

CALIBRAÇÃO ESTATICA E DINÂMICA DE UM TORQUÍMETRO UTILIZADO EM ENSAIOS SIMULATIVOS DE DESGASTE DE DEPOSITO BRASADO

Lucas Alves do Nascimento, eng.lucasalves@gmail.com¹
Louriel Oliveira Vilarinho, vilarinho@mecanica.ufu.br¹
Marcelo Braga dos Santos, mbsantos@mecanica.ufu.br¹
Francisco Paulo Lépoire Neto, fplepoire@mecanica.ufu.br¹
Victor Eduardo Silva Alves, victoralvesmec@gmail.com²

^{1,2} Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica Uberlândia, MG, Brasil.

Resumo: A confiabilidade nos resultados de medição indicados pelos diversos instrumentos é de fundamental importância em todas as áreas do desenvolvimento experimental. Mais do que isso, a calibração de instrumentos de medição deve ser relatada em um certificado de calibração contendo toda a informação requerida pelo método utilizado. É recomendada a calibração dos instrumentos periodicamente em função do rápido deterioramento das características metrológicas devido ao mau uso, choques, etc. Neste contexto, este trabalho apresenta a calibração estática e dinâmica de um torquímetro, construído com extensômetros, utilizado para medir os esforços de torção em placas de teste com substrato em aço AISI 4340 recoberto com depósito brasado durante ensaios de desgastes. O objetivo central desta calibração é verificar a existência da linearidade da resposta entre tensão e torque e consequentemente certificar se o sensor opera mecanicamente na zona elástica ou plástica. Assim, primeiramente, foi necessário verificar as condições de construção estruturais e de funcionamento do sistema de medição existente. Logo após, são apresentados os métodos utilizados para a calibração estática e dinâmica e os seus respectivos resultados. Dentre os resultados avaliados cita-se a sensibilidade estática de carga, sensibilidade estática de descarga, sensibilidade estática global, limiar de torque, curvas de histerese estática do sistema, curvas de carga e descarga estática, sensibilidade dinâmica e análise da frequência de operação dinâmica do instrumento. Para a análise da frequência de operação dinâmica são apresentadas as funções de transferências, os desvios de fase, coerência e densidade espectral do sistema de medição. Conclui-se pela aplicabilidade da metodologia utilizada, por meio da calibração estática e dinâmica, a reutilização do sensor nos ensaios simulativos da qualidade de depósito brasado.

Palavras-chave: Célula de carga; calibração dinâmica; calibração estática; extensometria.

1. INTRODUÇÃO

A correta instrumentação e confiabilidade nos resultados de medição indicados pelos diversos instrumentos é de fundamental importância em todas as áreas de desenvolvimento experimental (TOMPKINS, 1998 e ZELENOSKY, 1999). Em setores industriais, como por exemplo na soldagem, esta instrumentação é mandatória (ISO 17662, 2005). Neste contexto, foi desenvolvido um sensor (NASCIMENTO, 2013) com o desafio de medir dinamicamente torque em um ambiente submerso e corrosivo para determinar a qualidade do depósito brasado (liga de zinco, níquel e cobre onde se aderem carbonetos de tungstênio entre 2 mm e 8 mm) utilizado em estruturas denominadas de ferramentas destruidoras (são utilizadas para destruir colunas, brocas e eixos que porventura fiquem presos durante uma perfuração de poço de petróleo). Mais do que isso, a calibração deste instrumento de medição deve ser relatada em um certificado de calibração e deve incluir toda a informação solicitada pelo cliente e necessária à interpretação dos resultados da calibração e toda a informação requerida pelo método utilizado (NBR ISO/IEC 17025, 2005).

Uma das formas de se medir a qualidade deste depósito brasado é através de um ensaio simulativo físico (real). Para simulação física experimental de avaliação da qualidade de depósito brasado foi desenvolvido pelo grupo Laprosolda (Centro para Pesquisa e Desenvolvimento de Processos de Soldagem), um ambiente de simulação composto por uma fresadora Fig. (1) com função de suporte e movimentação, onde está fixada uma cuba, com temperatura controlada, onde será colocada a amostra em meio ao fluido de poço de petróleo e, no eixo árvore, é fixada a ferramenta de destruição com movimentação espacial e de geometria variável, em função da necessidade do usuário, acoplado a um torquímetro (desenvolvido pelos autores deste artigo).

A placa de teste e o tubo de sacrifício podem ter geometria variável antes e até mesmo durante o desgaste, assim a fresadora em processo rotativo os pressionam interruptamente com força constante controlada via software até que, ao ocorrer o desgaste do revestimento e o contato aço-aço, o tubo irá “patinar” (torque vai próximo a zero), e o equipamento define que este é o fim do ensaio, normalmente após 4 ou 8 horas de ensaio. Esta situação corresponde ao

desgaste máximo do depósito brasado, onde ocorreu o contato aço-aço do tubo de sacrifício e a placa de teste. Assim, o sistema automaticamente levanta a ponta da fresadora e mapeia outro local do depósito, dando continuidade ao ensaio.

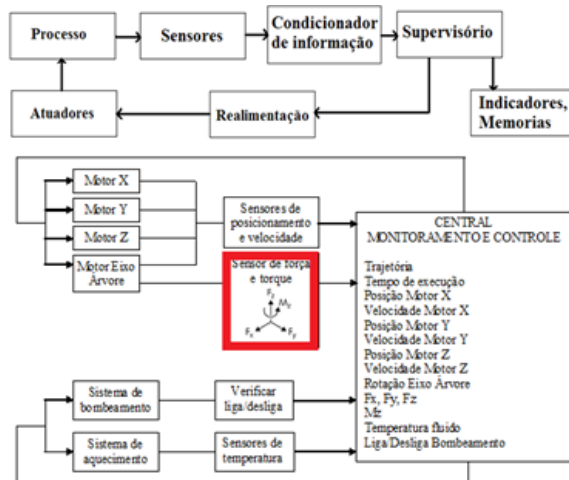


Figura 1. Detalhe do dinamômetro de contato deslizante montado no eixo-árvore sobre a cuba e fluxograma em malha fechada do sistema de mensuração (VILARINHO et al (2005)). Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura (1) mostra o fluxograma resumido do contexto em que o torquímetro a ser calibrado está inserido. No fluxograma apresentado, os sensores representam a célula de carga que transformará micro deformações provocadas em suas resistências (extensômetros) em sinais de tensão. Os sinais providos dos sensores serão encaminhados para um condicionador de sinais para tratamento. Este condicionador de sinais é dividido em três partes contendo um amplificador operacional de instrumentação (INA114AP), um circuito que elimina o offset dos extensômetros e um filtro de segunda ordem passa-baixa. A frequência de corte de projeto é de 220 Hz (frequência máxima que os extensômetros respondem sem perda de sinal (MALVINO, 1997)) e o ganho total do condicionador de sinais é de 533 vezes. O circuito ainda é composto de um somador inversor de ganho unitário que é o responsável pelo balanceamento da ponte de *Wheatstone* formada pelos extensômetros de cada célula. Os resultados da análise feita pelo programa supervisorio implicam retorno de sinais para o processo (planta), adequando o ensaio e também proporcionam ao usuário a visualização dos acontecimentos através de indicadores e memoriais.

