

AVALIAÇÃO DO IMPACTO DA INCERTEZA DA FORÇA DE CORIOLIS EM UMA MÁQUINA DE PADRONIZAÇÃO DE FORÇA POR PESO MORTO

Wairy Dias Cardoso ¹, Paulo R. G. Couto ², Max Suell Dutra ³

¹ Instituto Nacional de Metrologia , Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO
Av. Nossa Senhora das Graças, 50 - CEP 25250-020 - Xerém – Duque de Caxias - Rio de Janeiro - Brasil
wcardoso@inmetro.gov.br

³ Instituto Nacional de Metrologia , Normalização e Qualidade Industrial - INMETRO
Av. Nossa Senhora das Graças, 50 - CEP 25250-020 - Xerém – Duque de Caxias - Rio de Janeiro – Brasil
prcouto@inmetro.gov.br

³Programa de Engenharia Mecânica-COPPE , Universidade Federal do Rio de Janeiro-UFRJ
max@mecanica.coppe.ufrj.br

Resumo: É realizada a estimativa do impacto da incerteza referente á força de Coriolis na incerteza de medição da Máquina de Padronização Primária de Força por Peso morto. É apresentada também a comparação dos resultados das estimativas da incerteza de medição, para a medição da força, obtidos pelos modelos de cálculo do ISO GUM 95 e por Monte Carlo.

Palavras chave: máquina de padronização de força, peso morto, força de Coriolis, incerteza de medição, ISO GUM 95, método Monte Carlo.

1. INTRODUÇÃO

A padronização de força é realizada por máquinas que operam através da ação direta das massas no campo gravitacional. A unidade de força é realizada através do princípio de peso-morto, cujas forças são geradas por massas suspensas submetidas ao efeito da aceleração da gravidade local [1].

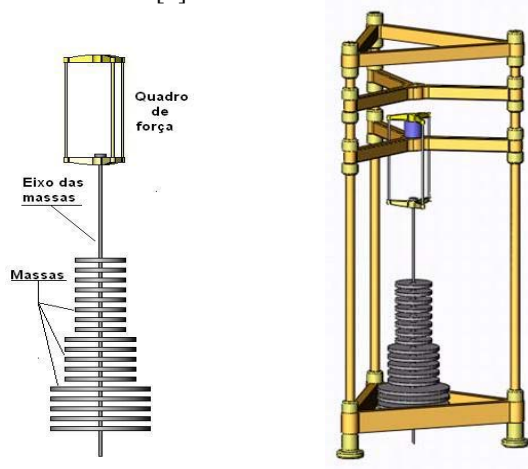


Fig. 1 Estrutura de uma Máquina de padronização de força por Peso-Morto.

As máquinas de padronização de força por peso morto são utilizadas para quantificar as unidades da grandeza força. São estruturas compostas por massas de elevada exatidão e reduzido grau de incerteza submetidas a aceleração da gravidade local .

No início do século dezenove, Gaspard Coriolis desenvolveu um princípio matemático para descrever o movimento de objetos em relação a um sistema de referência não-inercial, em rotação uniforme, tal como a Terra. Seu princípio recebeu o nome de Força de Coriolis.

O pêndulo de Foucault é um pêndulo destinado a evidenciar o movimento de rotação da Terra e baseia-se na invariabilidade do plano de oscilação de um pêndulo. Em nosso caso em particular, o modelo proposto sofre a influência da força de Coriolis comportando-se como um pêndulo de Foucault, alterando desta forma o valor esperado do padrão convencional da medida de força .

