

AVALIAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE TRANSDUTORES DE FORÇA

Jorge Augusto Salles Pereira, M.Sc – jasp@ituc.puc-rio.br

PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, ITUC, Instituto Tecnológico 22453-900 Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

José Luiz Fernandes, D.Sc – jlffernandes@cefet-rj.br

CEFET-RJ - Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca, Departamento de Engenharia Mecânica, 20271-110, Rio de Janeiro, RJ, BRASIL

Jorge Antonio da Paz Cruz, M.Sc – jacruz@inmetro.gov.br

Inmetro - Instituto Nacional de Metrologia Normalização e Qualidade Industrial, Laboratório de Força, Torque e Dureza, 25250-020, Xerém, Duque de Caxias, RJ, BRASIL

Jaime Tupiassú Pinho de Castro, Ph.D – jtcastro@mec.puc-rio.br

PUC-Rio, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Departamento de Engenharia Mecânica, 22453-900, Rio de Janeiro, BRASIL

Resumo. A medição de forças dinâmica tem importância em muitos casos práticos, como na obtenção de propriedades mecânicas de materiais estruturais. Contudo, a calibração de transdutores de força dinâmica não é uma tarefa trivial, e em vários países, têm sido realizados experimentos empregando-se uma massa calibrada montada via transdutor de força sobre um vibrador, para através da aceleração da massa obter a força dinâmica pela segunda lei de Newton, $f = m \cdot a$. Sendo assim, este trabalho propõe avaliar o desempenho um transdutor de força projetado, construído e referenciado ao padrão primário brasileiro de força.

Palavras Chaves: Medição de força, Projeto de transdutor e Efeitos dinâmicos

1. INTRODUÇÃO

Atualmente na medição de força são empregados vários tipos de instrumentos (transdutores), mecânicos e elétricos, tais como dinamômetros mecânicos, células de carga, sensores piezelétricos, sensores à fibra ótica, etc. Dentre estes, as células de carga e os dinamômetros de anel são os mais empregados visando a rastreabilidade de instrumentos e máquinas de medição força. No passado, foram construídos e aperfeiçoados os padrões primários de força, que são constituídos de massas sobre as quais atua a força de gravidade local (g_l), onde estes com seus valores e incerteza conhecidos, geram as forças. Seu princípio de funcionamento é baseado na Segunda lei de Newton (força é o produto de uma massa pela aceleração a qual está submetida). Estas massas são colocadas em estruturas de tal modo que a força gerada atue diretamente sobre o instrumento que se deseja calibrar.

Contudo, a maioria das máquinas não funciona só estaticamente, pois seus componentes mecânicos atuam sob ação de forças dinâmicas. Como exemplo pode-se citar as peças da suspensão de veículos rodoviários e ferroviários e elementos de máquinas e motores em geral, asas e componentes de trem de pouso dos aviões, amarras dos navios, componentes mecânicos das máquinas de ensaios mecânicos dinâmicos (Bray, *et al.*, 1990 e Fujii, *et al.* 2003).

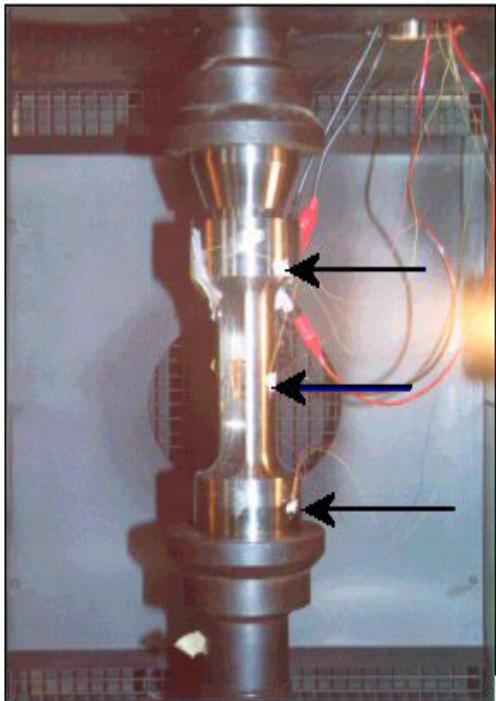
Com o desenvolvimento de máquinas de ensaios mecânicos cada vez mais rápidas, tem-se aumentado a preocupação com a qualificação metrológica de transdutores de força dinâmicos. Kumme (1996, 1997 e 1998) e Hunt (2000), apresentaram estudos sobre as propriedades dinâmicas

para diferentes tipos de transdutores de força. Crawshaw (2002), utilizando um procedimento de caracterização dinâmica, produziu resultados com grande exatidão, para uma faixa de força entre 12 e 20 kN, usando uma rampa com taxa 100N/s como sinal de entrada. Bruns (2002) desenvolveu um projeto para calibração de transdutores de força com forças de pulso de 1ms de duração. Pereira (2000a-b e 2003) construiu e caracterizou um transdutor de força para estas medições, que foi calibrado segundo normas nacionais e internacionais vigentes para forças estáticas.

