



AVALIAÇÃO DA INCERTEZA ATRAVÉS DE PLANILHAS ELETRÔNICAS

Monique Alves Franco de Moraes¹, Cláudio Costa Souza² e Rosenda Valdés Arencibia³

¹ Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, monique_afm@hotmail.com

² Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, claudio_costasouza@hotmail.com

³ Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil, arvaldes@mecanica.ufu.br

Resumo: Este trabalho tem como objetivo implementar planilhas eletrônicas para avaliação da incerteza das medições efetuadas no Laboratório de Metrologia Dimensional (LMD) da UFU como parte das atividades para adequação do mesmo à [1]. As etapas propostas para o desenvolvimento do trabalho são: estudo dos sistemas de medição; identificação das fontes de incerteza; obtenção dos modelos matemáticos e desenvolvimento dos roteiros de cálculo; implementação e validação das planilhas eletrônicas e, por fim, apresentação e discussão dos resultados. Ao finalizar o trabalho foram obtidas 20 planilhas eletrônicas para avaliar a incerteza da medição, utilizando 12 sistemas diferentes, que permitem avaliar a incerteza de forma simples e rápida. Entretanto, o usuário das mesmas deve possuir conhecimentos sobre o sistema de medição e o procedimento utilizado, além de incerteza, propriamente dita, para que possa extrair os dados declarados em certificados de calibração, manuais, dentre outros, bem como, interpretar e apresentar os resultados.

Palavras chave: incerteza, planilhas eletrônicas.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de medição mais comumente utilizados na indústria metal-mecânica são: paquímetro universal, micrômetro para externos, relógio comparador, trenas, escalas, traçadores de altura, microscópios e máquinas de medir por coordenadas. Atualmente, a confiabilidade metrológica das medições com esses sistemas de medição é buscada, principalmente através da calibração dos mesmos. No entanto, a garantia dessa confiabilidade inclui outros aspectos, que vão desde a seleção do sistema de medição mais adequado, até a correta expressão do resultado da medição juntamente com sua incerteza.

A avaliação da incerteza de medição deve ser efetuada seguindo as recomendações do [2]. Entretanto, o entendimento e aplicação deste guia não é uma tarefa simples, requerendo conhecimentos sobre o sistema e o processo de medição, bem como, sobre estatística básica. Para máquinas de medição, por exemplo, a estimativa se torna difícil devido à quantidade de variáveis que podem afetar o resultados da medição e à complexidade das operações matemáticas envolvidas.

De forma geral, a avaliação da incerteza de medição exige a manipulação de grande quantidade de dados. Assim sendo, recomenda-se o uso de planilhas eletrônicas e programas computacionais especialmente desenvolvidos, sendo que as planilhas eletrônicas são as mais disseminadas, pois são práticas para o registro dos resultados das medições, permitindo a rápida visualização dos mesmos; facilitam a análise crítica da incerteza de medição e permitem a comparação fácil e direta, uma vez que todas as contribuições de incerteza estão na mesma unidade de medida do mensurando e em uma mesma janela.

Segundo [3] estas planilhas fornecem transparência à expressão da incerteza de medição sendo fundamentais nas comparações interlaboratoriais e na avaliação de laboratórios metrológicos.

Desta forma, este trabalho tem como objetivo implementar planilhas eletrônicas para avaliar a incerteza das medições realizadas no Laboratório de Metrologia Dimensional da UFU, utilizando diversos sistemas de medição. Pretende-se com isto auxiliar o desenvolvimento das pesquisas desenvolvidas na faculdade e elevar o rigor científico das publicações decorrentes. Também contribuir para adequar as medições aos requisitos estabelecidos em [1].

2. FUNDAMENTOS TEÓRICOS

Um laboratório de calibração e/ou de ensaios deve aplicar procedimentos para avaliar a incerteza de todas as calibrações e/ou ensaios por ele realizados, conforme requisitado por [1].

Segundo [1], para aqueles casos onde a natureza do método de ensaio impedir uma avaliação rigorosa, o laboratório deve pelo menos tentar identificar todos os componentes de incerteza e fazer uma estimativa razoável.