É recomendado a calibração deste instrumento de medição em períodos entre 6 a 12 meses. Esta periodicidade é necessária em função do rápido deterioramento das características metrológicas devido ao mau uso, choques, vibrações, etc. Essas alterações, por sua vez, podem provocar desvios ou erros nas indicações das medidas. Neste contexto, este trabalho apresenta a calibração estática e dinâmica de um torquímetro construído com extensômetros e utilizado para medir os esforços de torção em placas de teste com substrato em aço AISI 4340 recoberto com depósito brasado durante ensaios de desgastes (NASCIMENTO et al (2013)). O objetivo central desta calibração é verificar a existência da linearidade da resposta entre tensão e torque e consequentemente certificar se o sensor opera mecanicamente na zona elástica ou plástica.

1.1. Verificação Estrutural e de Funcionamento do Sistema de Medição

Primeiramente, foi necessário verificar as condições de construção estrutural e de funcionamento do sistema de medição existente, que consiste nos sensores, condicionadores de sinais e aparato para recolhimento dos dados. Visualmente os sensores, condicionadores de sinais e aparato para recolhimento dos dados desenvolvido em LabView® apresentam boas condições de utilização e não apresentam danos. Uma vez que as leituras são apresentadas via computador, certifica-se que os gráficos e valores são apresentados nitidamente ao operador.

Fisicamente, o torquímetro analisado é composto de duas placas redondas paralelas unidas por quatro hastes transversais móveis. Na sua construção foram empregados extensômetros ($120 \pm 0,6\% \Omega$) que transformam energia mecânica em elétrica. O valor estabelecido de projeto para a carga máxima de força e torque é de 5000 N e 200 Nm, respectivamente. É de saber que o eixo central da fresadora aplica no máximo 9806 N sobre o sensor (NASCIMENTO et al (2013)).

Conforme mostrado na Figura (2), dois extensômetros são colados de forma a deformarem positivamente e outros dois extensômetros de forma a deformarem negativamente. Logo, são interligados na ponte de *Wheatstone* de maneira que fiquem em posição oposta permitindo a geração de tensões elétricas maximizadas.

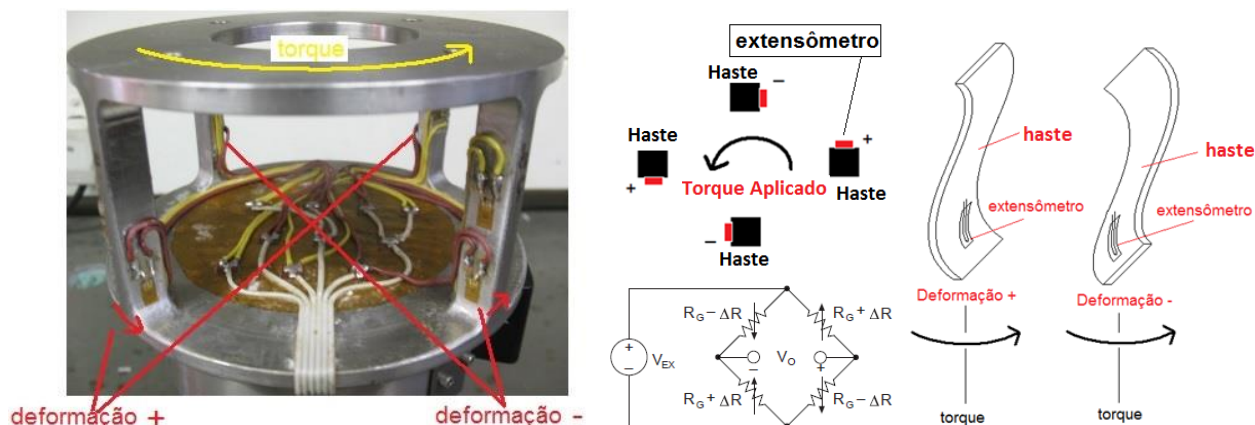


Figura 2. Peça real mostrando as posições corretas dos extensômetros que irão mensurar força e a ponte de Wheatstone convencionando as deformações. Fonte: Elaborada pelo autor

Um anel deslizante (Fig. (3)) que fica solidário ao eixo da célula de carga, transmite por meio, de escovas, o sinal provindo da ponte de Wheatstone para o circuito condicionador de sinal durante a rotação. Para mais informações do sistema de medição consultar o artigo referência Nascimento et al (2013).



Figura 3. Anel deslizante Slip Ring. Fonte: Elaborada pelo autor

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1. Calibração Estática

Apesar do sensor operar em regime dinâmico o principal objetivo desta etapa é certificar se o sensor ainda responde linearmente, por meio de levantamento de dados concretos, utilizando um método rápido de calibração. O método de calibração estática indireta permite uma montagem rápida e a simples análise direta da curva torque x tensão possibilita concluir se o torquímetro ainda opera na região de deformação elástica.