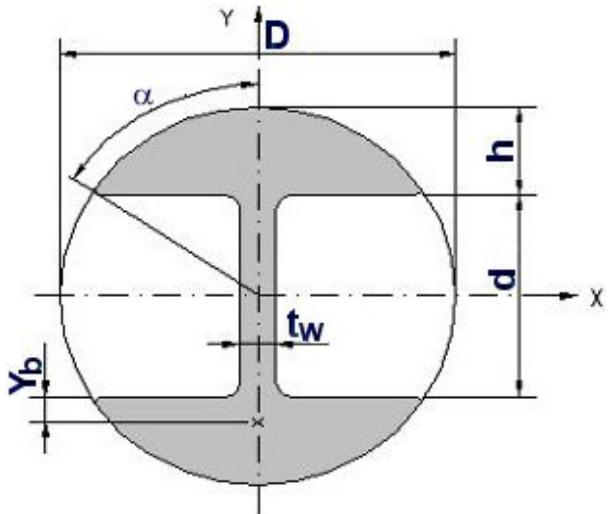
Sendo assim, este trabalho propõe avaliar o desempenho dinâmico deste novo transdutor de força extensométrico. Para isto, realizaram-se ensaios de avaliação no comportamento dinâmico do transdutor em um equipamento servo-hidráulico Instron, modelo 8502, com uma faixa nominal de escala de 100 kN. Em função da análise dos resultados obtidos identificou-se a necessidade de utilizar um equipamento que possuísse maior rigidez no quadro de reação. Sendo assim, utilizou-se para tal, ensaios dinâmicos em um equipamento com maior rigidez, Instron modelo 8504, com uma faixa nominal de escala com 500 kN.

2. MÉTODOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS

O transdutor de força apresenta um elemento elástico com seção transversal em perfil do tipo “H” circunscrita em um círculo, de forma que todos os momentos de inércia deste perfil são iguais. Este transdutor foi construído para viabilizar a medição de forças dinâmicas com capacidade de 100kN. A figura 1a mostra o elemento elástico na posição de aplicação da força durante o teste de desempenho da resistência de compensação e a figura 1b mostra o croqui da seção transversal na altura da região para instalação dos extensômetros. Na figura 1a as setas representam o posicionamento dos extensômetros. Vários ajustes foram realizados a fim de se conseguir os parâmetros ótimos mostrados na tabela 1. Esta tabela também mostra os valores das massas das peças após a fabricação.



(a)



(b)

Figura 1. (a) Elemento elástico na posição de aplicação da força (as setas indicam as posições dos termopares) (b) Croqui do elemento elástico (Corte transversal). (As setas, na figura 1a, representam o posicionamento dos extensômetros)

Tabela 1. Dimensões e pesos associados ao transdutor de força (Pereira, *et al.*, 2002a-b).

Nomenclatura	Dimensões e/ou peso
Limite superior da faixa de medição	100 kN
Sentidos de aplicação dos esforços	Tração e Compressão
Tipos de solicitação	Estática e Dinâmica
Coeficiente de segurança para forças axiais	Cinco
Deformação máxima	entre 1000 e 1200 $\mu\epsilon$
Momentos de Inércia	$I_x = I_y$
Material selecionado para construção	Aço resistente 17- 4 – PH
D (Diâmetro da seção transversal)	40,1 mm
d (Altura da Alma)	20,106mm
t_w (Largura da alma)	3,22 mm
I_x (Momento de Inércia em relação ao eixo X)	31883 mm ⁴
I_y (Momento de Inércia em relação ao eixo Y)	31870 mm ⁴
Área Seção transversal	555 mm ²
Elemento Elástico	3347 g
Invólucro completo	1812 g
Cabo blindado e conector Amphenol	800 g
Base de apoio superior para esforços	976 g
Transdutor completo	7365 g

O aço utilizado na construção do transdutor de força foi o 17-4 PH, da família dos inoxidáveis endurecíveis por precipitação, de alta resistência mecânica e à corrosão. O aço 17-4 PH para a geometria adotada no transdutor apresenta excelente condição de indeformabilidade durante o tratamento térmico. Para este tratamento utilizou-se um forno de banho de sal, que garante um aquecimento por condução de forma rápida e principalmente uma distribuição homogênea ao longo da peça. Além do mais, este tratamento térmico teve como primeira etapa um processo de solubilização (colocar em solução sólida os elementos formadores de partículas), que consistiu em um aquecimento em torno de 1400°C e depois o resfriamento a uma velocidade de 8°C/min até a temperatura ambiente. Na segunda etapa deste tratamento térmico houve um novo aquecimento do material numa temperatura na faixa de 480°C e 620°C, por um período de 180 min, para que houvesse a precipitação das fases formadores do aumento da resistência da liga. A terceira e última etapa consistiu em um resfriamento a uma taxa de 12°C/min até a temperatura ambiente (Metals Handbook, 1993). Após o tratamento térmico, descrito acima, realizaram-se ensaios de tração em quatro corpos de prova do aço 17-4 PH, sendo a média dos resultados de: *resistência ao escoamento* ($S_e = 1270 \text{ MPa}$), *resistência máxima* ($S_u = 1307 \text{ MPa}$), *alongamento* (Along. = 22%) e *redução de área* (RA = 53%).

A colagem dos extensômetros no elemento elástico (figura 1a) foi realizada em uma sala limpa, em bancada/estufa com fluxo laminar, certificada e com tamanhos de partículas controlados. Os extensômetros selecionados foram do tipo CEA06W250-120 produzidos pela “Micro-Measurements Divsion, North Carolina, USA”. Houve necessidade de prover uma resistência de compensação para controlar a variação do ganho em função da temperatura, como descrito acima (Pereira, 2000a).