2.1. Incerteza de medição

Para avaliar a incerteza de medição devem ser conhecidos os conceitos e as recomendações apresentados em [2]. A aplicação da metodologia proposta neste documento requer que o processo de medição seja modelado matematicamente, isto é, a variável de saída (mensurando) deve ser expressa em função das variáveis de entrada (variáveis de influência) conforme Eq. (1). Nesta equação, Y

representa a variável de saída e X_1, X_2, \dots, X_N são as variáveis de entrada.

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

Com o intuito de facilitar a avaliação da incerteza de medição são desenvolvidas ferramentas computacionais, dentre elas:

[4] propôs procedimentos para garantia da confiabilidade metrológica em processos de medição de temperatura. Um ambiente para análise da incerteza, seguindo os requisitos do [2], foi desenvolvido com programas já consagrados: o Excel (Microsoft Co.) para auxiliar na avaliação da incerteza e o programa Pspice (MicroSim Co.) para quantificação das fontes de incerteza individuais. O autor destaca a redução do tempo durante a avaliação da incerteza e a utilização das planilhas por profissionais de vários níveis da indústria.

[5] desenvolveu um software para avaliação da incerteza de medição analiticamente, através da implementação dos modelos matemáticos que descrevem o processo de medição em questão. Este programa surgiu da necessidade de declarar os resultados das medições juntamente com a incerteza associada, de forma simples, direta e em conformidade com [2].

[6] desenvolveu um trabalho fundamentado na metodologia do [2], na Simulação de Monte Carlo (MCS), bem como, nos trabalhos do programa Software Support for Metrology (SSfM). Com isso, foi possível desenvolver uma ferramenta de software denominada AUTOLAB INTUIT, capaz entre outros de modelar, automatizar e avaliar sistemas de medição, não sendo limitada a áreas específicas da metrologia. A ferramenta foi concebida e aplicada em diversos casos práticos, realizando aquisição automatizada de medições, avaliação de incertezas e emissão de relatórios condizentes às normas internacionais.

[7] implementou uma ferramenta para cálculo de parâmetros e incertezas em ensaios de tração conforme requisitado no [2]. O software desenvolvido pelo autor recebeu o nome de INcerTI e permite calcular os parâmetros de um ensaio de tração e as incertezas associadas.

[8] apresentaram o desenvolvimento e funcionamento do módulo de medição de um programa computacional para o controle metrológico e definição da zona de conformidade para um dado produto. O referido módulo foi desenvolvido em Excel, utilizando-se rotinas elaboradas em VBA (*Visual Basic for Application*). O programa computacional permite gerenciar os dados de medição no sentido de expressar o seu resultado de forma confiável, além de se definir uma zona de aceitação e rejeição de peças com base nos valores medidos.

3. METODOLOGIA

Para a implementação das planilhas eletrônicas necessárias à avaliação da incerteza, foram desenvolvidas as seguintes etapas:

3.1. Identificação dos sistemas de medição e dos mensurandos

Nesta etapa, foram levantados os sistemas de medição presentes no LMD. Em cada caso, foram identificados os mensurandos comumente medidos com os mesmos.

3.2. Estudo minucioso dos sistemas de medição para identificação das fontes de incerteza

Foram estudados o princípio de funcionamento, as características construtivas e as fontes de erros relativos a cada sistema de medição. Em seguida, foram identificados, para cada mensurando (variável de saída), as variáveis de influência (variáveis de entrada).

3.3. Modelagem matemática do processo de medição

Nesta etapa, foram obtidos os modelos matemáticos para cada processo de medição, conforme descrito a seguir. Cabe ressaltar que os roteiros de cálculo não são aqui apresentados.

3.3.1. Escalas de aço.

O modelo matemático proposto para avaliação da incerteza associada à medição com escala de aço é dado na Eq. (2).

$$C = s(L) + HR + \Delta I \quad (2)$$

onde $s(L)$ representa a variabilidade das leituras; ΔR é a correção devido à resolução da escala e ΔI a correção associada à calibração da escala.

