

CALIBRAÇÃO DE UM DISPOSITIVO DE MEDIDA DE ESFORÇOS RESULTANTES DA INTERAÇÃO ENTRE O ESCOAMENTO E O ROTOR DE TURBOMÁQUINAS

José Geraldo Trani Brandão – brandao@feg.unesp.br

José Elias Tomazini – tomazini@feg.unesp.br

UNESP - Departamento de Mecânica, Faculdade de Engenharia
CP 205 – 12516-410 Guaratinguetá SP

Resumo. Neste trabalho relata-se a calibração estática de um dispositivo para a medição dos esforços hidráulicos resultantes da interação entre o escoamento e o rotor de um modelo de uma turbomáquina onde foi montado um banco de teste que simula as diversas condições de operação destas máquinas. O dispositivo aqui utilizado foi desenvolvido na Universidade de Stuttgart junto ao Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen e com o apoio da Schwedisch Kugellager Fabrik em Schweinfurt. Um processo exaustivo de calibração foi desenvolvido e executado para propiciar às medições uma real correspondência entre os esforços reais atuantes no modelo de um rotor de uma turbomáquina e os esforços medidos. Assim, calibrações estática e dinâmica foram realizadas para a determinação dos coeficientes de calibração correspondentes dos respectivos sensores. O dispositivo utilizado consta de sensores piezoelétricos tridimensionais de carga.

Palavras-chave: forças hidráulicas em rotores, forças em turbomáquinas, medições de forças hidráulicas

1. INTRODUÇÃO

Os esforços nos rotores das turbomáquinas hidráulicas são causados pela oscilação e pela distribuição não-simétrica da pressão ao redor do rotor, principalmente do lado da sucção do mesmo, quando o rotor trabalha como turbina. As máquinas hidráulicas podem trabalhar em condições de operação muito severas e os esforços que agem no rotor variam com a condição de operação, assim estes podem ser grandes e com uma acentuada queda do rendimento destas máquinas, nestas condições. A operação nestas condições severas, fora da condição nominal de projeto pode ser verificado com maior frequência no Brasil, que possui hidroelétricas com máquinas de grande porte impondo tais condições de operação devido, principalmente, a oscilação significativa de demanda durante o dia todo.

Um dispositivo para medir os esforços hidráulicos nestas máquinas foi desenvolvido na Universidade de Stuttgart no Institut für Strömungsmachnik und Hydraulische Strömungsmaschinen e com o apoio na execução da Schwedisch Kugellager Fabrik.

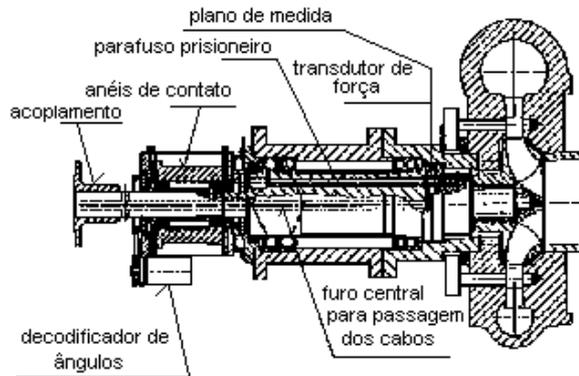


Figura 1- Dispositivo de Medida

A fig. 1 mostra o modelo do dispositivo de medida utilizado para a realização dos testes. À esquerda encontra-se um acoplamento que deverá ser utilizado na montagem final para acoplar o dispositivo a um medidor de torque e à direita encontra-se o caracol e o rotor da máquina. Indicado na fig. 2 pode-se ver que o plano de medida que contém três sensores piezoelétricos tridimensionais de carga, estão dispostos de tal maneira que o sistema de medida torna-se isotrópico. O ângulo de defasagem entre eles é de 120° , como pode-se ver na fig. 2.

Os sensores fornecem 9 sinais, sendo três para cada sensor: um para cada direção, (x_i , y_i e z_i). Um outro sensor (decodificador de ângulos) proporciona a posição instantânea angular do eixo em cada instante que se deseja medir os esforços. Considera-se, como mostrado na fig. 3, um sistema de coordenadas móvel, indicado por X^* , Y^* , Z^* , o qual faz uma rotação ϕ em relação ao referencial inercial (X, Y, Z). O ângulo ϕ indica a posição angular do eixo.

