

ADEQUAÇÃO DA CALIBRAÇÃO DO MICRÔMETRO PARA EXTERNOS À NBR ISO/IEC 17025

CLÁUDIO COSTA SOUZA ¹, ROSENDA VALDÉS ARENCIBIA ²

RESUMO

Este trabalho tem como objetivo adequar o procedimento de calibração dos micrômetros para externos à NBR ISO/IEC 17025 no Laboratório de Metrologia Dimensional da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Para tanto, foram propostas as seguintes etapas: estudo minucioso sobre micrômetros, enfatizando as características construtivas, os procedimentos de calibração e as fontes de erros; calibração do micrômetro utilizando um procedimento normalizado; desenvolvimento e implementação de uma metodologia para estimar a incerteza associada à calibração e, por fim, elaboração e padronização do certificado da calibração. Como resultados tem-se: um procedimento de calibração de micrômetros para externos; uma metodologia para cálculo da incerteza da calibração e um certificado de calibração padrão.

Palavras-Chave: Micrômetro, Calibração, Incerteza, Metrologia

ADAPTACIÓN DE LA CALIBRACIÓN DEL MICRÓMETRO PARA EXTERNOS A LA NBR ISO/IEC 17025

RESUMEN

Este trabajo tiene por objeto adaptar el procedimiento de calibración de los micrómetros para exteriores a la norma NBR ISO/IEC 17025, en el Laboratorio de Metrología Dimensional de la Facultad de Ingeniería Mecánica de la UFU. Para ello, fueron propuestas las siguientes etapas: estudio detallado de los micrómetros, con énfasis en las características constructivas, los procedimientos de calibración y las fuentes de errores; calibración del micrómetro usando un procedimiento estándar; desarrollo de una metodología para calcular la incertidumbre de la calibración y, por último, elaboración y estandarización del certificado de la calibración. Son resultados de este trabajo: un procedimiento de calibración de micrómetros para externos; una metodología para cálculo de la incertidumbre y un certificado de calibración estándar.

Palabras-Clave: Micrómetro, Calibración, Incertidumbre, Metrologia

¹ Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia - Av. João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica - Uberlândia, MG – Brasil - CEP 38400-902. E-mail: claudio_costasouza@hotmail.com

² Faculdade de Engenharia Mecânica - Universidade Federal de Uberlândia - Av. João Naves de Ávila, 2121 - Campus Santa Mônica - Uberlândia, MG – Brasil - CEP 38400-902. E-mail: arvaldes@mecanica.ufu.br

1. INTRODUÇÃO

Em 15 de maio de 2005 a International Organization for Standardization (ISO) publicou uma nova edição da Norma ISO/IEC 17025, atualmente em vigor. A referida norma contém todas as especificações e exigências que os laboratórios responsáveis pela realização de ensaios e calibrações devem atender para garantir a emissão de resultados confiáveis.

A adoção e implantação da mesma são indispensáveis para assegurar a qualidade de todos os serviços prestados pelos laboratórios, incluindo as pesquisas. Deve-se ressaltar que a adequação a esta norma garante o atendimento de todos os requisitos já contidos nas NBR ISO 9001 (1994) e NBR ISO 9002 (1994).

A NBR ISO/IEC 17025 é dividida em cinco partes, que são respectivamente: objetivo, referências normativas, termos e definições, requisitos da direção e requisitos técnicos. Ela discorre a respeito dos métodos normalizados, métodos não-normalizados e métodos desenvolvidos pelos próprios laboratórios, sendo aplicável a quaisquer entidades que realizam ensaios e calibrações.

Nas páginas finais, estão contidos dois anexos. O anexo A apresenta uma matriz de correlação dos tópicos desta norma com aqueles apresentados nas ISO 9001 e 9002. Por sua vez, o Anexo B trata a respeito da necessidade de informações complementares à norma, como exemplos de aplicações e referências às condições ideais de operação.

Segundo a ISO/IEC 17025 (2005), o laboratório é responsável por todas as atividades que realiza e deve, portanto, dispor de pessoal gerencial e técnico qualificado. Deve, ainda, nomear um gerente de qualidade e confeccionar documentos para informar a respeito das práticas e procedimentos adequados, garantindo inclusive o cumprimento da norma.

Todos os documentos pertencentes ao laboratório, incluindo normas, regulamentos, métodos de ensaios ou calibrações, desenhos, especificações, *softwares* e manuais devem ser controlados pelos responsáveis. Devem estar à disposição de todo o pessoal para consulta a partir da sua verificação.

O laboratório deve atender a alguns requisitos técnicos relacionados com os fatores humanos, os equipamentos e seu manuseio, os métodos empregados, as instalações e condições ambientais, a rastreabilidade das medições e a estimativa da incerteza.

O pessoal técnico deve ser qualificado e em determinados casos, certificado. Os responsáveis pela emissão de opiniões nos relatórios e documentos devem possuir conhecimento amplo a respeito da tecnologia, do princípio de funcionamento e da maneira

adequada de uso dos equipamentos do laboratório. Além de discernimento para julgar qualquer atividade que não esteja de acordo com a norma.

Os resultados das medições não podem ser influenciados por fatores ambientais. Assim sendo, o laboratório deve estar sempre limpo e organizado. É essencial o uso de fontes de energia e iluminação adequadas. As interferências externas, como vibrações, devem ser levadas em consideração, principalmente para o cálculo da incerteza de medição.

Todos os ensaios e calibrações devem ser executados seguindo procedimentos normalizados. O conhecimento a respeito dos instrumentos de medição é imprescindível, bem como a aquisição de normas relacionadas a cada um dos equipamentos.

A calibração de todos os equipamentos deve ser efetuada seguindo métodos normalizados. Porém, métodos regionais, nacionais, internacionais ou desenvolvidos pelos próprios laboratórios podem ser empregados se o cliente concordar.

Após a realização de qualquer atividade a incerteza de medição deve ser calculada, utilizando-se métodos apropriados. Quando não for possível utilizar todos os critérios estatísticos, deve-se ao menos realizar uma estimativa razoável desse parâmetro, para se ter noção da dispersão dos valores medidos.

O laboratório deve possuir os equipamentos necessários para a realização de suas atividades, além dos documentos contendo suas informações básicas. Todos os instrumentos devem ser calibrados antes de sua utilização e, caso algum deles seja danificado, deve ser imediatamente marcado e isolado. Somente após uma calibração ele será novamente admitido para uso.

A calibração visa assegurar a rastreabilidade com relação aos padrões primários, tanto dos instrumentos de medição quanto dos padrões do laboratório. Estes últimos são calibrados por organismos credenciados que assegurem total confiabilidade.

Os procedimentos de amostragem realizados pelo laboratório devem ser devidamente documentados. Os documentos devem conter, além do procedimento, a identificação do amostrador, a descrição do ambiente em que a amostragem foi realizada e as estatísticas que serviram de base para o trabalho. O contratante deve estar ciente de qualquer alteração realizada após o início dos trabalhos.