3.3.2. Paquímetro quadrimensional

O modelo matemático proposto para a avaliação da incerteza associada às medições internas efetuadas com um paquímetro quadrimensional analógico é expresso pela Eq. (3) segundo [9].

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta D_{Ret(F)} + \Delta D_{Ret(M)} + \Delta D_{Pr(I)} + \Delta I + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{pe} + \alpha_{pa}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{pe} + \alpha_{pa}) \quad (3)$$

Em que $s(L)$ é a variabilidade dos valores indicados pelo paquímetro; ΔR é a correção associada à resolução do paquímetro; $\Delta D_{Ret(F)}$ e $\Delta D_{Ret(M)}$ são as correções devido aos desvios de retitude das superfícies de medição para internos fixa e móvel; $\Delta D_{Pr(I)}$ é a correção associada ao desvio de paralelismo entre as superfícies de medição para internos; α_{pe} e α_{pa} são os coeficientes de expansão térmica linear do material da peça e do paquímetro; ΔT é a correção devido ao afastamento da temperatura ambiente com relação a (20 °C); δT a correção da variação da temperatura durante as medições; ΔI é a correção associada à calibração do paquímetro e L_0 o valor do mensurando.

As variáveis $s(L)$, ΔR , ΔI , α_{pe} , ΔT , δT e L_0 estão presentes em todos os modelos a partir da Eq. (3), tendo o mesmo significado.

3.3.3. Micrômetro para externos

O modelo matemático proposto para a avaliação da incerteza associada às medições externas efetuadas com um micrômetro analógico é expresso conforme a Eq. (4), [10].

$$C = s(L) + \Delta R + D_{P(F)} + D_{P(M)} + D_{Pr} + \Delta I + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Mi}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Mi}) \quad (4)$$

Neste caso, D_{Pr} é o desvio de paralelismo entre as superfícies de medição do micrômetro e α_{Mi} o coeficiente de expansão térmica linear do material do micrômetro (aço).

3.3.4. Relógio comparador e dispositivo de contrapontas

O modelo matemático proposto para a avaliação da incerteza associada às medições do desvio de circularidade com um relógio comparador analógico e um dispositivo de contra pontas, é expresso conforme a Eq. (5), [11].

$$C = s(L) + \Delta R + H + \Delta I + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Rel}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Rel}) \quad (5)$$

Em que H é a correção associada à histerese do relógio e α_{Rel} é o coeficiente de expansão térmica linear do material do relógio.

3.3.5. Traçador de alturas

O modelo matemático para a avaliação da incerteza associada às medições com um traçador de altura digital é expresso conforme a Eq. (6).

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta I + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{TA}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{TA}) \quad (6)$$

Em que: α_{TA} é o coeficiente de expansão térmica linear do material do traçador.

3.3.6. Máquina de medir desvios de forma

O modelo matemático proposto para avaliar a incerteza da medição do desvio de circularidade na máquina de medir desvios de forma é expresso conforme a Eq. (7), [11].

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta I + \Delta D_{Exc} + \Delta EA + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MM}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MM}) \quad (7)$$

Em que ΔD_{Exc} é o desvio de excentricidade da máquina, ΔEA é o erro de apalramento da máquina e α_{TA} é o coeficiente de expansão térmica linear da escala da máquina.

3.3.7. Rugosímetro

O modelo matemático proposto para avaliação da incerteza do parâmetro Ra é expresso conforme a Eq. (8) [12].

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta I + \Delta A_{Vib} + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Ru}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Ru}) \quad (8)$$

Em que: ΔA_{Vib} é a correção associada ao deslocamento provocado pela amplitude das vibrações e α_{Ru} é o coeficiente de expansão térmica linear relativo ao rugosímetro.

3.3.8. Máquina de medir por coordenadas.

O modelo matemático proposto para avaliação da incerteza da medição de diâmetro com máquina de medir por coordenadas é expresso conforme a Eq. (9), [11].

