

PROTÓTIPO DE UM NOVO CONCEITO DE PADRÃO PRIMÁRIO DE TORQUE - PRIMEIROS RESULTADOS

PROTOTYPE OF A NEW CONCEPT OF PRIMARY STANDARD TORQUE - FIRST RESULTS

G. M. Taccola¹, R. J. Leão²

¹Laboratório de Metrologia Mecânica, Instituto de Pesquisas Tecnológicas de São Paulo.

²Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais



RESUMO

O presente artigo aborda a fabricação, montagem e testes de um protótipo para calibração de transdutores de torque por um método inovador e recém-patenteado. Diferentemente dos métodos mais utilizados atualmente, onde o torque é alterado através da variação da força ou da variação da distância através de alavancas deslizantes, este novo conceito utiliza a variação angular do braço de reação para a alteração do torque. Tal conceito visa superar algumas limitações, tais como o grande esforço físico do técnico, dificuldades na automação do processo, necessidade de desmontagem do transdutor para a alteração do sentido de aplicação e a limitação à aplicação de pontos de calibração discretos. Tudo isso, mantendo valores de incerteza adequados e aceitáveis para as aplicações dos transdutores de torque atuais.

ABSTRACT

This article deals with the manufacture, assembly and test of a new primary torque standard concept recently patented. Unlike the methods most currently used, where the torque is changed by varying the applied mass or the length of the reaction arm, this new concept is based on the angular variation of the reaction arm. This concept aims to overcome some limitations of the current technology, such as the great physical effort that the technician has to apply, difficulties in the automation of the calibration sequence, the need for the removal and reinstallation of the transducer for changing the torque direction and to allow continuous calibration. The new standard intend to put together all these features while maintaining adequate and acceptable uncertainty values.

Palavras-chave: Torque / Transdutores de torque / Padrão de calibração / Calibração contínua

1. INTRODUÇÃO

O conceito mais difundido para a realização da grandeza torque é o da utilização de um braço de reação de comprimento calibrado, apoiado na posição horizontal, associado à aplicação de artefatos de massas calibradas em sua extremidade [6-8]. A variação da massa

aplicada resulta em diferentes valores de torque no eixo do padrão primário. Outro método bastante utilizado é a alteração da distância (através de alavancas deslizantes). Desta forma as massas não são alteradas.

Nos dois casos a aplicação é realizada de tal forma que o vetor força fique perpendicular ao vetor distância. Portanto, o torque

será função apenas da massa, da aceleração gravitacional e do comprimento do braço.

A incerteza relativa expandida desse tipo de equipamento varia entre 0,02 % e 0,1 %, conforme relatado em diversos trabalhos [1, 2]. Equipamentos automáticos vêm sendo desenvolvidos, de forma a minimizar a influência do operador durante a calibração de transdutores de torque, bem como aumentar a repetitividade da medição.

A avaliação da incerteza de medição em metrologia de torque é bem estudada na literatura [3, 4], e diversos trabalhos centralizam seus esforços na minimização de fatores críticos que compõem a incerteza final.

Apesar do sucesso na implementação de padrões primários de torque ao redor do mundo [5-8], diversos limitantes na calibração de transdutores de torque ainda existem, tais como o grande esforço físico do operador (devido à colocação e remoção das massas), dificuldades na automação do processo e a necessidade de desmontagem do transdutor (em alguns casos) para a alteração do sentido de aplicação. Além disso, as principais aplicações de transdutores de torque na indústria e na pesquisa preveem a sua utilização contínua. Atualmente a calibração de transdutores de torque é limitada à aplicação de pontos de calibração discretos, e muitas vezes sofre de uma falta de continuidade na rampa de crescimento dos valores aplicados, pois algumas das soluções atuais necessitam da troca de massas aplicadas e uma redução intermediária nos valores de torque.