Os resultados dos ensaios e calibrações são oficialmente emitidos através de relatórios de ensaio ou certificados de calibração. Não é permitida a reprodução de partes isoladas dos relatórios ou certificados, a menos que ela seja aprovada por escrito pelo pessoal responsável. As opiniões devem ser identificadas para que não sejam confundidas com especificações. O

formato de apresentação dos documentos deve ser padronizado e claro para impedir interpretações equivocadas.

Pelo antes exposto, pode-se dizer que a adequação dos processos de medição e calibração à NBR ISO/IEC 17025 (2005) não é uma tarefa fácil. O laboratório deve trabalhar de forma árdua para atingir tal objetivo.

Assim sendo, este trabalho tem como objetivo adequar apenas o procedimento de calibração dos micrômetros para medições externas. Para tanto, foram propostas as seguintes etapas: estudo minucioso sobre micrômetros, enfatizando as características construtivas, os procedimentos de calibração e as fontes de erros; calibração do micrômetro; desenvolvimento de uma metodologia para estimar a incerteza associada à calibração; elaboração e padronização de documentos para emitir os resultados da calibração.

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Os micrômetros são instrumentos muito utilizados na verificação dimensional de peças nas linhas de produção. Eles permitem a medição de diversas características com boa exatidão e repetitividade com custo relativamente baixo.

Atualmente, são comercializados micrômetros para medições externas, internas e de profundidades. Dentre eles, o mais utilizado é o micrômetro para medições externas. Seu funcionamento se baseia no Princípio de Palmer, que consiste no deslocamento axial de um parafuso com passo de alta exatidão no interior de uma porca fixa. Com isto, o valor do mensurando pode ser indicado com uma resolução de até um milésimo de milímetro.

Dentre os componentes que definem a geometria do micrômetro para dimensões externas estão: o fuso, o batente, o arco, o cilindro e o tambor (Figura 1). Os outros componentes são a trava do fuso, a catraca e o nônio, encontrado apenas em micrômetros com resolução de 0,001 mm.

O fuso e o batente entram diretamente em contato com a peça durante o processo de medição. Suas faces localizadas nas extremidades recebem o nome de superfícies de medição e as bordas podem apresentar chanfros. O batente é fixo e não se movimenta em relação ao arco, enquanto que o fuso se desloca juntamente com o tambor.

Para evitar o desgaste excessivo o fuso e o batente são fabricados de aço inoxidável ou de aço-ferramenta temperado. Por sua vez, o arco deve apresentar um formato que possibilite a medição de um diâmetro igual à faixa de medição do instrumento. Geralmente, são

fabricados de aço ou ferro fundido. A rigidez do arco é importante, pois a força aplicada para girar o parafuso deve impedir que as superfícies de medição se desloquem além do valor máximo recomendado pela NBR NM-ISO 3611 (1997).



Figura 1. Componentes do micrômetro para medições externas (Mitutoyo).

Normalmente, os arcos são revestidos com placas isolantes, cuja finalidade é reduzir a troca de calor entre o operador e o instrumento. A transferência de calor para o micrômetro provoca a dilatação dos componentes do sistema de medição, afetando de forma direta o valor da indicação final. Cabe ressaltar que a temperatura padrão para a realização de medições é 20 °C, de acordo com a NBR NM-ISO 1 (1997).

O cilindro contém a escala principal do instrumento. O tambor está conectado a ele e é também graduado, podendo apresentar 50 divisões, caso o passo da rosca seja igual a 0,5 mm, ou 100 divisões, caso o passo seja de 1 mm.

A trava do fuso é um componente que, quando acionado, impede o deslocamento do parafuso e, conseqüentemente, a movimentação do fuso. Ela é utilizada quando a peça e o instrumento estão devidamente posicionados e se deseja realizar a leitura da indicação do instrumento. Os micrômetros possuem, também, uma catraca para regular a pressão exercida na peça. É necessário girar a catraca duas ou três voltas para se obter o contato ideal entre o instrumento e a peça.

O nônio está presente nos micrômetros analógicos de resolução micrométrica (Figura 2). Ele é dividido em dez partes iguais, possibilitando a leitura dos milésimos de milímetros.

No corpo do micrômetro são feitas marcações destacando as divisões das escalas, a resolução, a faixa de indicação e o nome do fabricante ou marca. Assim os micrômetros são facilmente identificados.

A faixa de indicação do micrômetro é usualmente de 25 mm. Os limites inferior e superior estão entre 0 e 500 mm. Contudo, em alguns micrômetros para aplicações especiais esse valor máximo é ultrapassado. Por sua vez, a resolução depende do passo da rosca e do número de divisões do tambor, Eq. (1).

$$Resolução = \frac{passo_{rosca}}{divisões_{tambor}} \quad (1)$$



Figura 2. Nônio do micrômetro.

Se o passo da rosca for de 0,5 mm e o tambor dividido em cinquenta partes iguais, então, a resolução do micrômetro é de 0,01 mm. Para rosca de passo 1 mm, e tambor de 100 divisões, tem-se igualmente 0,01 mm. Nos micrômetros com nônio, a resolução é obtida considerando-se ainda o número de divisões do nônio, que é igual a 10, conforme a Eq. (2).

$$Resolução = \frac{1}{10} \cdot \frac{passo_{rosca}}{divisões_{tambor}} \quad (2)$$

A escolha do micrômetro para a realização de uma medição segue o princípio adotado universalmente. Para tanto a resolução deve ser igual ou inferior a um décimo da faixa de tolerância da peça a ser medida. Quando esta relação não for garantida, admite-se ainda que ela seja igual a um quinto da tolerância.

A medição de dimensões externas com o micrômetro obedece ao Princípio de Abbé, pois o eixo do instrumento é coincidente com a linha de medição da peça (Figura 3). A distância entre o eixo e a linha de medição é denominada braço de Abbé, que neste caso assume valor nulo.

Para efetuar a medição com micrômetro é necessário, primeiramente, posicionar a peça de forma correta entre as superfícies de medição. Depois deve-se deslocar o fuso e regular a pressão a ser exercida para que não ocorram deformações nos componentes do micrômetro e nem na peça objeto de medição.



Figura 3. Eixo do micrômetro coincidente com a linha de medição (Fabricante do micrômetro: Mitutoyo).

Com o objetivo de facilitar a medição, os micrômetros são fixados em suportes conforme mostra a Figura 4.



Figura 4. Suporte para micrômetros (Pantec).

Uma análise visual, mais detalhada, do micrômetro revela que as escalas não estão situadas no mesmo plano (Figura 5a). Assim sendo, recomenda-se que durante a leitura o instrumento seja colocado em frente aos olhos para evitar o erro de paralaxe.

Existem diversos tipos de micrômetros para medições externas, dentre eles o micrômetro analógico visto anteriormente e o digital (Figura 5b). O micrômetro digital

fornece o valor medido instantaneamente de acordo com sua resolução. Podem ser encontrados, também, micrômetros com contador mecânico (Figura 6a). Com características especiais, dentre eles com pontas finas (Figura 6b) e com pontas cônicas (Figura 7). Ambos utilizados nas medições de flancos de roscas, ranhuras e rasgos de chavetas.



