



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS JOINVILLE

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E CIÊNCIAS MECÂNICAS

Renan Ednan Flôres

**Análise crítica das capacidades de medição e calibração abordadas nos escopos de
acreditação e seu impacto na comprovação metrológica industrial**

Joinville
2019

Renan Ednan Flôres

**Análise crítica das capacidades de medição e calibração abordadas nos escopos de
acreditação e seu impacto na comprovação metrológica industrial**

Dissertação submetida ao Programa de Pós-graduação da
Universidade Federal de Santa Catarina para a obtenção
do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas
Orientadora: Prof^a. Sueli Fischer Beckert, Dra.

Joinville

2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Flôres, Renan Ednan

Análise crítica das capacidades de medição e calibração
abordadas nos escopos de acreditação e seu impacto na
comprovação metrológica industrial / Renan Ednan Flôres ;
orientador, Sueli Fischer Beckert, 2019.
109 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Campus Joinville, Programa de Pós-Graduação em
Engenharia e Ciências Mecânicas, Joinville, 2019.

Inclui referências.

1. Engenharia e Ciências Mecânicas. 2. Capacidade de
Medição e Calibração (CMC). 3. Escopos de acreditação. 4.
Comprovação Metrológica. 5. ISO IEC/17025. I. Beckert, Sueli
Fischer. II. Universidade Federal de Santa Catarina.
Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Mecânicas.
III. Título.

Renan Ednan Flôres

Análise crítica das capacidades de medição e calibração abordadas nos escopos de acreditação e seu impacto na comprovação metrológica industrial

O presente trabalho em nível de mestrado foi avaliado e aprovado por banca examinadora composta pelos seguintes membros:

Prof. Alexandre Mikowski, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Maurício de Campos Porath, Dr.

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Luiz Veriano de Oliveira Dalla Valentina, Dr.

Universidade do Estado de Santa Catarina

Certificamos que esta é a **versão original e final** do trabalho de conclusão que foi julgado adequado para obtenção do título de mestre em Engenharia e Ciências Mecânicas.

Prof. Regis Kovacs Scalice, Dr.

Coordenador(a) do Programa

Prof.(a) Sueli Fischer Beckert, Dr.(a)

Orientador(a)

Joinville, 2019.

Este trabalho é dedicado a Deus, aos meus amados pais, amigos e a todos que acreditaram e me apoiaram durante o seu desenvolvimento.

AGRADECIMENTOS

Meus agradecimentos serão destinados àqueles de direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento da minha dissertação de mestrado e conseqüentemente para a realização de um sonho. No entanto, cabe destacar os seguintes agradecimentos:

Agradeço a Deus, por me guiar e me manter firme no meu propósito. Graças a Ele, foi possível concretizar um projeto de vida. Agradeço a Deus por estar ao meu lado sempre, me abençoando para o que parecia impossível se tornasse possível.

Agradeço de todo meu coração, aos meus amados pais, por me apoiarem nesse desafio e por sempre me incentivarem e me motivarem a persistir na luta quando tudo parecia difícil.

Agradeço a todos os meus familiares que não foram citados individualmente aqui no texto, mas que certamente tiveram seu papel de apoio e carinho para o desenvolvimento desse trabalho.

Agradeço aos amigos por acreditarem na minha capacidade de seguir com esse novo desafio em minha carreira.

A menos que modifiquemos a nossa maneira de pensar, não seremos capazes de resolver os problemas causados pela forma como nos acostumamos a ver o mundo (Albert Einstein).

RESUMO

A pesquisa propõe uma análise crítica das Capacidades de Medição e Calibração (CMCs) apresentadas nos escopos de acreditação de laboratórios de calibração e a avaliação do seu impacto no processo de comprovação metrológica. A análise crítica é motivada pela grande variabilidade dos resultados declarados nos escopos de calibração para um mesmo tipo de serviço de calibração oferecido por diferentes laboratórios acreditados. A origem dessa variabilidade é desconhecida no meio científico uma vez que um requisito necessário para o laboratório ser acreditado é estar em conformidade com os requisitos apresentados na ISO/IEC 17025. A ISO/IEC 17025 apresenta as principais diretrizes relativas à calibração de instrumentos de medição e a declaração dos resultados nos certificados de calibração. Nesse sentido, foram analisados os escopos de quatro redes de calibração na área dimensional, mais especificamente, para paquímetros e micrômetros. As redes selecionadas são: Rede Brasileira de Calibração (RBC), *United Kingdom Accreditation Service* (UKAS), *Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH* (DAkkS) e *American Association for Laboratory Accreditation* (A2LA). Foi evidenciada a variabilidade nos formatos de apresentação da CMC bem como nos valores de CMC declarados nos escopos. Quando comparados com os Erros Máximos Admissíveis, observou-se em algumas situações, valores de CMCs muito superiores aos EMAs. Essa variação dificulta a seleção adequada de um prestador externo pelo usuário de calibração para realizar calibrações de instrumentos de medição. Entre os fatores que geram as variações na apresentação das CMCs, citam-se: falta de documentos orientativos para elaboração de escopos, utilização de diferentes métodos/padrões de calibração ou avaliação incompleta da incerteza de medição. A partir da realização de balanços de incerteza e simulações realizadas para diferentes resoluções em condições ótimas e típicas de calibração para micrômetros externos e paquímetros, constatou-se que a resolução teve grande impacto no resultado final da incerteza. Por fim, foram estabelecidas diretrizes para orientar e qualificar o usuário de calibração na seleção adequada de um laboratório de calibração para realizar calibrações.

Palavras-chave: Capacidades de medição e calibração (CMCs). escopos de acreditação. comprovação metrológica. ISO/IEC 17025.

ABSTRACT

The research proposes a critical analysis of the Measurement and Calibration Capabilities (CMCs) presented in the accreditation scopes of calibration laboratories and the evaluation of their impact on the metrological confirmation process. The critical analysis is motivated by the great variability of the results declared in the calibration scopes for the same type of calibration service offered by different accredited laboratories. The origin of this variability is unknown in the scientific community since a necessary requirement for the laboratory to be accredited is to comply with the requirements presented in ISO/IEC 17025. ISO/IEC 17025 sets out the main guidelines for the calibration of measuring instruments and the declaration of results in the calibration certificates. In this sense, the scopes of four calibration networks in the dimensional area were analyzed, more specifically, for calipers and micrometers. The selected networks are: *Rede Brasileira de Calibração* (RBC), United Kingdom Accreditation Service (UKAS), *Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH* (DAkkS) and American Association for Laboratory Accreditation (A2LA). The variability in the CMC presentation formats as well as in the CMC values declared in the scopes was evidenced. When compared with the Maximum Permissible Errors, it is noticed in some situations, CMC values much higher than the EMAs. This variation imply in such difficulty for the calibration user to select an external provider properly to perform calibration of measuring instruments. Among the factors that generate variations in the presentation of CMCs are: lack of guidance documents for scoping, use of different calibration methods/standards or incomplete assessment of measurement uncertainty. From the realization of uncertainty balances and simulations carried out for different resolutions under optimal and typical calibration conditions for external micrometers and calipers, it was found that the resolution had a great impact on the final result of the uncertainty. Finally, guidelines were established to guide and qualify the calibration user in the proper selection of a calibration laboratory to perform calibrations.

Keywords: Calibration and Measurement Capability (CMC). accreditation scopes. metrological confirmation. ISO/IEC 17025.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Fontes de incerteza de medição.....	28
Figura 2 – Exemplo de EMA definido pelo fabricante para micrômetro externo.....	43
Figura 3 – Exemplo de EMA definido pelo fabricante para paquímetro	43
Figura 4 – Diagrama de blocos para representação do processo metodológico da dissertação	50
Figura 5 – Fontes de variação da incerteza levadas em consideração na estimativa da CMC .	62
Figura 6 – Aplicação de métodos normatizados nos processos de calibração	63
Figura 7 – CMC informada no orçamento emitido pelo laboratório de calibração.....	64
Figura 8 – Aspectos apontados pelos laboratórios para justificar a dispersão na CMC.....	64
Figura 9 – Comparativo CMC e os EMAs (paquímetro)	71
Figura 10 – Jogo de blocos padrão para calibração de micrômetro externo	72
Figura 11 – Balanço de incerteza micrômetro 0 – 25 mm	75
Figura 12 – Balanço de incerteza paquímetro 0 – 150 mm.....	81
Figura 13 – Formas de definição dos Erros máximos admissíveis consideradas pelo usuário	85
Figura 14 – Aspectos observados pelo usuário na seleção de prestadores externos	85
Figura 15 – Consideração dos laboratórios sobre a incerteza na comparação com o EMA.....	86
Figura 16 – Formas de avaliação dos resultados de calibração dos instrumentos de medição	86
Figura 17 – Questionamento sobre a seleção de provedor externo por parte do cliente	87
Figura 18 – Aspectos apontados pelos usuários para justificar a dispersão na CMC	88
Figura 19 – Diagrama de blocos para apresentação das diretrizes estabelecidas.....	90

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Distribuições de probabilidade para o cálculo da incerteza padrão na avaliação Tipo B da incerteza	35
Quadro 2 – Tabela apresentação da avaliação da incerteza de medição das estimativas de entrada	38
Quadro 3 – Redes de Calibração selecionadas para análise dos escopos de acreditação	51
Quadro 4 – Normas com erros máximos admissíveis de paquímetros e micrômetros.....	53
Quadro 5 – Laboratórios de calibração acreditados por rede de calibração.....	58
Quadro 6 – Forma de expressão da CMC para micrômetro externo	59
Quadro 7 – Capacidade de Medição e Calibração declaradas para micrômetro externo	59
Quadro 8 – Exemplos de forma de expressão da CMC para paquímetros	60
Quadro 9 – Capacidades de Medição e Calibração para paquímetro	61
Quadro 10 – EMAs para micrômetros externos estabelecidos em normas técnicas	66
Quadro 11 – EMAs de indicação para paquímetro estabelecidos em normas técnicas.....	67
Quadro 12 – Erros máximos admissíveis especificados por fabricantes para micrômetros externos.....	68
Quadro 13 – Erros máximos admissíveis especificados por fabricantes para paquímetros	69
Quadro 14 – Comparativo CMC e EMA especificado em normas e por fabricantes para micrômetro	70
Quadro 15 – Incerteza expandida para condições ótimas de calibração (micrômetro externo)	76
Quadro 16 – Incerteza expandida para condições típicas de calibração (micrômetro externo)	78
Quadro 17 – Incerteza expandida para condições ótimas de calibração (paquímetro)	82
Quadro 18 – Incerteza expandida para condições típicas de calibração (paquímetro).....	84

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- A – limite inferior na faixa de medição
- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
- A2LA – *American Association for Laboratory Accreditation*
- a_+ e a_- – limites superior e inferior
- Cgcre – Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO
- CIPM MRA – *CIPM Mutual Recognition Arrangement*
- c_i – coeficiente de sensibilidade
- CMC – Capacidade de Medição e Calibração
- DAkkS – *Die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH*
- Dicla – Divisão de Acreditação de Laboratórios
- Δ_L – erro devido à variação no comprimento
- E – erro de indicação em medição externa com contato parcial das faces
- $E_{\delta t}$ – desvio devido à diferença de temperatura entre o padrão e o mensurando
- $E_{\Delta T \neq 20^\circ C}$ – desvio devido ao coeficiente de expansão térmica;
- EMA – Erro Máximo Admissível
- E_{Res} – desvio devido à resolução;
- f – função que representa o procedimento de medição e o método de avaliação
- $F_{m\acute{a}x}$ – erro máximo admissível em qualquer ponto da faixa de medição
- G – limite do erro G especificado nos catálogos da fabricante Mahr
- GPS – *Geometrical Product Specifications*
- GUM – Guia para Expressão da Incerteza em Medição
- ILAC – *International Laboratory Accreditation Cooperation*
- INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
- J – erro de indicação em medição externa com contato total das faces de medição
- K – erro de indicação decorrente do uso das bordas das orelhas em pequenos orifícios
- k – fator de abrangência
- L – erro de indicação em medição externa com contato linear
- L – comprimento
- mm – milímetros
- μm – micrometro
- MPE – *Maximum Permissible Error*
- MPE_E – Erro de indicação com contato parcial

MPE_J – Erro de indicação com contato total

MPE_R – Repetibilidade do Erro de Indicação com toda a face de contato

n – número de observações independentes

OAC – Organismo de Avaliação da Conformidade

p – nível de confiança

q – estimativa da grandeza Q

\bar{q} – média aritmética ou média dos valores individuais observados q_j ($j = 1, 2, \dots, n$)

Q – grandeza medida repetidamente

RBC – Rede Brasileira de Calibração

R – resolução do instrumento de medição

R – repetibilidade do erro de indicação externa de contato parcial das faces

S – erro de indicação decorrente da mudança de escala

SGQ – Sistema de Gestão da Qualidade

$s(q)$ – desvio padrão experimental

$s^2(q)$ – variância experimental dos valores q_j

U – incerteza expandida

UKAS – *United Kingdom Accreditation Service*

$u(\bar{q})$ – incerteza padrão associada à estimativa de entrada \bar{q}

$u(x_i)$ – incerteza padrão associada às estimativas x_i das grandezas de entrada X_i

$u(y)$ – incerteza padrão de medição associada à estimativa de saída ou resultado de medição y

$u_i(y)$ – contribuições da incerteza

v_{eff} – graus de liberdade efetivos

v_i – graus de liberdade

VIM – Vocabulário Internacional de Metrologia

VP – incerteza devida ao padrão;

x_i – estimativas de entrada para os valores das grandezas de entrada X_i

X_i – grandezas de entrada

\bar{X} – incerteza devido à repetibilidade;

y – valor medido/estimativa de saída

Y – grandeza de saída

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
1.1	OBJETIVOS	22
1.1.1	Objetivo Geral.....	22
1.1.2	Objetivos Específicos	22
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	24
2.1	COMPROVAÇÃO METROLÓGICA	24
2.1.1	Calibração e verificação	25
2.1.2	Resultados da calibração.....	26
2.2	ERRO DE MEDIÇÃO.....	27
2.3	INCERTEZA DE MEDIÇÃO	27
2.3.1	Linhas gerais e definições.....	30
2.3.2	Avaliação da incerteza de medição das estimativas de entrada	31
2.3.2.1	<i>Avaliação Tipo A da incerteza padrão</i>	<i>31</i>
2.3.2.2	<i>Avaliação Tipo B da incerteza padrão</i>	<i>33</i>
2.3.3	Cálculo da incerteza padrão da estimativa de saída.....	35
2.3.4	Incerteza expandida de medição	36
2.3.4.1	<i>Determinando o fator de abrangência k.....</i>	<i>36</i>
2.3.5	Apresentação da avaliação da incerteza de medição.....	38
2.3.6	Características metrológicas.....	38
2.3.7	Fontes de incerteza mais comuns em calibrações na área dimensional.....	39
2.3.7.1	<i>Modelo matemático para o erro em calibrações na área dimensional.....</i>	<i>39</i>
2.3.8	Erro máximo admissível (EMA)	42
2.4	ACREDITAÇÃO DE LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO	44
2.4.1	ISO/IEC 17025	45
2.4.2	Capacidade de medição e calibração (CMC)	47
2.4.3	Escopo de acreditação	47

3	METODOLOGIA.....	50
3.1	ANÁLISE DOS ESCOPOS DE ACREDITAÇÃO.....	51
3.1.1	Questionário destinado a laboratórios de calibração	52
3.2	COMPARAÇÃO DAS CMC's DECLARADAS COM OS EMA's	53
3.2.1	Balanço de incerteza de medição.....	54
3.2.1.1	<i>Balanço de incerteza – micrômetros externos.....</i>	<i>54</i>
3.2.1.2	<i>Balanço de incerteza - paquímetros</i>	<i>55</i>
3.2.2	Questionário destinado a usuários dos serviços de calibração	55
3.3	DEFINIÇÃO DE ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS NA AVALIAÇÃO DA CMC	57
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	58
4.1	ANÁLISE DOS ESCOPOS DE ACREDITAÇÃO.....	58
4.1.1	Escopos de acreditação para micrômetro externo.....	58
4.1.2	Escopos de acreditação para paquímetros	60
4.1.3	Questionário destinado a laboratórios de calibração	62
4.2	COMPARAÇÃO ENTRE AS CMCs DECLARADAS E OS EMAs.....	65
4.2.1	EMAs estabelecidos para micrômetro externo em documentos normativos .	65
4.2.2	EMAs estabelecidos para paquímetro em documentos normativos	67
4.2.3	Especificação do EMA por fabricantes	68
4.2.4	Análise comparativa das CMCs com os EMAs.....	70
4.2.5	Balanço da incerteza de medição.....	71
4.2.5.1	<i>Micrômetro Externo.....</i>	<i>71</i>
4.2.5.2	<i>Paquímetro</i>	<i>78</i>
4.2.6	Questionário destinado a usuários do serviço de calibração	84
4.3	DEFINIÇÃO DE ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS NA AVALIAÇÃO DA CMC	88
5	CONCLUSÃO.....	92

REFERÊNCIAS.....	94
APÊNDICE A – Questionário destinado a laboratórios de calibração	100
APÊNDICE B – Questionário destinado a usuários de calibração.....	104
ANEXO A – Tabela Distribuição <i>t-student</i>.....	109

1 INTRODUÇÃO

A exigência de produtos com alto nível de qualidade promove o desenvolvimento de estratégias empresariais para manter os produtos com excelência e satisfação do cliente final. Sob esse aspecto, ocorre uma crescente necessidade de estruturação do sistema de gestão da qualidade nas indústrias. A ABNT NBR ISO 9000 (2015) apresenta conceitos e princípios que contribuem para as empresas enfrentarem os desafios determinados por um ambiente extremamente competitivo no mercado. Nesse sentido, a importância da qualidade se estende para além da satisfação do cliente, impactando diretamente na reputação da organização.

Adicionalmente, a ABNT NBR ISO 9001 (2015), apresenta em seu escopo requisitos para um sistema de gestão da qualidade para as organizações que necessitam demonstrar sua capacidade de prover produtos que atendam às exigências dos clientes e, além disso, para aumentar a satisfação do cliente por meio da aplicação eficaz do sistema. A norma ainda cita que a organização deve determinar e prover os recursos necessários para assegurar resultados válidos e confiáveis quando o monitoramento ou medição for usado para verificar a conformidade de produtos e serviços com suas especificações.

Manders, Vries e Blind (2016), analisaram a relação entre a aplicação da ABNT NBR ISO 9001 nas empresas e o desenvolvimento de inovações aplicadas nos produtos. O estudo indicou fatores (internos e externos) que motivam as organizações na aplicação da norma. No que se refere aos fatores internos, o foco está definido na produtividade e eficiência produtiva.

A aplicação correta de um sistema de medição contribui para o aumento do nível de excelência do processo e da produtividade. De acordo com Kapelle (2017), não é possível tomar decisões de negócio assertivas sem a garantia de dados confiáveis em um sistema de medição. O ponto chave da análise consiste em definir se o processo de medição é suficientemente válido para a sua aplicação.

A análise e o monitoramento dos sistemas de medição podem contribuir para a avaliação do desempenho dos resultados fornecidos pelos instrumentos de medição. Gasper (2017) destacou que os instrumentos de medição apresentam papel fundamental no processo ao promoverem evidências técnicas assertivas e válidas para auxiliar na tomada de decisões do negócio e de desempenho.

A ABNT NBR ISO 10012 (2004) é a norma técnica que tem por objetivo especificar os requisitos genéricos e fornecer orientação para a gestão de processos de medição e

comprovação metrológica de equipamentos de medição nas organizações. A comprovação metrológica é definida pelo conjunto de operações necessárias para assegurar que um equipamento de medição é capaz de atender aos requisitos estabelecidos para o seu uso pretendido. Normalmente essas operações compreendem a calibração e a verificação do equipamento de medição (ISO 10012, 2003).

A calibração é um processo considerado imprescindível para todos os esforços de garantia de qualidade devendo ser conduzida por laboratórios qualificados. Os laboratórios podem ser acreditados conforme os padrões normativos determinados pela ABNT NBR ISO IEC 17025 (2017) – Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração.

A acreditação é uma ferramenta estabelecida em escala internacional para gerar confiança na atuação dos Organismos de Avaliação da Conformidade (OAC). A acreditação de um organismo de avaliação da conformidade (laboratório, organismo de certificação ou organismo de inspeção) tem por objetivos a comprovação do atendimento de requisitos previamente definidos e a demonstração da competência para realizar atividades com confiança para as instituições que desejam se juntar à rede nacional de acreditação (INMETRO, 2012).

O Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia (INMETRO) aborda em seu sítio que a acreditação de laboratórios segundo os requisitos estabelecidos na ABNT NBR ISO/IEC 17025 é aplicável a laboratórios de calibração e ensaio. Para o instituto, a acreditação representa o reconhecimento formal da competência técnica das organizações de avaliação da conformidade. Além disso, é uma forma de identificar aqueles que oferecem maior confiança em seus serviços (INMETRO, 2012).

A ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2017) define que um laboratório que oferece o serviço de calibração de instrumentos de medição, deve avaliar a incerteza de medição para todas as calibrações.

Zakharov, Vodotyka e Shevchenko (2011) abordaram em seu estudo alguns procedimentos utilizados para avaliar a incerteza durante as calibrações, que podem ser realizados através da análise dos métodos de medição, de modelos de comparação e da propagação e estimativa da incerteza em medições empregadas durante o processo de calibração. Salsbury e Morse (2012) destacaram a importância de se ter um método completo padronizado para avaliação da incerteza de medição. Para os autores, o método deve ser suficiente para promover a confiabilidade nos resultados do instrumento de medição e a sua posterior aprovação na análise dos resultados de calibração. Yahya e Halaj (2012) destacaram

que para garantir confiabilidade ao valor medido, os erros de medição devem ser identificados e seus efeitos prováveis nos resultados devem ser estimados.

Já em 2008, Chunovkina destacou que no final do século 20 houve uma crescente preocupação com o processamento de resultados de medição e a estimativa da incerteza de medição. Essa preocupação surgiu em decorrência da crescente globalização, atenção acelerada à gestão da qualidade presente nas indústrias e devido ao surgimento do Guia para Expressão da Incerteza em Medição. Priel (2009) destaca em seu estudo que o GUM proporciona a avaliação consistente da incerteza de medição e suporta a rastreabilidade metrológica do equipamento de medição.

Juntamente com as definições do GUM, Heping e Xiangqian (2009) ressaltam que a unificação da avaliação e expressão da incerteza de medição desempenhará um papel vital no comércio internacional e na comunicação técnica, pois tornará os resultados da medição comparáveis e obterá aceitação mútua entre os países do mundo todo. Ehrlich (2014) examinou a evolução do pensamento relativo à confiabilidade dos resultados de medição e seu impacto na terminologia que acompanhou o desenvolvimento do GUM. O autor concluiu que é de extrema importância a utilização de uma metodologia correta e terminologia adequada para relatar os resultados de medições amplamente disseminados e implementados. Nesse sentido, será possível garantir o entendimento atual e futuro do que foi feito na medição.

A *International Laboratory Accreditation Cooperation* (ILAC) é a autoridade internacional para organismos de acreditação que operam de acordo com a ISO/IEC 17011 e envolvida na acreditação de organismos de avaliação da conformidade incluindo laboratórios de calibração e ensaio a partir do uso da ISO/IEC 17025, laboratórios de ensaios médicos (ISO 15189) e organismos de inspeção (usando a ISO/IEC 17020). Consiste na hierarquia máxima no que se refere a laboratórios de calibração e organismos de acreditação, como um membro consistente de organismos de acreditação e organizações por todo o mundo (ILAC, 2013).

Com o objetivo de melhorar a harmonização na expressão da incerteza de medição em certificados de calibração e nos escopos de acreditação de laboratórios de calibração, a ILAC aprovou uma resolução em sua terceira reunião da Assembleia Geral realizada no Rio de Janeiro em 1999 para desenvolver critérios para a determinação da incerteza de medição. Desde então, os membros da ILAC implementaram documentos sobre a incerteza de medição baseados no GUM.

Nesse contexto, a ILAC emitiu o documento ILAC P14 (2013), no qual são configurados os requisitos e as diretrizes para a estimativa e a declaração da incerteza em calibração e medição aplicadas aos organismos de acreditação e seus laboratórios acreditados. Tem por objetivo garantir uma interpretação harmonizada do GUM e o uso consistente da Capacidade de Medição e Calibração (CMC) pelos organismos membros da ILAC para fortalecer a credibilidade do acordo estabelecido.

Segundo Cox (2015), o escopo de um laboratório acreditado consiste na apresentação da relação dos diferentes itens que a instituição determinou como capaz de calibrar. O escopo também apresenta a capacidade de medição e calibração ao mostrar a incerteza envolvida em cada equipamento calibrado. Os detalhes sobre os escopos são de extrema importância, tornando-se fundamental a compreensão detalhada sobre eles no momento de selecionar o serviço.

Fishbach (2001) afirma que conhecer a incerteza de medição é tão importante para o laboratório quanto para o cliente, de forma que é essencial selecionar um método adequado para avaliar a veracidade dos resultados. De acordo com Unger (2008), estar em conformidade com os critérios da ISO/IEC 17025 é um pré-requisito geral que todos os laboratórios devem atender para serem acreditados.

Tsimillis (2014) apresenta o ponto de vista do usuário do serviço de calibração. Com o objetivo de fazer o melhor uso da incerteza de medição como uma ferramenta para confiabilidade, todos os usuários necessitam entender o significado da incerteza declarada nos relatórios de ensaio e certificados de calibração. Para o autor, os usuários podem encontrar certa dificuldade em compreender que os resultados declarados da incerteza podem afetar sua saúde, segurança ou direitos econômicos.

Em uma outra publicação, Tsimillis (2018) descreve os requisitos relevantes dos padrões de acreditação referenciando laboratórios de ensaio e calibração. Cada laboratório de ensaio ou calibração é solicitado para manter e estabelecer a rastreabilidade metrológica de seus resultados de medição. Segundo o autor, por um longo tempo não esteve claro quais deveriam ser os requisitos a serem encontrados em prática pelos fornecedores de calibração. O autor levanta os seguintes questionamentos: o laboratório de calibração selecionado para prestação do serviço de calibração é acreditado? Se o laboratório for acreditado, a Capacidade de Medição e Calibração (CMC) é adequadamente declarada para sua proposta? Caso o laboratório não seja acreditado, como é demonstrada a sua rastreabilidade metrológica?

Um dos motivos para justificar certa dificuldade dos usuários em compreender os resultados declarados pode ser definido devido à grande heterogeneidade existente entre as Capacidades de Medição e Calibração (CMC) declaradas nos escopos dos laboratórios acreditados para um mesmo tipo de serviço de calibração. Ao se analisar os escopos de acreditação de laboratórios acreditados disponíveis na Rede Brasileira de Calibração (RBC), *United Kingdom Accreditation Service (UKAS)*, *Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkkS)* e *American Association for Laboratory Accreditation (A2LA)*, constatou-se que há significativa variabilidade nas CMCs, sem que sua origem seja conhecida. Por exemplo na rede A2LA (2019), para micrômetros externos, com faixa de medição de 25 mm, o menor e o maior valor de CMC encontrados foram de 0,3 μm e 14 μm respectivamente.

Dessa forma, como a CMC definida nos escopos de acreditação pode auxiliar o usuário na seleção do laboratório? Quais aspectos devem estar especificados nos escopos para que o usuário tenha segurança na seleção do serviço? Quais aspectos devem estar claros para os laboratórios de calibração ao apresentarem a CMC nos escopos de acreditação? Quais são os conhecimentos e competências mínimos esperados das pessoas responsáveis pela função metrológica nas organizações?