Para a calibração do sistema de medição foram utilizados um conjunto de massas-padrão posicionados há 200 mm do centro de aplicação do braço de força. Foram aplicadas massas-padrão de 5 kg em 5 kg e por meio da Eq.(1) foi calculado o torque aplicado em relação ao eixo do sistema. Para cada torque aplicado ao sistema é registrado o valor apresentado no display do Multímetro digital HP de modelo 3456A. A célula de carga foi calibrada de forma a verificar a histerese, ou seja, adicionando carga e retirando carga, pois, o torquímetro em operação gira no sentido horário e no sentido anti-horário.

$$T = F \cdot d \cdot \sin \phi \quad (1)$$

O sinal provindo da célula de carga a ser calibrada foi interligado ao condicionador de sinais, e o sinal de saída do condicionador foi conectado ao multímetro HP. O condicionador de sinais padrão foi energizado e interligado a célula de carga padrão KRATOS. A célula de carga KRATOS, cuja carga máxima é de 50 kgf e sensibilidade de 2 mV/kgf, recebe força de um conjunto de massas “padrão”, aplicada a 200 mm de distância do eixo do torquímetro Fig. (4). Todo sistema se manteve ligado por um período de 30 minutos antes da coleta dos dados por motivos de estabilização dos sinais. O esquema de ligação e montagem dos equipamentos nesta calibração são mostrados na Fig. (5).

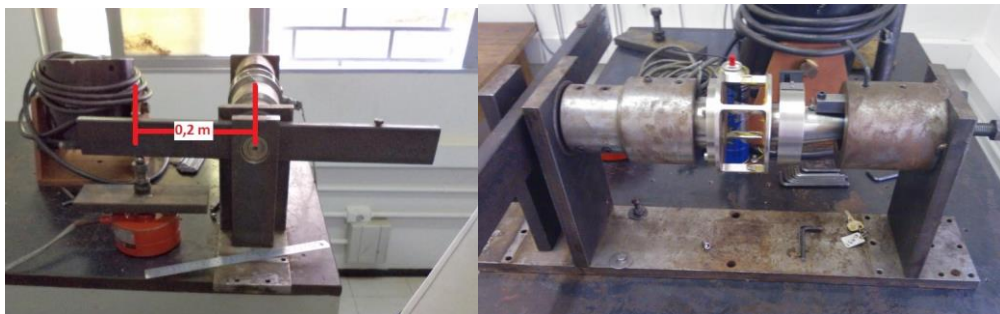


Figura 4. Distância de aplicação de torque em relação ao centro do torquímetro. Fonte: Elaborada pelo autor

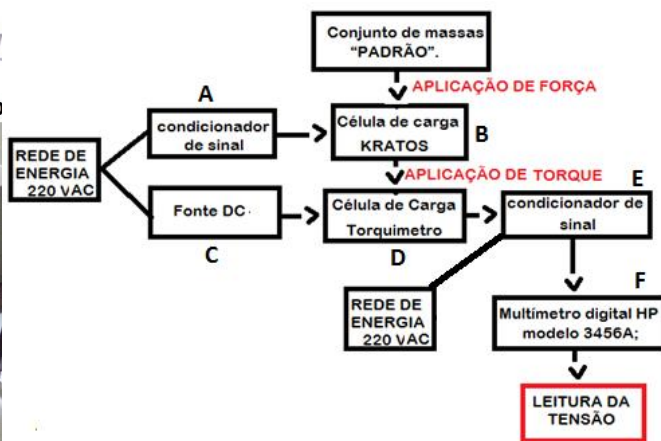
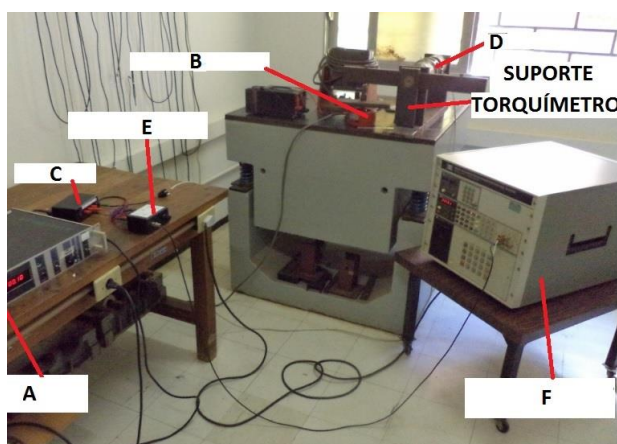


Figura 5. Esquema de interligação e montagem dos equipamentos. Fonte: Elaborada pelo autor

Todos os dados coletados nesta etapa foram processados com o auxílio do software Matlab® (GILAT, 2006) e por meio da função “regress” foi possível calcular a sensibilidade estática, o intervalo de confiança e os resíduos para valores de carga, descarga e global.

2.2. Calibração Dinâmica

Esta etapa tem por objetivo principal a calibração do torquímetro utilizando uma célula de carga piezelétrica como sistema de medição padrão. Neste tópico serão determinadas a sensibilidade dinâmica e a banda de frequência de operação do sistema de medição da célula de carga em estudo, além de explorar os métodos de estimação FRF (função de reposta em frequência) de um sistema linear para entradas estipuladas.

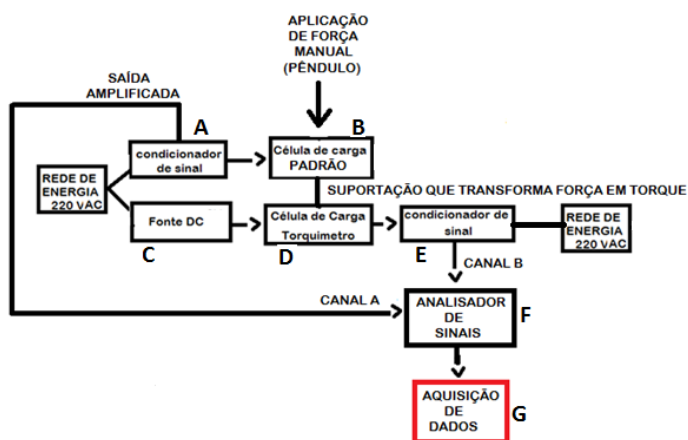
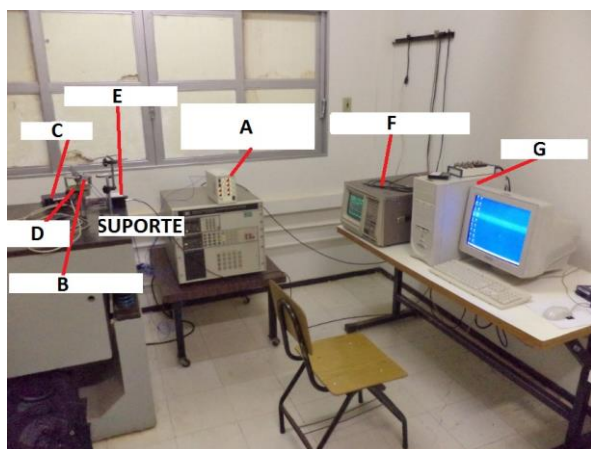


