equipamento UPPA X		Revisão 1	Folha 02/06

ANEXO B

Mitutoyo

Mitutoyo Sul Americana Ltda.

**LABORATÓRIO
DE
METROLOGIA**

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13**Cliente : FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**

Endereço : Avenida Amazonas, 2121 - Campus Umuarama - Uberlândia - MG. - CEP - 38400-902

Ordem de Serviço : 035.766/001

I. Objeto Calibrado :

Máquina de Medição por Coordenadas

Fabricante : Mitutoyo

MMC Modelo : BRM-443

No de Série : 0021902 / Código : 196-667-65

Identif. do Cliente : N.C

Faixa Nominal : 400 x 400 x 300 mm

Contador Digital / Controlador

Modelo : N.C

No Série : N.C

Resolução : 0,0005 mm

Cabeçote

Modelo : MH20i

No Série : 7F8912

Probe

Modelo : TP20

No Série : 6T4567

Rack

Modelo : N.C

No Série : N.C

Programa de Medição

Programa : Geopak Win

Versão : 3.0R16

Dongle No. : 10-10336238

**II. Notas:**

1. A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.
2. A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.
3. Erro = Diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência.
4. Os sinais dos resultados tem o mesmo sentido das indicações positivas e negativas do sistema de coordenadas da máquina.
5. A máquina foi calibrada conforme Procedimento PMI-0030 revisão 3.
6. Condição ambiental: Temperatura ambiente: $(20,5 \pm 0,5) ^\circ\text{C}$
7. Endereço e local da calibração são os mesmos.

III. Padrões utilizados :

Padrão Escalonado

No Série : 500034

Certificado No : 04980/13

Emitido em : 14/05/2013

Validade : 11/2013

Termômetro

No Série : T1FA016

Certificado No : LV22179/12

Emitido em : 18/06/2012

Validade : 06/2014

Esfera Padrão

No Série : D0106

Certificado No : 00848/12

Emitido em : 09/02/2012

Validade : 02/2014

Data da Calibração :

28 de Maio de 2013

Data da Emissão :

08 de Julho de 2013

Carlos Kazuo Shioake

Chefe Laboratório de Metrologia

Pag.: 1 / 4

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI).

A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.

Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

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

*Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raffle - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4740-5957 - Fax: (11) 4740-5900 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

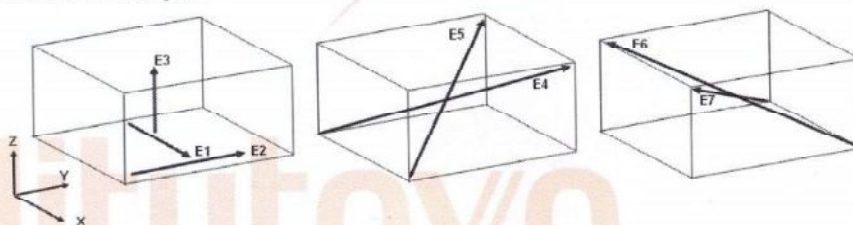
Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob N°. 0031

IV. Resultado das Medições :

4.1. Verificações iniciais do equipamento :

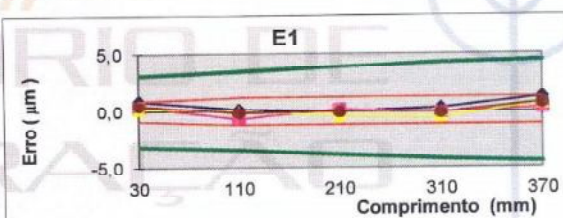
- a. Movimento da Máquina : OK
- b. Condições da área de Medição : OK
- c. Avaliação do Sist. Pneumático : OK
- d. Limpeza das superfícies de ref. : OK

4.2. Resultado da Medição:



4.2.1. Resultado da medição do eixo "X", (E1)

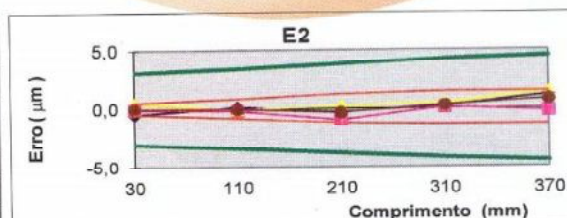
Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,4	0,2	0,5
110	0,2	-0,7	0,0	-0,2
210	0,0	0,2	-0,4	-0,1
310	0,3	-0,1	-0,6	-0,1
370	1,2	0,3	0,7	0,7