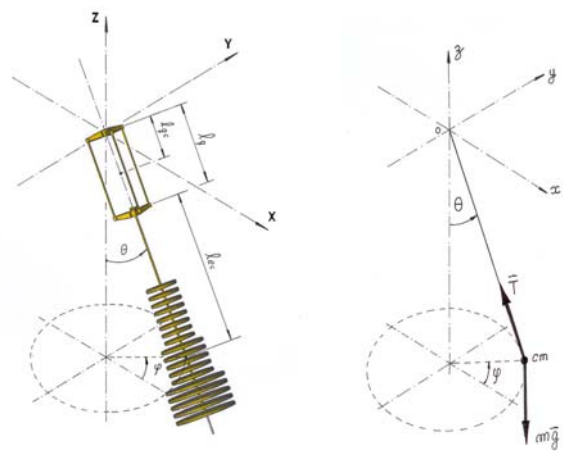


Fig.2 Representação do conjunto quadro de força, eixo das massas e as massas do sistema como Pêndulo de Foucault.

O guia ISO GUM 95 objetiva de maneira geral a harmonização da metodologia do cálculo da estimativa da incerteza de um resultado de medição [3]. A metodologia apresentada no guia possui limitações tais como: linearização do modelo, suposição da normalidade do mensurando e cálculo do grau de liberdade efetivo [3]. Objetivando superar estas limitações, o modelamento pelo método de Monte Carlo [3] pode ser aplicado também para a avaliação da incerteza de medição.

2. OBJETIVO

O artigo apresenta o impacto da força de Coriolis e a sua respectiva incerteza na medição da força por uma máquina de peso morto.

É apresentada também a comparação dos resultados das estimativas da incerteza de medição, para a medição da força por uma máquina de peso morto, obtidos pelos modelos de cálculo do ISO GUM 95 (Clássico e Kragten) e pelo modelagem usando o processo de Monte Carlo [3]. Além disso, é elaborado o balanço de incertezas na medição da força por uma máquina de peso morto focando o impacto da incerteza referente à força de Coriolis.

3. METODOLOGIA

A medição de força por uma máquina de peso morto segue a seguinte equação (1) tradicional:

$$F = m_m g_l \left(1 - \frac{\rho_a}{\rho_m} \right) \quad (1)$$

Onde:

F = módulo da força a ser padronizada;

m = módulo da massa dos pesos considerados;

g_l = valor da aceleração da gravidade local;

ρ_a = valor da massa específica do ar, no local da instalação do padrão ;

ρ_m = valor da massa específica do material dos pesos considerados.

Na equação (1) deve ser introduzida a força de Coriolis a qual não é considerada nas Máquinas de Padronização Primária de Força por Peso Morto, existentes nos Institutos de Metrologia. Portanto em nossa proposta na equação medição de força por uma máquina de peso morto deve ser incluída a parcela referente a força de Coriolis, a qual é definida pela equação (2).

$$F_C = -2m\omega(l_q + l_{cc}) \left[\cos\theta \sin\dot{\varphi}(\dot{\theta}) + \sin\theta \cos\dot{\varphi}(\dot{\varphi}) \right] \sin\lambda \quad (2)$$

onde:

F_C = módulo da força resultante a ser padronizada;

m = módulo das massas dos pesos considerados;

ω = velocidade angular de rotação da Terra;

l_q = comprimento do quadro de força;

l_{cc} = comprimento do eixo das massas desde o quadro de força até o centro de massa;

θ = deslocamento angular do eixo das massas em relação ao plano vertical;

$\dot{\theta}$ = velocidade angular do eixo das massas em relação ao plano vertical;

φ = deslocamento angular do eixo das massas em relação ao plano horizontal;

$\dot{\varphi}$ = velocidade angular do eixo das massas em relação ao plano horizontal;

λ = co-latitudes da posição da máquina de padronização de força.

Foram estimadas as incertezas para a medição de força por uma máquina de peso morto seguindo os Métodos Clássico e de Kragten, previstos no ISO GUM 95, além da metodologia computacional de Monte - Carlo para 150.000 iterações. Foi realizada também a análise dos fatores preponderantes de incerteza na incerteza combinada na medição da força por uma máquina de peso morto.