Figura 6. Fluxograma e identificação de Montagem. Fonte: Elaborada pelo autor

Para auxiliar na calibração foi utilizada uma célula de carga piezelétrica padrão da fabricante PCB PIEZOTRONICS: modelo # 208C03; serial # 27732; sensibilidade - 2,331 mV/N; incerteza 1%. O sinal da célula de

carga piezométrica padrão foi conectado ao canal A do analisador de sinais, enquanto que o sinal amplificado do torquímetro a ser calibrada foi interligado ao canal B. A saída do sistema de medição padrão foi ajustada para amplificar o sinal de saída em 10 vezes. As Figuras (6) e (7) mostram o fluxograma de interligação entre os equipamentos e as montagens realizadas. Na aplicação deste método, o sinal de ruído não terá banda e forças bem definidas, pois será gerada manualmente a aplicação da força com o auxílio de um pêndulo, como pode ser observado na Fig. (7). Nesta calibração a célula de carga padrão é definida como trigger do sistema de medição.

Para executar o cálculo da sensibilidade dinâmica conforme mostrado na Eq. (2) foram adquiridas a função transferência, fase e coerência pelo analisador de sinais para a banda de aquisição em 100 Hz. Em seguida estes dados foram processados pelo Matlab® retirando dados das extremidades (aproximadamente os 60 primeiros). Conhecendo a média e o desvio padrão, foi calculada a incerteza como mostra a Eq. (4).

$$S_d = ((100 * g/n)/0,2) \quad (2)$$

Onde:

S_d: sensibilidade dinâmica
g: soma acumulada da função transferência adquirida
n: número de pontos adquiridos

$$d = 1,96 * S/(n)^{1/2} \quad (3)$$

$$R = 100 * d/S_d \quad (4)$$

Onde:

S: Desvio padrão considerando os dados expurgados - calculado pela função “std” do Matlab®.
n: número de dados considerados considerando os dados expurgados
R: valor da incerteza em porcentagem

Neste trabalho ainda foram analisados os gráficos de densidade espectral, função de transferência, coerência e fase nas frequências de 1000 Hz, 400 Hz e 100 Hz para analisar e identificar a frequência de operação do sensor. A Densidade Espectral é considerada o estimador do espectro de potência e descreve como a energia de um sinal é distribuída em função da frequência. Para calcular a densidade espectral Eq. (6) de um espectro discreto é necessário calcular a transformada de Fourier na amostra de $x_k(t)$ Eq. (5). Logo após, deve-se calcular a média dos produtos.

Portanto, para uma amostra k do sinal no domínio do tempo $x_k(t) = \{x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n\}$, temos:

$$\hat{X}_k(\omega_k) = dt \sum_{j=0}^{n-1} x_j(t_j) e^{-j\omega_k t_j} \quad (5)$$

$$\hat{G}_n(\omega_k) = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} \hat{X}_k^* \hat{X}_k \quad (6)$$

A análise do gráfico da função de transferência Eq. (10) permite certificar em que faixa de frequência a sensibilidade dinâmica é considerada constante. Assim, a função de transferência (FFT) é a representação matemática da relação entre a saída e a entrada de um sistema. Para uma amostra k do sinal: $x_k(t) = \{x_1 \ x_2 \ x_3 \ \dots \ x_n\}$ e $y_k(t) = \{y_1 \ y_2 \ y_3 \ \dots \ y_n\}$ no domínio do tempo é necessário converter para o domínio da frequência por meio da transformada de Laplace Eq. (7). Para calcular a FFT é necessário calcular a Função Densidade Espectral Cruzada. Para tal, deve-se calcular as Transformadas de Fourier de $X_k(f)$ e $Y_k(f)$ para amostras de $x_k(t)$ e $y_k(t)$, obtidas simultaneamente, utilizando a Eq. (5) e logo após, calcular a média dos produtos $X^*k(f) Y_k(f)$, conforme mostrado nas Eq. (8) e Eq. (9).

$$x_k(t) \rightarrow X_k(f); y_k(t) \rightarrow Y_k(f) \quad (7)$$

$$\hat{G}_{xx}(f) = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} X_k^*(f) X_k(f) \quad (8)$$

$$\hat{G}_{xy}(f) = \frac{1}{n_s} \sum_{k=1}^{n_s} X_k^*(f) Y_k(f) \quad (9)$$

$$H_y(f) = H(f) = \frac{G_{xy}(f)}{G_{xx}(f)} \quad (10)$$

A $H(f)$ é uma função complexa e a fase de $H(f)$ determina a defasagem entre $x(t)$ e $y(t)$. A análise da fase permite identificar em quais frequências acontecem defasagens entre o sinal de entrada e saída do sistema de medição.

A função de coerência é definida pela Eq. (11) e mede a qualidade de um experimento. Para o valor do parâmetro coerência igual a 1 os valores da saída do sistema são completamente coerentes aos valores de entrada.

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f)G_{yy}(f)} \quad (11)$$

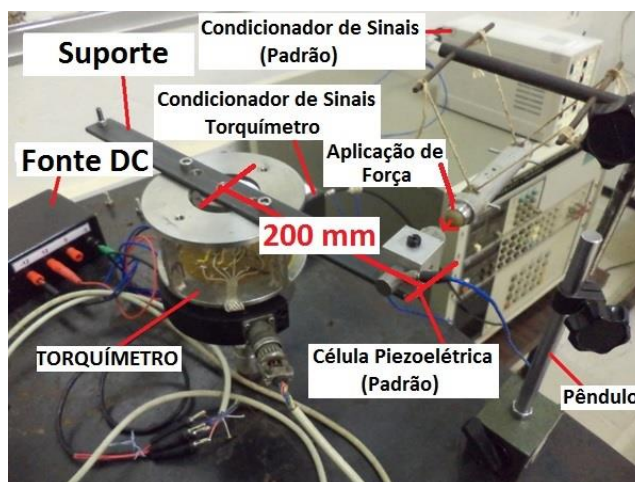


Figura 7. Visão geral da Montagem. Fonte: Elaborada pelo autor

2.2.1. Ajustes Preliminares

Primeiramente, para evitar saturações dos sinais durante a coleta dos dados foram ajustadas as escalas em amplitude dos canais A e B (Fig. (8)). O analisador de sinais foi configurado para o modo TIME; DUAL INP, 80 dB, JANELA RETANGULAR (WTG R). Desta maneira o ajuste em amplitude do Canal A (célula de carga padrão) e do Canal B (célula de carga a ser calibrada) para a captação da densidade espectral foram 0,5 V e 0,1 V, respectivamente. O ajuste em amplitude para a captação da função de transferência (FT), fase e coerência foram de 1,0 V e 20,0 V para o Canal A e Canal B, respectivamente.