Figura 5. Micrômetro analógico (a) e micrômetro digital (b) (Mitutoyo (a) e Starrett (b)).

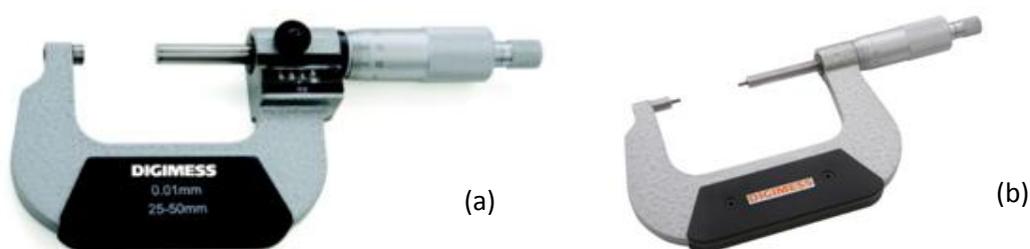


Figura 6. Micrômetro com contador mecânico (a) e com pontas finas (b) (Digimess).



Figura 7. Micrômetro com pontas cônicas (Starrett).

Micrômetro com discos (Figura 8a), que permite medições sobre dentes de engrenagens, assim como, a verificação das dimensões de aletas, rasgos de chaveta e ranhuras. Micrômetro com arco profundo (Figura 8b) para medição de regiões afastadas da

extremidade em peças de grandes dimensões ou chapas. Os micrômetros com batente em V (Figura 9) utilizados na medição de ferramentas de corte.

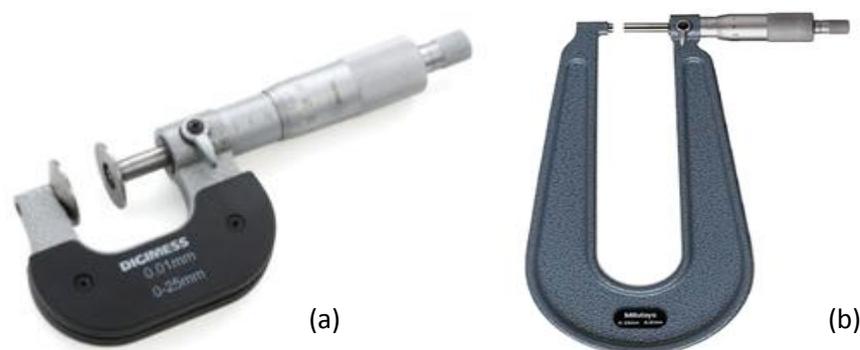


Figura 8. Micrômetro para medição de engrenagens (a) e micrômetro com arco profundo (b) (Digimess (a) e Mitutoyo (b)).

São encontrados, também, micrômetros com batentes intercambiáveis, com batentes deslizantes, com relógio comparador e do tipo paquímetro.

O erro máximo admissível para os micrômetros pode ser determinado pela Eq. (3) em função do limite inferior da faixa de medição.

$$F_{\max} = 4 + A/50 \quad (3)$$

onde F_{\max} é o erro máximo em (μm) e A é limite inferior da faixa de medição do instrumento.



Figura 9. Micrômetro com batente em V (Starrett).

Caso seja identificado um valor superior ao especificado pela norma, o instrumento é considerado inadequado para uso. Para tanto deve ser traçada a curva de erros, com base na medição de blocos-padrão de comprimento conhecido e que garantam a rastreabilidade a padrões nacionais de medida.

O erro do fuso micrométrico consiste na diferença entre o maior e o menor valor apresentado pela curva de erro ao longo da faixa de medição. Seu valor não pode ser superior a 3 μm .

O paralelismo e a planeza das superfícies de medição, também, são aspectos que devem ser analisados. A tolerância para a planeza é de 1 μm . No caso do paralelismo entre as faces de medição, a tolerância é estimada, em micrometros, através da Eq. (4).

$$D_{\text{paral}} = 2 + A/50 \quad (4)$$

Existe também uma tolerância para a posição do zero da escala principal do instrumento em relação à verdadeira origem da faixa de medição, obtida pela Eq. (5).

$$f = \pm(2 + A/50) \quad (5)$$

2.1. CALIBRAÇÃO DO MICRÔMETRO PARA EXTERNOS

Segundo a NBR NM-ISO 3611 (1997), a calibração dos micrômetros permite a verificação do erro de indicação do fuso micrométrico, dos desvios de planeza e de paralelismo das superfícies de medição e da força exercida pela catraca.

A referida norma recomenda que antes do início da calibração seja feita a limpeza dos componentes do instrumento para que o parafuso se desloque livremente em relação à porca, sem qualquer tipo de folga ou interferência. Deve ser verificada, também, a posição do zero das escalas principal e do tambor.

Todas as observações referentes às condições do micrômetro devem ser registradas em um documento. Dentre elas a presença de marcas de oxidação ou marcas que evidenciem que o instrumento sofreu algum tipo de choque ou queda; a qualidade dos traços de todas as escalas, o deslocamento do fuso e o estado das superfícies de medição.

O erro do fuso micrométrico é determinado através da realização de medições sucessivas de blocos-padrão. Para uma faixa de 0 a 25 mm, a NBR NM-ISO 3611 (1997) recomenda a utilização de dez blocos-padrão com as seguintes dimensões: 2,5 – 5,1 – 7,7 – 10,3 – 12,9 – 15,0 – 17,6 – 20,2 – 22,8 e 25,0 mm. Tem-se, desta forma, uma medição a cada duas voltas completas e não adjacentes do fuso.

Para cada comprimento foram realizadas cinco medições, que possibilitaram a análise estatística dos dados. A partir das leituras realizadas foram calculados a média aritmética e o desvio padrão. Como a dimensão do padrão é conhecida (Valor Verdadeiro Convencional) o erro de indicação pode ser calculado a partir da Eq. (6).

$$E = V_m - VVC \quad (6)$$

onde E é o erro de indicação, V_m o valor médio das leituras e VVC o valor verdadeiro convencional, representado pelo comprimento do bloco-padrão.

Conhecidos os erros sistemáticos (tendência) nos dez pontos de medição, é possível traçar a curva de erros do instrumento. Ela consiste em um gráfico com o eixo horizontal indicando o comprimento em milímetros e o eixo vertical representando o erro em cada ponto da faixa de medição também em milímetros. Ainda, são traçadas duas outras curvas, com os valores da ordenada iguais a $E+2s$ e $E-2s$, que estipulam um intervalo para as medições com um nível de confiança de 95%.

A planeza das superfícies de medição é avaliada por meio de um plano óptico. Este dispositivo indica o desvio de planeza através de franjas de interferência. Analisando cada superfície separadamente, deve-se posicionar o plano óptico de modo a visualizar o menor número de franjas possível. Caso sejam verificadas mais de quatro franjas de mesma cor, o desvio ultrapassa os níveis aceitáveis.