Foi aplicado o critério de avaliação de concordância entre distribuições contido no suplemento 1 do GUM (validação do GUM pelo método de Monte Carlo), para as seguintes comparações de valores de incertezas obtidos: i) Metodologias do ISO GUM 95 a clássica e a de Kragten e ii) Método do ISO GUM 95 e Metodologia de Monte Carlo. Segundo o suplemento 1 do GUM, para que os valores considerados sejam considerados equivalentes as diferenças entre os limites inferiores (*d_{inf}*) e superiores dos intervalos das distribuições (*d_{sup}*) devem ser inferiores à tolerância numérica (*δ*). O valor de (*δ*) é definido pela expressão $\delta = c \times 10^l$, onde *c* e *l* são números inteiros. Representando o valor da incerteza com dois algarismos significativos, *c* sempre será a metade da unidade referente ao último dígito do valor da incerteza e *l* o número de casas decimais quando a incerteza é apresentada com dois algarismos significativos.

4. RESULTADOS

A tabela 1 apresenta os valores da força de Coriolis em função das forças nominais medidas por uma máquina de peso morto e o erro (%) da medição se a força de Coriolis na for considerada.

Tabela 1 - Valores da força de Coriolis conforme forças nominais medidas por uma máquina de peso morto.

F(N)	Força de Coriolis(N)	Erro%
2000	3,6E-04	0,18
3000	5,4E-04	
4000	7,2E-04	
5000	9,0E-04	
20000	3,6E-03	
50000	9,0E-03	
100000	1,8E-02	
1000000	1,8E-01	

O gráfico da figura 3 apresenta os valores da força de Coriolis, calculada conforme a equação 2 em função da co-latidade.

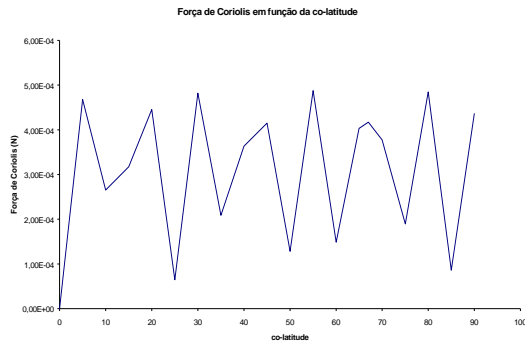


Fig. 3 Força de Coriolis em função da co-latidade, para a simulação do modelo

A figura 4 mostra a variação da força de Coriolis, em função do comprimento do eixo de suporte das massas de uma máquina de padronização primária de força por peso morto.

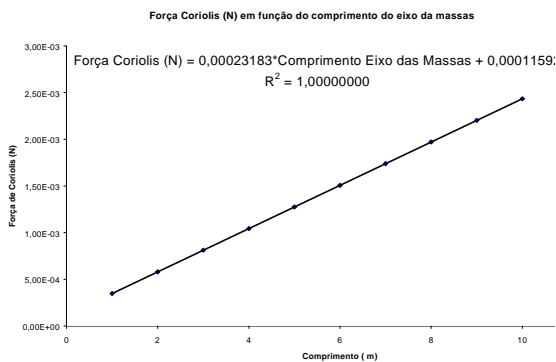


Fig. 4 Força de Coriolis em função do comprimento do eixo das massas

A incerteza de medição da máquina de peso morto foi inicialmente estimada seguindo o método clássico do ISO GUM 95. Na estimativa da incerteza de medição foi utilizada a equação completa para a medição da força por uma máquina de peso morto proposta neste artigo, a qual é o resultado da soma das equações 1 e 2.

A tabela 2 apresenta os valores e o impacto na incerteza combinada referentes todas as fontes na medição de uma força nominal de 2000 N, por uma máquina de peso morto.

Tabela 2 - Valores e o impacto na incerteza combinada de todas as fontes na medição de uma força nominal de 2000 N.