Com base nos questionamentos levantados, esta pesquisa abordará em seu desenvolvimento uma análise crítica dos escopos de acreditação de laboratórios de calibração de acordo com os requisitos estabelecidos na norma ILAC P14 (2013). Devido à diversidade de equipamentos de medição existentes no mercado, o trabalho estará focado nos instrumentos de medição do tipo dimensional, uma vez que as análises e avaliações realizadas poderão ser facilmente replicadas às demais categorias.

A pesquisa promoverá, através dos resultados obtidos com a aplicação de questionários destinados a usuários e laboratórios de calibração, a identificação dos aspectos observados pelo usuário durante a seleção de um provedor externo para prestação de um serviço de calibração de instrumentos de medição, e, a demonstração da interpretação da indústria em relação aos requisitos apresentados na ILAC P14 (2013) relativos aos procedimentos de calibração de instrumentos de medição, análise da incerteza da medição e a estruturação do escopo de acreditação dos laboratórios para a declaração da CMC.

1.1 OBJETIVOS

Nas seções abaixo estão descritos o objetivo geral e os objetivos específicos desta dissertação.

1.1.1 Objetivo Geral

Realizar uma análise crítica das Capacidades de Medição e Calibração (CMCs) abordadas nos escopos de acreditação e determinar seu impacto na comprovação metrológica.

1.1.2 Objetivos Específicos

- a) Avaliar os escopos de acreditação dos laboratórios acreditados quanto à variação e forma de apresentação da CMC;
- b) Comparar as CMCs declaradas nos escopos de acreditação de laboratórios de acreditação de diferentes economias com os erros máximos admissíveis para os instrumentos de medição;
- c) Estabelecer diretrizes/aspectos a serem observados na análise quanto à adequação da CMC para um determinado tipo de equipamento de medição.

O presente estudo consistirá no desenvolvimento de uma pesquisa aplicada a partir de uma análise crítica das CMCs abordadas nos escopos de acreditação e avaliação do seu impacto na comprovação metrológica. A pesquisa pode ser classificada como qualitativa, uma vez que inicialmente serão desenvolvidos dois questionários, sendo um direcionado aos laboratórios de calibração para buscar compreender qual o seu entendimento dos parâmetros normativos da ILAC P14 (2013) estabelecidos na construção da CMC nos escopos de acreditação. O segundo questionário será direcionado aos usuários dos serviços de calibração para identificar quais aspectos são observados durante a seleção de um laboratório para prestação de um serviço de calibração de instrumentos de medição. Na sequência, será realizado o levantamento dos dados e a posterior análise dos resultados para interpretações e conclusões futuras. Espera-se estabelecer maior clareza nos aspectos esperados dos laboratórios acreditados na preparação da

CMC. Devido à grande oportunidade de desenvolvimento de pesquisas futuras, o estudo também pode ser classificado como uma pesquisa exploratória.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta os fundamentos teóricos para embasamento do desenvolvimento da pesquisa. Inicialmente serão apresentadas definições e orientações referentes à comprovação metrológica e calibração de instrumentos de medição. Na sequência serão abordados os conceitos e aspectos normativos apresentados na ISO/IEC 17025 (2017) e o processo de acreditação de laboratórios de calibração. Serão retratados também os resultados provenientes das calibrações, os aspectos normativos descritos no ILAC P14 (2013) e a avaliação da incerteza de medição como parte fundamental da calibração. Por fim, a fundamentação teórica discorrerá sobre a Capacidade de Medição e Calibração (CMC) declarada nos escopos de laboratórios de calibração acreditados de acordo com a ISO/IEC 17025 (2017).

2.1 COMPROVAÇÃO METROLÓGICA

A ISO 10012 (2003) é a norma que especifica os requisitos genéricos e fornece orientação para a gestão de processos de medição e comprovação metrológica de equipamento de medição usado para dar suporte e demonstrar conformidade com os requisitos metrológicos.

A norma estabelece que a comprovação metrológica necessita ser planejada e implementada para assegurar que as características metrológicas do equipamento de medição satisfaçam os requisitos metrológicos do processo de medição. Um procedimento de comprovação metrológica pode incluir métodos para verificar que as incertezas de medição e os erros do equipamento de medição estão dentro dos limites permissíveis especificados para o seu uso pretendido.

Segundo Lira (2013), as normas técnicas de qualidade apresentam alguns requisitos básicos para que a comprovação metrológica seja estabelecida. Dentre eles, pode-se citar: escolha do equipamento, calibração e ajuste, procedimentos para comprovação metrológica, comprovação da situação, registros, condições ambientais, preservação, proteção e gerenciamento. Dentre os procedimentos para comprovação metrológica apresentados por Lira (2013), destacam-se:

- a) Métodos de calibração;
- b) Detalhamento do tipo do equipamento, identificação única, localização, frequência de calibração, erro máximo admissível, incerteza de medição;

- c) Critério de aceitação onde é especificado como a média obtida é comparada ao erro máximo admissível, como se demonstra que a incerteza é consistente com os requisitos da medida e, como se demonstra que a exatidão do instrumento torna hábil o seu uso;
- d) Métodos de análise para obtenção dos resultados de calibração;
- e) Condições ambientais, cuidados no manuseio, embalagem, armazenamento, preservação nas condições do uso do instrumento;
- f) Frequência da calibração;
- g) Procedimento para controle do equipamento não conforme para evitar seu uso e critério para reparo ou substituição.

Para Villeta et. al (2009), os processos de comprovação metrológica são essenciais para a melhoria do gerenciamento dos sistemas de medição, pois representam um elemento fundamental na garantia da qualidade da fabricação mecânica. Sob essa ótica, deve-se garantir que as incertezas e os erros de medição estão cobertos pelos limites permitidos, tendo como base as orientações descritas na Norma ISO 10012, onde é sugerido a inclusão de métodos de verificação dentro do processo de comprovação metrológica.

2.1.1 Calibração e verificação

O Vocabulário Internacional de Metrologia (VIM) define a calibração como a operação que estabelece, sob condições especificadas, em uma primeira etapa, a relação entre os valores e as incertezas de medição fornecidos por padrões e as indicações correspondentes com as incertezas associadas. Em uma segunda etapa, relaciona a informação visando obter um resultado de medição a partir de uma indicação. O resultado de uma calibração pode ser expresso por meio de uma declaração, uma função de calibração, um diagrama de calibração, uma curva de calibração ou uma tabela de calibração (VIM, 2012). A verificação é definida como o fornecimento de evidência objetiva de que um dado item atende a requisitos especificados (ISO 10012, 2003).

Em um processo produtivo, as medições realizadas necessitam de confiabilidade nos dados fornecidos. Desse modo, é fundamental que o instrumento de medição seja adequadamente especificado e garanta a rastreabilidade das medições (LIRA, 2013). Segundo Junior e Sousa (2008), a principal motivação para a realização de calibrações é a manutenção da confiabilidade metrológica de sistemas de medição. As calibrações devem apontar se os sistemas de medição em uso são capazes de indicar resultados de medições confiáveis, que

levem a tomadas de decisões seguras e preservem a qualidade de produtos e processos. Segundo Borba (2015), a calibração dos equipamentos de medição é importante, pois pode reafirmar as condições de qualidade do fabricante dentro dos critérios aceitáveis.

2.1.2 Resultados da calibração

O resultado de uma calibração possibilita tanto o estabelecimento dos valores do mensurando para as indicações de medições como a determinação das correções a serem aplicadas no sistema de medição. Normalmente é apresentado em um documento específico denominado certificado de calibração ou relatório de calibração. Trata-se de um relatório resumido, contendo as informações relevantes a respeito da calibração e seus principais resultados (JUNIOR; SOUSA, 2008). Segundo a ISO/IEC 17025 (2017), o laboratório de calibração deve ter um procedimento para monitorar a validade dos resultados. Os resultados devem ser analisados criticamente e autorizados previamente à sua liberação. Além disso, devem ser fornecidos com exatidão, clareza e objetividade, sem ambiguidade e devem incluir todas as informações acordadas com o cliente e necessárias para a interpretação dos resultados.

O resultado de uma calibração inclui a incerteza de medição que um laboratório pode alcançar ao realizar calibrações de instrumentos de medição. Nesse sentido os laboratórios acreditados pela ILAC devem estimar a incerteza de medição em consonância com as definições do GUM. Desse modo, os Organismos de Acreditação devem solicitar aos laboratórios de calibração acreditados a estimativa das incertezas de medição para todas as calibrações e medições abrangidas pelo escopo de acreditação (ILAC, 2013).

O ILAC P14 (2013) estabelece que o resultado da calibração deve geralmente incluir o valor medido y e a incerteza expandida associada U . Nos certificados de calibração, o resultado de medição deve ser reportado como $y \pm U$ relacionado com as unidades de y e U . O fator de expansão da incerteza e a probabilidade de abrangência devem ser declaradas no certificado. Normalmente, a probabilidade relatada nos certificados corresponde a aproximadamente 95%. Destaca-se a seguir alguns aspectos, segundo a ISO/IEC 17025 (2017), que devem estar inclusos nos certificados de calibração:

- a) Apresentação das medidas obtidas;
- b) A incerteza de medição do resultado de medição;
- c) Condições em que as calibrações foram realizadas e que tenham influência sobre os resultados de medição;

- d) Uma declaração identificando como os resultados das medições são metrologicamente rastreáveis.

A ISO 10012 (2003) recomenda que os resultados de calibração sejam registrados de forma que seja possível demonstrar a rastreabilidade de todas as medições e que possam ser reproduzidos sob condições semelhantes às condições originais. A ISO/IEC 17025 (2017) define que os laboratórios são responsáveis pelo estabelecimento da rastreabilidade metrológica, de modo que os resultados declarados de acordo com a norma fornecem rastreabilidade metrológica.

2.2 ERRO DE MEDIÇÃO

O erro de medição é obtido pela diferença entre o valor medido de uma grandeza e um valor de referência. É definido como o grau de concordância entre um valor medido e um valor verdadeiro de um mensurando (JCGM, 2012). O mensurando é o objeto de medição, o qual está sujeito à medição. Quando se conhece a ordem de grandeza de um erro de medição, pode-se limitá-lo a valores que tornem a medida confiável. Desse modo, o operador deve conhecer os dois tipos de erro que compõe ao erro de medição: o erro sistemático e o erro aleatório (LIRA, 2013).

O erro sistemático é a componente do erro de medição que em repetidas medições, permanece constante ou varia de maneira previsível. O erro sistemático e suas causas podem ser conhecidos ou desconhecidos, de forma que é possível aplicar uma correção para compensar o erro sistemático conhecido. O erro aleatório consiste na componente do erro de medição que em medições repetidas varia de maneira imprevisível (JCGM, 2012).

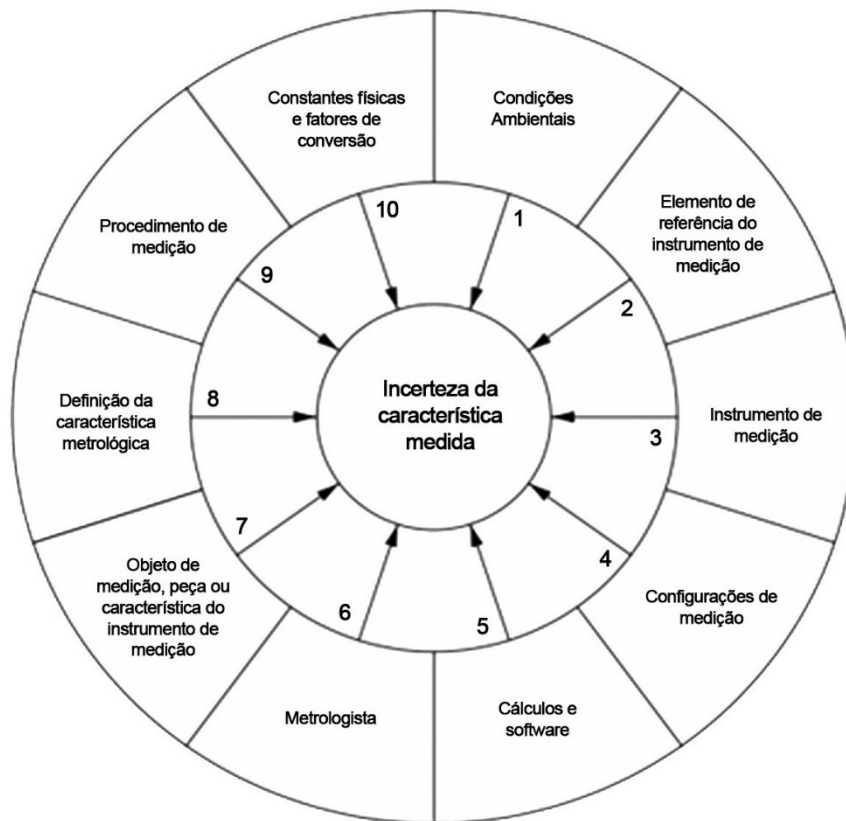
2.3 INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A incerteza de medição é o parâmetro não negativo que caracteriza a dispersão dos valores atribuídos a um mensurando, com base nos dados utilizados. Inclui componentes provenientes de efeitos sistemáticos não corrigidos e aleatórios. A palavra incerteza significa “dúvida”, no sentido mais amplo, incerteza de medição significa dúvida acerca da validade de um resultado (NETO, 2012). A incerteza de medição geralmente engloba muitas componentes

que podem ser estimadas por uma avaliação dos Tipos A e B da incerteza de medição (JCGM, 2012).

Segundo Neto (2012), uma medição sempre estará suscetível a erros que podem ser avaliados com o auxílio de métodos estatísticos ou outros procedimentos específicos mais abrangentes. Nesse sentido, a minimização e a análise dos erros de medição e a estimativa da incerteza são fundamentais na análise de uma medição. A ISO 14253-2 (2011) apresenta as fontes de incerteza em medição para a estimativa da incerteza (Figura 1).

Figura 1 – Fontes de incerteza de medição



Fonte: ISO 14253-2 (2011).

A incerteza de medição consiste na indicação quantitativa da qualidade dos resultados de medição, sem a qual, os mesmos não poderiam ser comparados entre si, com os valores de referência especificados ou com os valores padrão (NETO, 2012). Para Fusco (2014), a avaliação das incertezas de medição é fundamental para a garantia da confiabilidade em medições e o atendimento aos requisitos nas normas de sistema de gestão da qualidade. Isso

implica em um estudo da metrologia dedicado à avaliação e minimização das incertezas de medição.

A avaliação da incerteza de medição é um dos requisitos fundamentais para o processo de calibração (ISO 17025, 2017). Para Jornada (2009) a correta expressão da incerteza de medição por parte de laboratórios de calibração pode ser considerada um fator fundamental, impactando diretamente na análise e interpretação do resultado de medição. No entanto, o conhecimento aprofundado do avaliador de laboratórios com relação ao tema também consiste em um aspecto essencial para a avaliação apropriada da incerteza conforme os padrões estabelecidos na ISO/IEC 17025.

O GUM é um guia que estabelece regras gerais para a avaliação e expressão da incerteza em medição que pode ser aplicado na maioria dos campos de medição. O desenvolvimento do GUM promoveu o surgimento de documentos derivados para o cálculo de incerteza, dentre os quais pode-se citar: M3003 – *The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement* (UKAS, 2012), EA-4/02 M – *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration* (EA, 2013), NIT-DICLA-021 – *Expressão da Incerteza de Medição na Calibração* (DICLA, 2013), DAkkS-DKD-3 – *Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen* (DAkkS, 2010).

No momento em que o resultado de medição é relatado, deve-se fornecer alguma indicação quantitativa da sua qualidade para aqueles que o utilizam possam avaliar a sua confiabilidade. É necessário que exista um procedimento que seja de pronta aplicação, fácil compreensão e ampla aceitação para caracterizar a qualidade de um resultado de uma medição. Além disso, é imperativo que o método de avaliação e expressão da incerteza seja uniforme em todo mundo (JCGM, 2008).

O guia descreve de forma clara e harmonizada como avaliar, estimar e declarar a incerteza de medição (ILAC, 2013). Os princípios do GUM são aplicáveis a um amplo espectro de medições, incluindo aqueles necessários para (JCGM, 2008):

- a) manter o controle da qualidade e a garantia da qualidade na produção;
- b) respeitar e fazer cumprir leis e regulamentos;
- c) conduzir pesquisa básica, pesquisa aplicada e desenvolvimento na ciência e na engenharia;
- d) calibrar padrões e instrumentos e executar ensaios no contexto de um sistema nacional de medição de forma a proporcionar rastreabilidade a padrões nacionais;

- e) desenvolver, manter e comparar padrões físicos de referência, nacionais e internacionais, incluindo materiais de referência.

A expressão da incerteza de medição é um tema importante nos processos de medição devido ao seu impacto percebido tanto para os laboratórios quanto para seus clientes e demais partes envolvidas. No caso dos laboratórios, a importância reside em determinar o grau de dúvida associado às medições e, ao mesmo tempo, cumprir com os requisitos das normas de qualidade, para reconhecimento e competência técnica. Já para os clientes dos laboratórios, a importância está na utilização da incerteza como parâmetro fundamental para tomada de decisões. A incerteza surge como um diferencial competitivo para os laboratórios de ensaio e calibração, pois o cliente está propenso a buscar o laboratório que apresente a melhor qualidade em medições e conseqüentemente a menor incerteza (JORNADA, 2009).

O grande mérito do GUM tem sido a proposta de um tratamento consistente das contribuições da incerteza decorrentes de efeitos aleatórios e sistemáticos, de modo que, para a composição da incerteza de uma medição possa ser formado um valor único no qual ambos os tipos de contribuições são combinados de forma inequívoca e de maneira internacionalmente reconhecida e acordada (BICH, 2014).

2.3.1 Linhas gerais e definições

De acordo com a DICLA (2013), a declaração do resultado de medição somente é completa se ela contiver tanto o valor atribuído ao mensurando quanto a incerteza de medição associada a esse valor.

Os mensurandos são as grandezas particulares submetidas à medições, visto que em calibrações, normalmente se lida com somente um mensurando ou grandeza de saída Y que depende de uma série de grandezas de entrada $X_i (i = 1, 2, \dots, N)$ conforme a relação funcional apresentada na Equação 1:

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (1)$$

A função f representa o procedimento de medição e o método de avaliação, descrevendo como os valores da grandeza de saída Y são obtidos a partir dos valores das grandezas de entrada X_i . O conjunto de grandezas de entrada X_i pode ser agrupado em duas

categorias de acordo com a maneira pela qual o valor da grandeza e sua incerteza foram determinados:

- a) Grandezas cujas estimativas e incertezas associadas são diretamente determinadas na medição em curso. Os valores podem ser obtidos, por exemplo, por uma única observação, observações repetidas, ou através do julgamento baseado na experiência;
- b) Grandezas cujas estimativas e incertezas associadas são incorporadas à medição a partir de fontes externas, tais como grandezas associadas aos padrões de medição calibrados, materiais de referência certificados, ou dados de referência obtidos de manuais.

Uma estimativa do mensurando Y , a estimativa de saída designada por y , é obtida pela Equação 2 utilizando estimativas de entrada x_i para os valores das grandezas de entrada X_i

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (2)$$

Para uma variável aleatória a variância de sua distribuição ou a raiz quadrada positiva da variância, chamada desvio padrão, é utilizada como uma medida da dispersão de valores. A incerteza padrão de medição associada à estimativa de saída ou resultado de medição y , designado por $u(y)$, é o desvio padrão do mensurando Y . Ela deve ser determinada a partir das estimativas x_i das grandezas de entrada X_i , e suas incertezas padrão associadas $u(x_i)$.

2.3.2 Avaliação da incerteza de medição das estimativas de entrada

O Guia para expressão da incerteza de medição (GUM) estabelece orientações sobre as etapas para avaliação da incerteza de medição. Além disso, o documento diferencia as avaliações estatísticas das avaliações baseadas em outros métodos com a categorização em dois tipos respectivamente: Avaliação Tipo A e Avaliação Tipo B da incerteza padrão (UKAS, 2012). Nesse aspecto o documento M3003 (UKAS, 2012) apresenta as orientações baseadas no GUM para cálculo dos dois tipos de avaliação da incerteza.

2.3.2.1 Avaliação Tipo A da incerteza padrão

O Tipo A de avaliação da incerteza é conduzida pela aplicação de análises estatísticas de uma série de observações. Normalmente é usada para obter valores para a repetibilidade ou

aleatoriedade do processo de medição. Para algumas medições, a componente aleatória da incerteza pode não ser significativa em relação a outras contribuições para a incerteza. Mesmo assim é desejável para qualquer processo de medição que a importância relativa dos efeitos randômicos sejam estabelecidos (UKAS, 2012).

Supondo que a grandeza de entrada X_j medida repetidamente é a grandeza Q . Com n observações estatisticamente independentes ($n > 1$), a estimativa da grandeza Q é q , a média aritmética ou a média dos valores individuais observados q_j ($j = 1, 2, \dots, n$) é dada pela Equação 3 (DICLA, 2013):

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n q_j \quad (3)$$

A incerteza de medição associada à estimativa \bar{q} é avaliada de acordo com uma estimativa da variância da distribuição de probabilidade Gaussiana ou Normal é a variância experimental $s^2(q)$ dos valores de q_j dada pela Equação 4:

$$s^2(q) = \frac{1}{n-1} \sum_{j=1}^n (q_j - \bar{q})^2 \quad (4)$$

O valor (positivo) da raiz quadrada de $s^2(q)$ é denominado desvio padrão experimental. A melhor estimativa da variância da média aritmética \bar{q} é a variância experimental da média calculada através da Equação 5:

$$s^2(\bar{q}) = \frac{s^2(q)}{n} \quad (5)$$

O valor (positivo) da raiz quadrada de $s^2(\bar{q})$ é chamada desvio padrão experimental da média. A incerteza padrão $u(\bar{q})$ associada à estimativa de entrada \bar{q} é o desvio padrão experimental da média (Equação 6):

$$u(\bar{q}) = s(\bar{q}) \quad (6)$$

2.3.2.2 Avaliação Tipo B da incerteza padrão

De acordo com DICLA (2013), a avaliação Tipo B da incerteza padrão é a avaliação da incerteza associada com uma estimativa x_i de uma grandeza X_i feita por outros meios que não a análise estatística de uma série de observações. A incerteza padrão $u(x_i)$ é avaliada pelo julgamento científico baseado em todas as informações disponíveis sobre a possível variabilidade de X_i . Os valores da avaliação Tipo B da incerteza podem ser obtidos a partir de:

- a) dados de medições;
- b) experiência ou conhecimento geral do comportamento e propriedades de materiais;
- c) instrumentos relevantes;
- d) especificações do fabricante;
- e) dados provenientes de calibração e de outros certificados;
- f) incertezas atribuídas a dados de referência provenientes de manuais ou publicações.

O uso adequado da informação disponível para uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão de medição exige discernimento baseado na experiência e conhecimento geral, sendo essa uma habilidade que pode ser aprendida com a prática. Uma avaliação do Tipo B da incerteza padrão bem fundamentada pode ser tão confiável quanto uma avaliação do Tipo A, especialmente em uma situação em que a avaliação do Tipo A é baseada em somente um número comparativamente pequeno de observações estatisticamente independentes. Os casos a seguir devem ser distinguidos:

- a) Quando somente um único valor é conhecido para a grandeza X_i , por exemplo, uma única medida, um valor resultante de uma medição anterior, um valor de referência da literatura, ou um valor de correção, este valor será utilizado no lugar de x_i . A incerteza padrão $u(x_i)$ associada a x_i , deve ser adotada quando fornecida. Caso contrário, deve-se calculá-la a partir de dados de incerteza inequívocos. Se dados dessa natureza não estão disponíveis, a incerteza deve ser avaliada com base na experiência;
- b) Quando pode ser suposta uma distribuição de probabilidade para a grandeza X_i , baseada na teoria ou na experiência, então a esperança apropriada ou o valor esperado, e a raiz quadrada da variância desta distribuição, devem ser considerados como a estimativa x_i e a incerteza padrão associada $u(x_i)$;

- c) Se somente os limites superior e inferior a_+ e a_- podem ser estimados para o valor da grandeza X_i (exemplo: especificações do fabricante de um instrumento de medição, uma faixa de temperatura, um erro de arredondamento resultante da redução de dados automatizados), uma distribuição de probabilidade com densidade de probabilidade constante entre esses limites (retangular) deve ser suposta para a possível variabilidade da grandeza de entrada X_i . De acordo com o caso (b) tem-se a Equação 7 definida para o valor estimado e a Equação 8 para o quadrado da incerteza padrão.

$$x_i = \frac{1}{2}(a_+ + a_-) \quad (7)$$

$$u^2(x_i) = \frac{1}{12}(a_+ + a_-)^2 \quad (8)$$

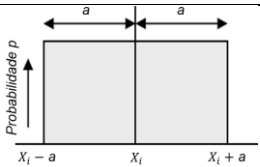
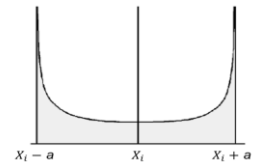
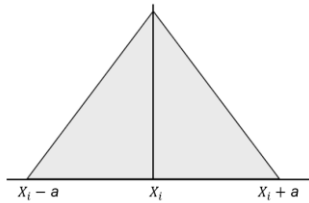
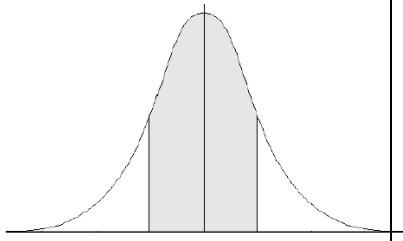
Se a diferença entre os valores limites for denotada por $2a$, a Equação 8 resulta na Equação 9:

$$u^2(x_i) = \frac{1}{3}a^2 \quad (9)$$

A distribuição retangular é uma descrição razoável, em termos de probabilidade, do conhecimento inadequado sobre a grandeza de entrada X_i na ausência de qualquer outra informação que não os limites de variabilidade. Mas se é de conhecimento que os valores da grandeza em questão, próximos ao centro do intervalo de variabilidade são mais prováveis do que valores próximos aos limites, uma distribuição triangular ou normal pode ser um modelo melhor a ser adotado. Por outro lado, se os valores próximos aos limites são mais prováveis do que valores próximos ao centro, uma distribuição em forma de U pode ser mais apropriada.

O Quadro 1 apresenta as distribuições de probabilidade que podem ser adotadas para o cálculo da incerteza padrão das fontes da incerteza na avaliação Tipo B.

Quadro 1 – Distribuições de probabilidade para o cálculo da incerteza padrão na avaliação Tipo B da incerteza

Distribuição de probabilidade adotada	Expressão para cálculo da incerteza padrão	Representação Gráfica
Retangular	$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{3}}$	
Forma de U	$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{2}}$	
Triangular	$u(x_i) = \frac{a}{\sqrt{6}}$	
Normal (proveniente de um certificado de calibração)	$u(x_i) = \frac{U}{k}$	
Normal (proveniente da especificação do fabricante)	$u(x_i) = \frac{\textit{Limite de Tolerância}}{k}$	

Fonte: UKAS (2012).