A calibração do transdutor foi realizada por uma máquina de referência nacional para medidas de força, que se encontra em um laboratório onde as condições ambientais são: *temperatura* (21,7°C), *umidade relativa do ar* (56,5%) e *pressão atmosférica* (1023,8 mbar). A figura 2 mostra os desvios das serie de leituras X_1 , X_2 , X_3 , X_4 , X_5 e X_6 em relação a uma curva ideal, onde X_1 e X_2 estão relacionados com o carregamento 0°, X_3 com o carregamento de 120°, X_4 com o descarregamento de 120°, X_5 com o carregamento de 240° e X_6 com o descarregamento a 240°. Estas medidas foram baseadas na norma NBR6674/99. Na tabela 2 estão mostrados os resultados obtidos na calibração realizada na máquina de referência do INMETRO em esforços de tração e compressão, gerados por ação direta de massas (peso morto).

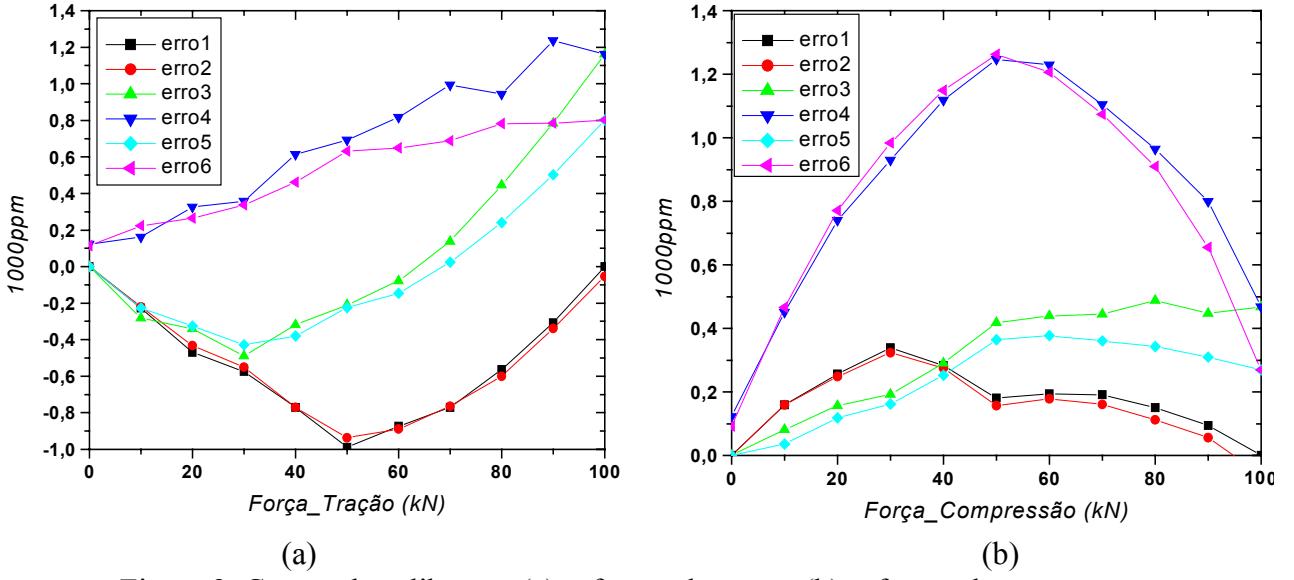


Figura 2. Curvas de calibração (a) esforços de tração (b) esforços de compressão.

Tabela 2. Resultados obtidos na calibração INMETRO em esforços de tração e compressão.

Força (kN)	Repetitividade (%)		Rotação (%)		Interpolação (%)		U combinada (%)		Classe Geral	
	Comp.	Tração	Comp.	Tração	Comp.	Tração	Comp.	Tração	Comp.	Tração
10	0,008	0,00	0,061	0,12	0,013	-0,00027	0,26	0,25	2	2
20	0,019	0,0038	0,073	0,069	-0,0078	0,031	0,19	0,18	2	2
30	0,008	0,0051	0,049	0,059	0,0043	-0,0011	0,16	0,16	1	1
40	0,000	0,0019	0,11	0,010	-0,0046	-0,0020	0,15	0,12	1	1
50	0,011	0,0046	0,16	0,052	0,0017	0,0010	0,15	0,11	1	1
60	0,003	0,0026	0,14	0,043	0,00074	0,00052	0,13	0,084	1	1
70	0,001	0,0044	0,13	0,041	0,0013	-0,00051	0,11	0,064	1	1
80	0,005	0,0048	0,13	0,047	-0,0010	0,00073	0,10	0,051	1	1
90	0,003	0,0043	0,12	0,043	-0,00086	-0,00075	0,092	0,039	1	1
100	0,005	0,0061	0,12	0,053	0,00056	0,00024	0,86	0,038	1	1

Pereira (2000a) realizou quatro experimentos, sendo dois em compressão (com e sem pré-carga) e dois em tração (com e sem pré-carga), onde nos experimentos sem pré-carga o transdutor permaneceu em repouso durante as 24 horas imediatamente anteriores ao ensaio, para evitar interferência de ensaios anteriores. Nos experimentos que envolveram pré-carga, aplicou-se 3 vezes uma força até o limite da faixa nominal de medição (3 pré-cargas), antes de iniciar o ensaio. Este ensaio foi realizado em uma máquina de referência nacional em metrologia de força no laboratório de força do IMETRO e baseou-se na norma NBR 10584. Esta norma prescreve os métodos para execução de ensaios em células de carga. A figura mostra os intervalos onde o transdutor permaneceu sob ação da força e depois de cessada a ação da mesma, respectivamente, considerando ensaio de compressão sem pré-carga. Realizaram-se também experimentos para o ensaio de compressão com pré-carga, de tração sem pré-carga e com pré-carga.