Um conceito inovador de padrão primário foi proposto recentemente [9], no qual a realização da grandeza torque é obtida através da variação angular de um braço de reação. Estudos mostram que uma incerteza competitiva com os conceitos atuais poderá ser obtida [10], além de propiciar a solução para os problemas supracitados encontrados quando do uso da tecnologia atual.

Desta forma, um protótipo piloto do novo conceito de padrão primário foi desenvolvido com o intuito de validar a ideia proposta anteriormente.

2. CONSTRUÇÃO

O protótipo, figura 1, foi construído a partir de tubos de aço SAE 1020 com um eixo central para apoio e posicionamento dos rolamentos e dois eixos nas extremidades, um para posicionamento da massa e o outro para contrapeso.

Em um lado, o eixo central foi usinado em formato sextavado para o devido acoplamento no transdutor de torque. No lado oposto, foi executada uma furação longitudinal com um furo roscado transversal para encaixe do transdutor de deslocamento angular.

Os eixos das extremidades são posicionados e encaixados de tal forma que se permita que o vetor força permaneça sempre na vertical.



Fig. 1 – Construção do protótipo

3. MONTAGEM

No eixo central foram utilizados rolamentos rígidos de esferas. Os rolamentos foram apoiados sobre mancais fabricados de forma a evitar o aperto dos rolamentos e o consequente aumento do atrito dos mesmos. Os apoios foram calçados e nivelados transversalmente com um nível de bolha de precisão, figura 2.



Fig. 2 – Nivelamento transversal

Neste protótipo, figura 3, a rotação foi realizada de forma manual. Para isto o transdutor de torque foi preso a uma placa divisora com o auxílio de um dispositivo cilíndrico. O acoplamento do transdutor de torque no eixo central foi realizado através de um soquete padronizado. Foi necessário prender a placa divisora em uma base fixa de modo a evitar escorregamentos devido ao esforço empregado ao sistema. O transdutor de ângulo foi preso ao eixo central no lado oposto ao transdutor de torque, figura 4.



Fig. 3 – Protótipo montado

4. VERIFICAÇÕES

Devido ao atrito estático característico apresentado pelos rolamentos, foi necessário realizar algumas verificações de atrito para as devidas correções. O sistema foi balanceado com diversos pesos na extremidade. Para cada uma das forças balanceadas foi incrementado massas baixas até a constatação do desbalanceamento do sistema com o auxílio de um nível eletrônico (momento em que o atrito é superado). A diferença das massas foi considerada como sendo o valor do atrito do rolamento a ser corrigido quando o mesmo estava submetido àquela força [11].

Foi realizada uma verificação de carga central para avaliação de uma componente de incerteza. Com a carga aplicada em um determinado ângulo, o indicador do transdutor de torque foi “zerado”. Em seguida, a carga foi deslocada para a direita e para a esquerda (reajustando o ângulo) e as diferenças (devido à descentralização da carga) foram anotadas.

5. CALIBRAÇÃO

Para a determinação do torque, é necessário conhecermos o comprimento efeti-

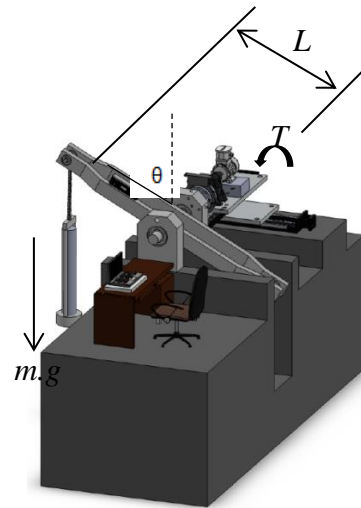


Fig. 4 – Desenho esquemático do protótipo

vo do braço de reação, o valor da massa aplicada, a aceleração gravitacional local e o ângulo do braço de reação.