2.3.3 Cálculo da incerteza padrão da estimativa de saída

Para grandezas de entrada não correlacionadas, o quadrado da incerteza padrão associada com a estimativa de saída é dado pela Equação 10 (EA, 2013):

$$u^2(y) = c_i u(x_i) \quad (10)$$

onde c_i é o coeficiente de sensibilidade (Equação 11) associado à estimativa de entrada x_i , isto é, a derivada parcial da função modelo f com relação à variável X_i avaliada para as estimativas de entrada x_i .

$$c_i = \frac{\partial f}{\partial x_i} = \frac{\partial f}{\partial x_i} | X_i = x_1, \dots, X_N = x_N \quad (11)$$

O coeficiente de sensibilidade descreve o quanto a estimativa de saída y é influenciada por variações da estimativa de entrada x_i .

2.3.4 Incerteza expandida de medição

Conforme orientações estabelecidas na ILAC-P14 (ILAC, 2013) e no EA-4/02 M (EA, 2013), os laboratórios de calibração devem expressar a incerteza de medição expandida U . A incerteza de medição expandida é obtida a partir da multiplicação da incerteza padrão $u(y)$ da estimativa de saída y por um fator de abrangência k (Equação 12).

$$U = ku(y) \quad (12)$$

Nos casos em que uma distribuição normal (Gaussiana) possa ser atribuída ao mensurando e a incerteza padrão associada à estimativa de saída tenha suficiente confiabilidade, o fator de abrangência padronizado $k = 2$ deve ser usado. A incerteza expandida atribuída corresponde a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. Essas condições são satisfeitas na maioria dos casos.

No entanto, para os casos onde a distribuição normal não possa ser justificada, informações sobre a real distribuição de probabilidade da estimativa de saída devem ser utilizadas para se obter um valor do fator de abrangência k que corresponda a uma probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%.

2.3.4.1 Determinando o fator de abrangência k

O fator de abrangência k é escolhido com base no nível de confiança exigido para o intervalo $y - U$ a $y + U$. Em geral, o valor de k está definido entre 2 e 3. No entanto, para aplicações especiais, k pode estar situado fora dessa faixa (JCGM, 2008). O GUM apresenta orientações para a definição do fator de abrangência k , o qual, produz um intervalo em torno do resultado y da medição, onde se espera que abranja uma grande fração especificada p da distribuição de valores que poderiam, razoavelmente, serem atribuídos ao mensurando Y . Para

obter o valor do fator de abrangência k que produz um intervalo correspondente a um nível especificado da confiança p , é requerido um conhecimento detalhado da distribuição de probabilidade caracterizada pelo estudo da medição e sua incerteza padrão combinada.

De acordo com UKAS (2012), na maioria das situações de medição, é possível avaliar as incertezas Tipo B com grande confiabilidade. Além disso, se o procedimento de medição seguido for bem estabelecido e se as avaliações Tipo A forem obtidas de um número suficiente de observações, então o uso de um fator $k = 2$, significará em uma incerteza expandida U , que irá promover um intervalo com uma probabilidade de abrangência próxima a 95%. Isso ocorre, pois, a distribuição tende à normalidade conforme o número de observações aumenta e $k = 2$ corresponde a 95,45% de confiança para uma distribuição normal.

Entretanto, em alguns casos, pode não ser prático basear a avaliação Tipo A em um grande número de leituras, podendo resultar em uma probabilidade de abrangência significativamente menor do que 95% se o fator de $k = 2$ for usado. Nessas situações, o valor de k , deveria ser baseado na distribuição *t-Student* do que a distribuição normal. O valor de k irá fornecer o valor da incerteza expandida U , que mantém a abrangência da probabilidade aproximadamente ao valor requerido de p .

Segundo orientações estabelecidas pelo UKAS (2012) no documento M3003, para obter o valor de k , é necessário determinar uma estimativa dos graus de liberdade efetivos, v_{eff} , da incerteza padrão da estimativa de saída $u(y)$. O GUM recomenda o uso da Equação de *Welch-Satterthwaite* (Equação 13) para calcular v_{eff} , baseado nos graus de liberdade v_i das incertezas padrão individuais.

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} \quad (13)$$

Os graus de liberdade v_i para contribuições obtidas das avaliações Tipo A são $n - 1$, onde n é o número de leituras usadas para avaliar $s(q_j)$. Geralmente é possível considerar os graus de liberdade v_i das contribuições Tipo B da incerteza, como infinitos com um alto grau de confiabilidade.

2.3.5 Apresentação da avaliação da incerteza de medição

Segundo a NIT-DICLA-021, a análise de incertezas para uma medição, deve incluir uma relação de todas as fontes de incerteza junto com as incertezas padrão associadas da medição e os métodos para avaliá-las. Para medições repetidas, o número n de observações também precisa ser declarado. Para que se tenha maior clareza, a norma recomenda a apresentação dos dados relevantes para a análise na forma de uma tabela. Todas as grandezas devem ser representadas por um símbolo X_i , ou uma identificação abreviada. Para cada grandeza, devem ser especificadas pelo menos a estimativa x_i , a incerteza padrão de medição associada $u(x_i)$, o coeficiente de sensibilidade c_i e as contribuições de incerteza $u_i(y)$. O Quadro 2 apresenta um modelo para apresentação dos dados. A incerteza padrão associada com o resultado da medição $u(y)$, fornecida no canto inferior direito do Quadro 2 é obtida pela raiz quadrada da soma quadrática de todas as contribuições de incerteza $u_i(y)$.

Quadro 2 – Tabela apresentação da avaliação da incerteza de medição das estimativas de entrada

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Distribuição de Probabilidade	Incerteza Padrão $u(x_i)$	Coefficiente de sensibilidade c_i	Contribuição para a incerteza padrão $u_i(y)$	Graus de Liberdade
X_1	x_1		$u(x_1)$	c_1	$u_1(y)$	ν_1
X_2	x_2		$u(x_2)$	c_2	$u_2(y)$	ν_2
...
X_N	x_N		$u(x_N)$	c_N	$u_N(y)$	ν_N
Y	y	$k =$			$u(y)$	ν_{eff}
Incerteza Expandida		$U =$				

Fonte: DICLA (2013).

2.3.6 Características metrológicas

As características metrológicas do instrumento de medição devem ser adequadas para o seu uso pretendido e podem estar sujeitas à calibração. A ISO 14978 (2018), é a norma internacional que especifica os conceitos e requisitos gerais para equipamentos de medição usados para medir características geométricas. Tem por objetivo facilitar a comunicação entre

fabricante/fornecedor e cliente/usuário e elaborar com maior precisão a fase de especificação das GPS do equipamento de medição. Além disso, é destinada a atuar como uma ferramenta a ser aplicada em empresas no processo de definição e seleção de características relevantes para o equipamento de medição a ser usado na garantia de qualidade do processo de medição.

As características metrológicas do equipamento medição são definidas como àquelas características capazes de influenciar os resultados de medição tais como: intervalo de medição e resolução, erro de indicação, histerese, características de temperatura, características relacionadas à força de medição aplicadas no contato geométrico, contato geométrico e equipamento auxiliar. As características metrológicas do equipamento de medição são de interesse para o controle dos erros e contribuições para a incerteza originadas pelo equipamento de medição. A repetibilidade das características metrológicas é uma informação importante na avaliação da incerteza de medição e usualmente deve ser expressa como um desvio padrão da variação referida (ISO 14978, 2018).

As características metrológicas definidas especificamente para micrômetros externos e paquímetros são estabelecidas respectivamente nas Normas ISO 3611 (2010) e ISO 13385-1 (2019), ambas baseadas na ISO 14978 (2018).

2.3.7 Fontes de incerteza mais comuns em calibrações na área dimensional

O documento G103 apresenta exemplos de calibrações na área dimensional e relaciona as seguintes fontes de incerteza: incerteza decorrente da repetibilidade, incerteza decorrente do padrão, incerteza decorrente da resolução, incerteza decorrente do coeficiente de dilatação térmica e incerteza decorrente da diferença de temperatura entre o padrão e o mensurando (A2LA, 2016). Vale destacar que o documento M3003, UKAS (2012) e a diretriz DAKKS-DKD-R 4-3 Blatt 10.1, DAkkS (2010), também consideram as mesmas fontes de incerteza para calibrações na área dimensional.

2.3.7.1 Modelo matemático para o erro em calibrações na área dimensional

A partir das fontes mais comuns em calibrações na área dimensional, é possível estabelecer a relação matemática para o erro de indicação Y (Equação 14).

$$Y = \bar{X} - VC - E_{Res} - E_{\Delta T \neq 20^\circ C} - E_{\delta t} \quad (14)$$

Onde,

Y é o erro de indicação;

\bar{X} é resultado base, obtido de uma série de medidas;

VC é o valor convencional atribuído ao padrão;

E_{Res} é o erro devido à resolução;

$E_{\Delta T \neq 20^\circ C}$ é o erro devido ao coeficiente de expansão térmica;

$E_{\delta t}$ é o erro devido à diferença de temperatura entre o padrão e o mensurando.

O desvio devido a diferença de temperatura a 20° C e da diferença entre os coeficientes de dilatação linear atribuídos ao padrão e o mensurando é calculado por $E_{\Delta T \Delta \alpha}$ pela Equação 15.

$$E_{\Delta T \Delta \alpha} = l \Delta_T \Delta_\alpha \quad (15)$$

De forma que:

l é o comprimento nominal;

Δ_T é o desvio de temperatura a 20 °C e

Δ_α é a diferença entre o coeficiente de dilatação linear atribuídos ao padrão e o instrumento.

O desvio devido à diferença de temperatura entre o padrão e o mensurando $E_{\delta t}$ é calculado pela Equação 16.

$$E_{\delta t} = l \delta_t \alpha \quad (16)$$

Onde,

l é o comprimento nominal;

δ_t é a diferença de temperatura entre o padrão e o mensurando

α é o coeficiente de expansão térmica do material.

Substituindo as Equações 15 e 16 na Equação 14, tem-se a Equação 17:

$$Y = \bar{X} - VP - E_{Res} - (l \Delta_T \Delta_\alpha) - (l \delta_t \alpha) \quad (17)$$

A partir da Equação 17 podem ser calculadas as incertezas padrão de entrada para cada componente de incerteza:

- Incerteza proveniente da repetibilidade das medições $u(x_{Rep})$ (Equação 18):

$$u(x_{Rep}) = \frac{s(q_j)}{\sqrt{n}} \quad (18)$$

- Incerteza proveniente da incerteza da calibração do padrão $u(x_{VP})$ (Equação 19):

$$u(x_{VP}) = \frac{U_{VP}}{k_{VP}} \quad (19)$$

- Incerteza devido ao erro máximo admissível atribuído ao padrão $u(x_{EVP})$ (Equação 20):

$$u(x_{EVP}) = \frac{E_{VP}}{\sqrt{3}} \quad (20)$$

- Incerteza proveniente da resolução adotada $u(x_{Res})$ (Equação 21):

$$u(x_{Res}) = \frac{Res}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

- Incerteza proveniente da diferença de temperatura a 20 °C e da diferença entre os coeficientes de dilatação linear do padrão e do mensurando $u(x_{\Delta T, \Delta \alpha})$ (Equação 22):

$$u(x_{\Delta T, \Delta \alpha}) = \frac{\Delta T \Delta \alpha}{\sqrt{3} \sqrt{6}} \quad (22)$$

- Incerteza proveniente da diferença de temperatura entre o padrão e o mensurando $u(x_{\delta t})$ (Equação 23):

$$u(x_{\delta t}) = \frac{\delta t}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

Aplicando a Equação 11 na Equação 17, é possível encontrar os coeficientes de sensibilidade associados a cada variável de entrada: $c_{Rep} = 1$, $c_{VP} = 1$; $c_{Res} = 1$; $c_{\Delta T \neq 20^\circ C} = L$ e $c_{\delta t} = L\alpha$.

2.3.8 Erro máximo admissível (EMA)

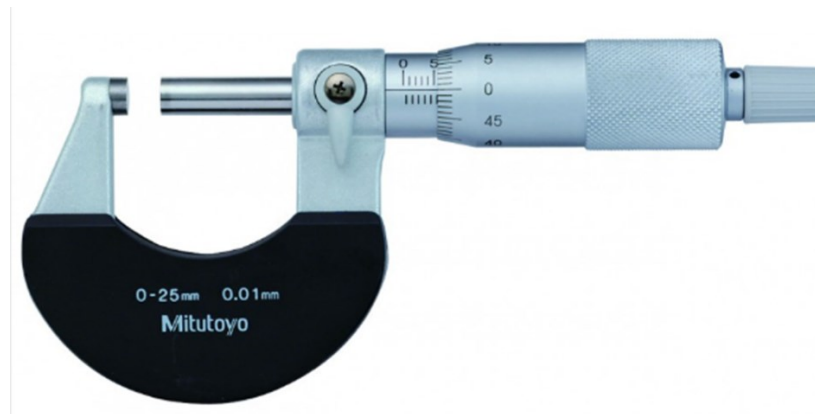
O erro máximo admissível (EMA), do inglês *Maximum Permissible Error* (MPE), consiste no valor extremo do erro de medição, relacionado a um valor de referência conhecido, admitido por especificações ou regulamentações para uma dada medição, instrumento de medição ou sistema de medição (JCGM, 2012). De acordo com a ISO 10012 (2003) após a calibração, as características metrológicas do instrumento de medição devem ser comparadas aos requisitos metrológicos do cliente ou do fabricante. Por exemplo, o erro de indicação do instrumento de medição deve ser comparado ao erro máximo especificado como um requisito metrológico do cliente. Se o erro for menor que o erro máximo admissível, então o instrumento está conforme com os requisitos e caso contrário, ações devem ser tomadas para remover a não conformidade ou o consumidor deve ser informado que o equipamento não pode ser comprovado.

Segundo Hochmuth, Meerkamm e Schweiger (1998), as tolerâncias possuem papel fundamental na engenharia dimensional, onde sua importância reside no fato de que não existe processo de fabricação isento de desvios e tolerâncias bem definidas que promovem a intercambiabilidade das peças, sendo considerada em alguns segmentos como uma estratégia de manufatura. Camargo e Abackerli (2009) ressaltam que a importância da tolerância está definida e integrada em todo o processo de desenvolvimento do produto, possibilitando que as empresas adotem melhores práticas de desenvolvimento com o objetivo de alcançar excelência competitiva no projeto do produto e no processo de produção.

Os EMAs podem ser definidos através dos fabricantes ou por normas técnicas regulamentadoras. As Figuras 2 e 3 apresentam exemplos de especificação da exatidão ou erro máximo admissível pelo fabricante para micrômetro externo e paquímetro respectivamente. A resolução do instrumento de medição é denominada pelo fabricante como graduação.

A Figura 2 apresenta um micrômetro externo analógico de capacidade 0-25 mm e resolução/graduação de 0,01 mm. O erro definido pelo fabricante consiste em $\pm 0,002$ mm na faixa de medição de 0-25 mm.

Figura 2 – Exemplo de EMA definido pelo fabricante para micrômetro externo



Código	Cap. (mm)	Gradação (mm)	Exatidão (mm)
102-301	0-25	0,01	±0,002
102-302	25-50		
102-303	50-75		
102-304	75-100		

Fonte: Mitutoyo (2019).

A Figura 3 apresenta um paquímetro analógico de capacidade de 0-150 mm e resolução/graduação de 0,05 mm. A exatidão ou EMA para indicações no paquímetro é de $\pm 0,05$ mm, especificação dada pelo fabricante.

Figura 3 – Exemplo de EMA definido pelo fabricante para paquímetro



Código	Cap. (mm/pol)	Gradação (mm/pol)	Exatidão
530-104B-10	150 / 6"	0,05 / 1/128	±0,05mm
530-114B-10	200 / 8"	0,05 / 1/128	
530-312B-10	150 / 6"	0,02 / .001"	±0,03mm
530-118B-10	200 / 8"	0,02 / .001"	

Fonte: Mitutoyo (2019).

2.4 ACREDITAÇÃO DE LABORATÓRIOS DE CALIBRAÇÃO

O INMETRO (2012) destaca que a grande vantagem da acreditação consiste no reconhecimento formal da competência técnica das organizações que realizam avaliação da conformidade, consiste em uma maneira segura de identificar aqueles que oferecem máxima confiança em seus serviços e agrega valor:

- a) Para os organismos de avaliação da conformidade acreditados:
 - Disponibiliza um valioso recurso a partir de um grupo de avaliadores da conformidade, independentes e tecnicamente competentes;
 - Fornece um processo de avaliação único, transparente e replicável com o qual se evita a utilização de recursos próprios, se elimina o custo da reavaliação e se reforça a coerência;
 - Reforça a confiança do público nos serviços prestados;
 - Estimula o desenvolvimento de esquemas confiáveis de auto regulação do próprio mercado, incrementando a competência e inovação;
- b) Para organizações certificadas:
 - Possibilita a tomada de decisões acertadas, diminuindo a tomada de decisões com base em avaliações incorretas;
 - Garante a aceitação internacional dos produtos sem a necessidade de repetições das avaliações realizadas;
- c) Para os consumidores finais:
 - Inspira confiança no provedor ao garantir que o produto foi avaliado por um organismo independente e competente, e
 - Aumenta a liberdade de escolha e fomenta um mercado livre, porém com confiabilidade.

Uma das formas de um laboratório gerar resultados válidos e confiáveis declarados em um certificado de calibração é através da acreditação do laboratório de acordo com a ISO/IEC 17025. No Brasil, a Coordenação Geral de Acreditação do INMETRO (Cgcre) é o órgão que concede a acreditação para laboratórios que realizam serviços de calibração e/ou ensaios. Já nos demais países como Alemanha, Reino Unido e Estados Unidos, os organismos de acreditação são respectivamente: *Die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH (DAkKS)*, *United Kingdom Accreditation Service (UKAS)* e *American Association for Laboratory Accreditation (A2LA)*.

A acreditação de laboratórios de calibração é concedida para um escopo constituído por grupos de serviços de calibração. No Brasil, os serviços são determinados na norma NIT-DICLA-012 – Relação padronizada de serviços acreditados para laboratórios de calibração, incluindo serviços, faixas e a capacidade de medição e calibração (INMETRO, 2012). Segundo a NIT-DICLA-012 (2018), o escopo de acreditação deve incluir o respectivo intervalo de medição, descrição dos métodos de calibração e a CMC estabelecida para os serviços de calibração. A norma especifica que o escopo de acreditação dos laboratórios de calibração é elaborado em três momentos:

- a) Solicitação da acreditação: o laboratório deve preencher o formulário FOR-Cgcre-011 – Proposta de escopo da acreditação – ABNT NBR ISO/IEC 17025;
- b) Visita de avaliação: nessa etapa, os representantes do laboratório e os avaliadores/especialistas devem analisar e revisar os serviços a serem acreditados, incluídos e/ou atualizados;
- c) Concessão da acreditação inicial, extensão e/ou atualização do escopo: baseado no conteúdo final da proposta do escopo, a Divisão de Acreditação de Laboratórios (Dicla) prepara o escopo final utilizando a sua base de dados e anexa-o ao processo de acreditação e aprovação da Cgcre e posterior disponibilização na internet.

Segundo Castro (2013) a execução de um sistema de gestão e posterior acreditação formal promovem de forma expressiva a confiabilidade e credibilidade de laboratórios de ensaio e calibração, contribuindo para que as organizações demonstrem formalmente a sua capacidade técnica na prestação de serviços apropriados e compatíveis com o sistema metrológico nacional e internacional. Nesse sentido, as instituições que oferecem serviços de calibração de instrumentos de medição ou ensaios em produtos devem adequar-se à Norma ISO/IEC 17025 com a finalidade de garantir a eficiência e eficácia do Sistema de Gestão da Qualidade (SGQ) e proporcionar qualidade nos resultados declarados em certificados de calibração e/ou ensaios emitidos.

2.4.1 ISO/IEC 17025

A ISO/IEC 17025 (2017) é um documento que especifica os requisitos gerais para a competência, imparcialidade, operação consistente e aplica-se a todas as organizações que realizam atividades de laboratório. Entende-se como atividades de laboratório o ensaio, a

calibração e a amostragem, associada com ensaio ou calibração subsequente. Ressalta-se que clientes de laboratório, autoridades regulamentadoras, organizações e esquemas que utilizem avaliação entre pares, organismos de acreditação e outros, utilizam esse documento para confirmar o reconhecimento da competência dos laboratórios.

A ISO/IEC 17025 (2017) é a norma técnica que tem como objetivo proporcionar confiabilidade na operação de laboratórios. Contém requisitos que permitem demonstrar competência, imparcialidade e operação consistente dos laboratórios ao fornecer o serviço de ensaio e calibração e promover resultados verdadeiros e confiáveis. No Brasil, a versão correspondente é a ABNT NBR ISO/IEC 17025 (2017) publicada pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT).

De acordo com Fischbach (2001), no início dos anos 2000, houve uma crescente mudança na utilização de padrões normativos europeus relativos à acreditação de laboratórios. Com a disseminação da EN ISO/IEC 17025 percebeu-se que não é somente importante validar os métodos de ensaio e calibrar equipamentos, mas também garantir a qualidade dos ensaios e dos resultados de calibração.

O documento contém requisitos para laboratórios, de modo a permiti-los demonstrar que operam de forma competente e que são capazes de promover resultados de medição válidos. A ISO/IEC 17025 (2017) requer que o laboratório planeje e implemente ações para abordar riscos e oportunidades estabelecendo uma base para aumentar a eficácia do sistema de gestão, alcançar resultados melhores e prevenir efeitos negativos. É destacado na norma que o seu uso facilitará a cooperação entre laboratórios e outros organismos, auxiliará no intercâmbio de informações e experiências bem como na harmonização de normas e procedimentos.

Dentre os requisitos apresentados na norma, destaca-se os requisitos de processo onde são trabalhados aspectos relativos à análise crítica de pedidos, propostas e contratos, e, seleção verificação e validação de métodos.

A ISO/IEC 17025 (2017) estabelece que o laboratório deve possuir um procedimento para desempenhar a análise crítica dos pedidos, propostas e contratos. O procedimento deve ser capaz de assegurar que os requisitos dos clientes sejam definidos, documentados, entendidos de forma adequada e que sejam selecionados métodos ou procedimentos apropriados e capazes de atendê-los. O laboratório deve informar o cliente a respeito de qualquer irregularidade no contrato além de cooperar com os clientes para esclarecer o pedido do cliente e para monitorar o desempenho do laboratório em relação ao trabalho realizado.

O laboratório deve ainda utilizar métodos e procedimentos adequados para todas as atividades desempenhadas e quando apropriado, para a avaliação da incerteza de medição e técnicas estatísticas para análise de dados. Quando não é especificado pelo cliente a respeito de qual método deva ser utilizado, a norma recomenda o uso de métodos publicados em normas internacionais, regionais ou nacionais (ISO, 2017).

2.4.2 Capacidade de medição e calibração (CMC)

O ILAC P14 (2013) define a CMC como a capacidade de medição e calibração disponibilizada aos clientes em condições normais conforme descrito nos escopos dos laboratórios de acreditação garantida por um signatário do arranjo da ILAC; ou conforme publicado no banco de dados chave de comparação do CIPM *Mutual Recognition Arrangement* (CIPM MRA). O ILAC P14 (2013) adicionalmente esclarece que a CMC é também definida como a menor incerteza de medição que se espera alcançar por um laboratório durante a calibração ou medição, definição presente também nos escopos da RBC (2019) e A2LA (2019).

A política do ILAC estabelece que a estimativa da incerteza de medição e da CMC, deve estar em conformidade com as orientações apresentadas no GUM. Na Europa, o documento EA-4/02 é a referência para estimativa da incerteza de medição na calibração. A NIT-DICLA 021 (2013), é a norma brasileira que estabelece os requisitos para a expressão e avaliação da incerteza de medição e conseqüentemente da CMC.

2.4.3 Escopo de acreditação

A partir da definição estabelecida na ISO/IEC 17011 (2017), o escopo de acreditação consiste na relação de serviços específicos de avaliação da conformidade para os quais a acreditação foi concedida.

De acordo com a ILAC P14 (2013), o escopo de acreditação de um laboratório de calibração acreditado deve incluir a Capacidade de Medição e Calibração (CMC) expressa em termos de:

- a) Materiais ou medidas de referência;
- b) Calibração/medição, método/procedimento e/ou tipo de instrumento/material a ser calibrado/medido;

- c) Intervalo de medição e parâmetros adicionais quando aplicáveis, ex.: frequência da voltagem aplicada;
- d) Incerteza de medição.

Adicionalmente, a política ILAC P14 (2013), fornece diretrizes a respeito da representação e apresentação da CMC nos escopos de acreditação. Ressalta-se no documento que não deve haver ambiguidade na expressão da CMC nos escopos de acreditação. Os seguintes requisitos devem ser observados nos escopos:

- a) A CMC deve ser expressa com uma incerteza expandida com probabilidade de abrangência de aproximadamente 95%. A unidade da incerteza deve sempre ser expressa na unidade do mensurando ou em um termo relativo ao mensurando, como por exemplo, um percentual;
- b) Os laboratórios de calibração devem fornecer evidência de sua capacidade em realizar calibrações aos clientes em conformidade com métodos ou procedimentos normatizados para que as incertezas alcançadas sejam iguais à sua CMC. Na formulação da CMC, os laboratórios devem levar em consideração o desempenho do “melhor equipamento existente” para a calibração. O “melhor equipamento existente” é entendido como um dispositivo a ser calibrado, o qual é disponibilizado comercialmente ou por outra forma para os clientes, mesmo se o dispositivo tiver um desempenho especial ou um longo histórico de calibrações;
- c) A CMC deve incluir uma contribuição para a incerteza decorrente da repetibilidade e também contribuições da reprodutibilidade, quando disponíveis. No entanto, a CMC não deve incluir contribuições significativas para a incerteza de imperfeições que existam mesmo no melhor equipamento que seja calibrado;
- d) Para algumas calibrações, é reconhecido que o “melhor equipamento existente” de fato não existe e/ou as contribuições para a incerteza atribuídas ao dispositivo afetam significativamente a incerteza. Se contribuições para a incerteza provenientes do dispositivo puderem ser separadas de outras contribuições, então o laboratório pode excluir essas contribuições da CMC. Para esses casos, o escopo de acreditação deve claramente identificar que as contribuições oriundas do dispositivo não estão incluídas na CMC.