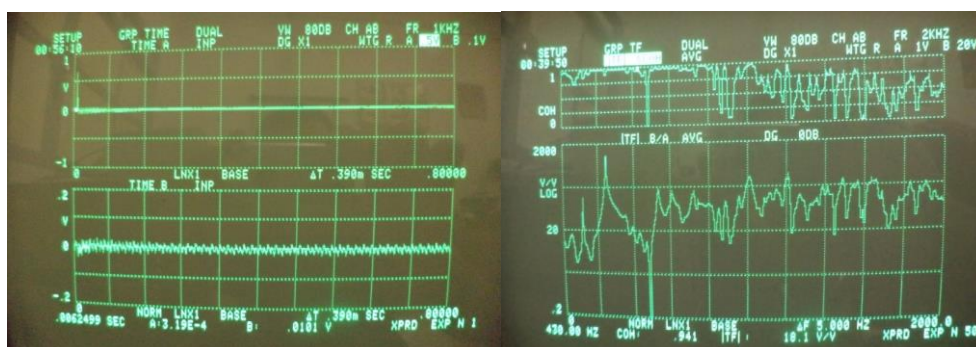


Figura 8. Fundo de escala dos sistemas de medições. Fonte: Elaborada pelo autor

Todos os resultados obtidos no analisador de sinais foram transferidos para o microcomputador, salvos em arquivos com extensão de texto (.txt) e processados com o auxílio do software Matlab®. Foram analisados sinais na banda de 1000 Hz, 400 Hz e 100 Hz.

Para captar os gráficos de densidade espectral o analisador de sinais foi configurado para o modo SPEC 2CH; com 50 médias (50 movimentos de força do pêndulo ao encontro da célula piezoelétrica padrão), janela retangular, acoplamento AC, resolução 800, escala em volts. Para captar os gráficos da função de transferência (módulo), fase e coerência o analisador de sinais deve ser ajustado no modo TF (Função Transferência), com 30 médias e Janela retangular. A banda de frequência é um parâmetro de ajuste no analisador de sinais e deve ser modificada para fundo de escala 1000 Hz, 400 Hz e 100 Hz conforme banda analisada.

3. RESULTADOS

3.1. Calibração Estática

Os dados mostrados na Tabela (1) foram processados utilizando o software Matlab®. A partir da regressão linear dos dados obteve-se a Sensibilidade de Carga, Descarga e Global.

Tabela 1. Dados Coletados e Calculados.

F [kgf]	T [Nm]	Tensão Registrada [V]	Variância Registrada [V ²]	Desvio Padrão Registrado [V]	F [kgf]	T [Nm]	Tensão Registrada [V]	Variância Registrada [V ²]	Desvio Padrão Registrado [V]
0	0,00	0,00026	2,02E-07	0,00045	100	196,20	-8,98	1,79E-06	0,0013
5	9,81	-0,35	1,77E-06	0,0013	95	186,39	-8,71	3,92E-06	0,0020
10	19,62	-0,69	9,05E-07	0,00095	90	176,58	-8,30	4,45E-06	0,0021
15	29,43	-1,01	6,07E-07	0,00078	85	166,77	-7,88	7,15E-07	0,00084
20	39,24	-1,34	9,75E-07	0,00099	80	156,96	-7,48	3,37E-06	0,0018
25	49,05	-1,68	8,93E-07	0,00094	75	147,15	-7,12	2,78E-01	0,53
30	58,86	-1,99	2,10E-06	0,0014	70	137,34	-6,73	5,05E-07	0,00071
35	68,67	-2,31	3,32E-06	0,0018	65	127,53	-6,30	1,54E-06	0,0012
40	78,48	-2,64	1,22E-06	0,0011	60	117,72	-5,94	1,30E-06	0,0011
45	88,29	-3,00	6,86E-06	0,0026	55	107,91	-5,55	3,02E-07	0,00055
50	98,10	-3,38	1,66E-05	0,0041	50	98,10	-5,16	1,85E-06	0,0014
55	107,91	-3,83	3,40E-06	0,0018	45	88,29	-4,78	9,84E-07	0,00099
60	117,72	-4,21	2,31E-05	0,0048	40	78,48	-4,40	1,90E-06	0,0014
65	127,53	-4,72	4,80E-06	0,0022	35	68,67	-4,01	5,31E-07	0,00073
70	137,34	-5,20	9,19E-06	0,0030	30	58,86	-3,67	2,39E-06	0,0015
75	147,15	-5,71	4,48E-06	0,0021	25	49,05	-3,26	2,59E-06	0,0016
80	156,96	-6,70	1,78E-07	0,00042	20	39,24	-2,89	2,27E-06	0,0015
85	166,77	-7,05	6,45E-06	0,0025	15	29,43	-2,48	2,20E-06	0,00148
90	176,58	-7,49	7,41E-06	0,0027	10	19,62	-2,07	2,94E-01	0,54
95	186,39	-8,18	5,28E-06	0,0023	5	9,81	-1,70	7,30E-07	0,00085
100	196,20	-8,98	1,79E-06	0,0013	0	0,00	-1,31	1,17E-06	0,0011

Os valores obtidos respectivamente foram $E_o = 44,95T + 604,63$ mV; $E_o = 44,95T + 604,60$ mV e $E_o = 44,95T + 604,61$ mV. Com base na resposta global a sensibilidade do torquímetro é de 44,95 mV/Nm. No intervalo de confiança de 95% tem-se a sensibilidade estática entre 41,78 mV e 48,12 mV. Portanto, a sensibilidade estática final é de 44,95 mV/Nm $\pm 7,05$ % com 95% de confiança.

A Figura (9) mostra a regressão linear para carga, descarga e resultados globais da calibração estática da célula de carga. Os resultados demonstram que o torquímetro responde linearmente e que está apto para a realização da calibração dinâmica.

Além do cálculo da sensibilidade e da calibração estática do torquímetro foram obtidos o limiar de torque aplicando cargas até a primeira variação significativa da mesma. O limiar de torque verificado para o sensor desenvolvido é de $T = 7,85$ Nm, para a tensão elétrica mensurada de 956,85 mV.