Para a distância do eixo de apoio nos mancais até os eixos extremos do braço (identificados como eixo A e eixo B), obteve-se um resultado de 501,316 mm +/- 0,16 mm (eixo A) e de 501,632 mm +/- 0,032 mm (eixo B), conforme relatório 19 406-204. Apesar de ter sido utilizado o mesmo sistema de calibração, a incerteza de medição do eixo A ficou consideravelmente maior que a do eixo B. Isso se deve à contribuição do próprio mensurando (erros de forma). Para a aplicação de força foi escolhido o eixo do lado B devido à uniformidade apresentada neste eixo.

A massa utilizada foi ajustada e calibrada para um valor próximo de 100 N.m com o sistema na posição horizontal (90°). Portanto a massa utilizada foi de 20,334968 kg +/- 0,000073 kg conforme relatório 19 405-204.

Os testes e análises ocorreram no laboratório de metrologia mecânica do Instituto de Pesquisas Tecnológicas. A aceleração gravitacional no campus vale 9,7864304 m/s² +/- 0,00000012 m/s², determinada pelo Observatório Nacional conforme certificado 02/2013.

No momento da calibração, a variação do ângulo foi medida através de um transdutor de ângulo eletrônico preso ao eixo central (no lado oposto ao transdutor). Tal instrumento foi

calibrado pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas conforme certificado 143 407-101 contendo uma incerteza de $0,005^\circ$.

Os instrumentos e equipamentos ficaram estabilizando (ligados) durante 5 horas à 20°C . Foram realizados os ensaios de fluência e de pré-carga, figura 5, submetendo o transdutor de torque ao valor máximo requerido (100 N.m). Os instrumentos foram “zerados” com o braço na posição vertical (0°) e em seguida o sistema foi levado até a posição horizontal (90°) após 30 s o sistema foi levado a sua posição inicial. O processo foi repetido por três vezes (ensaio de pré-carga) e após a terceira vez foi verificada a fluência no indicador (ensaio de fluência) conforme norma ABNT NBR 12240.

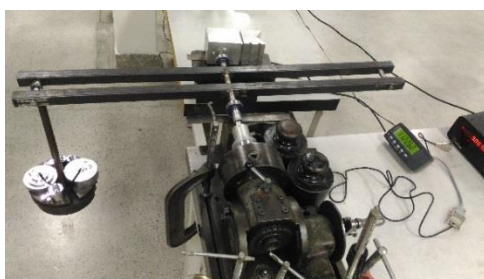


Fig. 5 – Realização do ensaio de pré-carga

Para o início do processo de calibração, figura 6, sem aplicação alguma de força, o braço foi nivelado com um nível de bolha e o transdutor de deslocamento angular foi “zerado”. Em seguida o braço foi levado até a posição vertical e os transdutores (de torque e de ângulo) foram “zerados”.

Devido ao espaço entre os tubos (que não permitia a passagem dos pesos pelo meio), o braço foi levado até uma posição em torno de 17° para a colocação das massas. Após a colocação das massas o braço foi colocado em cada posição de ângulo referente ao torque requerido até o ângulo de 90° (torque máximo requerido).

Foi realizada uma série de medição no sentido crescente. A segunda série de medição foi realizada no sentido crescente e decrescente sem alteração na posição de montagem do transdutor.

A terceira e a quarta série de medição foram realizadas no sentido crescente e decres-



Fig. 6 – Realização da calibração

cente após um giro do transdutor de 90° e de 180° respectivamente (de modo que os dispositivos e soquetes sofressem esforços em locais diferentes) conforme norma ABNT NBR 12240.

Antes de cada série de medição o processo de nivelamento com o nível de bolha foi realizado novamente para minimizar erros acumulados de zero [12].

Devido à dificuldade de posicionamento manual dos ângulos, os mesmos foram aproximados em cada ponto de calibração (não sendo os mesmos em todas as séries), sempre dentro de $\pm 0,065^\circ$. Tais diferenças serão corrigidas por métodos de cálculos numéricos. Todos os resultados e valores foram anotados para as devidas avaliações, correções e análises.