Os laboratórios de calibração devem promover evidências que assegurem a capacidade do laboratório em fornecer calibrações ou medições aos clientes de acordo com o método ou

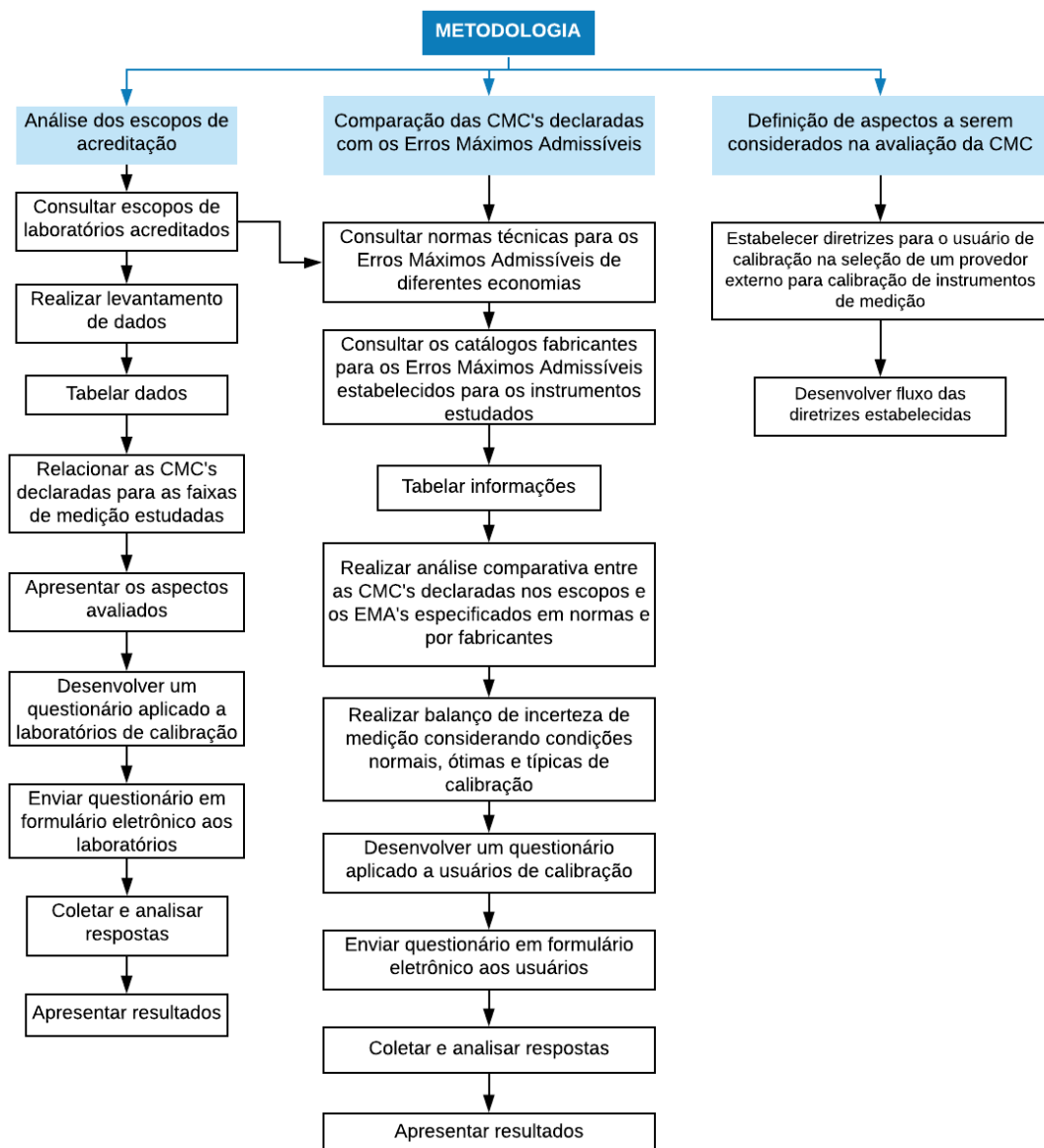
procedimento e/ou o tipo de instrumento/material a ser calibrado ou medido. Dessa forma as incertezas de medição são iguais às aquelas compreendidas pela CMC.

Os escopos são disponibilizados por cada Organismo de Avaliação da Conformidade (OAC). A Cgcre disponibiliza os escopos de acreditação dos laboratórios de acreditação segundo a ABNT NBR ISO/IEC 17025 através da Rede Brasileira de Calibração (RBC, 2019). Os demais países como Estados Unidos, Reino Unido e Alemanha também disponibilizam os escopos dos laboratórios acreditados em suas redes de calibração através de seus respectivos endereços eletrônicos: A2LA (2019), UKAS (2019) e DAkkS (2019).

3 METODOLOGIA

O procedimento experimental da dissertação está definido em três etapas: análise dos escopos de acreditação de laboratórios de calibração em diferentes redes de calibração, comparação das CMCs declaradas nos escopos de acreditação com os erros máximos admissíveis especificados para os instrumentos de medição, e definição de aspectos a serem considerados para avaliação da CMC de um determinado tipo de equipamento de medição. As etapas de metodologia estão apresentadas no Diagrama de Blocos representado na Figura 4.

Figura 4 – Diagrama de blocos para representação do processo metodológico da dissertação



Fonte: Autor (2019).

3.1 ANÁLISE DOS ESCOPOS DE ACREDITAÇÃO

Com o propósito de avaliar os escopos de acreditação de laboratórios de calibração, foi realizado um levantamento das CMCs declaradas nos escopos de redes de calibração de quatro países. O Quadro 3 apresenta as redes de calibração selecionadas para a pesquisa e seus países de origem: Rede Brasileira de Calibração (RBC) no Brasil, *United Kingdom Accreditation Service* (UKAS) no Reino Unido, *Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH* (DAkkS) na Alemanha e *American Association for Laboratory Accreditation* (A2LA) nos Estados Unidos. Nessa etapa, os escopos de acreditação foram avaliados quanto aos valores de CMC e à forma de expressão da CMC declaradas pelos laboratórios de calibração acreditados. As redes de calibração selecionadas para a pesquisa possuem representatividade na área metrológica de seus países e destaque na comunidade científica.

Quadro 3 – Redes de Calibração selecionadas para análise dos escopos de acreditação

Rede de Calibração	Sigla	País
Rede Brasileira de Calibração	RBC	Brasil
<i>United Kingdom Accreditation Service</i>	UKAS	Reino Unido
<i>Die Deutsche Akkreditierungsstelle GmbH</i>	DAkkS	Alemanha
<i>American Association for Laboratory Accreditation</i>	A2LA	Estados Unidos

Fonte: Autor (2019).

A coleta de dados das CMCs dos escopos de acreditação teve como foco a área dimensional, mais especificamente, analisou-se as capacidades de medição e calibração para micrômetros externos e paquímetros. Para micrômetros externos considerou-se comprimentos de 25 mm e 300 mm, já para paquímetros, o comprimento utilizado foi de 150 mm e 600mm. Para o levantamento de dados das CMCs de laboratórios de calibração de diferentes redes de calibração, realizou-se a consulta das bases de dados disponibilizadas pela RBC (2019), UKAS (2019), DAkkS (2019) e A2LA (2019). Após o levantamento das informações, os dados foram organizados em tabelas para facilitar a análise e avaliação dos escopos de acreditação. Para micrômetros externos, foram analisados os escopos de laboratórios acreditados apresentados nas redes, sendo: 174 laboratórios na A2LA (2019), 75 laboratórios na RBC (2019), 57 na DAkkS (2019) e 25 na UKAS (2019). Já para paquímetros, foram analisados os escopos de 54 laboratórios na A2LA (2019), 46 na RBC (2019), 34 na DAkkS (2019) e 19 no UKAS (2019).

3.1.1 Questionário destinado a laboratórios de calibração

Durante o processo de análise das CMCs dos escopos de acreditação dos laboratórios de calibração acreditados pelas redes de calibração, foi evidenciada uma variabilidade significativa nos valores declarados. Como a origem dessa variabilidade era desconhecida, foi desenvolvido um questionário para verificar a interpretação dos laboratórios quanto aos requisitos apresentados no ILAC P14 (2013), em relação aos procedimentos de calibração de instrumentos de medição, análise da incerteza da medição e a estruturação do escopo de acreditação para a declaração da CMC. O questionário foi aplicado aos 85 laboratórios acreditados pela Cgcre para a área dimensional apresentados na RBC. A RBC foi escolhida para aplicar o questionário devido à maior facilidade em se obter respostas dos laboratórios acreditados em nível nacional. O envio do questionário aos laboratórios se deu por meio de formulário eletrônico criado no aplicativo Google Formulários. Sua estrutura foi desenvolvida com sete seções contemplando introdução, identificação do laboratório e cinco perguntas específicas. O questionário direcionado a laboratórios de calibração está apresentado no Apêndice A.

A primeira questão teve como propósito identificar as fontes de variação da incerteza de medição levadas em consideração pelo laboratório na estimativa da CMC. Para respondê-la, foram relacionadas opções de múltipla escolha como: condições ambientais, resolução do instrumento, incerteza do padrão, repetibilidade, reprodutibilidade, erros sistemáticos não corrigidos pelo padrão. Além das opções apresentadas, foi estabelecida a alternativa “outros” com espaço para que o usuário descrevesse qualquer alternativa que não fosse relacionada anteriormente.

A segunda questão, classificada como objetiva, buscou avaliar se o laboratório segue métodos especificados em normas (internacionais, regionais ou nacionais) para realização das calibrações. Foram consideradas as opções “sim” ou “não”. Adicionalmente, a questão apresentou um espaço (obrigatório) para comentários do usuário para identificação dos métodos de calibração adotados.

De acordo com o ILAC P14 (2013), é permitido excluir da CMC as contribuições oriundas do dispositivo. Nesses casos, no escopo de acreditação é utilizado um asterisco para as CMCs que não contemplam todas as fontes de incerteza. A terceira questão consistiu em

identificar, sob a ótica do laboratório, quais são as fontes de incerteza não contempladas na CMC. Foi requerido que o usuário descrevesse sua resposta.

A quarta questão abordou a CMC na fase de orçamentação emitida pelo laboratório de calibração. O usuário foi questionado se a CMC é informada nos orçamentos ou disponibilizada aos clientes de outra forma. Nessa questão foi estabelecido um campo opcional para comentários.

A quinta questão do questionário solicitou que o laboratório apontasse causas que justificassem a existência da variabilidade das CMCs declaradas nos escopos de acreditação dos laboratórios de calibração acreditados.

3.2 COMPARAÇÃO DAS CMC'S DECLARADAS COM OS EMA'S

O Erro Máximo Admissível (EMA) serve como base para limitar o erro dos equipamentos de medição (JCGM, 2012), tanto para os fabricantes quanto para os usuários de calibração. Desse modo, as CMC's declaradas nos escopos de acreditação deveriam ser compatíveis com os EMA's, sob risco de decisão incorreta quanto à situação do equipamento. Sob esse aspecto, realizou-se a avaliação dos Erros Máximos Admissíveis de paquímetro e micrômetros estabelecidos em normas técnicas (Quadro 4) e pelos fabricantes comparando-os com as CMC's declaradas nos escopos de acreditação de laboratórios de calibração.

Quadro 4 – Normas com erros máximos admissíveis de paquímetro e micrômetros

Instrumento de Medição	País	Norma
Micrômetros	Alemanha	DIN 863 (2017)
	Reino Unido	BS 870 (2008)
	Brasil	NBR NM ISO 3611 (1997)
Paquímetro	Alemanha	DIN 862 (2015)
	Reino Unido	BS 887 (2008)
	Brasil	ABNT NBR 216 (2000)

Fonte: Autor (2019).

Foram selecionados três fabricantes de instrumentos de medição para a comparação dos erros máximos admissíveis com as CMC's declaradas nos escopos de acreditação das redes

de calibração. Os fabricantes Mitutoyo, Digimess e Mahr apresentam grande atuação no mercado de instrumentos de medição.

Foram consultados os catálogos gerais dos fabricantes para paquímetros e micrômetros externos (analógicos e digitais) com as mesmas resoluções para identificar os erros máximos admissíveis estabelecidos.

A análise comparativa dos erros máximos admissíveis estabelecidos por normas técnicas e fabricantes com as CMC's declaradas nos escopos abordou os intervalos de 0-25 mm e 275-300 mm para micrômetros externos. Já para paquímetros, os intervalos de medição estudadas foram de 0-150 mm e 0-600 mm. A partir destas informações, foi realizada a análise comparativa entre as CMC declaradas e os erros máximos admissíveis pesquisados.

3.2.1 Balanço de incerteza de medição

Com base na variabilidade identificada nos valores de CMC apresentados nos escopos das redes de calibração para área dimensional, realizou-se os balanços de incerteza para micrômetros externos e paquímetros como estudo de caso para verificar como a incerteza de medição se comporta em diferentes condições de calibração, simulando a calibração de instrumentos de medição de diferentes resoluções adotadas.

3.2.1.1 Balanço de incerteza – micrômetros externos

Para o balanço de incerteza de micrômetros externos e as simulações em condições ótimas e típicas de calibração foi avaliado o erro de contato total das faces e seguindo as recomendações da ISO 3611, foi verificado a partir de uma série de blocos padrão. Os blocos padrão Classe 0 foram utilizados no balanço. Com base nas diretrizes DAkkS (2010), A2LA (2016) e UKAS (2012) foram estabelecidas as fontes de incerteza na calibração de micrômetros externos com dois ciclos de medição em leituras dos blocos padrão de 2,5 – 5,1 – 7,7 – 10,3 – 12,9 – 15,0 – 17,6 – 20,2 – 22,8 e 25 mm. Para a faixa de 300 mm, a calibração de micrômetros externos foi simulada a partir de um estudo de repetibilidade de 5 medições para leituras do comprimento de 300 mm, incertezas estabelecidas nos escopos de laboratórios acreditados e erros estabelecidos em catálogos de fabricantes.

Primeiramente foi apresentado um exemplo de balanço de incerteza de micrômetro externo analógico com resolução de 1 μm e faixa de medição de 25 mm em condições normais

de trabalho. Na sequência foram apresentadas as simulações de balanços de incerteza em condições ótimas e típicas de calibração.

3.2.1.2 Balanço de incerteza - paquímetros

Já para o balanço de incerteza de paquímetros e as simulações foi avaliado o erro de contato parcial das faces de medição seguindo as recomendações da NBR NM 216 (2000), a qual orienta a avaliação de do erro de indicação com blocos padrão conforme padrões estabelecidos na ISO 3650. Os blocos padrão de Classe 0 foram utilizados no balanço. Assim como no balanço de micrômetros externos, as diretrizes DAkkS (2010), A2LA (2016) e UKAS (2012) serviram de base para estabelecer as fontes de incerteza com dois ciclos de medição em leituras dos blocos padrão de 22,5 – 50 – 100 e 150 mm. Para a faixa de 600 mm, a calibração de paquímetros foi simulada considerando um estudo de repetibilidade de 5 medições para leituras do comprimento de 600 mm, incertezas estabelecidas nos escopos de laboratórios acreditados e erros estabelecidos em catálogos de fabricantes.

No entanto, para as simulações em condições típicas, o erro de contato parcial das faces foi avaliado considerando leituras feitas no padrão escalonado, sendo esta uma prática adotada por vários laboratórios de calibração. O catálogo do fabricante Mitutoyo (2019) foi consultado e as características metrológicas do modelo de padrão escalonado 515-556 para 150 mm e 600 mm foram selecionadas para realizar os balanços de incerteza.

Inicialmente foi apresentado um exemplo de balanço de incerteza de paquímetro digital com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 0 a 150 mm em condições normais de trabalho. Na sequência foram apresentadas as simulações de balanços de incerteza em condições ótimas e típicas de calibração.

3.2.2 Questionário destinado a usuários dos serviços de calibração

Adicionalmente, para embasamento da comparação das CMC's com os EMA's foi desenvolvido um questionário destinado aos usuários de serviços de calibração. O questionário teve como objetivo promover um entendimento sobre quais aspectos são observados pelos usuários ao selecionar um laboratório para prestação do serviço de calibração de instrumentos de medição e como eles fazem uso das informações disponibilizadas no escopo do laboratório selecionado.

O questionário foi aplicado a empresas do ramo metalomecânico da região sul do Brasil, uma vez que nessa região há a concentração de grandes polos industriais. O questionário foi enviado a 338 empresas. O formulário também foi desenvolvido no aplicativo Google Formulários. Sua estrutura foi definida em sete seções contemplando a introdução, identificação do usuário e as cinco questões da pesquisa. O questionário destinado aos usuários de calibração está apresentado no Apêndice B.

A primeira questão consistiu em compreender como são definidos os Erros Máximos Admissíveis para os instrumentos de medição utilizados no processo produtivo. Essa questão apresentou quatro opções de resposta definidas por meio: das especificações do fabricante, de normas técnicas, aplicação (tolerância do produto) e outros. O usuário poderia escolher uma ou mais opções de resposta que mais caracterizasse sua realidade.

A partir de um conjunto de opções de respostas de múltipla escolha apresentado na questão 2, foi solicitado ao usuário para apontar quais são os dois aspectos de maior importância adotados pela empresa na seleção de provedores externos para serviços de calibração. As opções apresentadas foram: apoio ao cliente, Capacidade de Medição e Calibração (CMC), credibilidade do laboratório, custos para transporte, localização do laboratório, prazo de entrega, preço da calibração e outro. A questão ainda apresentou uma nota com as definições da CMC e “provedores externos” para auxiliar o entendimento do usuário ao apresentar a resposta.

A terceira questão apresentou duas etapas de resposta. A primeira fase consistiu em compreender por parte do usuário do serviço de calibração se a incerteza de medição é levada em consideração ao realizar a comparação dos resultados de calibração com o Erro Máximo Admissível. Nessa etapa houve três opções de resposta para o usuário: sim, não e outro. A segunda parte da questão solicitou ao usuário para selecionar, dentre uma série de opções de resposta, àquela que melhor indicasse a forma de avaliação dos resultados de calibração. As formas de avaliação apresentadas como opção de resposta foram: $ERRO + INCERTEZA \leq EMA$, $\sqrt{ERRO^2 + INCERTEZA^2} \leq EMA$, $INCERTEZA \leq EMA$, $ERRO \leq EMA$ e Outro.

A penúltima questão do questionário teve por objetivo avaliar se o usuário do serviço de calibração externa selecionaria um provedor externo acreditado que disponibilize em seu escopo uma CMC superior aos EMA's estabelecidos em normas e ou pelos fabricantes. As opções de respostas foram: sim e não. Adicionalmente, foi criado um campo para comentários (opcional) do usuário.

A quinta questão, assim como no questionário destinado aos laboratórios, também consistiu em solicitar uma causa que justificasse a existência da variabilidade percebida nos escopos de acreditação.

3.3 DEFINIÇÃO DE ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS NA AVALIAÇÃO DA CMC

Com base nos aspectos observados nos escopos atuais dos laboratórios de calibração de instrumentos de medição das redes de calibração estudadas e nas orientações descritas em normas técnicas, foram estabelecidas orientações técnicas para qualificar o usuário na seleção adequada de um prestador externo para realizar calibrações de instrumentos de medição. Foram estabelecidas diretrizes para usuário em relação à definição dos erros máximos admissíveis, definição de quais características metrológicas a serem avaliadas na calibração, análise crítica das CMCs apresentadas pelos laboratórios e solicitação de proposta técnica aos laboratórios para a menor incerteza possível a ser obtida na calibração.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

O quarto capítulo da dissertação apresentará os resultados e discussões a partir da análise dos escopos de acreditação, comparação das CMCs com os EMAs e da definição dos aspectos a serem observados pelos usuários e laboratórios quanto à adequação da CMC.

4.1 ANÁLISE DOS ESCOPOS DE ACREDITAÇÃO

Foram avaliados os escopos de acreditação para micrômetros e paquímetros de laboratórios das seguintes redes de calibração: RBC, UKAS, DAkkS e A2LA, sendo o total de laboratórios avaliados apresentado no Quadro 5.

Quadro 5 – Laboratórios de calibração acreditados por rede de calibração

Instrumento	Rede de Calibração	Total de laboratórios avaliados
Micrômetro	A2LA	174
	RBC	75
	DAkkS	57
	UKAS	25
Paquímetro	A2LA	54
	RBC	46
	UKAS	34
	DAkkS	19
Total Geral		484

Fonte: Autor (2019).

4.1.1 Escopos de acreditação para micrômetro externo

Na avaliação dos escopos de acreditação para micrômetros externos pode-se observar diferentes formas de apresentação da CMC (Quadro 6). Nota-se que em alguns casos a CMC é expressa por equações em função do comprimento (L) e/ou da resolução do equipamento (R). A resolução do equipamento também é levada em consideração como uma condicional para o valor expresso da CMC. Além disso, é possível evidenciar que a CMC é representada por

valores fixados para uma determinada faixa de medição. Foi observado poucos laboratórios que representaram a CMC acompanhada de um asterisco.

Quadro 6 – Forma de expressão da CMC para micrômetro externo

Rede de Calibração	Exemplos de formas de expressão da CMC
RBC	1 μm
	$[1,0 + (L/500)] \mu\text{m}$, L em mm
	0,8 μm até 2 μm
	*De 0,0008 mm até 0,003mm
A2LA	160 μin
	$(18 \mu\text{in} + 0.6 R) \mu\text{in}$, R em in
	$(0,6R + 13L) \mu\text{in}$, R e L em in
	21 μin para resolução de 0,00002 in
	$(24 + 9,0 L) \mu\text{in}$, para resolução de 0,00005 in e L em in
UKAS	$1,0 + (8,0 L) \mu\text{m}$, L em m
	$1,5 + (5,0 L) \mu\text{m}$, L em m
DAkKS	$3 \mu\text{m} + 10 \times 10^{-6} L \mu\text{m}$, L em m

Fonte: Autor (2019).

O Quadro 7 apresenta os valores mínimos e máximos de CMC encontrados nos escopos dos laboratórios acreditados para micrômetro externo das redes de calibração estudadas. Os comprimentos avaliados foram 25 mm e 300 mm.

Quadro 7 – Capacidade de Medição e Calibração declaradas para micrômetro externo

Comprimento	Rede de Calibração	RBC	A2LA	UKAS	DAKKS
Para 25 mm	Menor valor (μm)	0,3	0,2	0,9	1,4
	Maior valor (μm)	3	14	1,6	3,8
Para 300 mm	Menor valor (μm)	0,8	0,3	1,7	6
	Maior valor (μm)	14	23	3,4	12

Fonte: Autor (2019).

As redes europeias UKAS e DAkKS expressam a CMC através do mesmo formato, representando-a por equações onde a única variável é o comprimento (L). Entretanto, percebe-

se a existência de variações nos coeficientes das equações atribuídas à CMC nos escopos, o que impacta também em uma dispersão percebida entre os valores extremos de CMC. No entanto, quando se analisa de forma geral todos os escopos de ambas as redes, nota-se maior homogeneidade nos valores de CMC apresentados pela DAkkS do que os valores apresentados pelo UKAS.

As redes A2LA e RBC apresentaram uma maior diversidade nos formatos de expressão da CMC. Os seguintes formatos foram observados: valores únicos, equações em função do comprimento e/ou da resolução (formato com equações em função da resolução do equipamento percebido somente nos escopos da A2LA) e faixa de valores. Nesse aspecto, foi constatada uma maior dispersão nos valores de CMC expressos nos escopos dos laboratórios acreditados pela RBC e A2LA em relação aos valores de CMC das redes europeias.

4.1.2 Escopos de acreditação para paquímetros

No estudo realizado nos escopos de acreditação das redes de calibração para paquímetros, também foi observada grande variedade na forma de expressão da CMC. Por meio do Quadro 8 é possível constatar que a CMC é expressa por valores fixados para uma determinada faixa de medição, com equações em função do comprimento (L) e/ou da resolução (R).

Quadro 8 – Exemplos de forma de expressão da CMC para paquímetros

Rede de Calibração	Exemplos de formas de expressão da CMC
RBC	0,008 mm
	$[10 + (L/50)] \mu\text{m}$, L em m
	0,01 mm até 0,06 mm
	*0,01 mm
A2LA	$(100 + 3.5 L) \mu\text{in}$, L em in
	$(4.8 + 0.6 R) \mu\text{in}$ R em in
	$(360 + 4.5 L + 0.6 R) \mu\text{in}$, L e R em in
	400 μin
UKAS	$10 + (7.0 \times \text{length in m}) \mu\text{m}$
	$15 + (8.0 \times \text{length in m}) \mu\text{m}$
DAKKS	$30 \mu\text{m} + 30 \cdot 10^{-6} \cdot L \mu\text{m}$, L em m

Fonte: Autor (2019).

Entre as redes de calibração estudadas, pode-se observar novamente que os formatos de representação da CMC apresentados pela RBC e A2LA possuem significativa variabilidade em relação às demais redes de estudo. O UKAS e o DAKKS expressam a CMC a partir de equações em função do comprimento (L).

No que se refere aos valores de CMC, é possível constatar uma dispersão significativa tanto para os valores de CMC apresentados entre as redes de calibração como também dentro da mesma rede de calibração para uma mesma faixa de comprimento (Quadro 9).

Quadro 9 – Capacidades de Medição e Calibração para paquímetro

Comprimento	Rede de Calibração	RBC	A2LA	UKAS	DAKKS
Para 150 mm	Menor valor (μm)	1,0	2	11	35
	Maior valor (μm)	30	29	20	35
Para 600 mm	Menor valor (μm)	4,0	2,5	14	48
	Maior valor (μm)	37	33	33	78

Fonte: Autor (2019).

A maior dispersão percebida entre os valores de CMC pode ser constatada na RBC e A2LA. Uma razão que explica esse fato ocorre pelas diversas formas de expressar a CMC observadas nos escopos dos laboratórios acreditados por essas redes (Quadro 8).

O UKAS também apresentou certa variação nos valores de CMC. Foi observado que alguns laboratórios acreditados pelo UKAS utilizam equações com diferentes coeficientes para especificar o cálculo da CMC.

Nos escopos de laboratórios acreditados pela DAKKS, foram encontrados valores de CMC de 35 μm para o comprimento de 150 mm. Isso reflete o fato de que a equação para expressão da CMC é a mesma para todos os laboratórios para a faixa de comprimento de 150 mm, e esta, depende unicamente do comprimento (L). Já para o comprimento de 600 mm, é possível identificar uma variação nos valores de CMC, decorrente dos diferentes coeficientes presentes nas equações para cálculo da CMC para esta faixa.

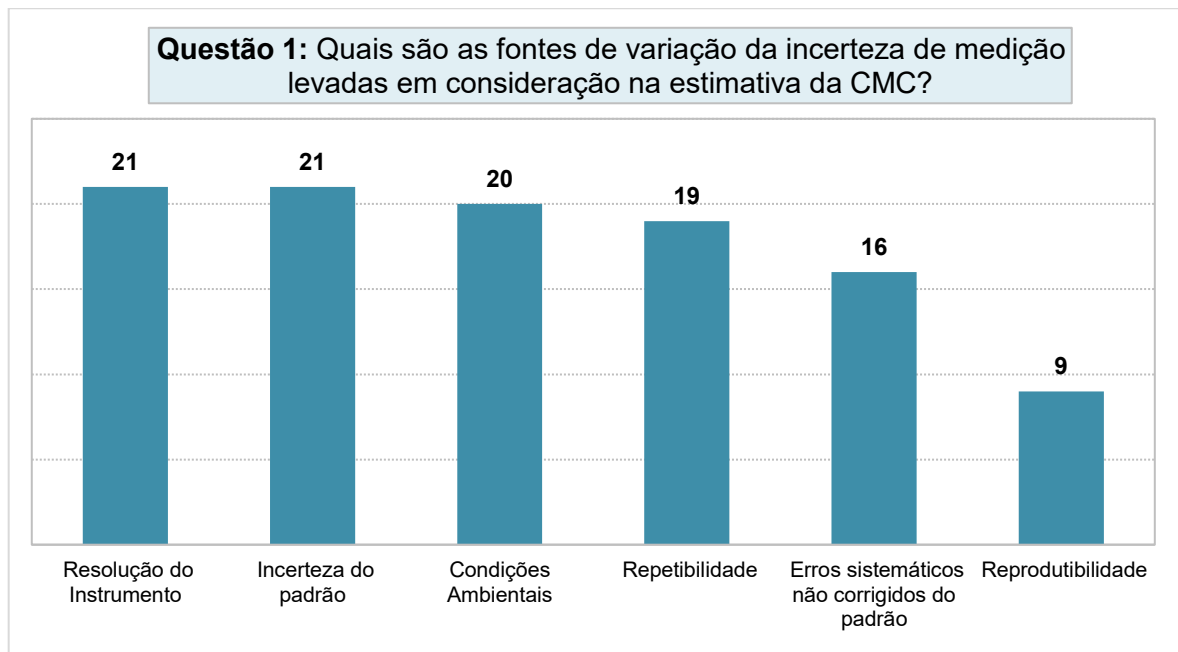
A variabilidade identificada nos valores de CMC nos escopos dos laboratórios de calibração torna o processo de seleção de um provedor externo complexo, pois o usuário do serviço de calibração não tem claramente definido como os parâmetros (a resolução e o tipo do instrumento, por exemplo) são considerados na composição da CMC.