A calibração relacionada ao paralelismo das faces dos micrômetros com faixa de medição de 25 mm é realizada utilizando-se uma combinação de paralelos ópticos de espessuras diferentes do passo da rosca. Para tanto as duas superfícies de medição entram em contato com os paralelos ópticos e tomando uma delas como referência, os paralelos ópticos são movimentados de modo a obter um número mínimo de franjas na face. Conta-se então o número de franjas visualizadas na outra superfície. Repete-se o procedimento para cada paralelo óptico. O número de franjas observado não deve ser maior que 8.

De forma similar é inspecionado o paralelismo das superfícies de medição de micrômetros com faixa de até 100 mm. Neste caso, é usada uma combinação de blocos-padrão. Recomenda-se que as pilhas montadas apresentem o menor número de blocos, para minimizar a propagação de erros acumulativos.

A força exercida pelo micrômetro contra a peça também precisa ser medida. Esta operação é feita com o uso de um dinamômetro. O valor encontrado deve estar entre 5 e 15 N.

Os resultados da calibração são emitidos em um documento denominado Certificado de Calibração. Ele deve ser redigido obedecendo a todos os requisitos estipulados pela NBR ISO/IEC 17025 (2005) e deve conter, também, informações sobre a incerteza associada à calibração.

2.2. INCERTEZA DE MEDIÇÃO

Todo processo de medição está inevitavelmente sujeito a erros, assim sendo, durante a medição com micrômetro é impossível obter exatamente o valor do mensurando. Portanto recomenda-se apresentar, juntamente com o valor encontrado, a estimativa da incerteza associada à medição.

Os erros de medição são classificados em três tipos dependendo do comportamento. Eles são:

Erro sistemático: provocado por uma grandeza de influência, podendo ser corrigido, desde que sua fonte seja detectada. Contudo, a correção do erro sistemático não é perfeita e sempre haverá uma dúvida.

Erro aleatório: não pode ser previsto e, portanto, não pode ser corrigido. Constitui a causa principal de variações em observações repetidas do mensurando. É possível minimizar seus efeitos aumentando-se o número de leituras consecutivas. Atribui-se a ele a indeterminação do resultado das medições.

Erro grosseiro: é imprevisível. Embora possa alterar significativamente os resultados finais, é facilmente detectado e corrigido.

Somando à dúvida proveniente da correção imperfeita do erro sistemático a dúvida que o erro aleatório impõe sobre o resultado da medição obtém-se o que se convencionou chamar de incerteza de medição.

Desde 1993, com a publicação do GUM é obrigatório expressar junto com o resultado da medição um parâmetro que indique o nível de confiabilidade a ele associado. Esse parâmetro é denominado incerteza de medição.

A incerteza de medição é definida como o parâmetro associado ao resultado de uma medição que caracteriza a dispersão dos valores que podem ser razoavelmente atribuídos ao mensurando (VIM, 2009).

A publicação do guia ISO GUM em 1993 pela *International Organization for Standardization* (ISO) possibilitou que metrologistas e pesquisadores do mundo todo tivessem um documento comum para estimar a incerteza de medição.

Este guia tem a finalidade de estipular um método padronizado para o cálculo da incerteza de medição, facilitando a troca de informações e a comparação de resultados entre entidades e laboratórios de diferentes países. A primeira edição brasileira foi publicada em 1997 e recebeu o título “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição”.

O GUM define três tipos de incerteza, que são a incerteza padrão, a incerteza padrão combinada e a incerteza expandida. Ainda, segundo o método da avaliação, a incerteza padrão pode ser classificada como do Tipo A e do Tipo B. Uma avaliação do Tipo A pode ser efetuada apenas quando existe a possibilidade de realizar observações sucessivas do mensurando. Neste caso, a incerteza padrão é facilmente determinada por métodos estatísticos. O valor esperado da grandeza é estimado através da média aritmética. Enquanto que, a dispersão dos valores pode ser representada através do desvio padrão. A incerteza padrão do tipo A é estimada por meio da Eq. (7) onde n é o número de leituras ou tamanho amostral.

$$u(x) = \frac{s(x)}{\sqrt{n}} \quad (7)$$

Por sua vez, uma avaliação do Tipo B pode ser efetuada através de um julgamento científico baseado em informações disponíveis sobre a variabilidade da grandeza em estudo. Essas informações podem ser especificações do fabricante, dados relatados em certificados de calibração ou manuais técnicos, dados de medições prévias ou mesmo do conhecimento a respeito dos materiais mais influentes.

Quando existe a chance de o valor de uma grandeza estar situado em um determinado intervalo, com uma porcentagem conhecida e significativa, pode-se considerar a distribuição como Normal. Admite-se que a melhor representação para cada valor seja o ponto médio do intervalo.

Por outro lado, adota-se uma distribuição retangular quando se tem conhecimento somente a respeito dos limites inferior e superior do intervalo no qual os valores estão contidos. Desta forma, é igualmente provável que eles estejam situados em qualquer lugar

entre as fronteiras e a probabilidade de eles não estarem ali contidos é zero. A incerteza padrão, neste caso, é calculada de acordo com a Eq. (8).

Fisicamente, a descontinuidade observada na função degrau que representa a distribuição retangular é improvável. Conclui-se que, em determinados casos, é mais sensato utilizar a distribuição trapezoidal, na qual os valores médios apresentam maiores chances de ocorrência. À medida que se afasta do centro, esta probabilidade é menor, o que justifica a geometria semelhante à de um triângulo na extremidade. Neste caso, calcula-se a incerteza padrão por meio da Eq. (9).

$$u(x) = \frac{\textit{estimativa}}{\sqrt{3}} \quad (8)$$

$$u(x) = \frac{a \cdot \sqrt{(1 + \beta)}}{\sqrt{6}} \quad (9)$$

onde a é a metade do comprimento da base maior do trapézio e β a metade do comprimento da base menor do trapézio.

Quando se tem à disposição uma quantidade razoavelmente maior de informações sobre a grandeza de influência, pode-se adotar a distribuição triangular. A incerteza padrão, neste caso, é estimada através da Eq. (10).

$$u(x) = \frac{\textit{estimativa}}{\sqrt{6}} \quad (10)$$

Nota-se claramente que o número encontrado é menor em relação ao da distribuição retangular caso os mesmos dados sejam analisados.

Após o cálculo das incertezas-padrão de todas as variáveis de influencia é possível estimar a incerteza padrão combinada através de uma lei conhecida como “lei de propagação de incertezas”, Eq. (11).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) + 2 \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \frac{\partial f}{\partial x_i} \frac{\partial f}{\partial x_j} \cdot u(x_i) \cdot u(x_j) \cdot r(x_i, x_j) \quad (11)$$

onde y é a estimativa da variável resposta Y ; x_i a estimativa da variável X_i , $u^2(x_i)$ a variância associada a x_i , para todo i variando de 1 até N ; N o número de variáveis que afetam a variável resposta Y ; $u(x_i)$ a incerteza associada à fonte de erro representada pela estimativa x_i ; e $r(x_i, x_j)$ o coeficiente de correlação entre as estimativas x_i e x_j .