Para o transdutor de força levantou-se a freqüência natural, utilizando um osciloscópio HP 56645A, acelerômetro Endeveco 751100, condicionador de sinais Endeveco e um martelete de percussão. Os resultados encontrados neste ensaio tiveram como valor médio de 5,264 kHz, com um desvio padrão de 0,0027 kHz.

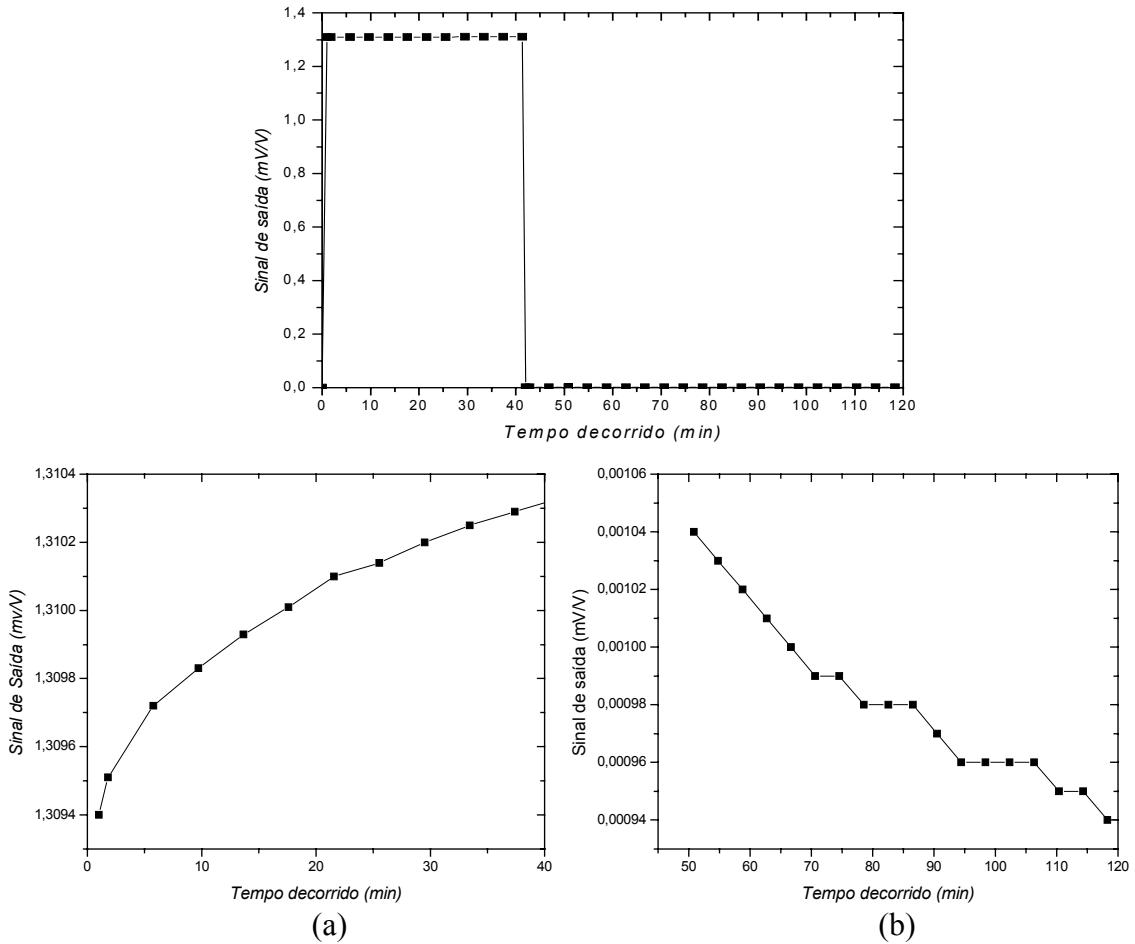


Figura 3. Gráfico mostrando os intervalos onde o transdutor de força foi submetido a compressão. (a) ampliação do trecho com ação da força de compressão (b) ampliação do trecho sem a ação da força de compressão.

Pereira (2000b), realizou experimentos dinâmicos para verificar a equivalência dos sinais de saída de calibração em carregamentos estáticos e dinâmicos. Para este experimento utilizou-se dois transdutores de força, um da máquina de ensaio Instron e o transdutor em avaliação. Os dois transdutores foram montados na máquina de ensaio de modo que os parâmetros (força, freqüência) selecionados no painel de comando atuassem simultaneamente sobre ambos. Na máquina Instron aplicou-se uma carga de 10 kN com uma forma de onda senoidal. Em seguida foram colocados incrementos em freqüência de 10 Hz, até atingir a freqüência limite de operacional da máquina. Verificou-se que os intervalos de operação da célula de carga para carga de 90 kN e 10 kN foi de 20 Hz e 100 Hz, respectivamente.