Fonte	u(N)	u(%)
uF(m)	1,69E-05	1,90
uF(gl)	1,18E-04	92,07
uF(ra)	1,46E-07	0,00
uF(rm)	2,18E-05	3,15
uF(Vel Rot)	2,85E-08	-
uF(lq)	1,54E-06	0,02
uF(lec)	1,54E-06	0,02
uF(Ang. Desl Vert)	1,06E-09	-
uF(ρ)	1,06E-09	-
uF(Vel Ang Vet)	2,08E-05	2,85
uF(ρ)	2,08E-10	-
uF(colatitude)	1,82E-07	-
uF(m)	3,05E-12	-
uF (Coriolis)	2,09E-05	2,88
uc(F)	1,23E-04	100

O gráfico da figura 5 representa o balanço das incertezas da medição de uma força nominal de 2000 N, por uma máquina de peso morto.

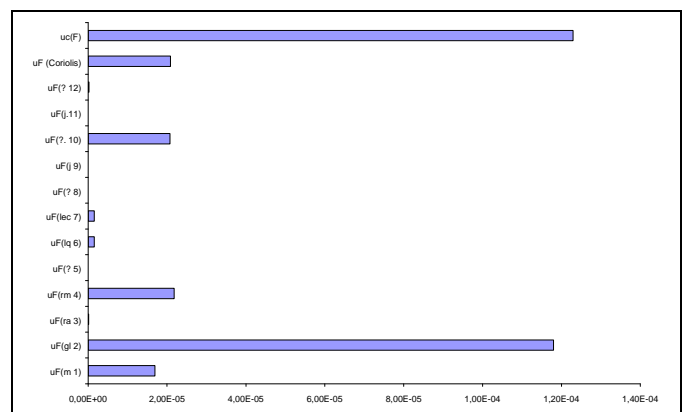


Fig. 5 Balanço das incertezas na medição de uma força nominal de 2000 N, por uma máquina de peso morto.

A tabela 3 apresenta os valores e o impacto na incerteza combinada da força de Coriolis, referentes todas as fontes na medição de uma força nominal de 2000 N, por uma máquina de peso morto.

Tabela 3 - Valores e o impacto das fontes na incerteza combinada da força de Coriolis, na medição de uma força nominal de 2000 N.

Fonte	u(N)	u(%)
uF(Vel Rot)	2,85E-08	0,0002
uF(lq)	1,54E-06	0,54
uF(lec)	1,54E-06	0,54
uF(Ang. Desl Vert)	1,06E-09	-
uF(ω)	1,06E-09	-
uF(Vel Ang Vet)	2,08E-05	98,9
uF(ω)	2,08E-10	-
uF(colatitude)	1,82E-07	0,008
uF(m)	3,05E-12	-
uF (Coriolis)	2,09E-05	100

O gráfico da figura 6 representa o balanço das incertezas da medição da força de Coriolis numa força nominal de 2000 N.

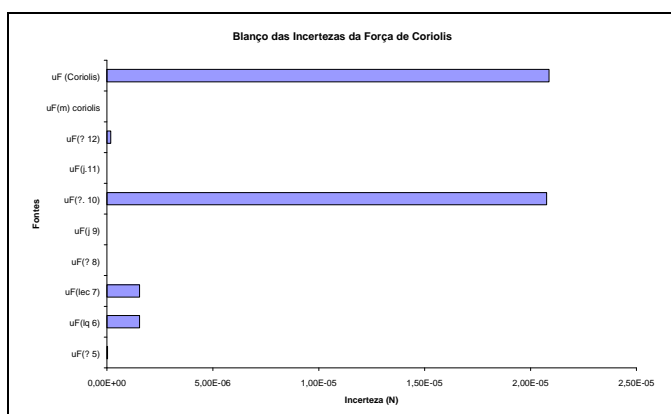


Fig. 6 Balanço das incertezas na medição da medição da força de Coriolis numa força nominal de 2000 N.

A tabela 4 apresenta os valores das incertezas combinadas para a força nominal de 2000 N, estabelecidas pelas metodologias do ISO GUM 95 (Clássica e de Kragten).