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta I + \Delta EA + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MMC}) \quad (9)$$

Em que: ΔEA é o erro de apalamento da MMC e α_{MMC} é o coeficiente de expansão térmica linear das escalas da MMC.

3.3.9. Projetor de perfil

Para as medições lineares no projetor de perfil, o modelo matemático proposto é expresso conforme a Eq. (10).

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta I + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Pr}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Pr}) \quad (10)$$

onde α_{Pr} é o coeficiente de expansão térmica linear do material das escalas do projetor.

3.3.10. Microscópio ferramenteiro

O modelo matemático proposto para avaliação da incerteza na medição no microscópio ferramenteiro é expresso conforme a Eq. (11).

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta I_{CSO} + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Mi}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Mi}) \quad (11)$$

Em que ΔI_{CSO} é a incerteza padrão associada à calibração do sistema óptico do microscópio e α_{Mi} é o coeficiente de expansão térmica linear da escala do microscópio.

3.3.11. Transferidor.

O modelo matemático proposto é expresso conforme a Eq. (12).

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta I + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Tr}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{Tr}) \quad (12)$$

Em que α_{Tr} é o coeficiente de expansão térmica linear do material do transferidor.

3.3.12. Máquina universal de medir comprimentos

Para avaliar a incerteza associada à medição de comprimentos utilizando a máquina universal de medir

comprimentos é proposto o seguinte modelo matemático Eq. (13).

$$C = s(L) + \Delta R + \Delta I + L_0 \cdot \Delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MC}) + L_0 \cdot \delta T \cdot (\alpha_{Pe} + \alpha_{MC}) \quad (13)$$

Em que α_{MC} é o coeficiente de expansão térmica linear da escala da máquina.

3.4. Elaboração dos roteiros de cálculo.

Foram elaborados os roteiros para avaliar as incertezas padrão, a padrão combinada e a expandida, em função das informações disponíveis para cada mensurando.

3.5. Implementação das planilhas eletrônicas.

Nesta etapa, foram implementados os roteiros para avaliação da incerteza em planilhas eletrônicas através das ferramentas do *Excel*. Foi elaborada uma planilha para cada um dos mensurandos. Paralelamente, foram efetuadas verificações, a fim de garantir que as equações inseridas estavam corretas e que as células referenciavam os termos necessários.

Foi definido o leiaute das planilhas. As mesmas foram implementadas em uma única tela, de forma que o usuário tenha acesso a todas as informações, tanto de entrada quanto de saída. Elas contem o logotipo do Laboratório de Metrologia Dimensional, bem como o nome do sistema de medição e o do mensurando considerado. Ainda, as planilhas são abertas, possibilitando que o usuário possa modificá-las e adaptá-las a outros procedimentos de medição.

As informações foram divididas em onze grupos, considerando-se assim, 11 campos, descritos a seguir.

Campo 1. Dados de entrada: Neste campo o usuário deverá inserir manualmente os dados de entrada. São eles: valor da resolução do sistema de medição utilizado; número de casas decimais da resolução; unidade da indicação do sistema de medição de acordo com o SI; número de leituras ou ciclos de medição; valores das leituras (quando o valor do mensurando corresponde com o valor indicado pelo sistema de medição) ou valores calculados para cada ciclo (quando o mensurando for obtido através de uma equação matemática, a partir das indicações do sistema de medição); incerteza associada à calibração do sistema de medição, fator de abrangência e probabilidade de abrangência correspondente; valores dos desvios geométricos relativos ao sistema de medição e que contribuem para a incerteza final.

Automaticamente a planilha fornece os valores da média aritmética e do desvio padrão amostrais.

Cabe ressaltar que todos os valores fornecidos pelas planilhas são apresentados com dois algarismos significativos a mais que a resolução, para diminuir os erros de cálculo.

Campo 2. Avaliação da incerteza padrão: No segundo campo foram inseridas as equações que possibilitam a

avaliação da incerteza padrão associada a cada variável de entrada, conforme descrito no roteiro de cálculo. Assim sendo, a planilha fornece estes valores de forma automática.