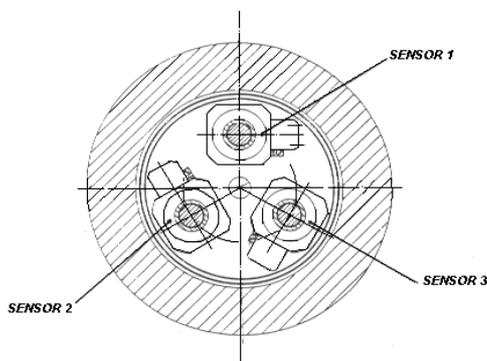


Figura 2 - Corte transversal do plano de medida.

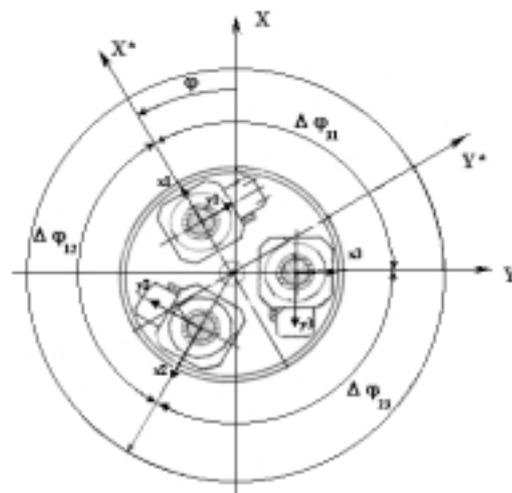


Figura 3 - Sistema de coordenadas fixas e móveis adotado.

Quando $\varphi = 0$ a coordenada x_1 fixa ao sensor 1, está paralela ao eixo X do referencial inercial. As coordenadas x_i de cada sensor estarão sempre no sentido radial, as coordenadas y_i estarão sempre tangentes a trajetória dos sensores e, finalmente, as direções z_i estarão sempre na direção de Z inercial.

2. DESENVOLVIMENTO EXPERIMENTAL

Para a realização da calibração estática foi projetado e construído um suporte no qual o dispositivo foi devidamente apoiado para que o mesmo quando na horizontal permitisse a aplicação das cargas nas três direções de maneiras diversas.

Na fig. 4 pode-se ver na vista lateral da montagem que a carga aplicada na plataforma 3 através da roldana uma solicitação na direção axial do dispositivo, direção Z e uma solicitação de carga na plataforma 2 propicia um momento em torno do eixo Z. Já as cargas aplicadas na plataforma 1 induzem esforços de força e momento nas direções X e Y, principalmente em posições diferentes de $\varphi = 0$.

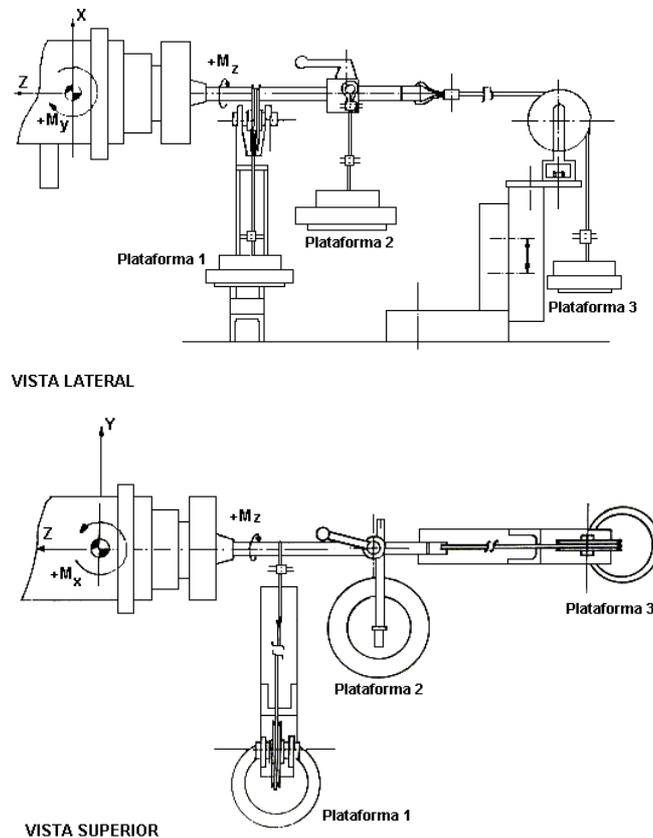


Figura 4 - Esquema da montagem utilizada para aplicação dos esforços.