4.1.3 Questionário destinado a laboratórios de calibração

A pesquisa qualitativa aplicada em forma de questionário direcionado a laboratórios da RBC buscou informações adicionais referente à variabilidade encontrada nas CMCs dos escopos de acreditação dos laboratórios acreditados. A pesquisa foi direcionada somente à laboratórios acreditados pela Cgcre, devido a maior facilidade de contato com os laboratórios para a obtenção de respostas. Ao todo, foram recebidas 21 respostas de um total de 85 laboratórios selecionados para a pesquisa.

Quanto ao questionamento sobre quais as fontes de variação da incerteza de medição levadas em consideração na estimativa da CMC (Figura 5), observa-se que a resolução do instrumento e a incerteza do padrão foram citadas por todos os laboratórios.

Figura 5 – Fontes de variação da incerteza levadas em consideração na estimativa da CMC

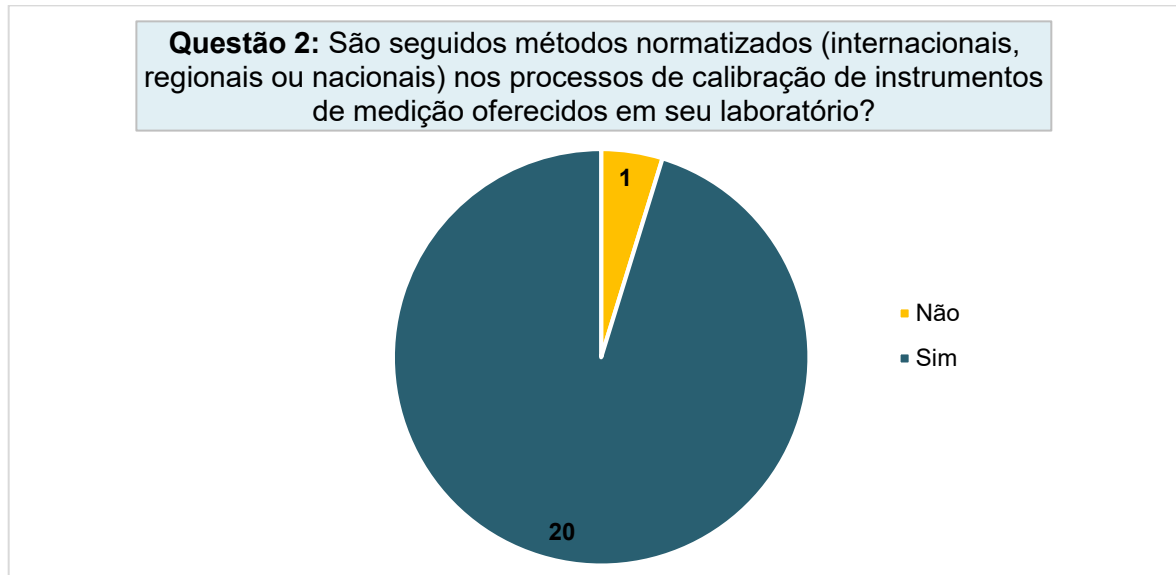


Fonte: Autor (2019).

A partir da segunda questão aplicada no questionário, foi possível constatar que a maioria dos laboratórios segue métodos normatizados para calibração de instrumentos de medição (Figura 6). Como comentários, alguns laboratórios relataram como prática, a aplicação de normas técnicas nacionais e internacionais, documentos orientativos da Cgcre, guias da Euramet para calibrações de instrumentos de medição. O resultado apresentado na segunda questão, vai de encontro com a recomendação estabelecida na ISO/IEC 17025 (2017), onde no

caso de o cliente não especificar o método a ser utilizado, sugere-se a utilização de métodos publicados em normas internacionais, regionais ou nacionais, ou por organizações técnicas respeitáveis, ou conforme especificado pelo fabricante do equipamento.

Figura 6 – Aplicação de métodos normatizados nos processos de calibração



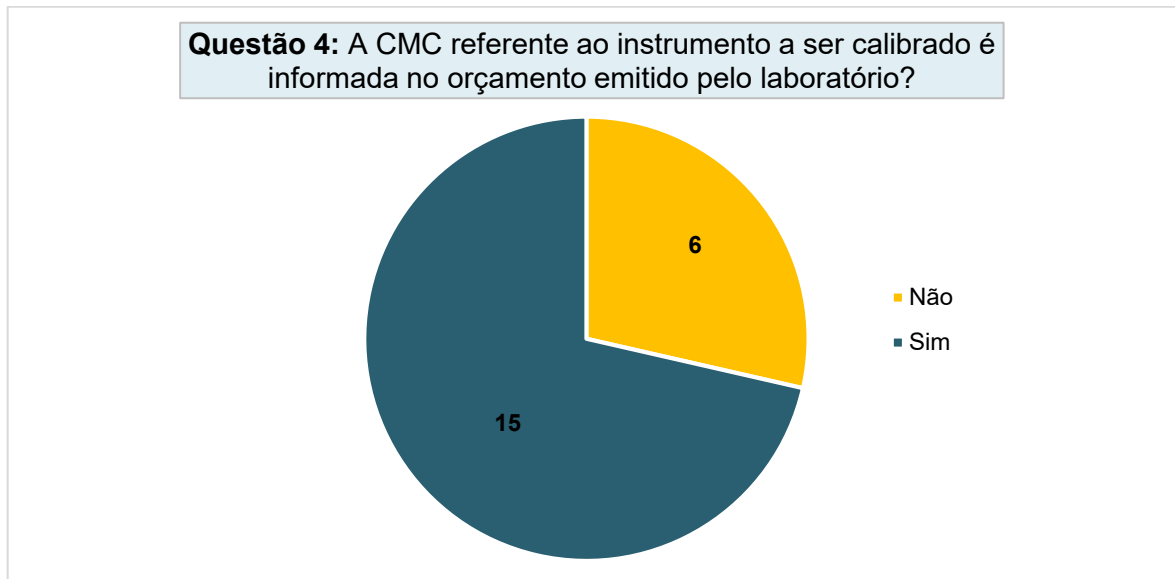
Fonte: Autor (2019).

De acordo com o ILAC P14 (2013), é possível excluir da CMC as contribuições oriundas do dispositivo. No entanto, a partir da terceira questão confirmou-se que esta prática não é adotada pela maioria dos laboratórios, como pode ser observado também na análise dos escopos de acreditação onde verificou-se que poucos laboratórios utilizam o asterisco (*) para indicar fontes de incerteza não contempladas na composição da CMC.

A partir da quarta questão observa-se que a maioria dos laboratórios fornece a CMC no orçamento do serviço de calibração (Figura 7). Como comentários, alguns laboratórios declararam não informar a CMC no orçamento, pois possuem um link direcionado ao site do INMETRO para a página da RBC possibilitando ao cliente a consulta à CMC.

A partir da análise dos escopos de acreditação (Quadro 4 e Quadro 6), percebe-se grande variabilidade nas CMCs declaradas para um mesmo instrumento de medição em uma mesma faixa de comprimento. A Figura 8 apresenta os aspectos descritos pelos laboratórios para justificar a dispersão existente entre os valores de CMC apresentados nos escopos de acreditação.

Figura 7 – CMC informada no orçamento emitido pelo laboratório de calibração



Fonte: Autor (2019).

Figura 8 – Aspectos apontados pelos laboratórios para justificar a dispersão na CMC



Fonte: Autor (2019).

A partir da Figura 8 constata-se que os laboratórios de calibração atribuem a alguns aspectos a causa para a dispersão encontrada nos valores de CMC encontrada nos escopos, dentre os quais, pode-se citar a ausência de documentos orientativos para a elaboração dos escopos, aspectos relacionados aos métodos e padrões utilizados na calibração, conduta e nivelamento das exigências por parte dos avaliadores e a inexistência de critérios padronizados para a estimativa de todas as fontes de incerteza adotadas na calibração.

4.2 COMPARAÇÃO ENTRE AS CMCS DECLARADAS E OS EMAS

Essa seção abordará uma análise comparativa das CMCs com os EMAs estabelecidos em normas e por fabricantes para o instrumento de medição por meio de um estudo de caso aplicado a micrômetros externos e paquímetros. O estudo de caso consistirá em realizar a calibração de micrômetros externos e paquímetros de diferentes resoluções bem como simulações em diferentes condições de calibração.

4.2.1 EMAs estabelecidos para micrômetro externo em documentos normativos

A ISO 3611 (2010) apresenta três características metrológicas principais para o micrômetro externo: erro de indicação com contato total (MPE_J), repetibilidade do erro de indicação com toda a face de contato (MPE_R) e o erro de indicação com contato parcial das faces onde estão considerados o erro de paralelismo e planeza das faces de medição do micrômetro.

A norma brasileira NBR NM ISO 3611 (1997) é baseada na ISO 3611 (1978), e define de forma geral que os erros especificados são determinados a uma temperatura de referência de 20 °C. O erro máximo admissível é definido pelo erro de medição ($F_{m\acute{a}x}$) em qualquer ponto da faixa de medição, sob uma força de medição de 10 N. A Equação 24 apresenta o erro máximo admissível em função do limite inferior de ajuste de zero (origem) na faixa de medição:

$$F_{m\acute{a}x} = 4 + A/50 \quad (24)$$

Onde,

$F_{m\acute{a}x}$ é o erro máximo admissível em qualquer ponto da faixa de medição em μm , e,

A é o limite inferior (ajuste de zero = origem) na faixa de medição, em milímetros.

A Alemanha segue aplicando a norma DIN 863-1 (2017), onde são estabelecidos os erros máximos admissíveis de indicação de contato total (MPE_J) e contato parcial (MPE_E) somente.

O Reino Unido mantém a aplicação da BS 870 (2008), a qual estabelece o erro máximo admissível para micrômetros externos de hastes fixas e hastes intercambiáveis separadamente. Para ambos os casos, a norma define os erros máximos admissíveis de planeza e paralelismo para as faces de medição.

O Quadro 10 resume os erros máximos admissíveis estabelecidos para as principais características metrológicas do micrômetro externo em diferentes normas, para comprimentos até 300 mm.

Quadro 10 – EMAs para micrômetros externos estabelecidos em normas técnicas

Faixa de Medição (mm)	NBR NM ISO 3611 (1997)			DIN 863 (2017)		BS 870 (2008)		
	Erro de indicação \pm (μm)	Paralelismo \pm (μm)	Planeza \pm (μm)	Erro de indicação contato total das faces de medição \pm (μm)	Erro de indicação contato parcial das faces de medição \pm (μm)	Erro de indicação \pm (μm)	Paralelismo \pm (μm)	Planeza \pm (μm)
0 a 25	4	2	1	4	2	3	3	1
25 a 50	4	2	1	4	2	3	3	1
50 a 75	5	3	1	5	3	3	5	1
75 a 100	5	3	1	5	3	3	5	1
100 a 125	6	4	1	6	3	3	5	1
125 a 150	6	4	1	6	3	3	5	1
150 a 175	7	5	1	7	4	3	5	1
175 a 200	7	5	1	7	4	3	5	1
200 a 225	8	6	1	8	4	3	5	1
225 a 250	8	6	1	8	4	3	8	3
250 a 275	9	7	1	9	5	3	8	3
275 a 300	9	7	1	9	5	3	8	3

Fonte: Autor (2019).

É possível constatar que a BS 870 (2008) apresenta o mesmo valor de erro de indicação ($\pm 3\mu\text{m}$) em todas as faixas de medição. Isso ocorre, pois, a norma considera o erro do fuso micrométrico como o erro de indicação em todas as faixas de medição. Já as demais normas estudadas consideram o erro de indicação incluindo o comportamento do erro em toda a faixa de medição.

4.2.2 EMAs estabelecidos para paquímetro em documentos normativos

A ISO 13385-1 (2011), define como características metrológicas do paquímetro o erro de indicação em medição externa com contato parcial das faces (*E*), repetibilidade do erro de indicação em medição externa de contato parcial das faces (*R*), erro de indicação decorrente da mudança de escala (*S*), erro de indicação em medição externa com contato linear (*L*), erro de indicação em medição externa com contato total das faces de medição (*J*) e, erro de indicação decorrente do uso das bordas das orelhas em pequenos orifícios (*K*).

O Brasil segue aplicando a ABNT NBR NM 216 (2000), a Alemanha a DIN 862 (2015), e o Reino Unido, a norma BS 887 (2008).

O Quadro 11 resume os erros máximos admissíveis de indicação para paquímetros estabelecidos em normas técnicas para comprimentos até 600 mm.

Quadro 11 – EMAs de indicação para paquímetro estabelecidos em normas técnicas

Comprimento (mm)	Erro máximo admissível de indicação \pm (μm)							
	NBR NM 216 (2000)			DIN 862 (2015)				BS 870 (2008)
	Resolução			Resolução				Resolução
	0,1 mm	0,05 mm	0,02 mm	0,1 mm	0,05 mm	0,02 mm	0,01 mm	0,02 mm
50	50	50	20	50	50	20	20	20
100	50	50	20	50	50	20	20	20
200	50	50	30	50	50	30	30	20
300	50	50	30	50	50	30	30	20
400	100	75	30	60	60	30	30	40
500	100	75	30	70	70	30	30	40
600	100	75	30	80	80	30	30	40

Fonte: Autor (2019).

A ABNT NBR NM 216 (2000) especifica os requisitos principais para as características construtivas, dimensionais e de desempenho de paquímetros com várias faixas de medição. São definidos na norma os erros máximos admissíveis de indicação para instrumentos de escala circular, nônio e indicação digital para diferentes resoluções.

A DIN 862 (2015), define o erro máximo admissível de indicação para equipamentos com resoluções de 0,1 mm, 0,05 mm, 0,02 mm e 0,01 mm.

A BS 887 (2008) define os erros máximos admissíveis de indicação em qualquer posição dentro da faixa de medição apenas para instrumentos com resolução de 0,02 mm.

4.2.3 Especificação do EMA por fabricantes

Os Quadros 12 e 13 apresentam respectivamente os erros máximos admissíveis estabelecidos pelos fabricantes selecionados para micrômetros externos e paquímetros de diferentes resoluções e modelos para as capacidades de medição de 0 a 25 mm e até 300 mm para micrômetros e capacidades de 0 a 150 mm e 0 a 600 mm para paquímetros.

Quadro 12 – Erros máximos admissíveis especificados por fabricantes para micrômetros externos

Tipo	Capacidade	Resolução Indicada	Erro Máximo Admissível (Exatidão) \pm (μm)		
			Mitutoyo	Digmess	Mahr
Analógico	0-25 mm	0,01 mm	2	4	4
Analógico	0-25 mm	0,001 mm	2	4	-
Digital	0-25 mm	0,001 mm	1	2	2
Digital - ultra exatidão	0-25 mm	0,0001 mm/ 0,0005 mm	0,5	-	-
Analógico	275-300 mm	0,01 mm	5	9	9
Digital	275-300 mm	0,001 mm	4	6	-

Fonte: Autor (2019).

Durante a consulta aos catálogos gerais dos fabricantes, observou-se que os fabricantes Digimess (2018) e Mitutoyo (2019) não fazem referência a normas técnicas para especificação dos EMAs. Já a fabricante Mahr (2013), faz referência à DIN 863-1 em seu catálogo, de forma que o limite do erro é representado pela letra G. Na versão atual da DIN 863 (2017), o erro G corresponde ao erro máximo admissível de contato total das faces de medição.

Observa-se nas faixas de medição de 0 a 25 mm e 275 a 300 mm para micrômetros externos analógicos com resolução de 0,01 mm que os erros máximos admissíveis apresentados no catálogo do fabricante Mitutoyo não são os mesmos considerados em normas técnicas.

Para os instrumentos analógicos com resolução centesimal (0,01mm) e milesimal (0,001 mm) na faixa de 0 a 25 mm foram encontrados os erros máximos admissíveis de $\pm 2 \mu\text{m}$ e $\pm 4 \mu\text{m}$. Já para os instrumentos analógicos na faixa de 275 a 300 mm com resolução de 0,01 mm, os erros máximos encontrados foram de $\pm 5 \mu\text{m}$ e $\pm 9 \mu\text{m}$.

Para os instrumentos digitais com resolução milesimal (0,001 mm), foram encontrados os erros máximos admissíveis de $\pm 1 \mu\text{m}$ e $\pm 2 \mu\text{m}$ para a faixa de 0 a 25 mm e de $\pm 4 \mu\text{m}$ e $\pm 6 \mu\text{m}$ para a faixa de 275 a 300 mm.

Adicionalmente, observou-se que o fabricante Mahr não apresenta erros máximos admissíveis para micrômetros externos analógicos com resolução milesimal. Além disso, foi constatado que o fabricante Mitutoyo apresenta em seu catálogo os erros máximos admissíveis para o micrômetro externo digital de ultra precisão com resolução de 0,0001 mm.

Quadro 13 – Erros máximos admissíveis especificados por fabricantes para paquímetros

Tipo	Capacidade	Resolução Indicada	Erro Máximo Admissível (Exatidão) \pm (μm)		
			Mitutoyo	Digimess	Mahr
Digital	0-150 mm	0,01 mm	20	30	30
Analógico (com nônio)	0-150 mm	0,02 mm	30	30	40
Analógico (com nônio)	0-150 mm	0,05 mm	50	50	50
Analógico (com relógio)	0-150 mm	0,01 mm	20	30	30
Analógico (com relógio)	0-150 mm	0,02 mm	30	30	30
Digital	0-600 mm	0,01 mm	50	50	-
Analógico (com nônio)	0-600 mm	0,02 mm	50	70	-
Analógico (com nônio)	0-600 mm	0,05 mm	100	-	-

Fonte: Autor (2019).

Assim como nos catálogos gerais de fabricantes para micrômetros externos, o catálogo geral para paquímetro da fabricante Mahr (2019) foi o único que apresentou referência à uma norma técnica para especificação dos limites de erro. O catálogo referenciou a DIN 862, representando o limite do erro pela letra *G*. Na versão atual, o limite do erro *G* corresponde ao erro máximo admissível de contato parcial das faces de medição (*E*).

Foram observados valores de erro máximo admissível de $\pm 20 \mu\text{m}$ e $\pm 30 \mu\text{m}$ para paquímetro digital (resolução de 0,01 mm) e analógicos com relógio (resoluções de 0,01 mm e 0,02 mm) para a faixa de 0 a 150 mm. Já para paquímetros com nônio, e resoluções de 0,02 mm e 0,05 mm, os valores de erros máximos admissíveis encontrados foram de $\pm 30 \mu\text{m}$, $\pm 40 \mu\text{m}$ e $\pm 50 \mu\text{m}$, respectivamente.

Considerando a faixa de 0 a 600 mm, os valores de erros máximos admissíveis encontrados foram de $\pm 50 \mu\text{m}$ (para paquímetro digital de resolução 0,01 mm), e ± 50 , ± 70 e $\pm 100 \mu\text{m}$ para paquímetros analógicos com nônio para as resoluções de 0,02 mm e 0,05 mm.

Observou-se que o fabricante Mahr não possui especificação de erros máximos admissíveis em seu catálogo para paquímetros na faixa de 0 a 600 mm. Já no catálogo do fabricante Digimes não foi encontrado valor de erro máximo admissível para paquímetros analógicos com resolução de 0,05 mm.

4.2.4 Análise comparativa das CMCs com os EMAs

Ao se comparar os valores extremos de CMC apresentados nos escopos das redes de calibração estudadas com os erros máximos admissíveis especificados em normas técnicas e por fabricantes, percebe-se em algumas situações, valores de CMC muito superiores aos erros máximos admissíveis, podendo comprometer um resultado de medição. Não foi observado em nenhum dos escopos estudados uma referência a respeito de qual resolução ou tipo de instrumento (digital ou analógico) foi considerada a CMC declarada. É esperado que a menor resolução disponível seja considerada na avaliação da CMC.

O Quadro 14 apresenta o comparativo entre os valores extremos de CMC para micrômetros externos encontrados na análise dos escopos de acreditação das redes de calibração estudadas em relação aos erros máximos admissíveis especificados por documentos normativos e fabricantes. É possível constatar níveis de incerteza muito altos nos escopos da A2LA para as duas faixas de medição estudadas bem como na RBC e DAkkS para faixa de 275 a 300 mm, implicando em resultados que podem não atender às necessidades dos clientes.

Quadro 14 – Comparativo CMC e EMA especificado em normas e por fabricantes para micrômetro

Faixa de Medição (mm)	Valores extremos da CMC declarada nos escopos (µm)				Erro máximo de indicação em normas técnicas ± (µm)			Erro Máximo Admissível especificado por fabricantes ± (µm)						
	RBC	A2LA	UKAS	DAkkS	NBR NM ISO 3611 (1997)	DIN 863 (2017)	BS 870 (2008)	Resolução (mm)						
								0,001 ^(A)	0,01 ^(A)	0,001 ^(B)	0,01 ^(A)	0,001 ^(B)	0,01 ^(A)	0,001 ^(B)
								Mitutoyo			Digimes		Mahr	
0 a 25	0,3 3	0,2 14,1	0,9 1,6	1,4 3,8	4	4	3	2	2	1	4	2	4	2
275 a 300	0,8 14	0,3 22,5	1,7 3,4	6 12	9	9	3	-	5	-	9	-	-	9

(A) Analógico
(B) Digital

Fonte: Autor (2019).

Ao se comparar os erros máximos admissíveis especificados em normas e por fabricantes com as incertezas encontradas nos escopos para paquímetros (Figura 9), percebe-se que alguns valores também podem comprometer, assim como na avaliação realizada para

micrômetros externos, o resultado final de medição, uma vez que foram evidenciados altos valores de CMC nos escopos.

Figura 9 – Comparativo CMC e os EMAs (paquímetro)

Faixa de Medição (mm)	Valores extremos da CMC declarada nos escopos (μm)				Erro máximo de indicação em normas técnicas (μm)					Erro Máximo Admissível especificado por fabricantes (μm)									
	RBC	A2LA	UKAS	DAkks	Resolução (mm)					Resolução (mm)									
					0,05	0,02	0,05	0,02	0,01	0,02	0,01 ^(D)	0,02 ^(A)	0,05 ^(A)	0,01 ^(D)	0,02 ^(A)	0,05 ^(A)	0,01 ^(D)	0,02 ^(A)	0,05 ^(A)
					NBR NM 216 (2000)		DIN 862 (2015)		BS 870 (2008)	Mitutoyo			Digimess			Mahr			
0 a 150	1 30	2 29	11 20	35 35	± 50	± 20	± 50	± 20	± 20	± 20	± 20	± 30	± 50	± 30	± 30	± 50	± 30	± 50	± 50
0 a 600	4 37	3 33	14 33	48 78	± 75	± 30	± 80	± 30	± 30	± 40	± 50	± 50	± 100	± 50	± 70	-	-	-	-

(A) Analógico

(B) Digital

Fonte: Autor

A variação percebida entre os valores extremos de CMC encontrados nos escopos das redes de calibração dificulta a avaliação do usuário do serviço de calibração ao selecionar um prestador de serviço de forma apropriada para realizar a calibração, uma vez que no escopo não está claro a qual resolução e tipo de instrumento (analógico ou digital) a CMC é referenciada, impactando em uma possível relação errônea por parte do usuário com o erro máximo admissível especificado em norma ou por fabricante.

4.2.5 Balanço da incerteza de medição

Nessa etapa serão apresentados os balanços de incerteza de medição para micrômetros externos e paquímetros. A característica metrológica avaliada nos micrômetros foi o erro de contato total das faces, já nos paquímetros, foi avaliada a característica metrológica do erro de contato parcial das faces. Serão apresentadas simulações com diferentes condições de medição em ambos os casos.

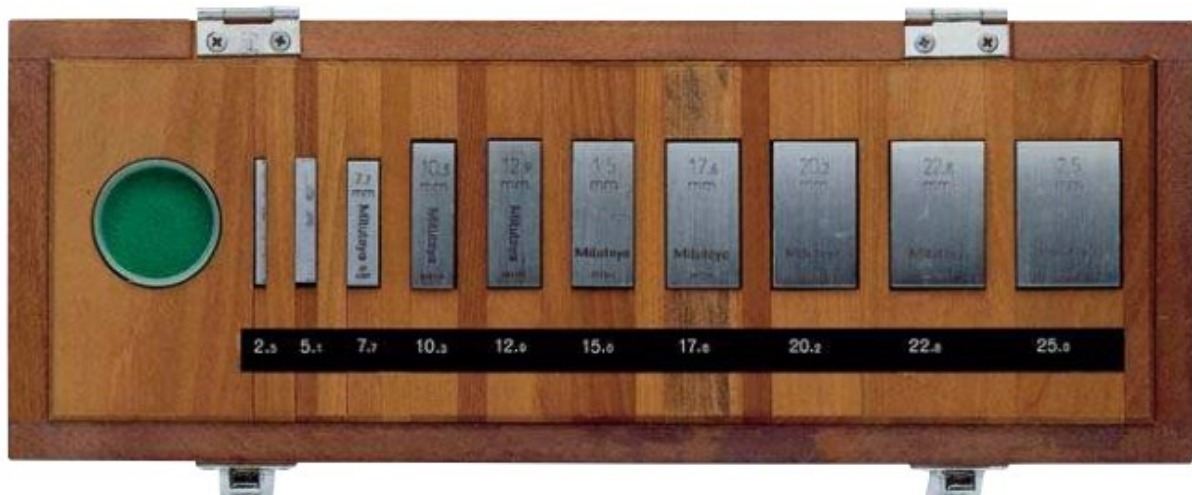
4.2.5.1 Micrômetro Externo

A ISO 3611 (2010) recomenda o uso de métodos normatizados para a calibração de micrômetros. O erro de contato total das faces de medição normalmente é verificado por meio

de uma série de blocos padrão. Para um micrômetro externo de faixa de medição de 25 mm, os erros de indicação com contato total das faces podem ser verificados a partir de uma série conveniente de blocos padrão: 2,5 – 5,1 – 7,7, 10,3 – 12,9 – 15,0 – 17,6 – 20,2 – 22,8 e 25 mm conforme ilustrado na Figura 10.

As diretrizes DAkk-DKD são documentos de aplicação para os requisitos da DIN EN ISO/IEC 17025. Essas diretrizes descrevem aspectos técnicos que envolvem os laboratórios de calibração e servem como modelo para definir procedimentos de calibração. O DAKKS-DKD-R 4-3 Blatt 10.1 (2010) define as fontes de incerteza na calibração de micrômetros externos. Já A2LA exemplifica através do *G103 - A2LA Guide for estimation of uncertainty of dimensional calibration and testing results* as fontes de incerteza de um micrômetro na faixa de 0 a 1 polegada. O documento M3003, (UKAS, 2012) relaciona algumas fontes de incerteza para calibrações da área dimensional. Nesse contexto, conforme já fundamentado anteriormente, estes documentos, apresentam fontes de incerteza comuns, são elas: incerteza do bloco padrão, resolução do instrumento de medição, incerteza do coeficiente de expansão térmica e a incerteza proveniente da diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando.