Para aplicação desta lei o modelo matemático que relaciona a variável de saída da medição e as variáveis que afetam o seu comportamento deve ser conhecido. Caso contrário outro método deve ser adotado.

O segundo termo da equação (11) expressa a correlação existente entre duas fontes de incertezas x_i , x_j com $i \neq j$. O coeficiente r , equação (12), fornece uma medida do grau de correlação entre as variáveis x_i e x_j .

$$r(x_i, x_j) = \frac{\sum_{k=1}^M (x_{ik} - \bar{x}_i) \cdot (x_{jk} - \bar{x}_j)}{\sqrt{\sum_{k=1}^M (x_{ik} - \bar{x}_i)^2 \cdot \sum_{k=1}^M (x_{jk} - \bar{x}_j)^2}} \quad (12)$$

onde M é o número de valores atribuídos às variáveis x_i e x_j e \bar{x}_i e \bar{x}_j as médias aritméticas dos M valores atribuídos à x_i e x_j , respectivamente.

O coeficiente de correlação varia de -1 a 1 . Quando esse valor se aproxima dos extremos significa que as variáveis x_i e x_j são altamente correlacionadas. Por outro lado, se o coeficiente de correlação é zero significa que não há correlação entre as variáveis. Portanto, se as estimativas x_i , x_j são independentes entre si, o coeficiente de correlação é igual a zero e o segundo termo da equação (11) desaparece. Neste caso, o número de cálculos necessários para determinar a incerteza padrão combinada é menor (Eq. 13).

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (13)$$

A incerteza padrão combinada estimada conforme recomendado no ISO GUM apresenta uma probabilidade de abrangência de apenas 68 %. Isto porque a incerteza padrão de todas as variáveis de entrada apresenta probabilidade de abrangência de 68 %.

Assim sendo, o Comitê Internacional de Pesos e Medidas (CIMP) propõe descrever a incerteza de medição através de intervalos que representam os valores esperados para os erros de medição, com uma probabilidade conhecida. O CIPM usa o termo incerteza expandida (U_p) para descrever tal intervalo conforme a Eq. (14) onde u_c é a incerteza padrão combinada e k o fator de abrangência ($k > 0$).

$$U_p = k \cdot u_c \quad (14)$$

O fator k está associado à distribuição de probabilidades dos valores obtidos na medição, que geralmente apresentam uma distribuição Normal.

Quando não for conveniente esta aproximação utiliza-se o teorema do valor central junto com a distribuição t-student para fornecer um fator de abrangência baseado no grau de liberdade efetivo da incerteza padrão da medição. O grau de liberdade efetivo v_{eff} é obtido através da fórmula de Welch-Satterthwaite, Eq. (15).

$$v_{eff} = \frac{u_c^4(y)}{\sum_{i=1}^N \frac{u_i^4(y)}{v_i}} \quad (15)$$

Os resultados das medições e calibrações e suas respectivas incertezas devem ser emitidos em conjunto com todas as informações necessárias para sua correta interpretação. Isso inclui a descrição detalhada do procedimento adotado e do cálculo da incerteza, a lista de todas as grandezas de influência e a maneira como cada uma delas foi avaliada, a análise dos dados e as correções necessárias. É também essencial seguir todas as etapas descritas, começando pela determinação da relação existente entre as grandezas de entrada e de saída.

Depois, são estipulados os valores de cada variável de entrada e as incertezas-padrão relacionadas, possibilitando o cálculo das incertezas padrão combinada e da expandida. Por fim, o resultado da medição é declarado juntamente com o valor da incerteza expandida.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Neste trabalho, foi efetuada a calibração parcial de um micrômetro para medições externas segundo o procedimento recomendado pela NBR NM-ISO 3611 (1997). O

micrômetro calibrado é de aço, do tipo analógico, marca Pantec. Apresenta passo de rosca de 0,5 mm, resolução de 0,001 mm, faixa de medição de 0-25 mm e número de identificação 061258393.

3.1. CALIBRAÇÃO

A calibração do micrômetro para medições externas foi realizada no Laboratório de Metrologia Dimensional da Faculdade de Engenharia Mecânica da UFU. Foram utilizados, também, um suporte para micrômetros, um conjunto de blocos-padrão de classe 0, cotonetes, luvas, pinças e álcool.

A calibração foi efetuada a $(20,1 \pm 1,0)$ °C. A temperatura ambiente foi monitorada por meio de um termo-higrômetro digital de resolução igual a 0,1 °C e faixa de indicação de – (20 a 60) °C. Foi aguardado, aproximadamente, 10 h para que todos os equipamentos e dispositivos atingissem o equilíbrio térmico.

Inicialmente, foi efetuada a limpeza do micrômetro, do suporte e dos blocos padrão (Figura 13). Em seguida foi feita a identificação dos mesmos. As informações registradas foram: tipo de instrumento, fabricante, resolução, faixa de indicação, passo da rosca, classe de exatidão e número do patrimônio.

Uma análise visual do micrômetro foi realizada com o intuito de detectar possíveis defeitos capazes de comprometer o seu desempenho. Os aspectos verificados foram: a presença de marcas de oxidação ou marcas provocadas por impacto; a definição e visibilidade dos traços das escalas principal, do tambor e do nônio; o movimento do fuso micrométrico; o funcionamento da catraca; a posição dos zeros de todas as escalas e as condições das superfícies de medição fixa e móvel.

Foram definidos dez pontos da faixa de indicação do micrômetro para análise: 2,5 – 5,1 – 7,7 – 10,3 – 12,9 – 15,0 – 17,6 – 20,2 – 22,8 – 25,0 mm. Recomendados pela NBR NM-ISO 3611 (1997).

Para a obtenção de todas as dimensões, foram montadas pilhas de blocos-padrão, que consistem na junção de dois ou mais blocos. As pilhas foram medidas cinco vezes, em ordem crescente, iniciando do ponto 2,5 até 25,0 mm. Todos os valores lidos durante a medição dos blocos-padrão foram anotados para tratamento posterior.

Após a calibração foi efetuada a limpeza e manutenção dos equipamentos e dispositivos. Para tanto foi utilizado álcool etílico, cotonetes, toalhas de papel e pano seco.

Uma camada de vaselina foi aplicada sobre os mesmos antes de serem guardados em seus respectivos estojos.

3.2. ESTIMATIVA DA INCERTEZA DE MEDIÇÃO

A estimativa da incerteza de medição iniciou-se com a identificação das variáveis que afetam os resultados da calibração do micrômetro. Isso possibilitou a definição do modelo matemático que relaciona as grandezas de entrada e de saída, além de alguns fatores de correção.