Os sinais provenientes dos sensores tridimensionais são conduzidos por cabos que passam pelo furo central do eixo do dispositivo de medida até os anéis de contato, que possuem escovas com banda de contato de prata. Os sinais são, então, enviados para um amplificador das cargas elétricas, especialmente projetado e construído para a realização destas medições, que por sua vez passa por um gravador de transientes (software de aquisição de dados em um microcomputador) que faz a transformação do sinal analógico em digital, e finalmente o sinal é processado.

2.1 Transferência do Sinal através dos Anéis de Contato

Inicialmente foram realizados algumas medições passando pelos anéis de contato e, em seguida, sem passar pelos anéis de contato para se verificar a influência do mesmo no sinal de uma dada carga aplicada em uma dada direção, através de voltímetros, para duas posições angulares distintas do eixo do dispositivo. As tensões produzidas pelos transdutores dos respectivos sensores foram aqui denominadas de S_{x_i} , S_{y_i} e S_{z_i} , dos sensores 1, 2 e 3.

Pode-se verificar, pelos resultados mostrados na tabela 1, que os anéis de contato não influenciam nas medidas a serem realizadas através dele.

Tabela 1 – Influência dos anéis de contato nas medidas.

componentes [V]	$\varphi = 0,9^\circ$		$\varphi = 31,5^\circ$	
	com anéis de contato	sem anéis de contato	com anéis de contato	sem anéis de contato
S_{x_1}	0,185	0,185	0,091	0,091
S_{x_2}	0,009	0,010	0,097	0,097
S_{x_3}	0,708	0,709	0,320	0,320
S_{y_1}	-0,076	-0,077	-0,166	-0,165
S_{y_2}	0,074	0,076	-0,014	-0,016
S_{y_3}	-0,367	-0,367	-0,724	-0,724
S_{z_1}	-0,090	-0,091	0,085	0,084
S_{z_2}	-0,079	-0,079	-0,071	-0,074
S_{z_3}	-0,352	-0,351	0,392	0,392

2.2 Comportamento da Variação das Tensões Medidas com a Carga Atuante

Segundo o fabricante dos sensores de carga, o comportamento da força aplicada em relação à voltagem medida é linear. A fim de se verificar esta linearidade o dispositivo foi solicitado na direção x com uma força que também provoca um momento em y. Esta força foi incrementada de 50 em 50[N] e verificou-se o comportamento da variação de voltagem. Os resultados são mostrados na Tabela 2. Como o esperado as variações de tensões são constantes com o mesmo passo na variação da força.

Tabela 2 – Comportamento linear da força atuante e a tensão medida.

Fx [N]	My [N.m]	ΔS_{x_1}	ΔS_{y_1}	ΔS_{z_1}	ΔS_{x_2}	ΔS_{y_2}	ΔS_{z_2}	ΔS_{x_3}	ΔS_{y_3}	ΔS_{z_3}
50	-17,16	46	1	178	-18	19	-88	-24	-20	-92
100	-34,31	46	1	178	-18	18	-87	-23	-20	-92
150	-51,47	47	1	179	-19	18	-88	-25	-19	-92
200	-68,63	47	1	177	-18	18	-87	-23	-21	-91
250	-85,79	46	1	178	-19	18	-87	-24	-20	-92
300	-102,95	47	1	177	-18	17	-87	-25	-20	-92

O amplificador de carga foi sempre ajustado de tal forma que 1 Volt na saída equivale a 1000[N] para as direções x e y e 500[N] na direção z. Em cada série de

medidas deve ser estabelecido um valor de referência ($Sx_i(\text{ref})$, $Sy_i(\text{ref})$, $Sz_i(\text{ref})$) para as nove coordenadas dos três sensores, assim:

$$Fx_i = [Sx_i(j) - Sx_i(\text{ref.})].500 \quad (1)$$

$$Fy_i = [Sy_i(j) - Sy_i(\text{ref.})].500 \quad (2)$$

$$Fz_i = [Sz_i(j) - Sz_i(\text{ref.})].1000 \quad (3)$$

Nestas expressões, j é o número da medida em uma série delas, Sx_i , Sy_i e Sz_i são as voltagens medidas respectivamente nas direções x , y e z .