Figura 10 – Jogo de blocos padrão para calibração de micrômetro externo



Fonte: Mitutoyo (2019).

Com base nas diretrizes DAkkS (2010), A2LA (2016) e UKAS (2012), é apresentado na Figura 10 um exemplo de um balanço de incertezas para o erro de contato total de um micrômetro externo analógico com resolução de 1 μm e faixa de medição de 0 a 25 mm em condições normais de trabalho. Foram considerados dois ciclos de medição. As seguintes fontes de incerteza foram consideradas:

- a) Incerteza proveniente da Repetibilidade (\bar{X}): A distribuição adotada foi a distribuição normal proveniente da avaliação da repetibilidade, então $u(x_i) = s(\bar{q})$. Foi realizado um estudo de repetibilidade de 5 medições de contato total no bloco padrão de 5,1 mm. Para o estudo de repetibilidade foram consideradas as seguintes medições: $q_1 = 5,101$ mm; $q_2 = 5,102$ mm; $q_3 = 5,101$ mm; $q_4 = 5,103$ mm e $q_5 = 5,102$ mm. A média das medições obtida foi $\bar{q} = 5,102$ mm. O desvio padrão calculado foi $s(q_j) = 0,84$ μm . Logo, o desvio padrão da média, ou seja, a incerteza padrão da repetibilidade obtida foi de $u(x_{Rep}) = 0,592$ μm , visto que os erros de indicação foram calculados a partir da média obtida de 2 ciclos de medição. Com um coeficiente de sensibilidade igual a 1, a contribuição da incerteza padrão $u_{Rep}(y) = 0,592$ μm .
- b) Incerteza do bloco padrão (U_{bl}): aplicada a incerteza de $0,08$ μm , $k = 2$ conforme escopo de laboratório de calibração da RBC selecionado para o estudo. Como a incerteza é proveniente de um certificado de calibração, a distribuição adotada foi a normal. A incerteza padrão do bloco padrão obtida foi $u(x_{UBL}) = 0,04$ μm . Considerando $c_{ubl} = 1$, então a contribuição da incerteza padrão obtida foi $u_{ubl}(y) = 0,04$ μm .
- c) Erro do bloco padrão de 25 mm (E_{bl}): erro de $\pm 0,14$ μm , típico do bloco de classe zero conforme especificado na ISO 3650 (1998). A distribuição de probabilidade adotada para o erro do bloco padrão de Classe 0 foi a retangular, conforme exemplo de balanço de incerteza para micrômetro apresentado no documento G103A (A2LA, 2016). Desse modo, a incerteza padrão foi obtida através da divisão do erro máximo admissível do bloco padrão pela raiz quadrada de três (Quadro 1). Então, a incerteza padrão obtida foi $u(x_{Ebl}) = 0,081$ μm . Considerando que o coeficiente de sensibilidade do erro do bloco padrão é igual a 1, então a contribuição da incerteza padrão obtida foi $u_{Ebl}(y) = 0,081$ μm .
- d) Resolução do instrumento de medição (Res): Considerando um micrômetro com resolução de 1 μm , o último dígito que pode ser lido é provável que seja qualquer número entre 0 e 9. Logo, a distribuição de probabilidade adotada foi a retangular, onde a incerteza padrão da resolução do instrumento de medição foi calculada pela divisão da resolução adotada do instrumento por raiz de três. Logo, a incerteza padrão calculada foi $u(x_{Res}) = 0,577$ μm . Considerando um coeficiente de sensibilidade da resolução igual a 1, a contribuição da incerteza padrão obtida foi $u_{Res}(y) = 0,577$ μm .

- e) Diferença entre o coeficiente de expansão térmica entre o padrão e o mensurando para temperatura diferente a 20 °C ($\Delta_\alpha \Delta_T$): Durante as medições, o laboratório foi mantido a 20°C \pm 0,5°C. Entretanto o termômetro não mede a temperatura exatamente havendo uma incerteza da temperatura indicada pelo termômetro. Diferença entre o coeficiente de expansão térmica atribuídos ao padrão e o micrômetro $\Delta_\alpha = 1,5 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ ou $1,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$).

Conforme exemplo de balanço de incerteza para calibração de um bloco padrão de comprimento nominal de 50 mm apresentado no EA-4/02, foram consideradas duas distribuições de probabilidade para a componente de incerteza referente ao coeficiente de expansão térmica. Foi considerada a distribuição retangular referente à diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando a 20 °C ($\Delta_T/\sqrt{3}$) e a distribuição triangular referente à variação do coeficiente de dilatação linear entre o padrão e o instrumento ($\Delta_\alpha/\sqrt{6}$) (EA, 2013). A incerteza padrão calculada foi obtida a partir da multiplicação dos valores do desvio de temperatura a 20 °C (Δ_T) e a diferença entre o coeficiente de dilatação linear atribuídos ao padrão e o mensurando (Δ_α) divididos por raiz de 3 e raiz de 6 respectivamente. Logo, $u(x_{\Delta_\alpha \Delta_T}) = 1,77 \times 10^{-7}$. Como $c_{\Delta_\alpha \Delta_T} = L = 25 \text{ mm}$ a contribuição da incerteza padrão obtida foi $u_{\Delta_\alpha \Delta_T}(y) = 0,0044 \text{ } \mu\text{m}$

- f) Diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando (δ_t): A diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando foi estimada para não exceder 0,2°C. O coeficiente de dilatação linear do aço é de aproximadamente 11,5 ppm/°C ou $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Foi assumida a distribuição retangular, logo a incerteza padrão calculada foi obtida pela divisão da diferença de temperatura entre o bloco e o mensurando por raiz de três. Logo, $u(x_{\delta_t}) = 0,115 \text{ }^\circ\text{C}$. Considerando $c_{\delta_t} = L\alpha$, a contribuição da incerteza padrão foi $u_{\delta_t}(y) = 0,0033 \text{ } \mu\text{m}$.

Da Equação 10, tem-se a incerteza padrão da estimativa de saída para o balanço de incerteza do paquímetro:

$$u_{(y)} = 0,832 \text{ } \mu\text{m}$$

Da Equação 13, é possível obter o valor dos graus de liberdade efetivos:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} = \frac{(0,832)^4}{0,03062} = 15,65 \approx 15 \text{ graus de liberdade efetivos.}$$

Considerando 15 graus de liberdade efetivos e um nível de confiança de 95,45%, obteve-se o valor de $k = 2,18$ da Tabela da Distribuição *t-Student*.

Aplicando os valores obtidos de $u_{(y)}$ e k na Equação 12, foi possível encontrar o valor da incerteza expandida.

$$U = k u_{(y)} = (2,18) (0,832) = 1,8 \mu\text{m}$$

Portanto, conforme apresentado na Figura 11, verifica-se que a incerteza expandida obtida, em condições controladas de calibração, foi de $U = 1,8 \mu\text{m}$ e $k = 2,18$.

Figura 11 – Balanço de incerteza micrômetro 0 – 25 mm

Componente da incerteza	Tipo	Valor	Divisor	$u(x_i)$	Distribuição	c_i	$u_i(y)$	v_i
Repetibilidade	A	0,84	1,4142	0,592	t	1	0,592	4
Incerteza do bloco padrão	B	0,08	2	0,040	N	1	0,040	∞
Erro do bloco padrão	B	0,14	1,7321	0,081	R	1	0,081	∞
Resolução do instrumento de medição	B	1,0	1,7321	0,577	R	1	0,577	∞
Coefficiente de expansão térmica ($\delta_{\pm 20^\circ\text{C}}$)	B	7,5E-07	4,2426	0,000000177	--	25000	0,0044	∞
Diferenças de temperatura (ΔT)	B	0,2	1,7321	0,115	R	2,88E-01	0,033	∞
			Distribuição	t		Incerteza padrão $u(y)$	0,832	15
						Incerteza expandida (U) [μm]	1,8	
						k	2,18	
						U arredondado	2,0	

Fonte: Autor, 2019.

Partindo das componentes da incerteza apresentadas na Figura 11 e aplicando o mesmo método de cálculo para obter as contribuições da incerteza padrão das componentes de incerteza, algumas simulações foram realizadas para condições ótimas de calibração considerando diferentes resoluções para instrumentos digital e analógico. Foram consideradas as seguintes fontes de incerteza:

- Repetibilidade (Rep): foi considerada a incerteza padrão devido à repetibilidade igual a zero, logo $u_{Rep}(y) = 0$;
- Resolução adotada do instrumento de medição (Res): resolução de 1 μm para instrumento digital ($u_{Res}(y) = 0,289 \mu\text{m}$) e resoluções de 1 μm ($u_{Res}(y) = 0,577 \mu\text{m}$) e 2 μm para instrumento analógico ($u_{Res}(y) = 1,155 \mu\text{m}$).

- c) Incerteza do bloco padrão (U_{bl}): incerteza de $0,08 \mu\text{m}$, $k = 2$ para bloco padrão de 25 mm ($u_{U_{bl-25\text{ mm}}}(y) = 0,040 \mu\text{m}$) e incerteza de $0,5 \mu\text{m}$, $k = 2$ para bloco padrão de 300 mm $u_{U_{bl-300\text{ mm}}}(y) = 0,250 \mu\text{m}$.
- d) Erro do bloco padrão (E_{bl}): erro de $\pm 0,14 \mu\text{m}$ para bloco padrão de 25 mm ($u_{E_{bl-25\text{ mm}}}(y) = 0,081 \mu\text{m}$) e erro de $\pm 0,7 \mu\text{m}$ para bloco padrão de 300 mm ($u_{E_{bl-300\text{ mm}}}(y) = 0,404 \mu\text{m}$), típicos do bloco de classe zero conforme especificado na ISO 3650 (1998);
- e) Diferença entre o coeficiente de dilatação linear atribuídos ao padrão e micrômetro e diferença temperatura a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta_\alpha\Delta_T$): $\Delta_\alpha = \pm 1,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com variações de temperatura de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ em relação à 20°C . Logo, $u_{\Delta_\alpha\Delta_T}(y) = 0,0044 \mu\text{m}$ para comprimento de 25 mm e $u_{\Delta_\alpha\Delta_T}(y) = 0,053 \mu\text{m}$ para comprimento de 300 mm;
- f) Diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando (δ_t): $\pm 0,2^\circ\text{C}$, sendo o coeficiente de dilatação linear do aço de aproximadamente $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Logo, $u_{\delta_t}(y) = 0,033 \mu\text{m}$ para 25 mm e $u_{\delta_t}(y) = 0,398 \mu\text{m}$ para 300 mm.

As incertezas expandidas estão apresentadas no Quadro 15. Em condições ótimas de calibração, para comprimentos de 25 mm as incertezas variaram entre $0,61 \mu\text{m}$, a $2,3 \mu\text{m}$. Já para comprimentos de 300 mm, as incertezas expandidas variaram de $1,4 \mu\text{m}$ a $2,6 \mu\text{m}$.

Quadro 15 – Incerteza expandida para condições ótimas de calibração (micrômetro externo)

Comprimento [mm]	25	25	25	300	300	300	
Tipo Instrumento	Digital	Analógico	Analógico	Digital	Analógico	Analógico	
Resolução [μm]	1	1	2	1	1	2	
Componentes da Incerteza	Tipo		$u_i(y)$				
Repetibilidade	A	0	0	0	0	0	
Incerteza do bloco padrão	B	0,040	0,040	0,040	0,250	0,250	0,250
Erro do bloco padrão	B	0,081	0,081	0,081	0,404	0,404	0,404
Resolução do instrumento	B	0,289	0,577	1,155	0,289	0,577	1,155
Coeficiente de expansão térmica ($\Delta T=20^\circ\text{C}$)	B	0,0044	0,0044	0,0044	0,053	0,053	0,053
Diferenças de temperatura (δ_t)	B	0,033	0,033	0,033	0,398	0,398	0,398
Incerteza padrão para a estimativa de saída $u(y)$ [μm]		0,304	0,585	1,159	0,686	0,849	1,312
k		2	2	2	2	2	2
Incerteza expandida U [μm]		0,61	1,2	2,3	1,4	1,7	2,6

Fonte: Autor (2019).

Considerando as mesmas componentes de incerteza das condições ótimas e os mesmos cálculos para obter as contribuições das incertezas padrão das componentes da incerteza, realizou-se uma simulação para condições típicas de calibração, e que são práticas rotineiras de

calibração utilizadas pelos laboratórios de calibração para diferentes resoluções. Foram consideradas as seguintes fontes de incerteza:

- a) Repetibilidade (Rep): estudo de repetibilidade de 5 medições para coletar o comprimento do bloco padrão de 5,1 mm. Logo, $u_{Rep}(y) = 0,39 \mu\text{m}$ para micrômetro digital e analógico de 1 μm de resolução e $u_{Rep}(y) = 0,77 \mu\text{m}$ para micrômetro analógico de 2 μm de resolução;
- b) Resolução adotada do instrumento de medição (Res): 1 μm para instrumento digital ($u_{Res}(y) = 0,289 \mu\text{m}$) e 1 μm ($u_{Res}(y) = 0,577 \mu\text{m}$) e 2 μm para instrumento analógico ($u_{Res}(y) = 1,155 \mu\text{m}$);
- c) Incerteza do bloco padrão (U_{bl}): incerteza de 0,08 μm , $k = 2$ para bloco padrão de 25 mm ($u_{U_{bl}-25 \text{ mm}}(y) = 0,040 \mu\text{m}$) e incerteza de 0,5 μm , $k = 2$ para bloco padrão de 300mm ($u_{U_{bl}-300 \text{ mm}}(y) = 0,250 \mu\text{m}$);
- d) Erro do bloco padrão (E_{bl}): erro de $\pm 0,14 \mu\text{m}$ para bloco padrão de 25 mm ($u_{E_{bl}-25 \text{ mm}}(y) = 0,081 \mu\text{m}$) e erro de $\pm 0,7 \mu\text{m}$ para bloco padrão de 300 mm ($u_{E_{bl}-300 \text{ mm}}(y) = 0,404 \mu\text{m}$), típicos do bloco de classe zero conforme especificado na ISO 3650 (1998);
- e) Diferença entre o coeficiente de dilatação linear atribuídos ao padrão e micrômetro e diferença temperatura a 20 °C ($\Delta_\alpha\Delta_T$): $\Delta_\alpha = \pm 1,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com variações de temperatura de $\pm 1,0 \text{ }^\circ\text{C}$ em relação à 20°C. Logo, $u_{\Delta_\alpha\Delta_T}(y) = 0,009 \mu\text{m}$ para 25 mm e $u_{\Delta_\alpha\Delta_T}(y) = 0,106 \mu\text{m}$ para 300 mm;
- f) Diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando (δ_T): $\pm 0,5^\circ\text{C}$, sendo o coeficiente de dilatação linear do aço de aproximadamente $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$. Logo, $u_{\delta_t}(y) = 0,083 \mu\text{m}$ para 25 mm e $u_{\delta_t}(y) = 0,996 \mu\text{m}$ para 300 mm.

Os resultados estão apresentados no Quadro 16.

Quadro 16 – Incerteza expandida para condições típicas de calibração (micrômetro externo)

Comprimento [mm]	25	25	25	300	300	300	
Tipo Instrumento	Digital	Analógico	Analógico	Digital	Analógico	Analógico	
Resolução [μm]	1	1	2	1	1	2	
Componentes da Incerteza	Tipo	$u_i(y)$					
Repetibilidade	A	0,39	0,39	0,77	0,39	0,39	0,77
Incerteza do bloco padrão	B	0,040	0,040	0,040	0,250	0,250	0,250
Erro do bloco padrão	B	0,081	0,081	0,081	0,404	0,404	0,404
Resolução do instrumento	B	0,289	0,577	1,155	0,289	0,577	1,155
Coefficiente de expansão térmica ($\Delta T \neq 20^\circ\text{C}$)	B	0,009	0,009	0,009	0,106	0,106	0,106
Diferenças de temperatura (δt)	B	0,083	0,083	0,083	0,996	0,996	0,996
Incerteza padrão para a estimativa de saída $u(y)$ [μm]		0,498	0,706	1,396	1,210	1,309	1,778
	k	2,28	2,06	2,06	2,01	2	2,02
Incerteza expandida U [μm]		1,1	1,5	2,9	2,4	2,6	3,6

Fonte: Autor (2019).

A partir do Quadro 16, é possível constatar que as incertezas expandidas obtidas em condições típicas de calibração para micrômetro externo variaram de 1,1 μm a 2,9 μm para indicação de 25 mm e 2,4 μm a 3,6 μm para indicação de 300 mm considerando as diferentes resoluções adotadas.

4.2.5.2 Paquímetro

A NBR NM 216 (2000) recomenda métodos para a calibração de paquímetros onde é sugerido que a avaliação do erro de indicação possa ser feita com o auxílio de blocos padrão conforme os padrões da ISO 3650 e com anel padrão. Para a realização do balanço de incerteza de paquímetro, foram feitas leituras em 0; 22,5 mm; 50 mm; 100 mm e 150 mm.

Assim como para micrômetros, a A2LA (2016) exemplifica as fontes para estimativa da incerteza de um paquímetro na faixa de medição de 0 a 6 polegadas: incerteza do bloco padrão, resolução do instrumento de medição, repetibilidade das medições, incerteza do coeficiente de expansão térmica e a incerteza proveniente da diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando.

Baseando-se nas orientações apresentadas nas diretrizes DAkkS (2010), A2LA (2016) e UKAS (2012), é apresentado na Figura 11 um exemplo de um balanço de incertezas para o erro de contato parcial em medições externas de um paquímetro digital com resolução de 0,01 mm e faixa de medição de 0 a 150 mm em condições normais de trabalho. Foram feitos dois ciclos de medição. As seguintes fontes de incerteza foram consideradas:

- a) Incerteza proveniente da Repetibilidade (Rep): A distribuição adotada foi a distribuição t -student proveniente da avaliação da repetibilidade, então $u(x_i) = s(\bar{q})$. Foi realizado um estudo de repetibilidade de 5 medições em uma posição. Para o estudo de repetibilidade, foram coletadas cinco medições externas de contato parcial do bloco padrão de 22,5 mm. Foram consideradas as seguintes medições: $q_1 = 22,49$ mm; $q_2 = 22,49$ mm; $q_3 = 22,48$ mm; $q_4 = 22,48$ mm e $q_5 = 22,49$ mm. A média das medições obtida foi $\bar{q} = 22,49$ mm. O desvio padrão calculado foi $s(q_j) = 0,00548$ mm. Logo, a incerteza padrão da repetibilidade obtida foi de $u(x_{Rep}) = 0,00387$ mm, uma vez que os erros de indicação foram obtidos através da média obtida de 2 ciclos de medição. Com um coeficiente de sensibilidade igual a 1, a contribuição da incerteza padrão foi de $u_{Rep}(y) = 0,00387$ mm.
- b) Incerteza do bloco padrão de 50 mm ($U_{bl-50\text{mm}}$): incerteza de $0,07\ \mu\text{m}$, $k = 2$ conforme escopo de laboratório da RBC selecionado para o estudo. Como a incerteza é proveniente de um certificado de calibração, a distribuição adotada foi a normal (Quadro 1). A incerteza padrão do bloco padrão foi calculada através da divisão do valor da incerteza do bloco de 50 mm pelo valor de k , portanto, o valor obtido foi $u(x_{UBL-50}) = 0,000004$ mm. Considerando $c_{Ubl} = 1$, então a contribuição da incerteza padrão obtida foi $u_{Ubl-50}(y) = 0,000004$ mm.
- c) Erro do bloco padrão de 50 mm ($E_{bl-50\text{mm}}$): erro de $\pm 0,20\ \mu\text{m}$, típico do bloco de classe zero conforme especificado na ISO 3650 (1998). A distribuição de probabilidade adotada para o erro do bloco padrão de Classe 0 foi a retangular, conforme exemplo de balanço de incerteza para micrômetro apresentado no documento G103A (A2LA, 2016). Desse modo, a incerteza padrão foi obtida através da divisão do desvio do erro do bloco padrão pela raiz quadrada de três (Quadro 1). A incerteza padrão obtida foi $u(x_{Ebl-50}) = 0,00012$ mm. Considerando que o coeficiente de sensibilidade do erro do bloco padrão é igual a 1, então $u_{Ebl-50}(y) = 0,00012$ mm;
- d) Incerteza de medição do bloco padrão ($U_{bl-100\text{mm}}$) de 100 mm: incerteza de $0,1\ \mu\text{m}$, $k=2$. Considerando uma distribuição de probabilidade normal e os mesmos métodos de cálculo aplicados na obtenção do valor da incerteza padrão combinada para o bloco padrão de 25 mm, tem-se que $u_{Ubl-100}(y) = 0,00005$ mm;
- e) Erro do bloco padrão de 100 mm ($E_{bl-100\text{mm}}$): $\pm 0,4\ \mu\text{m}$, típico do bloco de classe zero conforme especificado na ISO 3650 (1998). Considerando as mesmas premissas de

- cálculo utilizadas para obter o valor da incerteza padrão combinada do erro do bloco padrão de 50 mm, tem-se que $u_{Ebl-100}(y) = 0,00023$ mm;
- f) Resolução do instrumento de medição (Res): considerando um paquímetro digital de resolução de 0,01 mm, o último dígito que pode ser lido é provável que seja qualquer número entre 0 e 9. Logo, a distribuição de probabilidade adotada foi a retangular, onde a incerteza padrão da resolução do instrumento de medição foi calculada pela divisão de meia resolução do instrumento digital por raiz de três. Logo $u(x_{Res}) = 0,00289$ mm. Considerando um coeficiente de sensibilidade da repetibilidade igual a 1, a incerteza padrão combinada da repetibilidade obtida foi $u_{Res}(y) = 0,00289$ mm.
- g) Diferença entre o coeficiente de expansão térmica entre o padrão e o mensurando e diferença de temperatura a 20 °C ($\Delta\alpha\Delta T$): Durante as medições o laboratório foi mantido a 20 °C \pm 0,5 °C. Entretanto o termômetro não mede a temperatura exatamente havendo uma incerteza da temperatura indicada pelo termômetro. Diferença entre o coeficiente de expansão térmica atribuídos ao padrão e o micrômetro $\Delta\alpha = 1,5$ ppm/°C ou $1,5 \times 10^{-6}$ °C⁻¹. A incerteza padrão calculada foi obtida a partir da multiplicação dos valores do desvio de temperatura a 20°C (ΔT) e a diferença entre o coeficiente de dilatação linear atribuídos ao padrão e o mensurando ($\Delta\alpha$) divididos por raiz de 3 e raiz de 6 respectivamente. Logo, $u(x_{\Delta\alpha\Delta T}) = 1,77 \times 10^{-7}$. Como $c_{\Delta\alpha\Delta T} = L = 150$ mm, a contribuição da incerteza padrão obtida foi $u_{\Delta\alpha\Delta T}(y) = 0,0000265$ mm.
- h) Diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando (δ_t): A diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando foi estimada para não exceder 0,2 °C. Se houver uma diferença de $\delta_t = 0,2$ °C entre o bloco padrão e o mensurando, irá causar um erro Δ_L (Equação 7). Sendo o coeficiente de dilatação linear do aço de aproximadamente 11,5 ppm/°C ou $11,5 \times 10^{-6}$ °C⁻¹. Foi assumida a distribuição retangular, logo a incerteza padrão calculada foi obtida pela divisão da diferença de temperatura entre o bloco e o mensurando por raiz de três. Logo, $u(x_{\delta_t}) = 0,115$ °C. Considerando $c_{\delta_t} = L \alpha$, a contribuição da incerteza padrão foi $u_{\delta_t}(y) = 0,002$ mm.

Da Equação 10, tem-se a incerteza padrão da estimativa de saída para o balanço de incerteza do paquímetro:

$$u_{(y)} = 0,0048 \text{ mm}$$

Da Equação 13, é possível obter o valor dos graus de liberdade efetivos:

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4}{v_i}} = \frac{(0,0049)^4}{5,625 \times 10^{-11}} = 10,24 \approx 10 \text{ graus de liberdade efetivos.}$$

Considerando 10 graus de liberdade efetivos e um nível de confiança de 95,45%, obteve-se o valor de $k = 2,32$ da Tabela da Distribuição *t-Student*.

Aplicando os valores obtidos de $u_{(y)}$ e k na Equação 12, foi possível encontrar o valor da incerteza expandida. Portanto, conforme apresentado na Figura 12, verifica-se que a incerteza expandida obtida, em condições controladas de calibração, foi de $U = 0,01$ mm e $k = 2,32$.

Figura 12 – Balanço de incerteza paquímetro 0 – 150 mm

Componente da incerteza	Tipo	Valor	Divisor	$u(x_i)$	Distribuição	c_i	$\mu_i(y)$	v_i/v_{eff}
Repetibilidade	A	0,00548	1,414	0,00387	t	1	0,00387	4
Incerteza de medição do bloco-padrão 50 mm	B	0,0000075	2,00	0,000004	N	1	0,000004	∞
Erro do bloco-padrão 50 mm	B	0,0002	1,732	0,00012	retangular	1	0,00012	∞
Incerteza de medição do bloco-padrão 100 mm	B	0,0001	2,00	0,00005	N	1	0,00005	∞
Erro do bloco-padrão 100 mm	B	0,0004	1,732	0,00023	retangular	1	0,00023	∞
Resolução adotada do paquímetro	B	0,005	1,732	0,00289	retangular	1	0,00289	∞
Temperatura diferente de 20°C	B	0,0000008	4,243	0,00000018	---	150	0,0000265	∞
ΔT entre o padrão e o paquímetro	B	0,2	1,732	0,11547	retangular	1,73E-03	0,00020	∞
Incerteza padrão $u(y)$							0,0048	9
Incerteza expandida (U) [mm]								0,01
k								2,32

Fonte: Autor (2019).