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/1500) \mu\text{m}$, onde: L = comprimento em " mm " .
 Fator de abrangência (k) = 2,03
 Graus de liberdade (Ve_{ff}) = 88

4.2.2. Resultado da medição do eixo "Y", (E2)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,5	-0,1	0,5	0,0
110	0,1	-0,2	-0,1	-0,1
210	-0,3	-1,0	0,2	-0,4
310	0,2	0,1	0,5	0,3
370	1,1	-0,2	1,4	0,8



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$, onde: L = comprimento em " mm " .
 Fator de abrangência (k) = 2,08
 Graus de liberdade (Ve_{ff}) = 33

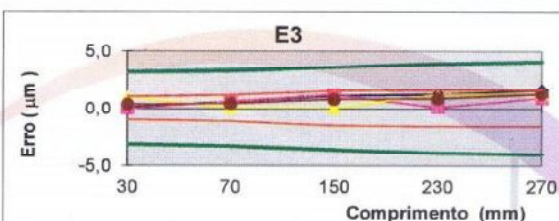
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob N°. 0031

4.2.3. Resultado da medição do eixo "Z", (E3)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μ m)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,1	0,0	1,0	0,4
70	0,6	0,6	0,1	0,4
150	1,1	1,2	0,1	0,8
230	1,2	0,1	1,2	0,8
270	1,6	0,9	1,3	1,3



Incerteza de medição expandida (U) = (0,9 + L/3000) μ m

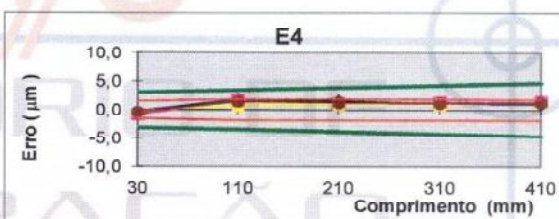
, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,11

Graus de liberdade (Veff) = 24

4.2.4. Resultado da medição do volume, (E4)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μ m)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4
110	1,9	1,7	0,9	1,5
210	1,6	1,2	1,1	1,3
310	1,2	1,4	1,1	1,2
410	1,1	1,5	1,4	1,3



Incerteza expandida de medição (U) = (0,7 + L/2600) μ m

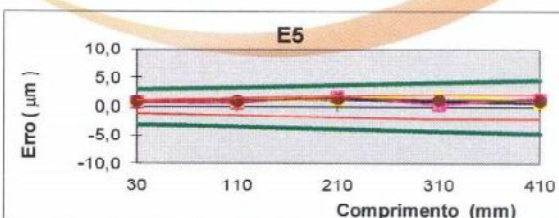
, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,02

Graus de liberdade (Veff) = 148

4.2.5. Resultado da medição do volume, (E5)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μ m)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	0,9	0,8	1,1	0,9
110	1,1	0,7	1,0	0,9
210	1,2	1,8	1,3	1,4
310	0,9	0,4	2,1	1,1
410	0,7	1,5	0,9	1,0



Incerteza de medição expandida (U) = (0,8 + L/2900) μ m

, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,04

Graus de liberdade (Veff) = 59

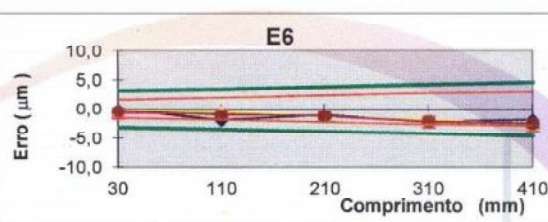
CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO No. 07081/13

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração Acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob N°. 0031

4.2.6. Resultado da medição do volume, (E6)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,8	-0,2	-0,4
110	-1,9	-0,9	-0,5	-1,1
210	-1,1	-1,3	-1,3	-1,2
310	-2,2	-2,3	-1,9	-2,1
410	-1,9	-2,9	-2,7	-2,5