Campo 3. Graus de liberdade: Neste campo, o Excel calcula os graus de liberdade associados à variabilidade das leituras ou dos valores do mensurando, em função do número de leituras ou de ciclos de medição. Os graus de liberdade relativos às demais variáveis de entrada já estão nas planilhas.

Campo 4. Avaliação da incerteza padrão combinada: O Excel, através da equação da Lei de Propagação de Incertezas, calcula o valor da incerteza padrão combinada e o apresenta no campo correspondente.

Campo 5. Cálculo de grau de liberdade efetivo: Através da equação de Welch-Satterwaite, previamente inserida na planilha, é calculado e apresentado o valor do grau de liberdade efetivo.

Campo 6. Determinação do fator de abrangência: O valor do fator de abrangência (k) é determinado automaticamente utilizando a tabela T-student, em função do valor do grau de liberdade efetivo e do nível de abrangência de 95,45 %.

Campo 7. Avaliação da incerteza expandida: Neste campo é efetuada a multiplicação dos valores da incerteza padrão combinada e do fator de abrangência obtendo-se a incerteza expandida.

Campo 8. Arredondamento do valor da incerteza expandida segundo as casas decimais da resolução: Como todos os valores calculados através da planilha apresentam mais algarismos significativos deve-se arredondar o valor da incerteza expandida segundo o número de algarismos da resolução. Isto se faz necessário porque este valor será declarado junto da média aritmética dos valores do mensurando.

Campo 9. Expressão do resultado da medição: A planilha fornece, ainda, como deve ser declarado o resultado da medição para que esteja em concordância com as normas vigentes. Desta forma devem ser apresentados os valores da média aritmética, da incerteza expandida, do fator de abrangência e da probabilidade de abrangência correspondente, geralmente, 95,45 %.

Campo 10. Tabela contendo toda a informação da avaliação da incerteza: Por fim, o Campo 10, mostra em uma tabela toda a informação referente à avaliação da incerteza de medição, conforme recomendado por [2]. Esta tabela é, geralmente, apresentada em certificados de calibração e relatórios de ensaio. Seu preenchimento é automático, na medida em que as informações são inseridas na planilha. Esta é, ainda, compatível com o Microsoft Word.

3.6. Realização de testes experimentais.

Foram planejados e executados testes experimentais para coletar os dados necessários para a simulação e, também, para a validação das planilhas. As medições foram conduzidas no Laboratório de Metrologia Dimensional para

a temperatura de $(20 \pm 1) ^\circ\text{C}$. Durante sua realização, foi monitorada a temperatura ambiente utilizando-se um termohigrômetro digital com resolução de $0,1 ^\circ\text{C}$ e faixa nominal de $(-20 \text{ a } 60) ^\circ\text{C}$.

3.7. Validação das planilhas

Nesta etapa, foram avaliadas as incertezas, utilizando-se os dados experimentais, e efetuada a validação das planilhas. Para tanto foram minuciosamente revisadas todas as equações matemáticas e simulações foram executadas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir são apresentados alguns dos resultados encontrados.

A Tabela 1 fornece os valores de altura de uma peça medida com um traçador de altura digital com resolução de $0,01 \text{ mm}$ e faixa nominal de 300 mm (Figura 1). Este equipamento foi fabricado pela Mitutoyo.



Fig. 1. Medição da altura com traçador de altura

Tabela 1. Valores da altura medidos com o traçador de altura

Medições	Leituras (mm)
1	14,48
2	14,48
3	14,49
4	14,49
5	14,49
Média (mm)	14,49
Desvio padrão (mm)	0,01

Tabela 2. Incerteza de medição da altura da peça

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u (mm)
S(L)	0,01	A	N	4	1	0,0050
ΔR	0,01	B	R	∞	1	0,0058
ΔI	0,0083	B	N	7	1	0,0012
Incerteza padrão combinada em mm						0,0077
Grau de liberdade efetivo v_{eff}						11,41
Fator de abrangência k						2,25
Incerteza expandida em mm						0,02

A Tabela 1 mostra os dados relativos à avaliação da incerteza associada à medição da altura com o traçador. Observe que a incerteza expandida é de $0,02 \text{ mm}$, para $k = 2,25$ e $95,45 \%$ de abrangência.