Como mostrado na fig. 3, os ângulos definidos a partir do transdutor 1, usado como referência, são: sensor 1: $\varphi_{10} = 0^\circ$, sensor 2: $\varphi_{20} = 0^\circ + \Delta\varphi_{12} = 120^\circ$ e sensor 3: $\varphi_{30} = 0^\circ + \Delta\varphi_{12} + \Delta\varphi_{23} = 240^\circ$. Desta forma, pode-se determinar as componentes da força no sistema de coordenadas (X^* , Y^* , Z^*):

$$FX_i^* = Fx_i \cos(\varphi_{i0}) + Fy_i \text{sen}(\varphi_{i0}) \quad (4)$$

$$FY_i^* = Fy_i \cos(\varphi_{i0}) - Fx_i \text{sen}(\varphi_{i0}) \quad (5)$$

$$FZ_i^* = Fz_i \quad (6)$$

As equações das forças no sistema de coordenadas inercial (X , Y , Z) são:

$$FX_i = Fx_i \cos(\varphi_{i0} + \varphi) + Fy_i \text{sen}(\varphi_{i0} + \varphi) \quad (7)$$

$$FY_i = Fy_i \cos(\varphi_{i0} + \varphi) - Fx_i \text{sen}(\varphi_{i0} + \varphi) \quad (8)$$

$$FZ_i = Fz_i \quad (9)$$

As equações das forças e momentos no ponto central do plano de medida são dadas por:

$$FX = \sum_{i=1}^3 FX_i, \quad FY = \sum_{i=1}^3 FY_i, \quad FZ = \sum_{i=1}^3 FZ_i \quad (10)$$

$$MX = r \sum_{i=1}^3 [-Fz_i \text{sen}(\varphi_{i0} + \varphi)] \quad (11)$$

$$MY = r \sum_{i=1}^3 [-Fz_i \cos(\varphi_{i0} + \varphi)] \quad (12)$$

$$MZ = r \sum_{i=1}^3 Fy_i \quad (13)$$

Nestas expressões r é a distância entre o centro do transdutor de carga e o centro do plano de medida do dispositivo.

2.3 Fatores de Calibração Estática

Denominando as forças e momentos atuantes nas respectivas direções indicadas em (X , Y ou Z) como: FXA , FYA , FZA , MXA , MYA e MZA . Pode-se realizar as seguintes combinações de esforços simultâneos com a montagem mostrada na Fig. 4, as quais encontram-se na Tabela 3.

Tabela 3 – Possibilidades de combinação de esforços.

POSSIBILIDADE	FORÇA	MOMENTO
1	FZA	-
2	FXA	MYA
3	FYA	MXA
4	FXA e FYA	MXA e MYA
5	FXA e FZA	MYA
6	FYA e FZA	MXA
7	FXA, FYA e FZA	MXA e MYA
8	FXA	MYA e MZA
9	FXA e FYA	MXA, MYA e MZA
10	FXA e FZA	MYA e MZA
11	FXA, FYA e FZA	MXA, MYA e MZA

As medições foram executadas para três posições do eixo, que são $\varphi=0^\circ$, $\varphi=120^\circ$ e $\varphi=240^\circ$. Os sinais medidos foram tratados conforme mostrado nas equações (1), (2) e (3) e as forças e momentos encontrados e transportados para o sistema de coordenadas inercial segundo as equações de (4) a (13) obtendo-se FX, FY, FZ, MX, MY, MZ. Assim, pode-se determinar os coeficientes de calibração para as respectivas forças e momentos como segue as equações abaixo:

$$\text{CalibFX} = \frac{\text{FXA}}{\text{FX}} \quad \text{CalibFY} = \frac{\text{FYA}}{\text{FY}} \quad \text{CalibFZ} = \frac{\text{FZA}}{\text{FZ}} \quad (14)$$

$$\text{CalibMX} = \frac{\text{MXA}}{\text{MX}} \quad \text{CalibMY} = \frac{\text{MYA}}{\text{MY}} \quad \text{CalibMZ} = \frac{\text{MZA}}{\text{MZ}} \quad (15)$$

2.4 Determinação dos Fatores de Calibração Estática do Dispositivo

Foram realizadas várias séries de medições para diversas posições angulares do eixo e diversas condições de carregamento como já exposto anteriormente. Nas próximas figuras estão apresentados o resultados dos valores das medições para forças e momentos em todas as três direções. Os gráficos a seguir mostram o número de medidas repetidas (frequência) e os respectivos fatores de calibração.