Para a determinação da incerteza de medição do transdutor em teste, considerou-se o desvio padrão baseado em 3 séries de medição do transdutor em teste, a menor divisão dos transdutores de referência e de teste e a incerteza do ajuste da curva força de referência *versus* força lida no transdutor em teste, esta seguindo o critério da norma ASTM E 74 -91. As tabelas 3 e 4 apresentam estes resultados obtidos. O cálculo das incertezas seguiu o guia para “Guia para a Expressão da Incerteza de Medição”.

Um outro tipo de ensaio foi realizado para testar a eficiência do transdutor de força, sendo este denominado de método direto. Este método corresponde a submeter o transdutor construído à ação da força de inércia gerada pelo movimento de uma massa, conforme a Segunda lei de Newton ($F = m \cdot a$). A figura 4a, ilustra esquematicamente o modelo representativo do experimento e as figuras 4b e 4c, mostram o conjunto montado na máquina Instron 8502, onde foi realizado o ensaio.

Tabela 3. Valores relativos à comparação em tração.

Valor de Referência (kN)	Valor da célula teste (kN)	Erros Relativos (%)		Incerteza Expandida (kN)
		Reprodutibilidade	Exatidão	
10,000	10,110	7,60e-01	-1,10e00	± 1,22e-01
20,000	20,157	6,33e-01	-7,84e-01	± 1,05e-01
30,000	30,212	3,38e-01	-7,06e-01	± 8,39e-02
40,000	40,090	3,17e-01	-2,24e-01	± 9,14e-02
50,000	49,951	1,52e-01	9,87e-02	± 5,55e-02
60,000	59,845	1,27e-01	2,58e-01	± 1,93e-02
70,000	69,706	1,09e-01	4,20e-01	± 5,55e-02
80,000	79,635	3,17e-01	4,56e-01	± 2,10e-02
90,000	89,580	5,63e-01	4,66e-01	± 4,20e-02
100,000	99,526	5,07e-01	4,74e-01	± 3,63e-02

Tabela 4. Valores relativos à comparação em compressão.

Valor de Referência (kN)	Valor da célula teste (kN)	Erros Relativos (%)		Incerteza Expandida (kN)
		Reprodutibilidade	Exatidão	
10,000	10,020	5,00e-02	-2,00e00	± 1,36e-02
20,000	20,045	8,00e-02	-2,25e-01	± 3,62e-02
30,000	30,063	4,33e-02	-2,10e-01	± 3,58e-02
40,000	40,069	2,00e-02	-1,73e-01	± 3,58e-02
50,000	50,109	6,00e-03	-2,18e-02	± 3,53e-02
60,000	60,138	1,50e-02	-2,30e-01	± 2,60e-03
70,000	70,170	1,43e-02	-2,43e-01	± 3,54e-02
80,000	80,201	1,00e-02	-2,51e-01	± 3,55e-02
90,000	90,244	4,44e-03	-2,71e-01	± 3,55e-02
100,000	100,287	2,73e-01	-2,87e-01	± 3,55e-02

Neste experimento considerou-se que a massa total, mostrada na figura 4a, é representada pelo somatório da massa calculada (m_1), da soma das massas dos acoplamentos e eliminadores de folga (m_2) e da massa da metade superior do elemento elástico (m_3). O valor de m_1 , foi calculado considerando a força medida pelo transdutor da Kratos (3726 N (m.kg.s⁻²)), dividida pela aceleração da gravidade local ($9,7880029 \pm 3 \times 10^{-7}$ m.s⁻²), obtendo-se como resultado 380,72 kg. O resultado de m_2 e m_3 , foram 0,850 kg e 3,347 kg, respectivamente, logo a massa total foi 384,9 kg (m_t).

A máquina de teste, quando usada para fazer oscilar um conjunto de massas livres (sem estar com os dois extremos fixados no quadro de reação), acarreta que o quadro de reação também oscile como um sistema de dois graus de liberdade. Por outro lado, a máquina Instron usada apresentou pela sua própria característica, alguns problemas, que surgem a medida que se coloca para oscilar m_t . Quando a haste do atuador recebe um comando para elevar rapidamente m_t , devido ao atuador estar apoiado no quadro de reação da Instron, e como os coxins flutuantes, da máquina Instron, se movimentam ligeiramente para baixo, os valores obtidos no LVDT são diferentes do esperado em função do valor registrado no painel de comando da máquina. Assim sendo, a medida que uma nova amplitude de oscilação (maior) é registrada no painel de comando, a força de reação também se altera, ocasionando um outro valor para a referida diferença. Observou-se, que além disto, sua variação não é linear, com o crescimento das amplitudes registradas no painel da máquina.