As variáveis que influenciam a incerteza associada à calibração do micrômetro são: valor do mensurando (L_M) indicado pelo instrumento, resolução do micrômetro (R_M), os coeficientes de dilatação linear dos materiais do micrômetro (α_M) e dos blocos-padrão (α_P) e a variação de temperatura (ΔT) em relação à temperatura padrão de 20 °C. Os outros fatores utilizados são as correções devido aos desvios de planeza das superfícies de medição de medição fixa e móvel ($D_{pl(fixa)}$ e $D_{pl(móvel)}$) e a correção devido ao desvio de paralelismo entre estas superfícies (D_{paral}). O modelo proposto para estimativa da incerteza é apresentado na Eq. (16).

$$C = L_M + R_M + D_{Paral} + D_{Pl(fixa)} + D_{Pl(móvel)} + \alpha_M \cdot P \cdot \Delta T + \alpha_P \cdot P \cdot \Delta T + I_{pad} \quad (16)$$

Posteriormente, foram calculadas as incertezas-padrão relacionadas a cada uma das variáveis de influência.

A incerteza padrão associada à indicação do micrômetro é considerada do tipo A. Foram realizadas cinco medições da cada pilha e calculados a média aritmética e o desvio padrão. Para efeitos de cálculo foi adotada uma distribuição normal para esta variável. Isto porque há informações suficientes de que auxiliam na determinação do comportamento da função que representa a distribuição a ela associada. O número de graus de liberdade é igual ao número de leituras menos um, isto é, igual a quatro. O coeficiente de sensibilidade assume valor unitário. Assim sendo, a incerteza padrão relacionada às leituras é definida de acordo com a Eq. (7).

A resolução do micrômetro pode ser tratada como uma fonte de incerteza do tipo B, com distribuição retangular. Neste caso, não é possível determinar a posição da variável no intervalo considerado, podendo assumir infinitos valores. Por este motivo, o grau de liberdade

é considerado infinito. O valor do coeficiente de sensibilidade é um e a incerteza padrão associada à resolução pode ser calculada através da Eq. (17).

$$u(R_M) = \frac{\text{resolução}}{\sqrt{3}} \quad (17)$$

A correção devido ao desvio de paralelismo das faces de medição do micrômetro apresenta uma incerteza padrão do tipo B, com distribuição triangular. Neste caso, há uma probabilidade maior dos valores estarem situados no centro da distribuição. O grau de liberdade é infinito e o coeficiente de sensibilidade assume o valor um.

A Equação (18) permite encontrar o valor da incerteza neste caso.

$$u(D_{\text{paral}}) = \frac{D_{\text{paralelismo}}}{\sqrt{6}} \quad (18)$$

A distribuição de probabilidade triangular fornece uma incerteza padrão menor que aquela estimada caso a distribuição fosse retangular. Observe que, neste caso, o valor do desvio é dividido pela raiz de seis.

As incertezas-padrão associadas aos desvios de planeza das superfícies de medição fixa e móvel são calculadas pelas Equações (19) e (20), respectivamente. As distribuições adotadas para ambos os casos são triangulares e os graus de liberdade infinitos. As derivadas parciais da variável de saída em relação às variáveis de entradas são iguais a um.

$$u(D_{\text{pl}(fixa)}) = \frac{D_{\text{planeza}(fixa)}}{\sqrt{6}} \quad (19)$$

$$u(D_{\text{pl}(móvel)}) = \frac{D_{\text{planeza}(móvel)}}{\sqrt{6}} \quad (20)$$

A análise dos coeficientes de expansão térmica dos materiais que constituem o micrômetro e dos blocos-padrão foi feita, para calcular as respectivas incertezas. As distribuições adotadas são retangulares e os graus de liberdade infinitos, porém os coeficientes de sensibilidade assumem valores diferentes de um. Ambos são obtidos pela

multiplicação da diferença de temperatura ΔT e o valor estipulado para L_M após a realização de leituras sucessivas. Para os coeficientes α do micrômetro e da peça, as incertezas padrão $u(\alpha_M)$ e $u(\alpha_P)$ são respectivamente definidas de acordo com as Eq. (21) e (22).

$$u(\alpha_M) = \frac{0,1 \cdot \alpha_M}{\sqrt{3}} \quad (21)$$

$$u(\alpha_P) = \frac{0,1 \cdot \alpha_P}{\sqrt{3}} \quad (22)$$

A incerteza relacionada à variação da temperatura de medição difere das demais. No cálculo são considerados dois fatores, isto é, a incerteza associada à calibração do termômetro utilizado para medir a temperatura ambiente e a variação da temperatura em relação a 20 °C.

A incerteza associada à calibração do micrômetro é declarada no certificado de calibração. Informações adicionais como a probabilidade de abrangência e o valor de k , podem ser fornecidas também.

A incerteza padrão da variação de temperatura é do tipo B, com distribuição retangular e grau de liberdade infinito. Ela pode ser calculada através da Eq. (23).

$$u(\text{var Temp}) = \frac{\Delta T}{\sqrt{3}} \quad (23)$$

A incerteza associada à temperatura é finalmente determinada com a Eq. (24). A derivada parcial da variável de saída em relação à variação de temperatura é dada pela Eq. (25).

$$u(\Delta T) = \sqrt{u(\text{medidor})^2 + u(\text{var Temp})^2} \quad (24)$$

$$\frac{\partial C}{\partial \Delta T} = (\alpha_M + \alpha_P) \cdot L_M \quad (25)$$

A incerteza da calibração depende, também, da incerteza dos padrões utilizados ($I_{Padrão}$). Para tanto foi adotada a distribuição de probabilidade retangular e infinitos graus de

liberdade. A derivada parcial relacionada a essa variável apresenta valor unitário. A incerteza padrão $u(I_{Pad})$ é calculada conforme a Eq. (26).

$$u(I_{Pad}) = \frac{I_{Padr\tilde{a}o}}{\sqrt{3}} \quad (26)$$

Com todos os valores das incertezas-padrão calculados, é possível aplicar a “lei da propagação de incertezas” no modelo matemático da Eq. (16). Ela relaciona todas as incertezas e os respectivos coeficientes de sensibilidade, para a estimativa da incerteza padrão combinada u_c , de acordo com a Eq. (27).

Após a realização de todos os cálculos, a incerteza expandida é finalmente obtida conforme a Eq. (14). Enquanto que o valor de k é dado pela Eq. (15).

$$\begin{aligned} (u_C)^2 = & \left(\frac{\partial C}{\partial L_M} \right)^2 \cdot (u(L_M))^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial R_M} \right)^2 \cdot (u(R_M))^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial D_{paral}} \right)^2 \cdot (u(D_{paral}))^2 \\ & + \left(\frac{\partial C}{\partial D_{pl(fixa)}} \right)^2 \cdot (u(D_{pl(fixa)}))^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial D_{pl(m\acute{o}vel)}} \right)^2 \cdot (u(D_{pl(m\acute{o}vel)}))^2 + \\ & + \left(\frac{\partial C}{\partial \alpha_M} \right)^2 \cdot (u(\alpha_M))^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \alpha_P} \right)^2 \cdot (u(\alpha_P))^2 + \left(\frac{\partial C}{\partial \Delta T} \right)^2 \cdot (u(\Delta T))^2 + \\ & + \left(\frac{\partial C}{\partial I_{Pad}} \right)^2 \cdot (u(I_{Pad}))^2 \end{aligned} \quad (27)$$

Como o número de graus de liberdade de várias grandezas de influência é considerado infinito, tem-se que os termos do denominador que apresentam essa característica tendem a zero.