6. RESULTADOS

Na tabela 1 seguem os resultados obtidos na análise do atrito dos rolamentos submetidos em diferentes cargas. Estes resultados serão utilizados para correção dos resultados obtidos na calibração.

Tabela 1 - Análise do atrito dos rolamentos

Carga aplicada (N)	Força de Atrito (N)
0	0,0097864
4,8932152	0,0117437
9,7864304	0,0195729
48,932152	0,0391457
107,6507344	0,0489322
146,796456	0,0489322
205,5150384	0,0489322

Na tabela 2 estão os resultados obtidos no teste de carga central. Estes resultados serão usados numa das componentes de incerteza.

A tabela 3 apresenta os valores de calibração do transdutor de torque pelo método convencional (variação da força) extraídos do certificado 152 813-101. Como o instrumento apresentava valores em mV/V, foi utilizada a curva de calibração apresentada no certificado, para a conversão dos resultados em N.m e uma comparação mais prática e adequada dos dois métodos.

A tabela 4 mostra os resultados da calibração pelo método proposto (através da variação angular).

Tabela 2 - Teste de carga central

Ângulo (°)	Aplicação no centro (N.m)	Aplicação na esquerda (N.m)	Aplicação na direita (N.m)	Aplicação no centro (N.m)
45	0	0,0798292	0	-0,17348694
90	0	0,0393949	0,0626001	0,19038489

Tabela 3 - Calibração do transdutor de torque - Método Convencional

Torque aplicado (N.m)	Indicação no instrumento (N.m)	U (N.m)	k	v _{eff}
40	39,1431	0,2	2	∞
50	48,9421	0,25	2	∞
60	58,7067	0,31	2	∞
70	68,5032	0,38	2	∞
80	78,2967	0,43	2	∞
90	88,0863	0,47	2	∞
100	97,8580	0,51	2	∞

Tabela 4 – Calibração do transdutor de torque - Método Proposto

Torque aplicado (N.m)	Indicação no instrumento (N.m)	U (N.m)	k	v _{eff}
40	39,403	0,26	2	∞
50	49,169	0,33	2	∞
60	59,058	0,19	2	∞
70	68,931	0,37	2	∞
80	78,824	0,41	2	∞
90	88,472	0,61	2	∞
100	97,800	0,82	2	∞

Finalmente na tabela 5 comparamos os dois resultados de calibração (método convencional e método proposto) com a análise estatística de erro normalizado.

Tabela 5 – Comparação dos métodos

Torque aplicado (N.m)	Erro Normalizado
40	0,79
50	0,55
60	0,97
70	0,80
80	0,88
90	0,50
100	0,06

7. ANÁLISE

Dentre os fatores importantes a serem analisados estão: a qualidade do rolamento, o tipo de aço das barras, o sistema de rotação do conjunto, a qualidade das medições da massa, distância e aceleração gravitacional e, o mais importante, o método de medição do ângulo.

O equipamento deve ser construído com rolamentos adequados e com o atrito coerente ao desejado e/ou realizar um levantamento adequado da curva de atrito para as devidas correções.

O material utilizado na estrutura do braço de reação, bem como seu desenho, deve ser de maneira que evitem a flexão das barras [13]. O sistema de rotação do conjunto pode ser manual ou automático. No caso do protótipo, que foi optado por uma rotação manual com o auxílio de uma placa divisora, o sistema não apresentou uma movimentação suave (possivelmente devido à precisão das engrenagens da placa), o que dificultou a estabilização dos pontos de calibração. No entanto, com um pouco de prática foi possível realizar o posicionamento manual nos ângulos (aproximados) requeridos. Caso a necessidade seja para uma opção mais precisa e exata, seria mais adequado um sistema de rotação automático, realizado com o auxílio de um motor e um redutor de

velocidade adequados e bem dimensionados para evitar os “choques” e facilitar o posicionamento.