Verificou-se, também, que na prática é muito difícil impor uma aceleração de referência sobre as massas (grandes) necessárias para calibrar transdutores da ordem de 100kN, como os usados em máquinas de testes de materiais. Sendo assim, desenvolveu-se um experimento que utilizou uma

massa de cerca de 400 kg, que foi acelerada senoidalmente em um equipamento servohidráulico de faixa nominal de escala de 500 kN. Para este experimento utilizou-se um cilindro de aço com 440 mm de diâmetro e 320 mm de altura, cuidadosamente usinado para garantir a simetria em relação ao seu centro de massa. A massa m_1 ficou posicionada sobre o transdutor de força, conforme mostra a figura 4a, e este conjunto sobre a placa das garras inferiores da máquina, de modo que a fixação fosse feita diretamente pelos mordentes destas. Para esta montagem projetou-se um novo sistema de acoplamento exclusivo para o equipamento Instron 8504. No procedimento de montagem dos acoplamentos atentou-se para que não houvesse folgas entre todos os componentes, utilizando-se dois eliminadores constituídos de arruelas helicoidais bipartidas, conforme mostra a figura 4c. A figura 4c mostra em escala real, o transdutor apresentado na figura 4b, em escala reduzida.

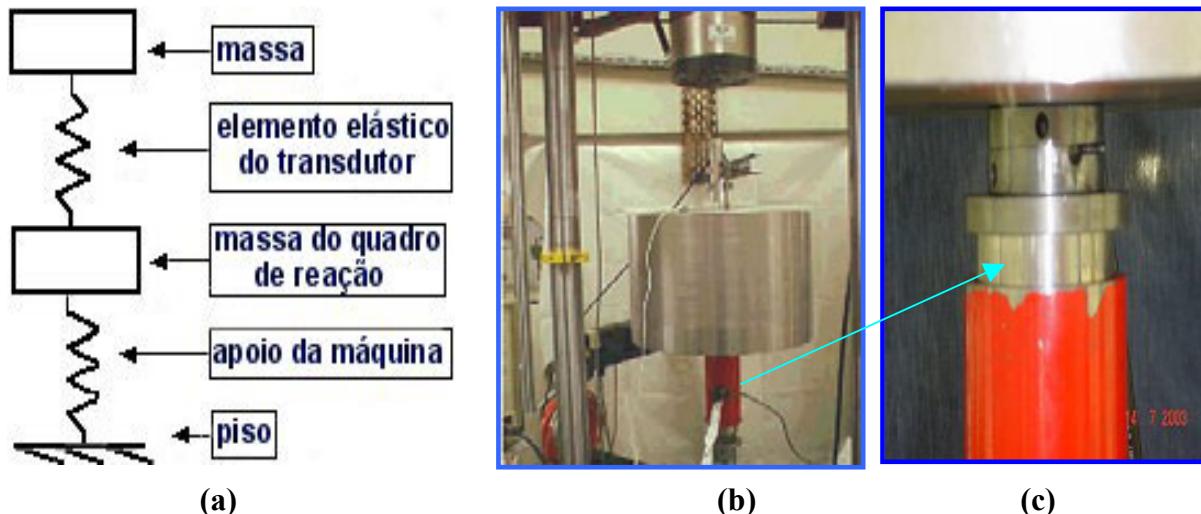


Figura 4. (a) Modelo associado ao experimento. (b) Vista geral do conjunto montado na máquina Instron 8502, (c) Detalhe da montagem mecânica da massa sobre o transdutor e duas arruelas helicoidais bipartidas, para eliminar toda e qualquer folga entre os componentes.

Com o objetivo de garantir a amplitude e minimizar o ruído do sinal do transdutor de força, ele foi alimentado por duas baterias automotivas convencionais de chumbo-ácido ligadas em paralelo com uma fonte de 12V CC estabilizada, as quais foram permanentemente monitoradas por um voltímetro de 5 1/2 dígitos, HP modelo 3468A. Usou-se um acelerômetro ENDEVCO modelo 752-100, com sensibilidade de 106,08 mV/g, um osciloscópio digital HP modelo 54501A e um analisador espectral Agilent-HP modelo 35670a. O acelerômetro foi instalado sobre a superfície superior da massa metálica, através de um furo rosqueado previamente usinado para este fim. Cuidou-se para que este ficasse o mais próximo possível do eixo de simetria vertical do conjunto.

Uma vez montado e testado o aparato experimental, realizaram-se ensaios nos quais o conjunto massa-transdutor oscilasse com diferentes valores de freqüências e amplitudes de deslocamento, por meio do equipamento servohidráulico Instron 8504, de modo a gerar diferentes valores de aceleração e consequentemente valores de força atuantes sobre o transdutor. Inicialmente os resultados das medições dos sinais no osciloscópio apresentaram ruídos muito altos, que impediram uma leitura segura do sinal de saída do acelerômetro. Devido a este fato houve a necessidade de se introduzir um novo instrumento de medição do sinal de saída, um analisador espectral de sinais que eliminou o problema identificado. Antes de submeter o transdutor de força ao experimento dinâmico o mesmo foi calibrado seguindo a norma ASTM E 74-01. Utilizou-se como referência um transdutor de força que é componente da máquina Instron 8502, cuja faixa nominal de escala é de 100 kN, que por sua vez foi calibrado por comparação com padrões de referência devidamente rastreados ao Inmetro, pelo próprio laboratório LEM-ITUC-PUC-Rio.

A tabela 5 apresenta os resultados obtidos na calibração do transdutor de força para esforços de tração e compressão, respectivamente. Nesta tabela também é mostrado a média de quatro séries de leitura (1), valores ajustados pelos métodos dos mínimos quadrados da curva força versus sinal de saída (2) e a incerteza padronizada (U_p) com fator de abrangência 2 (dois), calculada conforme

ISO GUM-98. A execução do experimento foi conduzida através do painel de comando da máquina, onde foram introduzidos parâmetros de freqüência e amplitude de deslocamento do pistão no equipamento servohidráulico Instron 8504. Por uma questão de segurança o experimento iniciou com valores bem pequenos de freqüência de forçamento, em torno de 0,5 Hz e amplitude de deslocamento em torno de 0,05 mm.