O procedimento de cálculo da incerteza associada à calibração é apresentado em uma tabela. Ela contém todas as grandezas de influência com seus respectivos valores, distribuições de probabilidade, graus de liberdade, coeficientes de sensibilidade e incertezas padrão, além dos valores da incerteza combinada, grau de liberdade efetivo, fator de abrangência e incerteza expandida.

3.3. EMISSÃO DOS RESULTADOS

Após a estimativa dos valores do erro de indicação do instrumento ao longo de sua faixa de medição é possível efetuar a correção dos resultados de quaisquer medições efetuadas com o micrômetro. Para tanto, é usada a curva de erros traçada.

Os certificados de calibração são documentos que contem as informações relativas ao procedimento de calibração.

Eles devem apresentar título, nome e endereço do laboratório que realizou a calibração, identificação do certificado, nome e endereço do cliente, identificação do método utilizado, descrição dos itens calibrados, além dos nomes, funções e assinaturas das pessoas autorizadas a emitir a documentação. Podem também ser incluídas opiniões, com o intuito de assegurar a correta interpretação a respeito de todos os tópicos.

Analisando os dados apresentados no certificado de calibração, como erro de indicação e incerteza de medição, é possível ainda concluir a respeito da capacidade ou não do instrumento calibrado de efetuar medições confiáveis.

É importante que os laboratórios responsáveis pela realização de calibrações possuam um modelo padronizado de certificado para a emissão dos resultados.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Por meio da análise visual do micrômetro observou-se que o instrumento não apresenta marcas de oxidação ou de impacto. Os traços de todas as escalas estão bem definidos e legíveis. O fuso micrométrico se desloca com folga mínima. A catraca funciona de maneira adequada. Os zeros das escalas são coincidentes. As superfícies de medição se encontram em bom estado.

Através do procedimento de calibração, foram obtidos dados que possibilitaram a determinação do comportamento do instrumento ao longo de toda a sua faixa de medição. Os valores coletados nos cinco ciclos de medição são apresentados na Tabela 1.

Na Tabela 1, é possível observar que existe variabilidade associada às leituras em todos os pontos da faixa de indicação do micrômetro. Esta variabilidade pode ser justificada pela presença de efeitos aleatórios.

Tabela 1. Indicação do micrômetro.

VVC [mm]	N 1 [mm]	N 2 [mm]	N 3 [mm]	N 4 [mm]	N 5 [mm]
2,5	2,502	2,501	2,500	2,501	2,501
5,1	5,103	5,103	5,103	5,103	5,102
7,7	7,703	7,701	7,702	7,702	7,703
10,3	10,302	10,302	10,302	10,301	10,301
12,9	12,903	12,904	12,901	12,901	12,902
15,0	15,003	15,003	15,002	15,001	15,002
17,6	17,604	17,603	17,604	17,604	17,603
20,2	20,200	20,203	20,204	20,203	20,204
22,8	22,807	22,806	22,806	22,806	22,807
25,0	25,006	25,006	25,005	25,005	25,005

4.1. ERRO DE INDICAÇÃO

O erro de indicação ou tendência foi calculado pela Eq. (6). A Tabela 2 mostra a média, o desvio padrão das leituras e os respectivos valores de erro encontrados.

Tabela 2. Erro de indicação do micrômetro.

VVC [mm]	Indicação [mm]	Desvio Padrão [μm]	Erro de Indicação [μm]
2,5	2,501	0,7	1
5,1	5,103	0,4	3
7,7	7,702	0,8	2
10,3	10,302	0,5	2
12,9	12,902	1,3	2
15,0	15,002	0,8	2
17,6	17,604	0,5	4
20,2	20,203	1,6	3
22,8	22,806	0,5	6
25,0	25,005	0,5	5

Na Tabela 3 se observa que o erro de indicação é diferente em cada ponto de avaliação e assume valores entre 1 e 6 μm . Com estes dados é possível traçar a curva de erros do instrumento (Figura 10).

Esta curva de erros mostra o erro de indicação (tendência) que deve ser corrigido do resultado de qualquer medição efetuada com o micrômetro.

Para os pontos da faixa de indicação que não foram avaliados deve ser feita uma interpolação linear a fim de estimar o valor da tendência.

Além da curva da tendência, são traçadas outras duas curvas, que representam os limites máximos e mínimos para o erro.

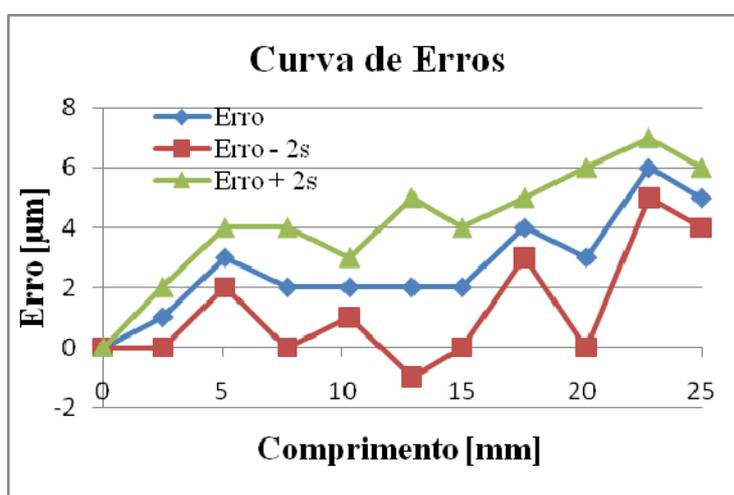


Figura 10. Curva de erros do micrômetro calibrado.

Observe que todas as curvas ultrapassam o valor de 4 μm que é considerado como o erro máximo para o tipo de micrômetro calibrado.

4.2. INCERTEZA DA CALIBRAÇÃO

A incerteza associada à calibração foi estimada em todos os pontos de medição. Primeiramente foram calculadas as incertezas-padrão de cada variável de influência, bem como os coeficientes de sensibilidade.

Em seguida foram estimados a incerteza padrão combinada, o grau de liberdade efetivo e, finalmente, a incerteza expandida relativa a cada ponto.

A Tabela 3 exibe os valores relacionados à incerteza de medição no ponto correspondente a 2,5 mm da faixa de medição do micrômetro.

Tabela 3. Incerteza associada à medição do comprimento de 2,5 mm.