Tomando como base o exemplo de cálculo da incerteza expandida apresentada na Figura 12 e suas componentes da incerteza, algumas simulações foram realizadas para condições ótimas de calibração considerando paquímetros com resoluções de 0,01 mm, 0,02 mm e 0,05 mm para instrumentos digital e analógicos com nônio para as faixas de 150 e 600 mm. Foram avaliadas as seguintes fontes de incerteza:

- Repetibilidade (Rep): foi considerada a incerteza padrão devido à repetibilidade igual a zero, logo $u_{Rep}(y) = 0$;
- Resolução do instrumento de medição (Res): resolução de 0,01 mm para instrumento digital ($u_{Res}(y) = 0,0029$ mm), e resoluções de 0,02 mm ($u_{Res}(y) = 0,012$ mm) e 0,05 mm para instrumento analógico ($u_{Res}(y) = 0,014$ mm);

- c) Incerteza de medição do bloco padrão (U_{bl}): incerteza de $0,07 \mu\text{m}$, $k = 2$ para bloco padrão de 50 mm ($u_{U_{bl}-50 \text{ mm}}(y) = 0,0000038 \text{ mm}$), incerteza de $0,1 \mu\text{m}$, $k = 2$ para bloco padrão de 100 mm ($u_{U_{bl}-100 \text{ mm}}(y) = 0,000050 \text{ mm}$) e incerteza de $0,8 \mu\text{m}$, $k = 2$ para bloco padrão de 600 mm ($u_{U_{bl}-600 \text{ mm}}(y) = 0,0004 \text{ mm}$);
- d) Erro do bloco padrão (E_{bl}): $\pm 0,20 \mu\text{m}$ para bloco padrão de 50 mm ($u_{E_{bl}-50 \text{ mm}}(y) = 0,00012 \text{ mm}$), $\pm 0,4 \mu\text{m}$ para bloco padrão de 100 mm ($u_{E_{bl}-100 \text{ mm}}(y) = 0,00023 \text{ mm}$) e $\pm 1,3 \mu\text{m}$ para bloco padrão de 600 mm ($u_{E_{bl}-600 \text{ mm}}(y) = 0,00075 \text{ mm}$), típicos do bloco de classe zero conforme especificado na ISO 3650 (1998);
- e) Diferença entre o coeficiente de dilatação linear atribuídos ao padrão e micrômetro e diferença temperatura a $20 \text{ }^\circ\text{C}$ ($\Delta_\alpha\Delta_T$): $\Delta_\alpha = \pm 1,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, com variações de temperatura de $\pm 0,5^\circ\text{C}$ em relação à $20 \text{ }^\circ\text{C}$.
Logo, $u_{\Delta_\alpha\Delta_T}(y) = 0,0000265 \text{ mm}$ para comprimento de 150 mm e $u_{\Delta_\alpha\Delta_T}(y) = 0,000106 \text{ mm}$ para comprimento de 600 mm ;
- f) Diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando (δ_t): $\pm 0,2 \text{ }^\circ\text{C}$, sendo um coeficiente de dilatação linear atribuído ao padrão e mensurando de $11,5 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$.
Logo, $u_{\delta_t}(y) = 0,002 \mu\text{m}$ para 150 mm e $u_{\delta_t}(y) = 0,008 \mu\text{m}$ para 600 mm .

Os resultados estão apresentados no Quadro 17. A partir dos resultados apresentados, observa-se que as incertezas expandidas obtidas para a faixa de 150 mm variaram de $0,0058 \text{ mm}$ a $0,029 \text{ mm}$. Já para a faixa de 600 mm de comprimento, os valores das incertezas expandidas variaram de $0,0062 \text{ mm}$ a $0,029 \text{ mm}$.

Quadro 17 – Incerteza expandida para condições ótimas de calibração (paquímetro)

Comprimento [mm]	150	150	150	600	600	600
Tipo Instrumento	Digital	Analógico com Nonio	Analógico com Nonio	Digital	Analógico com Nonio	Analógico com Nonio
Resolução [mm]	0,01	0,02	0,05	0,01	0,02	0,05
Componentes da Incerteza	Tipo	$\mu(y)$				
Repetibilidade	A	0	0	0	0	0
Incerteza do bloco padrão 50 mm	B	0,0000038	0,0000038	0,0000038	-	-
Erro do bloco padrão 50 mm	B	0,00012	0,00012	0,00012	-	-
Incerteza do bloco padrão 100 mm	B	0,000050	0,000050	0,000050	-	-
Erro do bloco padrão 100 mm	B	0,00023	0,00023	0,00023	-	-
Incerteza do bloco padrão 600 mm	B	-	-	-	0,0004	0,0004
Erro do bloco padrão 600 mm	B	-	-	-	0,00075	0,00075
Resolução do instrumento	B	0,0029	0,012	0,014	0,0029	0,012
Coefficiente de expansão térmica ($\Delta T \neq 20^\circ\text{C}$)	B	0,0000265	0,0000265	0,0000265	0,000106	0,000106
Diferenças de temperatura (δt)	B	0,00020	0,00020	0,00020	0,0008	0,0008
Incerteza padrão para a estimativa de saída $u(y)$ [μm]		0,0029	0,012	0,014	0,003	0,012
k		2	2	2	2	2
Incerteza expandida U [mm]		0,0058	0,023	0,029	0,0062	0,023

Fonte: Autor (2019).

Considerando as mesmas fontes de incerteza, realizou-se uma simulação para condições típicas de calibração não tão rígidas e que são práticas normais de calibração pelos laboratórios (Quadro 18). Para as simulações foi utilizado o padrão escalonado, cuja as incertezas de medição e desvios estão descritos a seguir:

- a) Repetibilidade (*Rep*): estudo de repetibilidade de 5 medições em cada um dos comprimentos de 150 mm e 600 mm. Logo, $u_{Rep}(y) = 0,0039$ mm para paquímetro digital de 0,01 mm de resolução. Já para os instrumentos analógicos de resolução 0,02 mm e 0,05 mm a contribuição da incerteza padrão foi $u_{Rep}(y) = 0$.
- b) Resolução do instrumento de medição (*Res*): resolução de 0,01 mm para instrumento digital ($u_{Res}(y) = 0,0029$ mm) e resoluções de 0,02 mm ($u_{Res}(y) = 0,012$ mm) e 0,05 mm para instrumento analógico ($u_{Res}(y) = 0,014$ mm)
- c) Incerteza de medição do Padrão Escalonado (U_{PE}): incerteza de 0,002 mm, $k = 2$ para comprimento de 150 mm ($u_{PE-150\text{ mm}}(y) = 0,0010$ mm) e incerteza de 0,004 mm, $k = 2$ para comprimento de 600 mm respectivamente ($u_{PE-600\text{ mm}}(y) = 0,0020$ mm) ;
- d) Erro do Padrão Escalonado (E_{PE}): $\pm 0,005$ mm para 150 mm ($u_{E_{PE-150\text{ mm}}}(y) = 0,0029$ mm), e $\pm 0,007$ mm para 600 mm ($u_{E_{PE-600\text{ mm}}}(y) = 0,0040$ mm) conforme catálogo do fabricante Mitutoyo (2019) modelo 515-556;
- e) Diferença entre o coeficiente de dilatação linear atribuídos ao padrão e micrômetro e diferença temperatura a 20 °C ($\Delta_\alpha\Delta_T$): $\Delta_\alpha = \pm 1,5 \times 10^{-6}$ °C⁻¹, com variações de temperatura de $\pm 1,0$ °C em relação à 20°C.
Logo, $u_{\Delta_\alpha\Delta_T}(y) = 0,000053$ mm para comprimento de 150 mm e $u_{\Delta_\alpha\Delta_T}(y) = 0,00021$ mm para comprimento de 600 mm;
- g) Diferença de temperatura entre o bloco padrão e o mensurando (δ_t): $\pm 0,5$ °C, sendo um coeficiente de dilatação linear atribuído para o padrão e o mensurando de $11,5 \times 10^{-6}$ °C⁻¹. Logo, $u_{\delta_t}(y) = 0,001$ μm para 150 mm e $u_{\delta_t}(y) = 0,004$ μm para 600 mm.

Observa-se em condições típicas de calibração de paquímetro que as incertezas de medição obtidas variaram de 0,012 mm a 0,030 mm na faixa de 150 mm e de 0,014 mm a 0,031 mm para a faixa de 600 mm.

Quadro 18 – Incerteza expandida para condições típicas de calibração (paquímetro)

Comprimento [mm]	150	150	150	600	600	600	
Tipo Instrumento	Digital	Analógico com Nonio	Analógico com Nonio	Digital	Analógico com Nonio	Analógico com Nonio	
Resolução [mm]	0,01	0,02	0,05	0,01	0,02	0,05	
Componentes da Incerteza	Tipo	$\mu(y)$					
Repetibilidade	A	0,0039	0,000	0,000	0,0039	0,000	0,000
Incerteza do Padrão Escalonado (U_{PE})	B	0,0010	0,0010	0,0010	0,0020	0,0020	0,0020
Erro do Padrão Escalonado (E_{PE})	B	0,0029	0,0029	0,0029	0,0040	0,0040	0,0040
Resolução do instrumento	B	0,0029	0,012	0,014	0,0029	0,012	0,014
Coefficiente de expansão térmica ($\Delta T=20^{\circ}C$)	B	0,000053	0,000053	0,000053	0,00021	0,00021	0,00021
Diferenças de temperatura (δt)	B	0,0005	0,0005	0,0005	0,002	0,002	0,002
Incerteza padrão para a estimativa de saída $u(y)$ [μm]		0,0057	0,012	0,015	0,0069	0,013	0,015
	k	2,13	2,00	2,00	2,07	2,00	2,00
Incerteza expandida U [mm]		0,012	0,024	0,030	0,014	0,025	0,031

Fonte: Autor (2019).

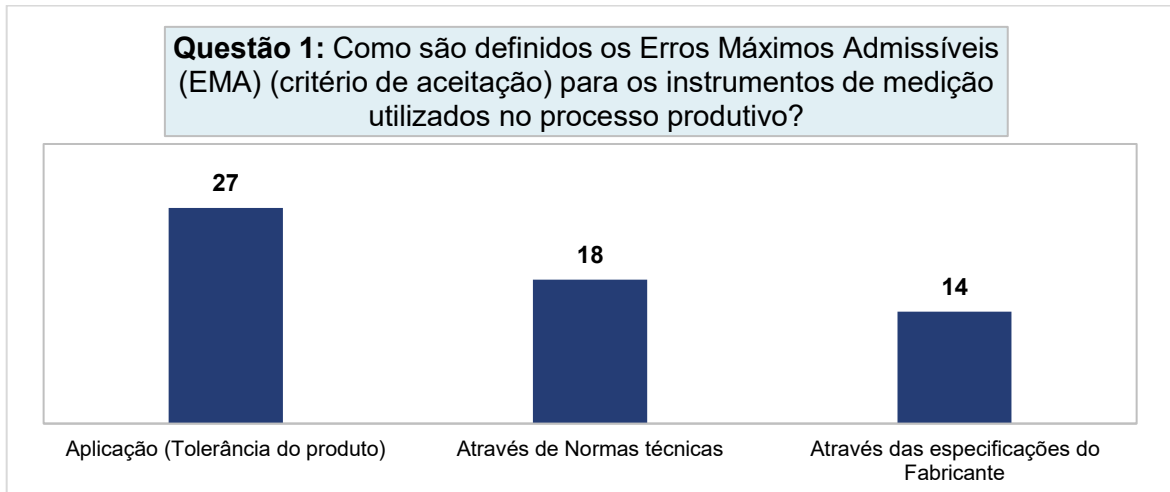
A partir dos resultados alcançados nos balanços de incerteza e simulações para diferentes resoluções em condições ótimas e típicas de calibração para micrômetros externos e paquímetros, é possível constatar uma variação nos valores estimados para a incerteza de medição. Conforme evidenciado nas análises, a resolução do instrumento adotada teve maior impacto no resultado final da incerteza em relação às demais fontes de incerteza. Dependendo da resolução do instrumento adotada é possível obter diferentes valores de incerteza no resultado final quando se avalia uma mesma faixa de comprimento.

4.2.6 Questionário destinado a usuários do serviço de calibração

Assim como o questionário destinado aos laboratórios de calibração, a pesquisa qualitativa em formato de questionário destinado a usuários do serviço de calibração também buscou um melhor entendimento sob o ponto de vista dos usuários do serviço de calibração sobre as variações percebidas nos valores de CMC nos escopos de acreditação. O questionário foi enviado em formato eletrônico para empresas do ramo metalomecânico localizadas na região sul e sudeste do Brasil. Ao todo, foram obtidas 37 respostas, dentre 338 questionários enviados.

Quanto ao questionamento sobre como são definidos os Erros Máximos Admissíveis como critério de aceitação para os instrumentos de medição utilizados no processo produtivo, observa-se que a aplicação (tolerância do produto) foi a opção com maior incidência entre as respostas (Figura 13).

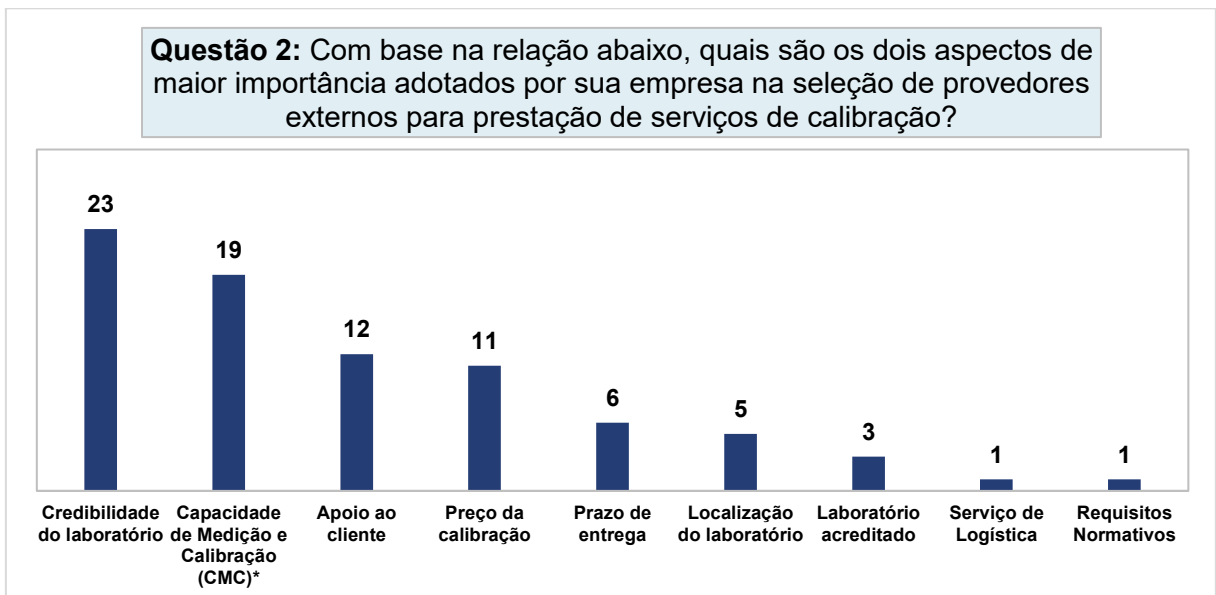
Figura 13 – Formas de definição dos Erros máximos admissíveis consideradas pelo usuário



Fonte: Autor (2019).

Através da segunda questão foi possível identificar quais são os aspectos de maior importância levados em consideração pelo cliente, na seleção de um provedor externo (laboratório de calibração) na prestação do serviço de calibração. A credibilidade do laboratório e a Capacidade de Medição e Calibração, foram os aspectos mencionados pela maioria dos usuários (Figura 14).

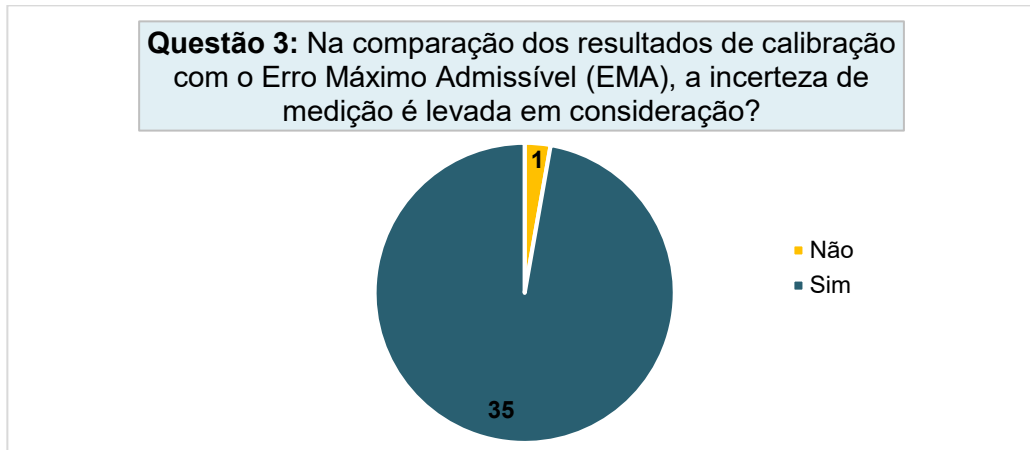
Figura 14 – Aspectos observados pelo usuário na seleção de prestadores externos



Fonte: Autor (2019).

Quando questionados se a incerteza de medição é levada em consideração na comparação dos resultados de calibração com os EMAs, nota-se que para a maioria dos usuários, a maioria dos usuários afirmou que considera a incerteza em tal análise (Figura 15).

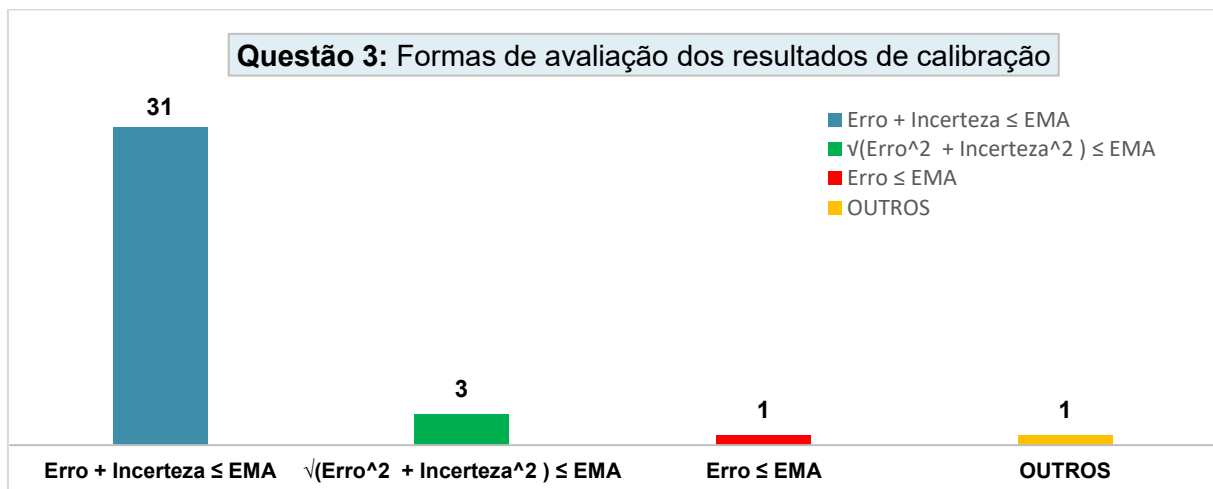
Figura 15 – Consideração dos laboratórios sobre a incerteza na comparação com o EMA



Fonte: Autor (2019).

A terceira questão também evidenciou, sob a ótica do usuário de calibração, a melhor forma de avaliação dos resultados de calibração. A Figura 16 demonstra que para a maioria dos usuários da pesquisa, a incerteza de medição e o erro de medição são levados em consideração em comparação com o EMA para demonstrar que o equipamento de medição está apto para o uso.

Figura 16 – Formas de avaliação dos resultados de calibração dos instrumentos de medição



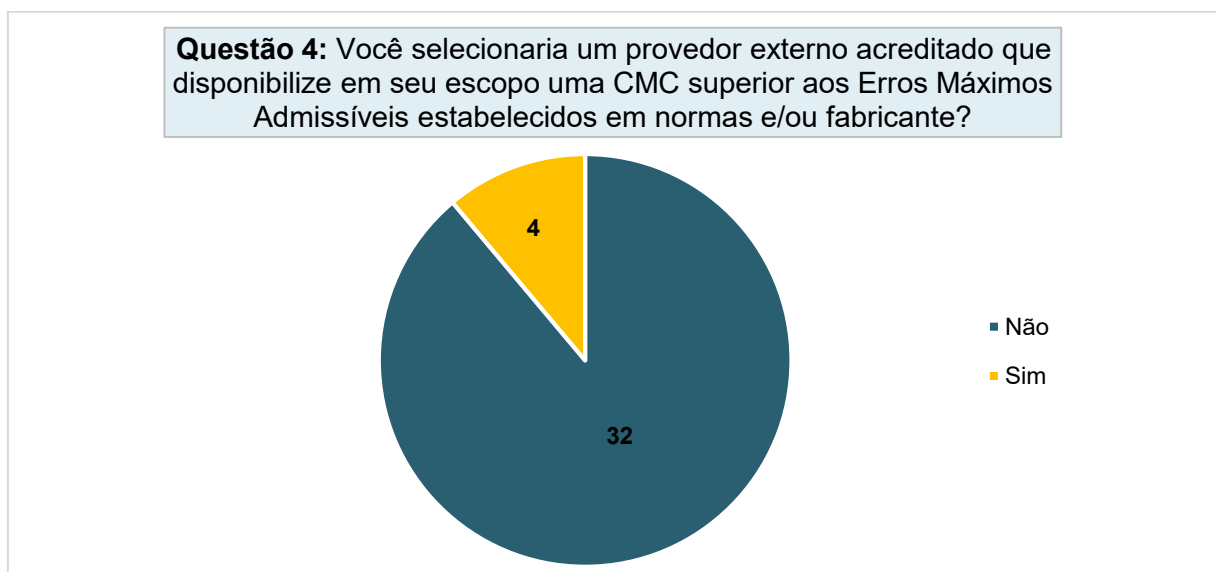
Fonte: Autor (2019).

No que se refere às propostas comerciais para os serviços de calibração, constatou-se que a maioria dos usuários não selecionariam um laboratório que declare uma CMC superior ao EMA estabelecidos para o instrumento de medição (Figura 17). Como comentários, observou-se que os usuários que não selecionariam um laboratório com uma CMC declarada superior ao EMA, citaram que só selecionariam tal prestador em caso de não haver outro laboratório acreditado que realize o serviço para o equipamento em questão. Em contrapartida, os usuários aceitariam tal condição no caso de a CMC do escopo atender seu critério. Além disso, foi relatado pelo usuário que em nível operacional se sabe a importância dos aspectos gerais para a seleção de um bom fornecedor, mas na prática, lamentavelmente muitas vezes fica-se sujeito ao preço da calibração e prazo de entrega, por determinações superiores.

A Figura 18 apresenta os principais aspectos relatados pelo usuário do serviço de calibração para justificar a variabilidade percebida nos valores da CMC apresentados nos escopos de acreditação para um mesmo tipo de serviço de calibração.

A partir das respostas apresentadas na Figura 18, percebe-se que é de conhecimento do usuário do serviço de calibração que realmente existe uma variabilidade nos valores de CMC apresentados nos escopos de laboratórios de calibração da RBC. Nota-se que as principais causas descritas apontam para a falta de padronização dos métodos de calibração, declaração da CMC de forma inadequada, diferentes fontes consideradas para a incerteza entre os laboratórios e até mesmo falta de credibilidade e ética no serviço.

Figura 17 – Questionamento sobre a seleção de provedor externo por parte do cliente



Fonte: Autor (2019).

Figura 18 – Aspectos apontados pelos usuários para justificar a dispersão na CMC



Fonte: Autor (2019).

Sob a perspectiva do usuário de calibração evidencia-se uma carência identificada de forma que ele não possui clareza sobre as informações apresentadas pelo provedor externo. O usuário deve possuir competência técnica para conhecer a funcionalidade dos instrumentos de medição, identificar quais características metrológicas necessitam de verificação, clareza nos métodos de calibração e suas incertezas associadas, definição dos erros máximos admissíveis e, interpretação correta dos escopos de acreditação e certificados de calibração.

4.3 DEFINIÇÃO DE ASPECTOS A SEREM CONSIDERADOS NA AVALIAÇÃO DA CMC

Nas atividades de comprovação metrológica, a calibração e a verificação dos instrumentos de medição são fundamentais. Após a calibração, a verificação compara os resultados de calibração com os erros máximos admissíveis estabelecidos para as características metrológicas. De acordo com a ISO 14978 (2018), cabe à função metrológica da organização a definição desses limites. Para defini-los a função metrológica deve conhecer os princípios de funcionamento do sistema de medição e os processos de medição em que serão utilizados.

Após a definição dos EMAs deve-se compará-los com os resultados de calibração. O resultado de calibração fornece os valores obtidos para as características metrológicas e a incerteza de medição. Nessa etapa, deve-se considerar um requisito fundamental na verificação metrológica: a seleção por parte do usuário de um prestador externo para realizar a calibração do instrumento de medição.

Com o propósito de estabelecer orientação técnica para qualificação do usuário na seleção adequada de um prestador externo para a realização da calibração de instrumentos de medição, são estabelecidas as seguintes diretrizes:

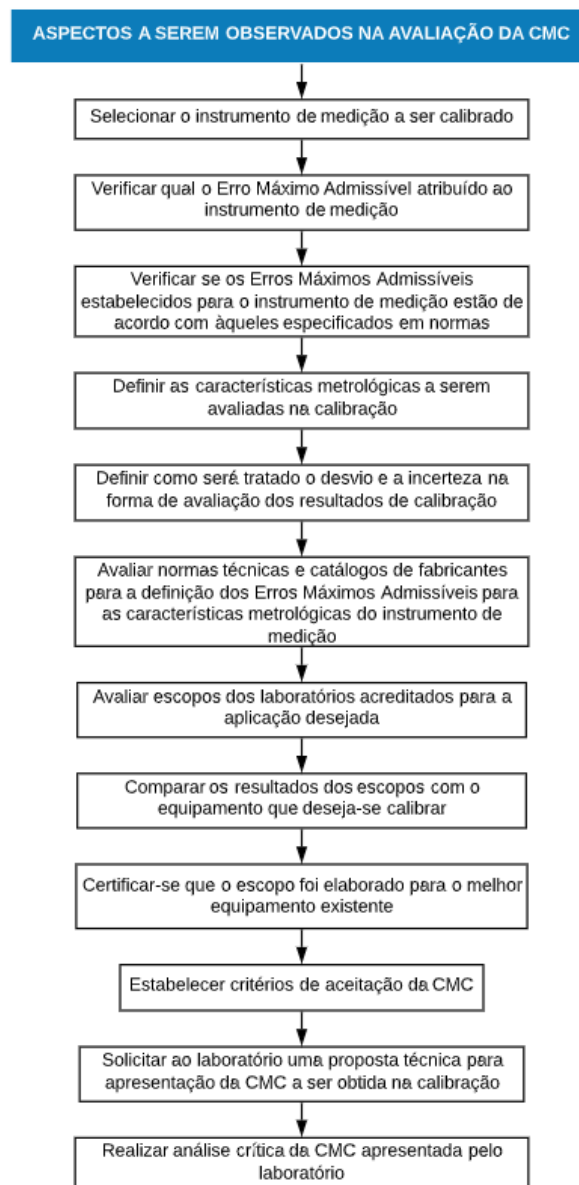
- a) A partir da tarefa de medição, que pode ser a inspeção de um produto ou o monitoramento do processo produtivo, é selecionado um instrumento de medição e a ele é atribuído o erro máximo admissível. Este valor deve levar em consideração a aplicação e as características metrológicas do instrumento de medição. Deve-se observar se os EMAs estão de acordo com os EMAs estabelecidos em normas técnicas e catálogos de fabricantes. Recomenda-se que o erro máximo admissível atribuído ao instrumento de medição não seja nem maior que o dobro nem menor do EMA estabelecido em normas ou pelos fabricantes.
- b) Definir quais as características metrológicas que serão avaliadas na calibração, tendo por base, as características metrológicas estabelecidas em normas específicas do fabricante ou documentos reconhecidos conforme a aplicação desejada;
- c) Definir como será considerado o tratamento do desvio e da incerteza. Por exemplo, deve-se avaliar o desvio e a incerteza serão somados ou considerados de forma individual na forma de avaliação dos resultados de calibração;
- d) Avaliar normas técnicas e catálogos gerais de fabricantes para a definição dos erros máximos admissíveis para as características metrológicas dos instrumentos de medição tendo como foco a aplicação;
- e) Avaliar os escopos dos laboratórios acreditados para a aplicação desejada. O usuário deve atentar-se para o valor de CMC mais frequentes entre os escopos dos laboratórios;
- f) Comparar os resultados dos escopos com o equipamento que deseja-se calibrar;
- g) Certificar-se de que o escopo foi construído para o melhor equipamento existente;
- h) Estabelecer critérios de aceitação da CMC para a empresa;
- i) Solicitar ao laboratório uma proposta técnica para apresentação da menor incerteza possível a ser obtida na calibração do instrumento ou equipamento de medição, ou seja,

a CMC, considerando as características metrológicas específicas para o instrumento e o método que será utilizado na calibração;

- j) Quando necessário, deve-se realizar uma análise crítica da CMC apresentada pelo laboratório selecionado de modo a verificar quais as fontes de incerteza que foram levadas em consideração na composição da CMC apresentada no escopo;

As diretrizes podem ser observadas de forma objetiva no diagrama de blocos apresentado na Figura 19.