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/2800) \mu\text{m}$

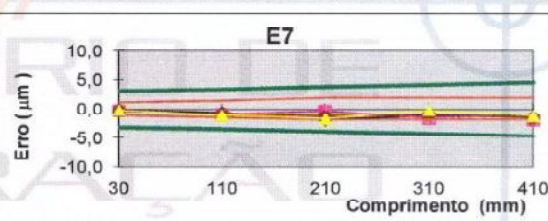
, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,04

Graus de liberdade (Veff) = 65

4.2.7. Resultado da medição do volume, (E7)

Comprimento (L) (mm)	Erro (μm)			
	1ª. Serie	2ª. Serie	3ª. Serie	Media
30	-0,2	-0,3	-0,2	-0,2
110	-0,6	-0,9	-1,1	-0,9
210	-1,9	-0,3	-1,7	-1,3
310	-1,2	-1,6	-0,2	-1,0
410	-1,3	-1,9	-1,2	-1,5



Incerteza de medição expandida (U) = $(0,8 + L/3000) \mu\text{m}$

, onde: L = comprimento em " mm ".

Fator de abrangência (k) = 2,07

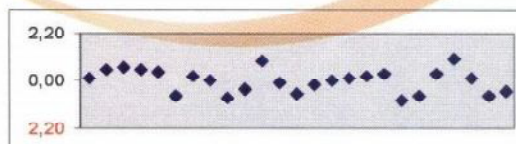
Graus de liberdade (Veff) = 38

4.2.8. Erro de Apalpação (P)

Erro de apalpação = $(1,9 \pm 1,2) \mu\text{m}$

Fator de abrangência (k) = 2,00

Graus de liberdade (Veff) = infinito



5. Observações Gerais :

ANEXO C



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

LABORATÓRIO DE METROLOGIA

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12



Interessado : " FUNDAÇÃO DE APOIO UNIVERSITÁRIO "

Pág.1/4

Endereço : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.

Local da calibração : Av. João Naves de Ávila, 2121, Bloco 1M, Campos Santa Mônica - Uberlândia - MG.

Ordem de Serviço : 034.514/001

1 - OBJETO CALIBRADO**PROJETOR DE PERFIL**

Fabricante : Mitutoyo

Código : 302-714A

Modelo : PJA3000

No. de Série : D00101012

Tambor Micrométrico

Código : 164-164

N°. série : 000636

Código : 164-164

N°. série : 000619

Resolução da unidade de leitura : 0,001 mm

Resolução do goniômetro : 0° 01'

Identificação do Proprietário : 088180

2 - PADRÃO UTILIZADO NA CALIBRAÇÃO**Régua Graduada de Vidro**

N°. de Série : 21164

Certificado N°. : 01647/11

Validade: 30/02/2013

N°. de Série : 24364

Certificado N°. : 08755/11

Validade: 30/06/2013

Padrão Angular

N°. de Série : RET 1

Certificado N°. : 110381/101

Validade: 30/06/2013

3 - PROCEDIMENTO DE MEDIÇÃO : PML - 0043 Versão 1/2.

O erro de ampliação e a indicação foi verificado projetando a régua padrão sobre a tela do projetor e a medição através de comparação com a régua.

O erro de indicação do goniômetro foi verificado comparativamente com um padrão angular projetado sobre a tela e a leitura feita no goniômetro.

Data de calibração : 22 de Agosto de 2012

Data de emissão : 05 de Setembro de 2012

Carlos Kazuo Suetake
Gerente do Dpto. de Garantia da Qualidade

Este certificado atende aos requisitos de acreditação pela CGCRE que avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida (ou ao Sistema Internacional de Unidade - SI).

A reprodução deste Certificado só poderá ser total e depende da aprovação por escrito da Mitutoyo.

Os resultados deste Certificado referem-se exclusivamente ao instrumento submetido à calibração nas condições especificadas, não sendo extensivo a quaisquer lotes.