Grandeza X_i	Estimativa x_i	Dist. de Probabilidade	Coefficiente de Sensibilidade	Graus de Liberdade	Incerteza Padrão
L_M	2,501 mm	Normal	1	4	0,3162 μm
R_M	1 μm	Retangular	1	∞	0,5774 μm
D_{paral}	2 μm	Triangular	1	∞	0,8165 μm
$D_{\text{pl(fixa)}}$	1 μm	Triangular	1	∞	0,4082 μm
$D_{\text{pl(móvel)}}$	1 μm	Triangular	1	∞	0,4082 μm
ΔT	0,1 $^{\circ}\text{C}$	Retangular	0,0550 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}^{-1}$	∞	0,5033 $^{\circ}\text{C}$
α_M	$1,1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Retangular	250 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}$	∞	$6,35 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
α_P	$1,1 \times 10^{-5} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$	Retangular	250 $\mu\text{m}^{\circ}\text{C}$	∞	$6,35 \times 10^{-7} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$
$I_{\text{padrão}}$	0,05 μm	Normal	1	∞	0,0250 μm
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm					1,20
Grau de liberdade efetivo (ν_{eff})					823
Fator de abrangência (95,5 %)					$k=1,96$
Incerteza expandida (U_P) em μm					2,35

Observe que o desvio de paralelismo entre as faces de medição do micrômetro apresenta o maior valor de incerteza padrão, sendo de 0,82 μm . Ela é seguida pela resolução do instrumento e pela variação da temperatura em relação a 20 $^{\circ}\text{C}$.

No entanto, a incerteza padrão relacionada à variação de temperatura tem seu efeito atenuado pelo baixo valor do coeficiente de sensibilidade.

As incertezas padrão relacionadas aos coeficientes de expansão térmica são pouco expressivos. Sua influencia é minimizada pelo fato dos coeficientes de sensibilidade relacionados a ambos os coeficientes de expansão assumirem valores muito pequenos.

De forma similar foi estimada a incerteza associada aos demais pontos de medição. A diferença entre eles está, apenas, no valor de incerteza padrão associada às leituras, além dos coeficientes de sensibilidade que consideram o comprimento do mensurando.

A Tabela 4 contém os valores de incerteza padrão combinada, grau de liberdade efetivo, fator de abrangência e incerteza expandida para todos os pontos de medição.

Observe que a incerteza padrão combinada assume valores entre 1,17 e 1,39 μm , enquanto a incerteza expandida varia de 2,29 a 2,79 μm com probabilidade de abrangência de 95,5 %.

Tabela 4. Valores das incertezas padrão combinada e expandida.

VVC [mm]	u_c [μm]	ν_{eff}	Fator k	U_P [μm]
2,5	1,20	823	1,96	2,35
5,1	1,17	4741	1,96	2,29
7,7	1,22	448	1,96	2,39
10,3	1,19	2200	1,96	2,33
12,9	1,30	99	1,99	2,59
15,0	1,22	460	1,96	2,39
17,6	1,20	2278	1,96	2,35
20,2	1,39	51	2,01	2,79
22,8	1,21	2361	1,96	2,37
25,0	1,21	2403	1,96	2,37

O valor de k se repetiu para quase todos os pontos, pois o grau de liberdade efetivo das medições é muito elevado.

4.3. CERTIFICADO DE CALIBRAÇÃO

Um certificado de calibração foi confeccionado para a emissão dos resultados da calibração. Neste documento são relatados todos os dados e informações importantes relacionados ao procedimento de calibração, tais como: erro de indicação e incerteza de medição em cada ponto da faixa de indicação avaliado. Ele contém ainda a curva de erros do instrumento.

Cabe ressaltar que o certificado de calibração atende os requisitos estabelecidos na NBR ISO/IEC 17025 (2005).

Os resultados da calibração do micrômetro para externos revelam que o instrumento apresenta valores de erro superiores ao valor máximo permitido por norma, que é de 4 μm . Observe que em dois dos pontos da faixa de indicação avaliados os erros são respectivamente iguais a 6 e 5 μm .

O erro do fuso, também, apresenta valor superior ao máximo permitido pela NBR NM-ISO 3611 (1997), que é de 3 μm . O erro do fuso micrométrico é considerado aceitável apenas até o ponto da faixa de indicação correspondente a 15,0 mm.

5. CONCLUSÃO

Ao finalizar foram formuladas as seguintes conclusões.

Foi proposta e aplicada uma metodologia para calibrar micrômetros para externos conforme requisitado pela NBR ISO/IEC 17025 (1997). Um micrômetro, escolhido ao acaso, foi calibrado.

A metodologia da calibração foi documentada e pode ser aplicada para calibrar qualquer micrômetro para externos independente da faixa de medição.

Foi desenvolvida uma metodologia para estimar a incerteza associada à calibração de micrômetros para externos de forma simples e rápida seguindo as recomendações do GUM (2008).

O procedimento de cálculo da incerteza foi implementado, utilizando-se o aplicativo Microsoft Office Excel e ficará à disposição de todos.

A curva de calibração do micrômetro mostrou que o erro de indicação atinge valores de até 6 μm , ultrapassando o valor máximo permitido pela NBR NM-ISO 3611 (1997).

O erro do fuso também apresenta um valor maior que aquele estipulado por norma. Assim sendo, este equipamento deve ser ajustado ou colocado em desuso.

A variável que mais influenciou na incerteza associada à calibração do micrômetro foi o desvio de paralelismo existente entre as superfícies de medição fixa e móvel do instrumento.

A incerteza padrão combinada assume valores entre 1,17 e 1,39 μm , enquanto a incerteza expandida varia entre 2,29 e 2,79 μm .

Foi elaborado um certificado padrão para relatar os resultados da calibração de acordo com a NBR ISO/IEC 17025 (2005).

6. AGRADECIMENTOS

Oferecemos os agradecimentos ao PIBIC-UFU pelo apoio financeiro e por possibilitar o desenvolvimento deste trabalho de Iniciação Científica.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CAVACO, M.A.M. *Apostila de Metrologia Parte II*. Laboratório de Metrologia e Automação, Departamento de Engenharia Mecânica. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2003. 169 p. Apostila.

GONÇALVES Jr., A.A. *Apostila de Metrologia Parte I*. Laboratório de Metrologia e Automação, Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, Brasil, 2002. 130 p. Apostila.

INMETRO. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*. Rio de Janeiro, 1997. 120 p.

INMETRO. *SI - Sistema Internacional de Unidades*, 2007. 114 p.

INMETRO. *VIM - Vocabulário Internacional de Termos Fundamentais e Gerais de Metrologia*, 2008. 72 p.

MORETTIN, L.G. *Estatística Básica Volume 1: Probabilidade*. 7ª Edição. Makron Books, 1999. 230 p.

NBR ISO/IEC 17025 *Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração*. Janeiro, 2005. 20 p.

NBR NM-ISO 1 *Temperatura padrão de referência para medições industriais de comprimento*. Dezembro, 1997. 2 p.

NBR NM-ISO 3611 *Micrômetro para medições externas*. Janeiro, 1997. 12 p.