Tabela 4 - Valores das incertezas combinadas para a força nominal de 2000 N, estabelecidas pelas metodologias clássica e de Kragten.

Metodologia	uc(F) N	U (95%) N
Clássico	1,23E-04	2,41E-04
Kragten	1,22E-04	2,38E-04

A tabela 5 apresenta os valores das incertezas expandidas para a força nominal de 2000 N, estabelecidas pelas métodos do ISO GUM 95 e de Monte Carlo.

Tabela 5- Valores das incertezas expandidas para a força nominal de 2000 N, estabelecidas pelas métodos do ISO GUM 95 e de Monte Carlo.

Método	U(95%) N
ISO GUM 95	2,41E-04
Monte Carlo	2,13E-04

5. DISCUSSÃO

A tabela 1 mostra que se não for considerada a força de Coriolis na medição da força por Máquinas de Padronização Primária de Força por Peso Morto ocorre um erro constante de 0,18%.

Na figura 3 observa-se que a co-latidade é um dos fatores na medição de força por uma máquina de peso que deve ser analisado, pois dependendo da posição geográfica do laboratório haverá calibrações de força com resultados diferentes, significativos ou não, em comparações internacionais.

Com esta constatação, torna-se necessário que os laboratórios que fazem calibração, e os institutos de metrologia que realizam comparações internacionais, façam o devido ajuste na correção dos valores obtidos em seus transdutores primários de força, para obter a exatidão que se espera.

A análise da figura 4 mostra que quanto maior o eixo das massas, maior o valor da força de Coriolis, portanto, a máquina de grande porte cujo eixo pode ter um comprimento considerável, terá o valor da força de Coriolis grande o suficiente para aumentar o erro da medição, logo, o estudo desta aumentará a exatidão do sistema em questão.

O comprimento do eixo das massas, em função do modelo estudado, fornecerá informações sobre o comportamento da variação da força de Coriolis e o quanto isso representa nas avaliações das medições de força.

Os valores da tabela 2 em conjunto com o gráfico da figura 5 mostram que a fonte de maior impacto na incerteza combinada na medição de uma força nominal de 2000 N por uma máquina de peso morto, é aceleração da gravidade local. Esta fonte corresponde a aproximadamente 92% da incerteza combinada. A incerteza referente à força de Coriolis é a terceira fonte que mais impacta na medição, cerca de 2,88%.

Os valores da tabela 3 em conjunto com o gráfico da figura 6 mostram que a fonte de maior impacto na incerteza da força de Coriolis, é velocidade angular do eixo das massas em relação ao plano vertical. Esta fonte corresponde a aproximadamente 99% da incerteza da força de Coriolis.

Aplicou-se o critério recomendado no suplemento 1 do ISO GUM para a avaliação de concordância entre valores de incerteza determinados metodologias do ISO GUM 95 (Clássica e de Kragten). Neste caso apresentando os resultados das incertezas obtidos pelas duas metodologias com dois algarismos significativos o valor é 0,00012N. Representando o valor 0,00012 N na forma $c \times 10^l$, ou 12×10^{-5} , onde c e l são números inteiros. Sendo assim como descrito no capítulo anterior, a tolerância numérica δ é igual $0,5 \times 10^{-5}$. Nos casos da incerteza combinada $uc(F)$ e também da incerteza expandida as diferenças entre os valores das metodologias clássica e de Kragten são respectivamente iguais a $0,01 \times 10^{-5}$ e $0,03 \times 10^{-5}$. Os dois valores são menores do que a tolerância estabelecida.

Aplicando-se o mesmo critério na comparação dos resultados de incerteza obtidos pelo ISO GUM 95 e por Monte Carlo os valores são 0,00024 e 0,00021, respectivamente. A tolerância numérica δ é igual $0,5 \times 10^{-5}$. A diferença entre os dois valores das incertezas expandidas

pelo dois métodos é $0,28 \times 10^{-4}$. Neste caso a diferença é maior do que a tolerância.