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

*Fábrica: Rod. Índio Tibiriçá, 1555 - Bairro Raífo - CEP: 08620-000 - Suzano - SP - Tel.: (11) 4746-5858 - Fax: (11) 4746-5936 - E-mail: suzano@mitutoyo.com.br

Laboratório: Tel.: (11) 4746-5950 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: metrologia@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Interna: Tel.: (11) 4746-5957 - Fax: (11) 4746-5960 - E-mails: assistec@mitutoyo.com.br

Assistência Técnica Externa: Tel.: (11) 5643-0027 - Fax: (11) 5643-0028 - E-mails: ate@mitutoyo.com.br



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12

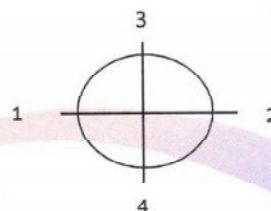
REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág.2/4

4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :

4.1 - Resultado Ampliação



Lente de Ampliação de 10 X

Número lente: 013012

Item	Posição				Incerteza de Medição (U)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
	1	2	3	4			
Erro (%)	0,01	0,01	0,00	0,00	0,01 %	2,00	infinito

LABORATÓRIO DE
CALIBRAÇÃO
BRASIL



Mitutoyo Sul Americana Ltda.

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág.3/4

4 -RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :

4.2 - Resultado da Indicação

Eixo " X "

Indicação (mm)	Resultado (mm)	Incerteza de medição (mm)
0,000	0,000	0,002
2,500	2,500	
5,100	5,100	
7,700	7,700	
10,300	10,300	
12,900	12,900	
15,000	15,000	
17,600	17,600	
20,200	20,200	
22,800	22,800	
25,000	25,000	
30,000	30,000	
35,000	35,001	
40,000	40,000	
45,000	45,000	
50,000	50,001	

Fator de abrangência (k) = 2,03

Graus de liberdade (Veff) = 99

Eixo " Y "

Indicação (mm)	Resultado (mm)	Incerteza de medição (mm)
0,000	0,000	0,002
2,500	2,499	
5,100	5,100	
7,700	7,701	
10,300	10,300	
12,900	12,900	
15,000	15,000	
17,600	17,600	
20,200	20,200	
22,800	22,800	
25,000	25,000	
30,000	30,000	
35,000	35,000	
40,000	40,001	
45,000	45,001	
50,000	50,001	

Fator de abrangência (k) = 2,03

Graus de liberdade (Veff) = 99

CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO N°. 12137/12

REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO

Laboratório de Calibração acreditado pela Cgcre de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob número CAL 0031

Pág.4/4

4 - RESULTADO DA CALIBRAÇÃO :**4.3 - Resultado da indicação do Anteparo Goniométrico**

Indicação	Resultado	Incerteza de Medição (U)	Fator de abrangência (k)	Graus de liberdade (V _{eff})
0	0 ° 00 '	0 ° 01 '	2,29	11
30	29 ° 59 '			
60	60 ° 00 '			
90	90 ° 00 '			
120	119 ° 59 '			
150	149 ° 59 '			
180	180 ° 00 '			
210	210 ° 00 '			
240	240 ° 01 '			
270	270 ° 00 '			
300	300 ° 01 '			
330	330 ° 02 '			
360	360 ° 02 '			

5 - INCERTEZA DE MEDIÇÃO :

A incerteza expandida de medição relatada é declarada como a incerteza padrão da medição multiplicada pelo fator de abrangência k , o qual para uma distribuição t com V_{eff} graus de liberdade efetivos corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

A incerteza padrão da medição foi determinada de acordo com a publicação EA-4/02.

6 - Nota: Temperatura ambiente : (19,6 ± 0,5) °C.

ANEXO D



Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 1 / 2



CONTRATANTE : Universidade Federal de Uberlândia - UFU
 ENDEREÇO : Av. João N. de Ávila, 2121, Bl. 1M - Campus Sta. Mônica - Uberlândia - MG
 INTERESSADO : O mesmo
 ENDEREÇO : O mesmo

INSTRUMENTO : Termohigrômetro Digital
 FABRICANTE : Instrutherm
 MODELO : HT-260
 IDENTIFICAÇÃO : Não especificado
 NÚMERO DE SÉRIE : 06120362

DATA DA CALIBRAÇÃO : 19/06/2013 LOCAL DA CALIBRAÇÃO : Laboratório Elus
 PRÓXIMA CALIBRAÇÃO : Determinado pelo cliente TEMPERATURA DO AR : 23°C ± 5°C
 DATA DA EMISSÃO : 20/06/2013 UMIDADE RELATIVA AR : 45%UR a 70%UR

PADRÕES UTILIZADOS :

Termohigrômetro Digital identificação EL-225 rastreado por Laboratório RBC - CAL 0439 em 28/02/2013 sob certificado R1678/13 válido até fevereiro/2014.