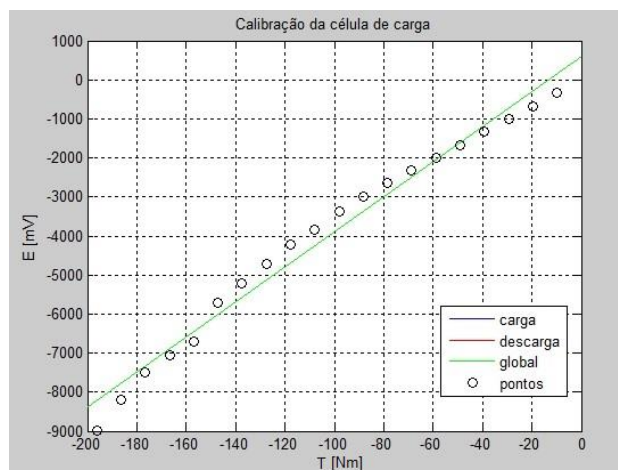
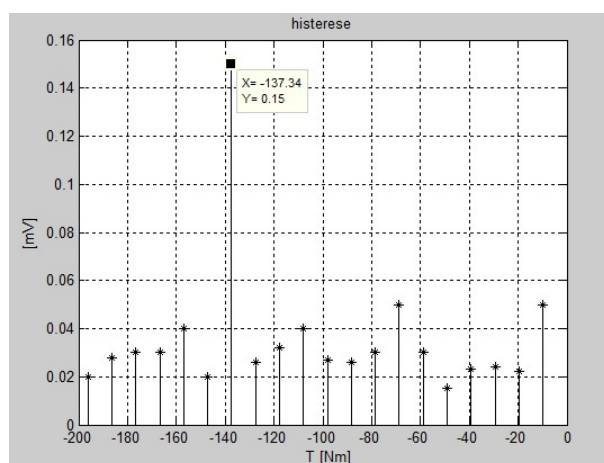
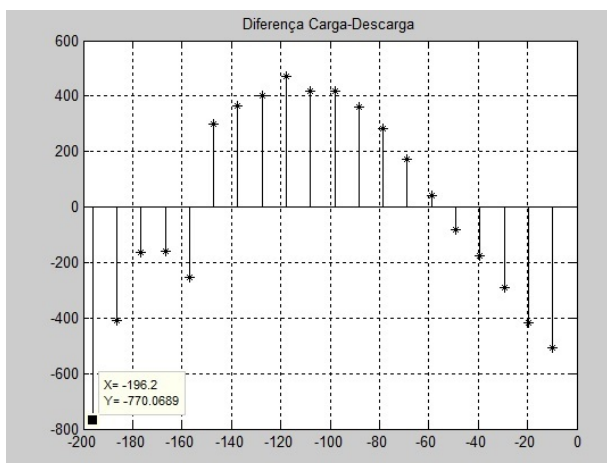


Figura 9. Reta de regressão linear do torquímetro (Calibração Estática). Fonte: Elaborada pelo autor

A Figura (10a) apresenta a histerese do experimento de calibração estática e a diferença entre os valores de carga e descarga. A curva de histerese do sistema de medição calibrado aponta o valor máximo de 0,15 mV para torque aplicado de 137,34 Nm. Já a curva de carga e descarga aponta o valor de 770,06 mV como diferença máxima de tensão elétrica para o torque aplicado de 196,20 Nm Fig. (10b).



(a)



(b)

Figura 10. Histerese do sistema (a) e Diferença entre carga e descarga (b). Fonte: Elaborada pelo autor

3.2. Calibração Dinâmica

3.2.1. Densidade Espectral para as Bandas de Frequência 1000 Hz, 400 Hz e 100 Hz

É notável na Figura (11) que a célula de carga padrão não possui comportamento linear em toda banda de frequência analisada. É observado nesta mesma figura que não se pode trabalhar com frequências próximas a 200 Hz, pois não existe periodicidade próxima a esta frequência, dada pela alta variação do sinal de densidade espectral. Na célula de carga a ser calibrada podem observar frequências problemáticas múltiplas de 60 Hz. Isso se deve a tensões induzidas pela rede elétrica e pela fonte de alimentação. Esta observação ficará mais clara analisando espectros de frequência de 0 Hz a 400 Hz e de 0 Hz a 100 Hz.

Para a banda de frequência entre 0 Hz e 1000 Hz não é possível analisar os dados com precisão, portanto, é necessário o ajuste da banda de frequência entre 0 Hz e 400 Hz. Observa-se na Figura (11) que o nível de energia do sinal do canal A é praticamente constante até 200 Hz. Observa-se também que o nível de energia do canal B é praticamente constante até 200 Hz com exceção das frequências múltiplas de 60 Hz. Para melhorar a precisão de análise ajustou-se a banda de frequência entre 0 Hz e 100 Hz. Nesta faixa de análise nota-se que o torquímetro apresenta grande variação em sua periodicidade na frequência da rede (60 Hz).