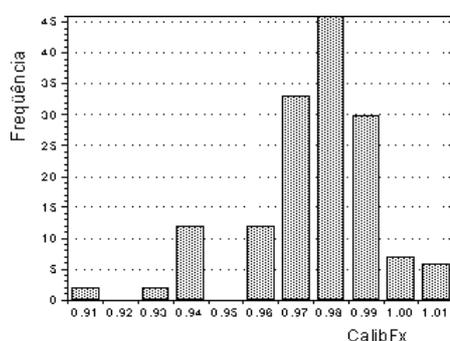


Figura 5 – Histograma do Fator de Calibração para Fx

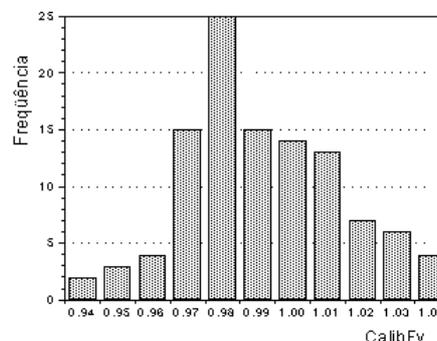


Figura 6 – Histograma do Fator de Calibração para Fy

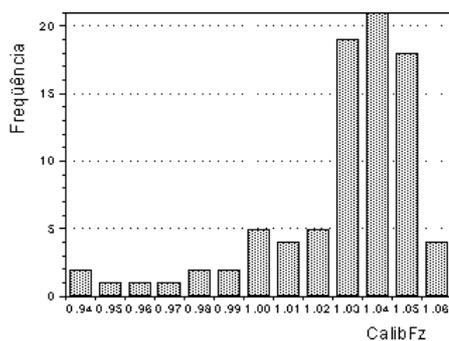


Figura 7 – Histograma do Fator de Calibração para Fz

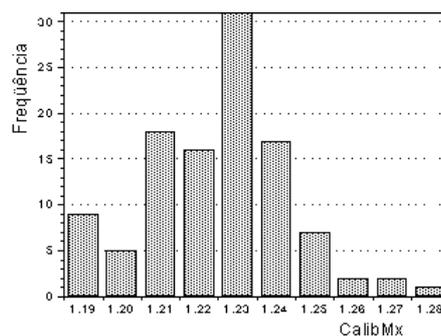


Figura 8 – Histograma do Fator de Calibração para Mx

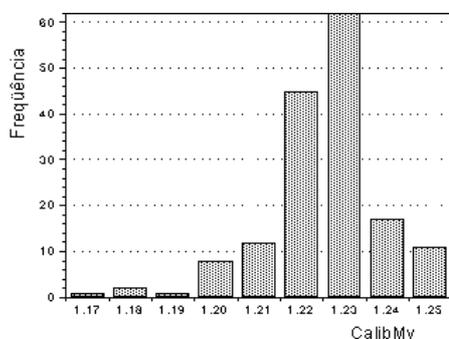


Figura 9 – Histograma do Fator de Calibração para My

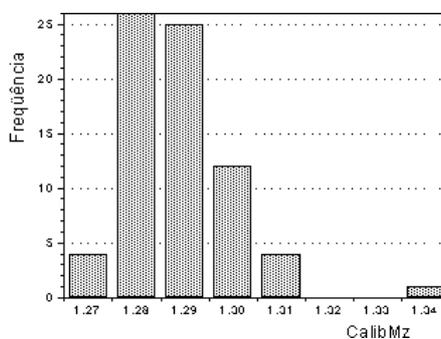


Figura 10 – Histograma do Fator de Calibração para Mz

O valor médio e o desvio padrão dos respectivos fatores de calibração são mostrados na Tabela 4 para cada um dos esforços.