PROCEDIMENTO DE CALIBRAÇÃO :

- A calibração foi realizada pelo método comparativo contra padrões de referência, seguindo os procedimentos internos: PCT-003 rev. 01 / PCT-012 rev. 02.

OBSERVAÇÕES :

- Este certificado atende aos requisitos de acreditação pelo CGCRE, o qual avaliou a competência do laboratório e comprovou sua rastreabilidade a padrões nacionais de medida.
- A calibração foi realizada em 3 medições por ponto. O Valor Verdadeiro foi herdado pela média de 3 medições obtidas pelo padrão em cada ponto.
- Os valores de temperatura apresentados estão em conformidade com a Escala Internacional de Temperatura de 1990.
- k = fator de abrangência (fator multiplicativo adimensional) / V_{eff} = graus de liberdade efetivo. / I.M. = Incerteza de Medição.

TÉCNICO EXECUTANTE: CAIO CESAR SILVA

Julio Cesar Pereira de Souza
Gerente Técnico Substituto

RODRIGO BOMES CORDEIRO
GERENTE TÉCNICO



Certificado de Calibração

Laboratório de Temperatura & Umidade

Número do Certificado R4996/13 Folha 2 / 2

Laboratório de Calibração acreditado pelo CGCRE de acordo com a ABNT NBR ISO/IEC 17025, sob o número CAL 0439.

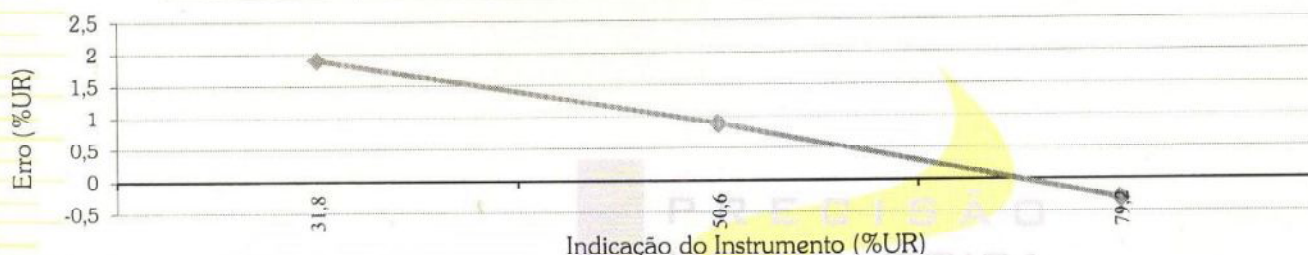
RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO :

UMIDADE RELATIVA DO AR SENSOR EXTERNO : TEMPERATURA DA CALIBRAÇÃO - 20°C

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n.º.s.: Não especificado

Faixa de medição: 0 ~ 100 %UR, divisão de escala: 0,1 %UR.

Indicação do Instrum. (%UR)	Valor Verdadeiro (%UR)	Erro (%UR)	I.M. (%UR)	k	Veff
31,8	29,9	1,9	1,0	2,00	∞
50,6	49,7	0,9	1,0	2,00	∞
79,2	79,5	-0,3	1,3	2,00	∞



TEMPERATURA SENSOR EXTERNO :

Sensor - Fabricante: Não especificado; Modelo: Não especificado; Id.: Não especificado; n.º.s.: Não especificado

Faixa de medição: -20 ~ 60 °C, divisão de escala: 0,1 °C.

Imersão (mm)	Indicação do Instrum. (°C)	Valor Verdadeiro (°C)	Erro (°C)	I.M. (°C)	k	Veff
---	20,6	20,0	0,6	0,3	2,00	∞
---	25,9	25,0	0,9	0,3	2,00	∞
---	31,3	30,0	1,3	0,3	2,00	∞