6. CONCLUSÕES

Se não for considerada a força de Coriolis no cálculo da força medida por Máquinas de Padronização Primária de Força por Peso Morto, acarreta um erro constante de medição da ordem de 0,18%.

A co-latidade e o comprimento do eixo das massas, em função do modelo estudado, indicarão o comportamento do efeito pendular e, o quanto representa este efeito nas avaliações das medições de força, Máquinas de Padronização Primária de Força por Peso Morto.

Quanto maior o eixo das massas, maior o valor da força de Coriolis, portanto, em máquinas de grande porte cujo eixo pode variar em comprimento, terá o valor da força de Coriolis grande o suficiente para aumentar o erro da medição, portanto, a contemplação deste efeito otimizará a exatidão do sistema primário de medição de força.

Em função destas observações, é relevante o estudo da influência da força de coriolis no sistema primário de medição de força, uma vez que este efeito não é levado em consideração pelos laboratórios internacionais de calibração de força para as Máquinas de Padronização Primária de Força por Peso Morto.

O projeto da máquina apresentado neste artigo tem como fundamentação o efeito dinâmico e não como anteriormente, uma máquina inercial. Este projeto é uma inovação tecnológica em relação as máquinas existentes no mundo o que pode trazer grandes benefícios em termos da exatidão, na área de medição de força.

A fonte de maior impacto na incerteza combinada na medição de força por uma máquina de peso morto, é aceleração da gravidade local. Esta fonte corresponde em qualquer força nominal a mais de 90% da incerteza combinada da força. A incerteza referente à força de Coriolis que é a terceira fonte que mais impacta na medição, varia de 2,88% a 2,94%, na faixa de 2kN a 1 MN.

A fonte de maior impacto na incerteza da força de Coriolis, é velocidade angular do eixo das massas em relação ao plano vertical. Esta fonte corresponde a aproximadamente 99% da incerteza da força de Coriolis, na faixa de medição de 2kN a 1MN.

As metodologias do ISO GUM 95 (Clássica e de Kragten), fornecem resultados semelhantes de incertezas para a força nominal de 2000 N, porque de acordo com o critério recomendado no suplemento do ISO GUM a diferença entre os valores na duas situações são menores do que a tolerância.

Os métodos do ISO GUM 95 e de Monte Carlo apresentam resultados diferentes da incerteza expandida da força nominal de 2000 N, porque de acordo com o critério recomendado no suplemento do ISO GUM a diferença entre os valores de incerteza expandida é maior do que a tolerância.

Foi relevante o estudo da influência da força de Coriolis no sistema, uma vez que este efeito não é levado em consideração pelos laboratórios internacionais de calibração de força.

REFERÊNCIAS

- [1] Cardoso, W. D., *Modelagem de uma Máquina de Padronização de Força por Peso Morto considerando o efeito de Coriolis*, Universidade Federal do Rio de Janeiro, COPPE / UFRJ, Rio de Janeiro, 2008.
- [2] Cardoso, W.D. *Determinação de um novo método para medir a força em uma máquina de padronização de força por peso morto*, 1 Cimtec, outubro de 2008, Rio de Janeiro, Brasil.
- [3] Couto, P. R. G., *Estimativa da Incerteza da Massa Específica da Gasolina pelo ISO GUM 95 e Método de Monte Carlo e seu Impacto na Transferência de Custódia*, Dissertação de Mestrado, Escola de Química/UFRJ, Rio de Janeiro, 2006.
- [4] ISO GUM 95, *Guia para a Expressão da Incerteza de Medição*, 3ª edição brasileira em língua portuguesa, ABNT e INMETRO, Rio de Janeiro, 2003.
- [5] *Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração*, INMETRO e ABNT e SBM, Rio de Janeiro, 1999.
- [4] *Versão Brasileira do Documento de Referência EA-4/02-S1, Suplemento 1 ao EA-4/02 - Expressão da Incerteza de Medição na Calibração - Exemplos*, INMETRO e SBM, Rio de Janeiro, 1999.