Figura 19 – Diagrama de blocos para apresentação das diretrizes estabelecidas



Fonte: Autor (2019).

A partir dessas orientações, o usuário do serviço de calibração terá disponível mais informações sobre a incerteza de medição e a funcionalidade do equipamento para que possa selecionar um provedor externo para realizar calibrações de instrumentos de medição buscando maior segurança no resultado final.

5 CONCLUSÃO

A avaliação dos escopos de acreditação dos laboratórios acreditados conforme requisitos estabelecidos na ISO/IEC 17025 para calibrações de instrumentos de medição, da área dimensional, evidenciou uma variabilidade quanto ao formato de apresentação e nos valores de CMC declarados. Verifica-se que os formatos de apresentação da CMC são definidos por equações estabelecidas em função do comprimento (L) e/ou da resolução (R) do instrumento de medição e também por valores fixados para uma determinada faixa de medição. Constatou-se uma dispersão significativa tanto para os valores de CMC entre as redes de calibração como também dentro de uma única rede para uma mesma faixa de comprimento.

Quando comparados com os erros máximos admissíveis estabelecidos por normas técnicas e por fabricantes, identificou-se que alguns casos, os valores de CMC encontrados na análise dos escopos de acreditação para calibrações de paquímetros e micrômetros externos podem comprometer o resultado final de medição, uma vez que possuem altos níveis de incerteza. Isso dificulta a avaliação do usuário do serviço de calibração ao selecionar adequadamente um prestador de serviço para realizar calibrações, sendo que nos escopos não está claro a qual tipo de instrumento a CMC declarada é referenciada. Conforme identificado nos balanços de incerteza realizados e simulações em condições ótimas e típicas de calibração para os instrumentos de medição de estudo, a resolução do instrumento tem impacto significativo em relação às demais fontes de incerteza consideradas. Foi constatado que dependendo da resolução adotada, pode-se alcançar diferentes valores de incerteza no resultado final quando se avalia uma mesma faixa de comprimento.

Ao serem questionados a respeito da origem da dispersão identificada nos valores de CMC nos escopos de calibração, os laboratórios de calibração atribuem a causa a alguns aspectos, dentre os quais, destacou-se: a ausência de documentos orientativos para a criação dos escopos, aspectos relacionados aos métodos e padrões utilizados na calibração, falta de nivelamento das exigências por parte dos avaliadores e a inexistência de critérios padronizados para a estimativa de todas as fontes de incerteza adotadas na calibração. Por outro lado, os usuários dos serviços de calibração apontam como causas para a dispersão a falta de padronização dos métodos de calibração, declaração da CMC de forma inadequada, diferentes fontes consideradas para a incerteza entre os laboratórios e até mesmo a falta de credibilidade no serviço.

A partir do ponto de vista do usuário de calibração, nota-se que este não possui clareza sobre as informações apresentadas pelo provedor externo nos escopos. Nesse sentido, o usuário deve possuir competência técnica mínima para conhecer a funcionalidade dos instrumentos de medição, identificar quais características metrológicas necessitam de verificação, clareza nos métodos de calibração e suas incertezas associadas, definição dos erros máximos admissíveis e, interpretação correta dos escopos de acreditação e certificados de calibração. Desse modo, foram estabelecidas diretrizes para contribuir na qualificação o usuário no que diz respeito aos aspectos a serem observados na análise quanto à adequação da CMC para um determinado tipo de equipamento de medição.

Os escopos de calibração, por sua vez, devem estar apresentados em conformidade com as orientações estabelecidas na ILAC P14 (2013). Sendo assim, o laboratório garantirá as informações necessárias para que usuário avalie as CMCs de forma apropriada garantindo segurança na seleção do serviço.

Sabe-se que a calibração tem papel fundamental no processo de comprovação metrológica de instrumentos de medição. No entanto, uma variabilidade evidenciada entre os valores de CMC declarados nos escopos de calibração para um mesmo tipo de serviço de calibração pode comprometer a seleção de um prestador de serviço para realizar calibrações pelo usuário de calibração. Sob esse aspecto, o usuário de calibração deve estar qualificado para analisar, avaliar e criticar as CMCs declaradas nos escopos ou em certificados de calibração. Por outro lado, os laboratórios devem estar operando em conformidade com os requisitos estabelecidos em documentos normativos, principalmente a ISO/IEC 17025 e a ILAC P14.

Para trabalhos futuros, recomenda-se o estudo aplicado aos escopos de calibração para os demais tipos de serviço de calibração.

REFERÊNCIAS

AMERICAN ASSOCIATION FOR LABORATORY ACCREDITATION (United States). **A2LA Directory of Accredited Organizations**. 2019. Disponível em: <<https://portal.a2la.org/search/resultscurrentnewformat.cfm>>. Acesso em: 06 maio 2019.

AMERICAN ASSOCIATION FOR LABORATORY ACCREDITATION. **G103: A2LA Guide for Estimation of Uncertainty of Dimensional Calibration and Testing Results**. Usa: A2LA, 2016. 39 p. Disponível em: <https://portal.a2la.org/guidance/est_mu_dimen.pdf>. Acesso em: 17 jul. 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9000**: Sistemas de gestão da qualidade - Fundamentos e vocabulário. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 59 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 9001**: Sistemas de gestão da qualidade - requisitos. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2015. 32 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT ISO NBR 10012**: Sistemas de gestão de medição - requisitos para os processos de medição e equipamento de medição. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 20 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO/IEC 17025**: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração. 3 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 32 p.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR NM-ISO 3611**: Micrômetro para medições externas. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 1997.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR NM 216**: Paquímetros e paquímetros de profundidade – características construtivas e requisitos metrológicos. 2 ed. Rio de Janeiro: ABNT, 2000.

BICH, Walter. Revision of the ‘Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement’. Why and how. **Metrologia**, [s.l.], v. 51, n. 4, p.155-158, 11 jul. 2014. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/51/4/s155>.

BORBA, Heitor. Exigência de calibração anual dos instrumentos de medição. 2015. Disponível em: <<http://heitorborbasolucoes.com.br/exigencia-de-calibracao-anual-dos-instrumentos-de-medicao/>>. Acesso em: 21 jul. 2015.

BRITISH STANDARDS. BS 870: Specification for external micrometers. 2 ed. Londres: BSI, 2008.

BRITISH STANDARDS. BS 887: Precision vernier callipers – requirements and test methods. 2 ed. Londres: BSI, 2008.

CAMARGO, Roderlei; ABACKERLI, Alvaro Jose. Contribuição da tolerância dimensional no processo de desenvolvimento do produto. In: ENCONTRO NACIONAL DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO, 29., 2009, Salvador. **Anais eletrônicos do Encontro Nacional de Engenharia de Produção**. Salvador: Enegep, 2009. p. 2 - 16.

CHUNOVKINA, A. G.. Introducing measurement uncertainty into methods of calibrating and checking measuring instruments. **Measurement Techniques**, [s.l.], v. 51, n. 3, p.341-343, mar. 2008. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s11018-008-9022-4>.

CASTRO, Denise Confar Carvalho de. **Aspectos críticos para implantação da norma NBR ISO/IEC 17025: 2005 em laboratório de ensaio e calibração**: Estudo de caso em uma instituição pública. 2013. 67 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Mestrado Profissional em Sistemas de Gestão, Escola de Engenharia de Produção, Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2013.

COX, Hill. Calibration source criteria, continued: consider these factors in your calibration decisions. **Quality**, Ontario, v. 2, n. 54, 14p., fev. 2015

DAkkS - DEUTSCHE AKKREDITIERUNGSSTELLE. (Germany). **Accredited Bodies (DAkkS)**. 2019. Disponível em: <<https://www.dakks.de/en/content/accredited-bodies-dakks>>. Acesso em: 29 maio 2019.

DEUTSCHE AKKREDITIERUNGSSTELLE GMBH. **DAkkS-DKD-R 4-3 Blatt 10.1**: Kalibrieren von Messmitteln für geometrische Messgrößen Kalibrieren von Bügelmessschrauben mit planparallelen oder sphärischen Messflächen. Braunschweig: DAkkS, 2010. 5 p. Disponível em: <https://www.dakks.de/sites/default/files/dakks-dkd-r_4-3_blat_10.1_20101221_v1.1.pdf>. Acesso em: 16 jul. 2019.

DEUTSCHE AKKREDITIERUNGSSTELLE. **DAkkS-DKD-3**: Angabe der Messunsicherheit bei Kalibrierungen. 1 ed. Berlin: DAkkS, 2010.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN). **DIN 863-1**: Geometrical product specifications (GPS) - Micrometers - Part 1: Micrometers for external measurements; maximum permissible errors. 2 ed. Berlin: DIN, 2017.

DEUTSCHES INSTITUT FÜR NORMUNG E.V. (DIN). **DIN 862**: Geometrical product specifications (GPS) - Callipers - Maximum permissible errors. 2 ed. Berlin: DIN, 2015.

DICLA (Divisão de Acreditação de Laboratórios do INMETRO), 2018, **NIT-DICLA-012**: Relação padronizada de serviços acreditados para laboratórios de calibração, revisão 19, Rio de Janeiro, Brasil.

DIGIMESS. **Catálogo D-05**: Digimess instrumentos de precisão. 2018. Disponível em: <<https://www.digimess.com.br/>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

DIVISÃO DE ACREDITAÇÃO DE LABORATÓRIOS DO INMETRO. **NIT-DICLA-021**: Expressão da incerteza de medição por laboratório de calibração. 9 ed. Rio de Janeiro: Dicla, 2013.

EHRlich, Charles. Terminological aspects of the Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (GUM). **Metrologia**, [s.l.], v. 51, n. 4, p.145-154, 11 jul. 2014. IOP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1088/0026-1394/51/4/s145>.

EUROPEAN ACCREDITATION LABORATORY COMMITTEE. **EA-4/02 M**: Evaluation of the uncertainty of measurement in calibration. 1 ed. : Ea Laboratory Committee, 2013.

FISCHBACH, R.. Metrological Demands of ISO 17025 on Testing Laboratories. **Accreditation And Quality Assurance**, [s.l.], v. 6, n. 1, p.41-41, 9 jan. 2001. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s007690000264>.

FUSCO, Neville Marcelo Barbosa. **Ambiente de simulação para aplicação a sistemas de garantia metrológica de laboratórios de calibração**. 2014. 105 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Pós Graduação em Engenharia Mecânica área de Concentração: Metrologia Industrial, Programa de Pós Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

GASPER, Eric. Calibration and measurement systems: the unsung hero in quality efforts. **Measurement**, Washington, v. 56, n. 7, p.24-27, jul. 2017.

HEPING, Peng; XIANGQIAN, Jiang. Evaluation and management procedure of measurement uncertainty in new generation geometrical product specification (GPS). **Measurement**, [s.l.], v. 42, n. 5, p.653-660, jun. 2009. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.measurement.2008.10.009>.

HOCHMUTH, Rüdiger; MEERKAMM, Harald; SCHWEIGER, Willy. AN APPROACH TO A GENERAL VIEW ON TOLERANCES IN MECHANICAL ENGINEERING. In: INTERNATIONAL DESIGN CONFERENCE, 5., 1998, Marjanovic - Dubrovnik. **Proceedings of the 5th International Design Conference**. Croatia: Marjanovic And Programme Committee, 1998. p. 31 - 38.

INMETRO. **Acreditação de Laboratórios (ABNT NBR ISO/IEC 17025:2005)**. 2012. Disponível em: <http://www.inmetro.gov.br/credenciamento/acre_lab.asp>. Acesso em: 20 ago. 2018.

INTERNATIONAL LABORATORY ACCREDITATION COOPERATION. **ILAC-P14**: ILAC Policy on the Traceability of Measurement Results. 3 ed. Silverwater: Ilac, 2013. 10 p.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC 17025**: General requirements for the competence of testing and calibration. 3 ed. Switzerland: ISO, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 10012:** Measurement management systems - Requirements for measurement processes and measurement equipment. 1 ed. Switzerland: ISO, 2003.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14978:** Geometrical Product Specifications (GPS) - General concepts and requirements for GPS measuring equipment. 2 ed. Switzerland: ISO, 2018.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 14253-2:** Geometrical product specifications (GPS) — Inspection by measurement of workpieces and measuring equipment Part 2: Guidance for the estimation of uncertainty in GPS measurement, in calibration of measuring equipment and in product verification. 1 ed. Geneva: ISO, 2011.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3611:** Geometrical Product Specifications (GPS) - Dimensional measuring equipment: Micrometers - Design and metrological characteristics. 2 ed. Switzerland: ISO, 2010.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3611:** Geometrical Product Specifications (GPS) - Dimensional measuring equipment: Micrometers - Design and metrological characteristics. 1 ed. Switzerland: ISO, 1978

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 13385-1:** Geometrical Product Specifications (GPS) - Dimensional measuring equipment - Part 1: Callipers; Design and metrological characteristics. 2 ed. Switzerland: ISO, 2019.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/IEC 17011:** Conformity assessment — Requirements for accreditation bodies accrediting conformity assessment bodies. 2 ed. Switzerland: ISO, 2017.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 3650:** Geometrical Product Specifications (GPS) — Length standards — Gauge blocks. 2 ed. Switzerland: ISO, 1998.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **JCGM 200:** International vocabulary of metrology - basic and general concepts and associated terms (VIM). 3 ed. .: BIPM, 2012. 108 p.

JOINT COMMITTEE FOR GUIDES IN METROLOGY. **JCGM 100:** Evaluation of measurement data – guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM).: BIPM, 2008. 134 p.

JORNADA, Daniel Homrich da. **Implantação de um guia orientativo de incerteza de medição para avaliadores de laboratório da rede metrológica RS.** 2009. 155 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Programa de Pós Graduação em Engenharia de Produção, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

JUNIOR, Armando Albertazzi Gonçalves; SOUSA, André R. de. **Fundamentos de metrologia científica e industrial.** Barueri: Manole, 2008. 408 p. (ISBN 978-85-204-2116-1).

KAPELE, William D. (Org.). The cost of a poor measurement system: convince people of the value of measurement system analysis. **Quality: Software & Analysis**, Washington, v. 7, n. 56, p.32-35, 01 jul. 2017.

LIRA, Francisco Adval de. **Metrologia na Indústria**. 9. ed. São Paulo: Érica, 2013. 256 p. (ISBN 978-85-365-1601-1).

MAHR. **Catálogo Tecnologia de Medição Dimensional**. 2013. Disponível em: <<https://www.mahr.com/images/OnlineKataloge/Mahr-Metrology-Catalog--PT--2013/blaetterkatalog/index.html>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

MANDERS, Basak; VRIES, Henk J. de; BLIND, Knut. ISO 9001 and product innovation: A literature review and research framework. **Technovation**, [s.l.], v. 48-49, p.41-55, fev. 2016. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.technovation.2015.11.004>.

MITUTOYO. **Catálogo Geral de Produtos P-2019/2020**: Catálogo completo de Instrumentos e Equipamentos Mitutoyo. 2019. Disponível em: <<https://www.mitutoyo.com.br/catalogos/>>. Acesso em: 10 ago. 2019.

NETO, João Cirilo da Silva. **Metrologia e controle dimensional**: Conceitos, normas e aplicações. Rio de Janeiro: Elsevier, 2012. 239 p.

PRIEL, Marc. From GUM to alternative methods for measurement uncertainty evaluation. **Accreditation and Quality Assurance**, [s.l.], v. 14, n. 5, p.235-241, 11 abr. 2009. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00769-009-0518-7>.

RBC – REDE BRASILEIRA DE CALIBRAÇÃO. (Brasil). **Sistema de Consulta aos Escopos de Acreditação dos Laboratórios de Calibração Acreditados segundo a ABNT NBR ISO/IEC 17025 (RBC)**. 2019. Disponível em: <http://www.sitedoconsumidor.gov.br/laboratorios/rbc/consulta_servico.asp?nom_grupo_servico=DIMENSIONAL>. Acesso em: 29 maio 2019.

SALSBURY, James G.; MORSE, Edward P.. Measurement uncertainty in the performance verification of indicating measuring instruments. **Precision Engineering**, [s.l.], v. 36, n. 2, p.218-228, abr. 2012. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.precisioneng.2011.10.001>.

TSIMILLIS, Kyriacos C.. Training needs to understand quality assurance. **Accreditation and Quality Assurance**, [s.l.], v. 20, n. 1, p.53-59, 12 dez. 2014. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00769-014-1092-1>.

TSIMILLIS, Kyriacos C.. Measurement uncertainty: requirements set in the accreditation standards. **Accreditation and Quality Assurance**, [s.l.], v. 23, n. 2, p.109-114, 26 mar. 2018. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00769-018-1310-3>.

UKAS – United Kingdom Accreditation Service. (United Kingdom). **Accredited Organizations**. 2019. Disponível em: <<https://www.ukas.com/list-all->

organisations/?org_type=1&parent=Calibration%20Laboratories >. Acesso em: 29 maio 2019.

UNITED KINGDOM ACCREDITATION SERVICE. **M3003**: The Expression of Uncertainty and Confidence in Measurement. 3 ed. Feltham: UKAS, 2012.

UNGER, Peter. Comment on the Editorial “Does accreditation ensure competence in Measurement?”. **Accreditation And Quality Assurance**, [s.l.], v. 13, n. 6, p.339-339, 26 mar. 2008. Springer Nature. <http://dx.doi.org/10.1007/s00769-008-0392-8>

VILLETA, Maria et al. Considerations to design of metrological confirmation process in mechanical manufacturing systems. Daaam International: **Annals of DAAAM & Proceedings**, Viena, v. 20, n. 1, p.1071-1072, jan. 2009. ISSN 1726-9679.

YAHYA, Adel Elahdi M.; HALAJ, Martin. Uncertainty and its impact on the quality of measurement. **American Journal Of Engineering And Applied Sciences**, [s.l.], v. 5, n. 2, p.114-118, 1 fev. 2012. Science Publications. <http://dx.doi.org/10.3844/ajeassp.2012.114.118>.

ZAKHAROV, I. P.; VODOTYKA, S. V.; SHEVCHENKO, E. N.. Methods, models, and budgets for estimation of measurement uncertainty during calibration. **Measurement Techniques**, Karkov, v. 54, n. 4, p.20-26, abr. 2011.

APÊNDICE A – Questionário destinado a laboratórios de calibração

Seção 1 de 7



Questionário

Pesquisa direcionada para laboratórios de calibração de instrumentos de medição

Prezado Sr(a),

Com o propósito de promover o desenvolvimento de estudos científicos para o Programa de Pós Graduação de Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC/Joinville, foi desenvolvida uma pesquisa de mestrado direcionada a laboratórios de calibração de instrumentos de medição.

O objetivo dessa pesquisa consiste em demonstrar a atual interpretação da indústria dos requisitos apresentados no ILAC P14: 2013, em relação aos procedimentos de calibração de instrumentos de medição, análise da incerteza da medição e a estruturação do escopo de acreditação dos laboratórios para a declaração da CMC.

As respostas obtidas com esse questionário serão de extrema importância para o desenvolvimento metodológico e posterior análise de resultados da pesquisa. A confidencialidade e o sigilo das respostas serão mantidos. Contamos com a sua colaboração para responder o questionário abaixo, de forma que serão necessários apenas 5 minutos para respondê-lo.

Agradeço a cooperação.

Cordialmente,
Profª. Dra. Sueli Fischer Beckert.
Programa de Pós Graduação de Engenharia e Ciências Mecânicas
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC - Campus Joinville

Endereço de e-mail *

Endereço de e-mail válido

Identificação (Opcional)

A sua identificação é opcional, caso não deseje identificar-se, clique em "PRÓXIMA" para iniciar as perguntas.

Nome do Laboratório *

Texto de resposta curta

Nome *

Texto de resposta curta

Questão 1

Descrição (opcional)

Quais são as fontes de variação da incerteza de medição levadas em consideração na estimativa da CMC? *

- Condições Ambientais
- Resolução do Instrumento
- Incerteza do padrão
- Repetibilidade
- Reprodutibilidade
- Erros sistemáticos não corrigidos do padrão
- Outros...

Seção 4 de 7



Questão 2

Descrição (opcional)

São seguidos métodos normatizados (internacionais, regionais ou nacionais) * nos processos de calibração de instrumentos de medição oferecidos em seu laboratório?

Sim

Não

Comentários: *

Texto de resposta longa

Seção 5 de 7



Questão 3

Descrição (opcional)

O ILAC P 14 permite excluir da CMC as contribuições oriundas do dispositivo. Nesses casos, nos escopos de calibração é utilizado o asterisco (*) para as CMCs que não contemplam todas as fontes de incerteza. Que fontes de incerteza seriam essas? Cite um exemplo. *

Texto de resposta longa



Questão 4

Descrição (opcional)

A CMC referente ao instrumento a ser calibrado é informada no orçamento emitido pelo laboratório? *

Sim

Não

Comentários (Opcional):

Texto de resposta longa



Questão 5

Descrição (opcional)

Ao se analisar os escopos de acreditação dos laboratórios de calibração acreditados, percebe-se grande variabilidade nas CMCs declaradas para um mesmo instrumento de medição. Descreva uma causa que justifique essa dispersão? *

Texto de resposta curta

APÊNDICE B – Questionário destinado a usuários de calibração

Seção 1 de 7



Questionário

Pesquisa direcionada para usuários de serviços de calibração na seleção de provedores externos para calibração de instrumentos de medição

Prezado Sr(a),

Com o propósito de promover o desenvolvimento de estudos científicos para o Programa de Pós Graduação de Engenharia e Ciências Mecânicas da Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC do Campus Joinville, foi desenvolvida uma pesquisa de mestrado direcionada a usuários de serviços de calibração de instrumentos de medição oferecidos por laboratórios de calibração.

O objetivo dessa pesquisa é identificar quais aspectos são observados pelo usuário durante a seleção de um provedor externo para prestação do serviço de calibração de instrumentos de medição.

As respostas obtidas com esse questionário serão de extrema importância para o desenvolvimento metodológico e posterior análise de resultados da pesquisa. A confidencialidade e o sigilo das respostas serão mantidos. Contamos com a sua colaboração para responder o questionário abaixo, de forma que serão necessários apenas 5 minutos para respondê-lo.

Agradeço a cooperação.

Cordialmente,
Profª. Dra. Sueli Fischer Beckert.
Programa de Pós Graduação de Engenharia e Ciências Mecânicas
Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC - Campus Joinville

Endereço de e-mail *

Endereço de e-mail válido

Identificação

Descrição (opcional)

Nome da Empresa *

Texto de resposta curta

Nome *

Texto de resposta curta

Questão 1

Descrição (opcional)

Como são definidos os Erros Máximos Admissíveis (EMA) (critério de aceitação) para os instrumentos de medição utilizados no processo produtivo? *

- Através das especificações do Fabricante
- Através de Normas técnicas
- Aplicação (Tolerância do produto)
- Outros...



Questão 2

Descrição (opcional)

Com base na relação abaixo, quais são os dois aspectos de maior importância adotados por sua empresa na seleção de provedores externos (***) para prestação de serviços de calibração? *

- Apoio ao cliente
- Capacidade de Medição e Calibração (CMC)*
- Credibilidade do laboratório
- Custos para transporte
- Localização do laboratório
- Prazo de entrega
- Preço da calibração
- Outros...

Nota:

(*) CMC é a Capacidade de Medição e Calibração disponibilizada aos clientes em condições normais conforme descrito nos escopos dos laboratórios de acreditação.

(**) Provedores externos: laboratórios que realizam atividades de ensaio, calibração ou amostragem associada a ensaio e calibração.

Questão 3

Descrição (opcional)

Na comparação dos resultados de calibração com o Erro Máximo Admissível* (EMA), a incerteza de medição é levada em consideração?

- Sim
- Não
- Outros...

Selecione a opção que melhor indique a forma de avaliação dos resultados da calibração.*

- Erro + Incerteza \leq EMA
- $\sqrt{(\text{Erro}^2 + \text{Incerteza}^2)} \leq$ EMA
- Incerteza \leq EMA
- Erro \leq EMA
- Outros...



Questão 4

Descrição (opcional)

Você selecionaria um provedor externo acreditado que disponibilize em seu escopo uma CMC superior aos Erros Máximos Admissíveis estabelecidos em normas e/ou fabricante? *

Sim

Não

Comentários (Opcional):

Texto de resposta longa



Questão 5

Descrição (opcional)

Ao se analisar os escopos de acreditação dos laboratórios de calibração acreditados, percebe-se grande variabilidade nas CMCs declaradas para um mesmo instrumento de medição. Descreva uma causa que justifique essa dispersão. *

Texto de resposta curta

ANEXO A – Tabela Distribuição *t-student*

Graus de liberdade v_i	Valores de $t_p(v)$ da distribuição <i>t-student</i> para graus de liberdade v que definem um intervalo que abrange frações especificadas p da distribuição correspondente					
	$p = 68,27\%$	$p = 90\%$	$p = 95\%$	$p = 95,45\%$	$p = 99\%$	$p = 99,73\%$
1	1,840	6,310	12,710	13,970	63,660	235,800
2	1,320	2,920	4,300	4,530	9,920	19,210
3	1,200	2,350	3,180	3,310	5,840	9,220
4	1,140	2,130	2,780	2,870	4,600	6,620
5	1,110	2,020	2,570	2,650	4,030	5,510
6	1,090	1,940	2,450	2,520	3,710	4,900
7	1,080	1,890	2,360	2,430	3,500	4,530
8	1,070	1,860	2,310	2,370	3,360	4,280
9	1,060	1,830	2,260	2,320	3,250	4,090
10	1,050	1,810	2,230	2,280	3,170	3,960
11	1,050	1,800	2,200	2,250	3,110	3,850
12	1,040	1,780	2,180	2,230	3,050	3,760
13	1,040	1,770	2,160	2,210	3,010	3,690
14	1,040	1,760	2,140	2,200	2,980	3,640
15	1,030	1,750	2,130	2,180	2,950	3,590
16	1,030	1,750	2,120	2,170	2,920	3,540
17	1,030	1,740	2,110	2,160	2,900	3,510
18	1,030	1,730	2,100	2,150	2,880	3,480
19	1,030	1,730	2,090	2,140	2,860	3,450
20	1,030	1,720	2,090	2,130	2,850	3,420
25	1,020	1,710	2,060	2,110	2,790	3,330
30	1,010	1,700	2,040	2,090	2,750	3,270
35	1,010	1,700	2,030	2,070	2,720	3,230
40	1,010	1,680	2,020	2,060	2,700	3,200
45	1,010	1,680	2,010	2,060	2,690	3,180
50	1,010	1,680	2,010	2,050	2,680	3,160
100	1,005	1,660	1,984	2,025	2,626	3,077
∞	1,000	1,645	1,960	2,000	2,576	3,000

Fonte: UKAS (2012).