Observe que a planilha da Tabela 2 fornece de forma resumida todas as informações referentes à avaliação da incerteza. A incerteza associada à calibração do traçador é a variável que mais contribui para a incerteza final.

A Figura 2 mostra a medição do desvio de circularidade com uma máquina de medir desvios de forma, do fabricante Taylor Hobson, que possui resolução de $0,01 \mu\text{m}$. Foram realizadas, com este sistema, três medições do referido desvio.

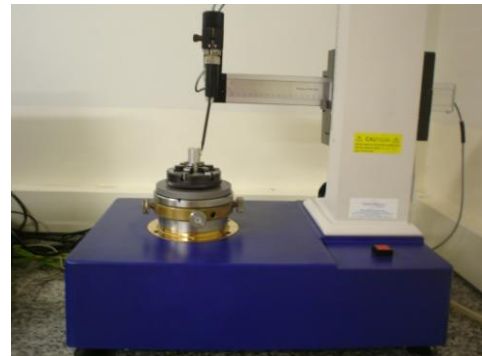


Fig. 2. Máquina de medir desvios de forma

Através da Tabela 3 podem-se observar os valores coletados para os diferentes ciclos de medição.

Tabela 3. Valores de circularidade

Parâmetros (μm)	Ciclo de medição			Média (μm)	Desvio padrão (μm)
	1°	2°	3°		
Desvio de circularid.	4,74	4,69	4,51	4,65	0,12

A Tabela 4 mostra todas as componentes de incerteza associadas à medição deste mensurando.

Tabela 4. Incerteza de medição de circularidade

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
S(L)	0,12	A	N	2	1	0,0845
ΔR	0,01	B	R	∞	1	0,0029
ΔD_{exc}	0,035	B	T	∞	1	0,0143
α_{MM}	0,000012	B	R	∞	2,788	6,3E-08
α_{Pe}	0,000024	B	R	∞	2,788	1,4E-07
ΔT	0,6	A	N	∞	0,0002	0,0866
ΔI	0,005	B	N	8	1	0,0025
Incerteza padrão combinada (u_c) em μm						0,1221
Grau de liberdade efetivo v_{eff}						8,54
Fator de abrangência k						2,37
Incerteza expandida em μm						0,29

Observando a Tabela 3, pode-se dizer que a incerteza expandida associada à medição do desvio de circularidade é de 0,29 μm , para $k = 2,37$, com uma probabilidade de abrangência de 95,45 %.

A máquina de medir por coordenadas (MMC) do fabricante Mitutoyo foi utilizada para medir o diâmetro de uma peça (Figura 3). Esta máquina é do tipo ponte móvel, possui resolução de 1 μm e capacidade de medição de 400 x 400 x 300 mm para os eixos X, Y e Z, respectivamente. Durante a medição foi utilizada uma ponta única com esfera de rubi de diâmetro de 2 mm. Durante a medição do diâmetro foram apalpados 9 pontos.

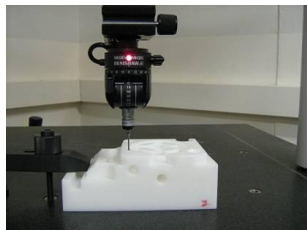


Figura 3. Peça medida com a MMC.

Os valores coletados são expressos na Tab. 5.

Tabela 5. Medição do diâmetro utilizando a MMC.

Medições	Diâmetro (mm)
1	30,016
2	30,019
3	30,018
Média (mm)	30,018
Desvio padrão (mm)	0,002

A Tabela 6 mostra os componentes da incerteza da medição deste mensurando.

Tabela 6. Incerteza do diâmetro utilizando a MMC.