Tabela 4 - Valor médio e desvio padrão dos fatores de calibração

Fatores de Calibração	Valor Médio	Desvio Padrão
CalibFX	0,9743	0,0225
CalibFY	0,9915	0,0185
CalibFZ	1,0281	0,0264
CalibMX	1,2251	0,0186
CalibMY	1,2253	0,0136
CalibMZ	1,2888	0,0115

Verifica-se que existe uma tendência para o valor 1 dos fatores de calibração relativos às forças e já para os momentos, os fatores de calibração fogem um pouco do valor unitário. Este efeito pode estar relacionado com a forma de atuação dos esforços

no próprio transdutor de carga: uma força constante e axial solicita a seção transversal de forma uniforme enquanto que os momentos a solicita de uma forma linear ao longo da mesma.

Das medições observou-se que os fatores de calibração poderiam estar relacionados com o posicionamento angular do eixo do dispositivo. Outro fator que também colaborou para a oscilação dos valores dos coeficientes de calibração é o coeficiente de influência de uma medida na outra, como o próprio fabricante dos sensores “KISTLER INSTRUMENTE AG” mostra em seu catálogo. O que se torna necessário é a validade destes fatores fornecidos pelo fabricante, pois existe uma grande influência de toda a montagem do dispositivo de medidas.

Utilizando-se os valor médios dos fatores de calibração pode-se cometer erros devido as suas próprias variações. O importante é conhecer estes erros. Para uma avaliação da amplitude destes erros a Tabela 5 mostra os valores calculados dos erros máximos absolutos e relativos, para as respectivas faixas de carga utilizadas nas medições executadas. Os valores apresentados de FX, FY, FZ, MX, MY e MZ são os valores medidos e processados.

Tabela 5 – Máximos valores dos erros absolutos e relativos

Esforços Medidos	Faixa de Aplicação	Máximo Erro Absoluto [N]	Máximo Erro Relativo [%]
FX	0-300 [N]	10,10	1,36
FY	0-300 [N]	13,89	1,96
FZ	0-700 [N]	19,67	1,46
MX	0-102,95 [Nm]	2,95	1,13
MY	0-120,34 [Nm]	3,15	0,80
MZ	0-43,26 [Nm]	1,24	0,61

2.5 Fatores de Calibração considerando os Coeficientes de Influência

Uma das características dos sensores de mais de uma direção de medida são os chamados coeficientes de influência. Quando um sensor é solicitado em uma de suas direções de medida aparecem pequenos sinais nas outras direções.

Segundo o fabricante estes coeficientes dependem da direção, mas não deveriam depender do tipo de solicitação. No caso do dispositivo em estudo a solicitação não ocorre sempre com a carga exatamente nas direções correspondentes, mas quase sempre aparece de forma combinada, sendo os sensores solicitados de forma que os sinais das nove componentes compõem o esforço aplicado no rotor da máquina.

A única direção que pode ter uma solicitação pura é a direção z, devido a montagem dos sensores no plano de medida. Os maiores coeficientes de influência são da direção x na z e da direção y na z, segundo a KISTLER, que pode chegar até – 4%.

O valor da força axial máxima que atuará no eixo da Turbobomba que se deseja fazer as medições, ou seja na direção z, será aproximadamente $FZA = 690$ N. Assim, com esta solicitação foram determinados os coeficientes de influência para as outras direções como mostrado na Tabela 6. Os coeficientes foram determinados para várias posições angulares do eixo, de 0° a 315° , com passo de 45° . Denominaremos de

CF(ZX1) o coeficiente de influência em X devido ao carregamento em Z no transdutor de carga 1.

Tabela 6 – Coeficientes de Influência para uma Carga Axial

Ângulo de Rotação ϕ	CF(ZX1) [%]	CF(ZY1) [%]	CF(ZX2) [%]	CF(ZY2) [%]	CF(ZX3) [%]	CF(ZY3) [%]
0°	-7,91	0,47	-5,92	-0,22	-6,78	-1,64
45°	-8,64	0,45	-6,08	-0,45	-7,64	-1,85
90°	-8,30	0,44	-5,58	0,00	-7,04	-1,88
135°	-8,33	-0,23	-6,40	0,24	-6,95	-1,57
180°	-8,10	0,23	-5,63	0,00	-7,45	-1,70
225°	-8,94	0,97	-5,80	0,22	-7,51	-2,15
270°	-8,29	0,98	-5,27	0,21	-7,05	-2,50
315°	-8,84	0,47	-6,33	0,42	-7,21	-2,33
Valor Médio	-8,42	0,47	-5,88	0,05	-7,20	-1,95
“Kistler” Fabricante	-0,5	-0,3	-0,3	-0,2	-0,2	-0,3

Verifica-se que os valores medidos são muito diferentes dos valores fornecidos pelo fabricante, o que já se esperava. Os valores obtidos pelo fabricante são valores considerados ideais, ou seja, cargas atuando exatamente nas respectivas direções consideradas, o que não acontece com o dispositivo de medidas, quando temos os sensores no plano de medida e as forças atuando no rotor da máquina hidráulica.