Os valores de freqüência e amplitude de deslocamento foram combinados entre si, para obtenção de velocidades de deslocamento do conjunto e acelerações cada vez maiores. Obteve-se, então, os valores de aceleração que gerassem forças condizentes com o valor da faixa nominal de escala do transdutor que é de 100kN, a partir dos valores de força gerados. A calibração estática realizada pelo laboratório LEM ITUC, Credenciado pela Rede Brasileira de Calibração–RBC, teve base a norma ABNT ASTM E 74-01. Os valores de freqüência e amplitude de deslocamentos combinados entre si, bem como os resultados obtidos pelo acelerômetro e pelo transdutor de força são mostrados na tabela 6. Nesta tabela os valores de saída da aceleração da massa são lidos diretamente no analisador espectral em milésimos do valor da aceleração da gravidade convencional (mg_c) e o transdutor de força fornece o valor em voltagem (mV/V). Porém como não se dispõe dos valores de mV/V do acelerômetro utiliza-se um cálculo inverso. De posse do valor da força em kgf calculado com o valor da aceleração obtido pelo acelerômetro em mg_c , aplica-se a equação de calibração estática do transdutor de força em tração para calcular o valor de mV/V, obtido pelo acelerômetro.

Tabela 5. Resultados da calibração do transdutor de força em tração e em compressão.

Faixa de medição de força	Sinal de saída do instrumento				Incerteza Up	
	Leituras (1)		Valores Ajustados (2)			
	Tração	Comp.	Tração	Comp.	Tração	Comp
(kN)	(mV/V)	(mV/V)	(mV/V)	(mV/V)	(kN)	(kN)
10	0,132	0,131	0,131	0,130	$\pm 1,7 \text{ E-}01$	$\pm 1,3 \text{ E+}00$
20	0,264	0,262	0,263	0,260	$\pm 5,3 \text{ E-}01$	$\pm 1,3 \text{ E+}00$
30	0,396	0,393	0,399	0,391	$\pm 7,4 \text{ E-}01$	$\pm 1,8 \text{ E+}00$
40	0,528	0,525	0,527	0,526	$\pm 9,2 \text{ E-}01$	$\pm 2,4 \text{ E+}00$
50	0,660	0,656	0,662	0,658	$\pm 1,0 \text{ E+}00$	$\pm 3,1 \text{ E+}00$
60	0,792	0,786	0,790	0,781	$\pm 1,1 \text{ E+}00$	$\pm 3,6 \text{ E+}00$
70	0,924	0,918	0,921	0,920	$\pm 1,2 \text{ E+}00$	$\pm 3,5 \text{ E+}00$
80	1,057	1,049	1,056	1,051	$\pm 1,2 \text{ E+}00$	$\pm 3,2 \text{ E+}00$
90	1,189	1,180	1,190	1,185	$\pm 1,2 \text{ E+}00$	$\pm 3,0 \text{ E+}00$
100	1,322	1,312	1,321	1,313	$\pm 1,2 \text{ E+}00$	$\pm 3,0 \text{ E+}00$

3 –DISCUSSÃO

De acordo com os dados apresentados na figura 2 e tabelas 2, 3 e 4 podem-se observar que o transdutor construído apresentou bom desempenho e classificação em instrumentos de medição de força para uso em laboratório. Na tabela 5, observou-se que os erros relativos obtidos, tanto na comparação em tração como em compressão que seus valores estão satisfatórios para o tipo de transdutor construído e para o uso pretendido. Em relação aos valores de incertezas obtidos observou-se que os valores máximos e mínimos encontrados foram, 1,223 % e 0,026 %, 1,136 % e 0,004 % em tração e compressão respectivamente.

Na tabela 6, pode-se observar que a resposta do transdutor construído não variou com o aumento dos valores da freqüência, o que confere a este a condição adequada para medições dinâmicas dentro das faixas de freqüências examinadas. Além do mais, na tabela 6, verifica-se que a proposta de usar um equipamento servohidráulico com maior rigidez no quadro de reação apresentou resultado satisfatório para baixos valores de força. Vale ressaltar que não se conseguiu a leitura adequada dentro do intervalo de 10% a 90% da faixa nominal da escala do transdutor de força.

Tabela 6. Valores de freqüência e amplitude de deslocamentos e os resultados obtidos pelo acelerômetro e pelo transdutor de força.