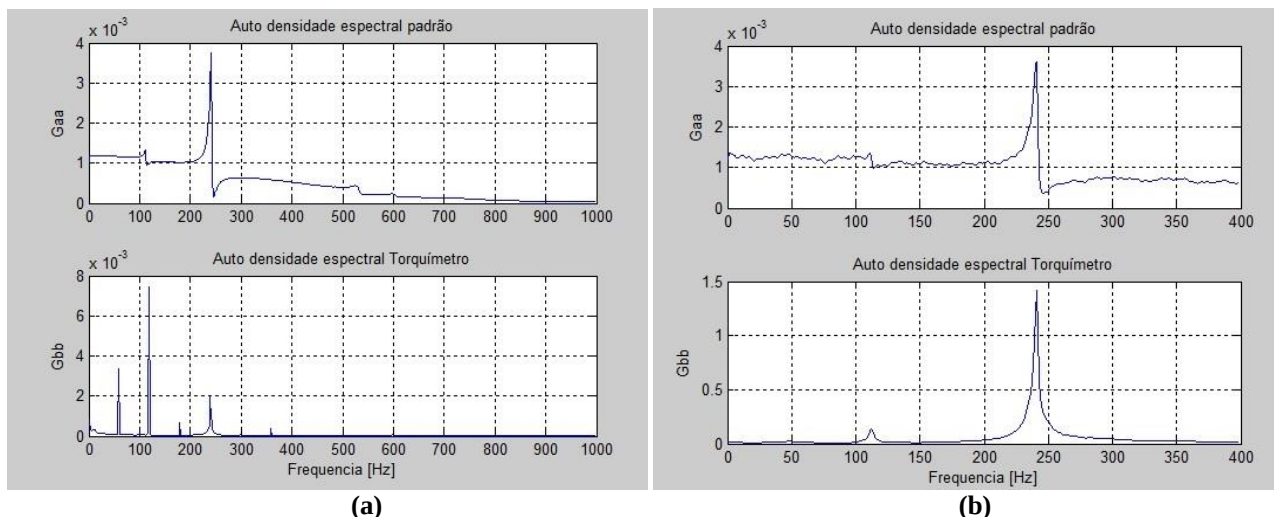


Figura 11. (a) Densidade espectral de 0 Hz a 1000 Hz; (b) 0 Hz a 400 Hz e (c) de 0 Hz a 100 Hz. Fonte: Elaborada pelo autor

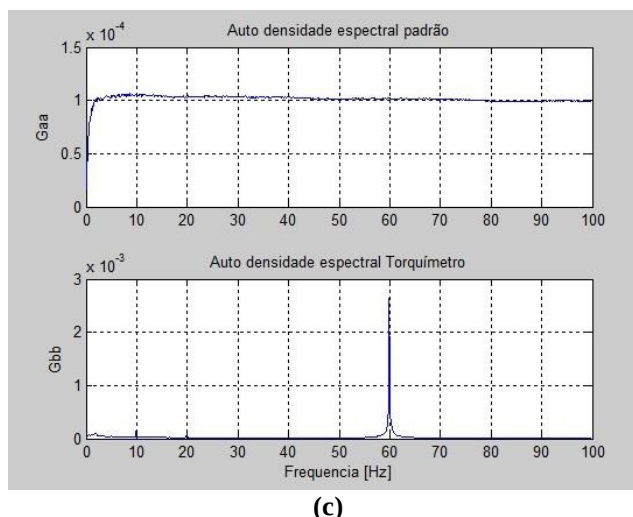


Figura 11. (a) Densidade espectral de 0 Hz a 1000 Hz; (b) 0 Hz a 400 Hz e (c) de 0 Hz a 100 Hz. Fonte: Elaborada pelo autor

3.2.2. Função de Transferência, Fase e Coerência para Bandas de Frequência 1000 Hz, 400 Hz e 100 Hz

Analisando o espectro entre 0 Hz e 1000 Hz não é possível observar com clareza as frequências em que a sensibilidade dinâmica possui comportamento linear. Não é possível determinar também nesta banda em quais pontos ou faixa a função de transferência é constante. Nesta frequência é possível observar apenas as variações nas frequências múltiplas de 60 Hz.

Ainda analisando a faixa entre 0 Hz e 1000 Hz nota-se que existe um desvio de fase considerável próximo a frequência de 250 Hz. A coerência é próxima de 0,7 com frequências até 300 Hz, exceto nas múltiplas de 60 Hz. A coerência não se aproxima de 1 porque o sinal de excitação ser gerado manualmente, ou seja, não é gerada em uma frequência constante, que seria possível com a utilização de um *shaker*. Análises mais refinadas são conseguidas observando os espectros com banda entre 0 Hz e 400 Hz ou entre 0 Hz e 100 Hz.

Analisando os gráficos (b) e (c) da Figura (12) certifica-se que a sensibilidade dinâmica é considerada constante até 100 Hz com exceção das frequências múltiplas de 60 Hz. Observa-se também que em aproximadamente 100 Hz e 250 Hz existe uma variação significativa da fase. Portanto, para a determinação da sensibilidade dinâmica é necessário analisar os resultados na banda de 100 Hz.

Nota-se na Figura (12c) que até 5 Hz o sensor não responde bem e possui uma variação de fase considerável. Utilizando a função de transferência e eliminando as frequências múltiplas de 60 Hz, foi calculada a sensibilidade dinâmica na faixa entre 5 Hz a 100 Hz. Considerando a aplicação da força a 200 mm do eixo do torquímetro, tem-se como resultado a sensibilidade dinâmica de 54,18 mV/Nm com uma incerteza expandida de 1,96 %.

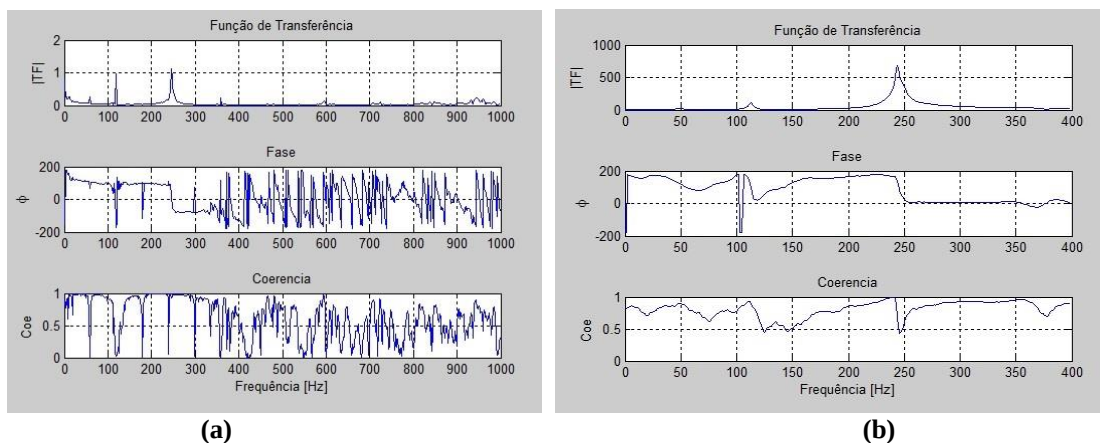


Figura 12. (a) Função de transferência (Tf), fase(ϕ) e coerência(Coe) para bandas de frequência de 0 Hz até 1000Hz; (b) 0 Hz até 400 Hz (c) e de 0 Hz até 100 Hz. Fonte: Elaborada pelo autor