Outros valores também foram investigados, tais como coeficientes de influências de forças em outras direções e também valores dos coeficientes partindo-se de um momento aplicado, o que ocasiona efeitos não considerados pelo fabricante.

Assim, recalculando os Fatores de Calibração, considerando agora os coeficientes de influência, tem-se os resultados que são mostrados na Tabela 7.

Tabela 7 - Valor médio e desvio padrão dos fatores de calibração levando em consideração os coeficientes de influência

Fatores de Calibração	Valor Médio	Desvio Padrão
CalibFX	1,0044	0,0231
CalibFY	1,0155	0,0249
CalibFZ	1,0201	0,0289
CalibMX	1,2184	0,0159
CalibMY	1,2230	0,0157
CalibMZ	1,2976	0,0105

3. CONCLUSÕES

- Os desvios padrões de ambos os fatores de calibração, ou seja, considerando os coeficientes de influência ou não, indicam valores bem próximos, de forma que não existe uma real variação dos valores dos fatores de calibração.
- Com relação aos valores dos fatores de calibração pode-se dizer que os mesmos não sofreram uma forte variação e de certa forma observa-se uma discreta diferença que pode ser até desprezada.
- Os valores dos coeficientes de calibração convergiram para os patamares esperados no começo de todo o processo de calibração: em torno de 1,0 para as forças e em torno de 1,2 para os momentos.
- As forças e momentos processados através dos sinais medidos FX, FY, FZ e MX, MY, MZ no sistema de coordenadas fixo na carcaça do dispositivo, ou seja, no referencial inercial, com ou sem a consideração dos coeficientes de influência, produzem resultados bons e bem próximos.
- Depois desta calibração estática, que durou mais de um ano, o equipamento tornou-se bem próximo de estar preparado para as medições numa bancada que simula as várias condições de operação da turbomáquina em estudo.

REFERÊNCIAS

- Bachmann, P., 1980, Fortschritte im Erfassen und Auswerten von Kräften und Momenten na Rotoren hydraulischer Modellturbomaschinen, Ercher Wyss, n.1/2, pp 69-81.
- Brandão, J. G. T. & Tomazini J. E., 1994/1995, Esforços Hidráulicos Dinâmicos em Turbomáquinas, Revista de Engenharia e Ciências Aplicadas, São Paulo, Brasil, vol. 2, pp. 41-45.
- Brandão, J. G. T. & Tomazini J. E., 1999, Dynamic Model af a Measurement Device, Pan American Congress of Applied Mechanics, vol. 8, pp 1423
- Grein, H., 1975, Radial krräfte na hydraulischer Turbomaschinen, Technische Rundschau Sulzer, n.1, p.37-48.
- Harbort T., 1990, Statische Kalibrierung der Messanordnung zur Messung der auf das Laufrad der Modellpumpturbine wirkenden Kräfte und Momenten, Institut für Strömungsmechanik und Hydraulische Strömungsmaschinen, Universität Stuttgart, HSN Nr.62.
- Liess, C., 1982, The determination of dynamic radial forces in hydraulic machines, Voith Research and Construction, vol.28E.
- Liess, C., Jäger, E. U., Llemm, D., 1987, Hydraulically induced radial forces on Frances trubines: measurements, evolution and results, IAHR-SYMPIOSIUM, 12, Stirling.
- Staubli, T., Some results of forces measurements on impeller of a modell turbine, IAHR-MEETING, 3, Lille.

TITLE: CALIBRATION OF A MEASUREMENT DEVICE AS A RESULT OF EFFORTS OF INTERACTION FLOW AND IMPELLER OF TURBOMACHINES

KEYWORDS: hydraulic forces on impeller, forces in turbomachine, measurements of hydraulic forces