Amplitude (mm)	Freqüência (Hz)	Sinal de saída do transdutor (mV)	Amplitude (mm)	Freqüência (Hz)	Sinal de saída do transdutor (mV)
0,2	60	0,128	0,5	90	0,571
0,2	70	0,137	0,5	100	0,762
0,2	80	0,165	0,6	60	0,374
0,2	90	0,203	0,6	70	0,452
0,2	100	0,269	0,6	80	0,556
0,3	60	0,180	0,6	90	0,715
0,3	70	0,205	0,6	100	0,966
0,3	80	0,246	0,7	60	0,421
0,3	90	0,308	0,7	70	0,516
0,3	100	0,412	0,7	80	0,644
0,4	60	0,229	0,7	90	0,816
0,4	70	0,281	0,7	100	1,104
0,4	80	0,339	0,8	60	0,443
0,4	90	0,425	0,8	70	0,558
0,4	100	0,567	0,8	80	0,693
0,5	60	0,297	0,8	90	0,875
0,5	70	0,368	0,8	100	1,152

4. CONCLUSÕES

De acordo com os ensaios mostrados acima o transdutor de força projetado e construído mostrou-se adequado a medição de esforços estáticos e dinâmicos como e mostraram os resultados da calibração feita na máquina de referência do INMETRO. Suas características de reproduzibilidade, repetitividade, histerese ficaram abaixo de 0,5 % e o valor de incerteza máximo encontrado foi de 0,26 %. A comparação com o transdutor de força dinâmica mostrou que o transdutor construído é capaz de medir forças dinâmicas, tal como um transdutor de uma máquina de ensaios dinâmicos, nas faixas examinadas.

Verificou-se, também, que a proposta de usar um equipamento servohidráulico com maior rigidez no quadro de reação apresentou resultado satisfatório o que evidenciou a necessidade da continuação das atividades deste grupo de pesquisa, visando o desenvolvimento de novos recursos metrológicos neste campo.

5. REFERÊNCIAS

- American Society for Metals, Metal Handbook, 1993, *Heat Treatment of Superalloy*, Vol. 2, Metals Park, Ohio, pp.793-813.
- Bray A., Barbato G. e Levi R., 1990, *Force Measurement Theory And Practice*, Academic Press.
- Bruns, T., Kumme, R., Kobush, M., Peters, M., 2002, “From oscillation to impact: The design of a new force calibration device at PTB”, *Measurement*, 32 (1), pp. 85-92
- Crawshaw, A.H. and Robinson, A.D., 2002, “The calibration of force transducers On-the-Fly”, *NPL Report CMAM 86*, September, 11p.
- Fujii, Y., 2003, “Evaluation of momentum transfer responses of commercial forces transducers”, *Measurement*, 33 (5), pp. 35-45.
- Hunt, A., 2000, “Dynamic force measurement establishing the value of dynamic calibration”, Dorkchester, Andrew Hunt Consultant, *Proc. XIII IMEKO TC3 World Congress*, Torino, 5p.
- IMETRO, *Guia para a expressão da incerteza de medição*, Ed. IMETRO, 1998, 121p.

- Kumme, R., 1996, "The determination of effective dynamic force for the calibration of force transducer with due regard to the distribution of mass and acceleration", *Proceedings of 15th International conference, Accuracy, Assurance in force and mass measurements*, Madrid, Spain, October 1996, P. 129-138.
- Kumme, R., 1997, "The Main Influences On the dynamic properties of measuring devices", *Proceedings of the XIV Inmeko - World Congress*, Volume III, Tampere, Finland, pp. 102 – 107.
- Kumme, R., 1998, "Investigation of the comparison method for the dynamic calibration of force transducers", *Measurement 23* (4), pp. 239-245.
- Pereira, J.A.S., 2000a, Desenvolvimento de uma célula de carga para medições de estáticas e dinâmicas, *Dissertação de Mestrado*, Departamento de Metrologia, PUC-Rio.
- Pereira, J.A.S. e Castro, J. T. P., 2000b, Avaliação do comportamento de um transdutor de força, *II Congresso Brasileiro de Metrologia*, 10p.
- Pereira, J.A.S., Cruz, J.A.P., Fernandes, J.L. e Castro, J.T.P., 2003, "Medição de força dinâmica a partir da inércia de massas", *III Congresso Brasileiro de Metrologia*, Recife, Setembro, Pernambuco, 5p.

6. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

EVALUATION OF THE BEHAVIOR OF FORCE TRANSDUCERS

Jorge Augusto Salles Pereira, M.Sc – jasp@ituc.puc-rio.br

ITUC, Technology Institute in Catholic University of Rio de Janeiro, 22453-900, Rio de Janeiro, RJ, BRAZIL.

José Luiz Fernandes, D.Sc – jlffernandes@cefet-rj.br

CEFET-RJ - Department of Mechanical Engineering, 20271-110, Rio de Janeiro, RJ, BRAZIL

Jorge Antonio da Paz Cruz, M.Sc – jacruz@inmetro.gov.br

INMETRO, Nacional Institute of Metrology, Normalization and Industrial Quality, 25250-020, Xerém, Duque de Caxias, RJ, BRAZIL.

Jaime Tupiassú Pinho de Castro, Ph.D – jtcastro@mec.puc-rio.br

PUC-Rio, Catholic University of Rio de Janeiro, Department of Mechanical Engineering, 22453-900, Rio de Janeiro, BRAZIL.

ABSTRACT

Abstract: The measurement of dynamic force is important in many functional situations as in the case of rating mechanical properties of structural materials. However the calibration of dynamic force transducers is not a trivial task, experiments have been carried out in many countries, using a mass gagged mounted in force transducer on a shaker, for the acceleration of the mass, to obtain the dynamic force of the second Newton's law ($f = m \times a$). Therefore this work intends to evaluate the performance of a projected force transducer, built and referenced to the primary Brazilian Force Standard.

Key Words: Force measurement, transducer's design, dynamic effects.