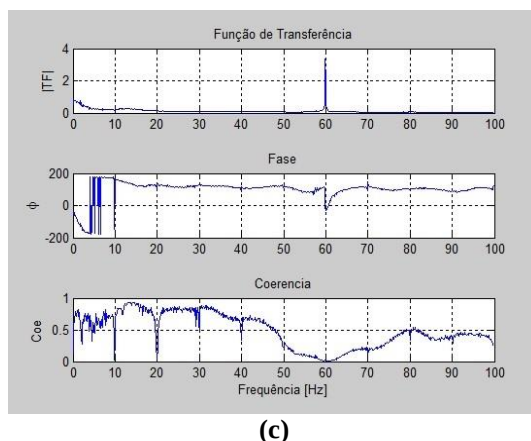


Figura 12. (a) Função de transferência (Tf), fase(ϕ) e coerência(Coe) para bandas de frequência de 0 Hz até 1000Hz; (b) 0 Hz até 400 Hz (c) e de 0 Hz até 100 Hz. Fonte: Elaborada pelo autor

4. CONCLUSÕES

Dado o exposto, conclui-se com base na análise da sensibilidade dinâmica que a faixa de operação linear do torquímetro está entre 5 Hz a 100 Hz, com exceção das frequências múltiplas de 60 Hz. O valor da sensibilidade dinâmica é de 54,18 mV/Nm com incerteza expandida de 1,96 %. Conclui-se pela calibração dinâmica que próximo a frequências 100 Hz e 250 Hz existe uma variação significativa da fase. Observa-se também que o sensor não responde bem na faixa de frequência entre 0 Hz e 5 Hz por causa da variação considerável da fase neste intervalo.

Com base na calibração estática obtém-se o valor de $Se = 44,95 \text{ mV/Nm} \pm 7,05 \%$ no intervalo de confiança 95% para a sensibilidade estática. A equação da sensibilidade global encontrada foi de $E_o = 44,95T + 604,61 \text{ mV}$. Além do mais o sensor possui o limiar de torque igual a 7,85 Nm.

Analisando os resultados estáticos e dinâmicos certifica-se que o torquímetro não apresenta suspeita de deformação plástica. Não foi possível comparar com a calibração anterior, pois, este torquímetro nunca foi calibrado. Na faixa de frequência em que o comportamento da célula é linear, a sensibilidade dinâmica tem valor próximo ao da sensibilidade estática, mas não são iguais devido à interferência da frequência de excitação, gerado manualmente, presente nos ensaios de calibração dinâmica.

Constata-se o fenômeno que acontece em equipamentos de instrumentação chamado de “drift rate”, ou seja, o sinal de saída varia enquanto os extensômetros estão em processo de aquecimento devido à passagem de corrente. Portanto, antes de começar qualquer tipo de ensaio é necessário energizar o torquímetro e aguardar aproximadamente 30 minutos. Este procedimento possui o intuito de aumentar a confiabilidade nos dados mensurados através do equilíbrio térmico entre os extensômetros, a célula de carga e o ambiente de trabalho.

5. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à Petrobras, à Fapemig, ao CNPq, ao Laprosolda/UFU, ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica e à CAPES/PROEX.

6. REFERÊNCIAS

- Gilat, A., 2006, Matlab® com aplicações em engenharia - tradução Glayson Eduardo de Figueiredo, - 2. ed. – Porto Alegre; Bookman, 360 p.
- ISO 17662, 2005, “Welding – Calibration, verification and validation of equipment used for welding, including ancillary activities”, 31p.
- Malvino, A. P., 1997, “Eletrônica”. 4ª edição, São Paulo: McGraw-Hill, 788p.
- Nascimento, L. A.; Vilarinho, L. O.; Vilarinho, L. O., 2013, Desenvolvimento de um dinamômetro para medição de esforços de torção e força axial em ensaio de depósito brasado. In: Cobef 2013, Itaipava, RJ. Desenvolvimento de um dinamômetro para medição de esforços de torção e força axial em ensaio de depósito brasado, 2013.
- NBR ISO/IEC 17025, 2005, “Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração”
- Tompkins, W. J., 1998, “Interfacing Sensors to the IBM PC”, 1ª Edição, Ed. Prentice Hall, pp. 83-94.
- Vilarinho, L. O. et al., 2005, “Otimização de Ferramentas Destruidoras de Partes de Coluna Utilizadas em Poços de Petróleo”, Relatório Técnico, Laprosolda-UFU, 125p.
- Zelenovsky, R., 1999, “Um Guia Prático de Hardware e Interfaceamento”, 2ª Edição, Ed. MZ, pp. 452-465.

7. DIREITOS AUTORAIS

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

STATIC AND DYNAMIC CALIBRATION OF A TORQUIMETER USED IN TESTS OF BRAZED DEPOSIT

Lucas Alves do Nascimento, eng.lucasalves@gmail.com¹

Louriel Oliveira Vilarinho, vilarinho@mecanica.ufu.br¹

Marcelo Braga dos Santos, mbsantos@mecanica.ufu.br¹

Francisco Paulo Léopore Neto, fplepore@mecanica.ufu.br¹

Victor Eduardo Silva Alves, victoralvesmec@gmail.com²

^{1,2} Universidade Federal de Uberlândia – Faculdade de Engenharia Mecânica, Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica Uberlândia, MG, Brasil.

Abstract. *The reliability of measurement results indicated by several instruments is fundamental in all areas of experimental development. Moreover, the calibration of these measuring instruments must be reported in a calibration certificate and must include all information requested by the customer and necessary to the interpretation of calibration results and all information required by the method. In this context, this paper presents static and dynamic calibration of a load cell constructed with strain gages (part of a load cell developed by the authors of this article), used to measure the torsional stress on test plates with substrate formed steel AISI 4340 and deposit brazed during wear testing. The main goal of this calibration is to verify the existence of response linearity (voltage x torque) and thus ensure that the sensor operates mechanically in the elastic or plastic zone. Therefore, first it is necessary to check the conditions of structural construction and operation of the existing measurement system that consists of sensors, signal conditioners and apparatus for data acquisition. After, are presented the methods used for static and dynamic calibration, and their respective results. Among the evaluated results one can name the static load sensitivity, static discharge sensitivity, static global sensitivity, threshold of the torque, static hysteresis curves of the system, load curves and static discharge, dynamic sensitivity and analysis of the frequency of operation. For the analysis of frequency operation are presented transfers functions, phase deviation, coherence and self-spectral density are out lined.*

Keywords: Load Cell, dynamic calibration, static calibration, strain gage.

1. RESPONSIBILITY NOTICE

The authors are the only responsible for the printed material included in this paper.