Componentes de incerteza						
Grandeza	Estimativa	TI	DP	GL	CS	u
S(L)	0,002	A	N	2	1	0,00116
ΔR	0,001	B	R	∞	1	0,00029
ΔEA	0,0029	B	T	∞	1	0,00118
ΔI	0,00122	B	N	2	1	0,00061
Incerteza padrão combinada (u_c) em mm						0,00179
Grau de liberdade efetivo ν_{eff}						10,47
Fator de abrangência k						2,28
Incerteza expandida em mm						0,004

A tabela 5 mostra que a incerteza expandida associada à medição do diâmetro da peça é de 0,004 mm, para $k = 10,47$ e probabilidade de abrangência é de 95,45 %.

Os valores encontrados para todos os casos são adequados.

5. CONCLUSÕES

Após finalizar este trabalho podem ser apresentadas as seguintes conclusões:

As 20 planilhas eletrônicas desenvolvidas permitem avaliar a incerteza de medição de forma rápida e simples, contribuindo para diminuir os erros de cálculo.

O uso destas planilhas requer conhecimentos sobre o sistema de medição e habilidades para extrair os dados declarados em certificados de calibração, manuais, etc., que são relevantes para o cálculo.

A adequada interpretação dos resultados fornecidos pelas planilhas exige conhecimentos sobre incerteza de medição.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPEMIG (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais) pelo apoio financeiro.

REFERÊNCIAS

- [1] NBR ISO/IEC 17025. *Requisitos gerais para competência de laboratórios de ensaio e calibração*, 20 p, Rio de Janeiro, Brazil, 2005.
- [2] INMETRO. *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, 120 p, Rio de Janeiro, Brazil, 2008.
- [3] R. Kacker, K. Sommer, R. Kessel, *Evolution of modern approaches to express uncertainty in measurement*. *Metrologia*, v. 44, nº 8, pp 513-529, Sèvres, France, 2007.
- [4] A. M. Barp, *Metodologia de avaliação e de gerenciamento da incerteza de sistemas de medição de temperatura*, Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Santa Catarina, 126 p, Florianópolis, Brazil, 2000.
- [5] C. Grachanen, *Uncertainty Calculator*, 2002. Disponível em: <<http://metrologyforum.tm.agilent.com/download3.shtml>>. Acesso em: 2 outubro de 2010.
- [6] C. R. Stempniak, *Software para modelagem, automação e avaliação de sistemas de medição*, Dissertação de mestrado – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 100 p, Curitiba, Brazil, 2004.
- [7] A. Matusевич, *INcerTI: Una herramienta para calcular parámetros e incertidumbres en el ensayo de tracción*. 2001. Disponível em: <<http://www.inti.gov.ar/cordoba/boletin/boletin05/pdf/1-3.pdf>>. Acesso em: 5 de outubro de 2010.
- [8] J. E. F. Oliveira, N. G. M. Mesquita, *Desenvolvimento de um programa computacional para controle de medições dimensionais com ênfase na garantia da conformidade de produtos*. *Revista Innovare*. v. 8. Jul-Dez 2009, 54 p, Ponta Grossa, Brazil, 2009.
- [9] L. L. Lemos, M. A. F. Moraes, C. C. Souza, R. A. Valdés, *Modelagem matemática dos processos de medição utilizando paquímetro*. *Proceedings of the XI Semana de Engenharia Mecânica e Mecatrônica*, 2 p, Uberlândia, Brazil, 2009.
- [10] C. C. Souza, A. R. Valdés, *Adequação da calibração do micrômetro para externos à NBR ISO/IEC 17025*, Relatório de Bolsa PIBIC, 30 p, Uberlândia, Brazil, 2010.
- [11] C. C. Souza, A. R. Valdés, H. L. Costa, A. Piratelli-Filho, *A contribution to the measurement of cylindricity and circularity deviation*, Artigo aceito para publicação no COBEM 2011. 10 p, Natal, Brazil, 2011.
- [12] M. A. F. Moraes, A. R. Valdés, H. B. Lacerda, *Estimativa da incerteza da medição de rugosidade e análise da influência das vibrações*. Artigo aceito para publicação no TC4 IMEKO XVIII Simpósio, 6 p, Natal, Brazil, 2011.