Novos protótipos deverão possuir sistemas de movimentação e giro do transdutor de torque, de apoio dos mancais e de apoio do transdutor de ângulo de forma independente, para diminuição de possíveis efeitos de vibrações (principalmente se houver um sistema automático utilizando um motor elétrico).

A medição da massa, da distância e da aceleração deve ser realizada com uma incerteza adequada às necessidades da utilização do equipamento.

O eixo central foi confeccionado para maior facilidade do alinhamento nos rolamentos. Isso pode ser um fator de dificuldade para passagem do peso entre as barras, já que se perde um espaço considerável.

O método de medição do ângulo deve atender o requerido pelo instrumento. Esta é a parte do projeto que melhor precisa ser analisada, pois é o ponto do equipamento que possui o maior custo em relação à exatidão e a precisão desejada.

Além dos cuidados mencionados acima e de outros comumente conhecidos (temperatura, estabilização etc.) é necessária a adequada atenção para que o eixo do transdutor de ângulo não escorregue no eixo central causando um erro na medição (se este for o método de medição de ângulo).

8. DISCUSSÃO

Diversas configurações e métodos para a aplicação do conceito do novo padrão podem ser vislumbradas, sendo que o custo do projeto dependerá diretamente da exatidão e da precisão exigidas.

O sistema de rotação pode ser realizado através de métodos manuais com placas divisoras ou sistemas de rotação por catracas ou pode ser realizado por métodos automatizados com motor elétrico, redutor de velocidade e software de controlos adequados.

É interessante também que se tenha uma gama de pesos, para substituição depen-

dendo da capacidade de cada transdutor, inclusive sendo possível reduzir a faixa de trabalho angular do braço se for julgado mais adequado. Neste aspecto é interessante que o braço possua um vão maior para um bom aproveitamento do espaço entre os tubos, de preferência sem o eixo central passando no meio.

A medição do ângulo pode ser realizada por meio de níveis eletrônicos (método de menor custo e menor precisão), pela utilização de teodolitos ou por triangulação, medindo a distância variável com um laser interferométrico (método de maior custo e maior exatidão), conforme mostrado na figura 7.

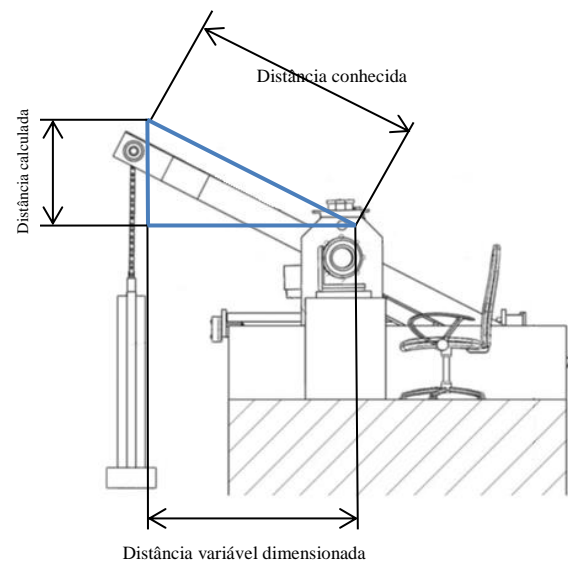


Fig. 7 – Outra possibilidade de medição de ângulo

9. CONCLUSÃO

O sistema mostrou ser solução para os problemas de não linearidade dos transdutores de torque, atendendo melhor o item 5.4.5 da norma ABNT NBR 12240 que diz que “o intervalo de tempo entre dois valores consecutivos de torque deve, na medida do possível, ser o mesmo”. Além disso, a estabilização dos valores foi adequada para os instrumentos utilizados ($0,001^\circ$ no transdutor de ângulo e $0,00001$ mV/V no transdutor de torque).

O sistema possibilita também, a calibração de forma contínua (prevista no item 5.4.1 da norma ABNT NBR 12240), desde que todos os indicadores (ângulo e torque) possuam velocidades de resposta compatíveis [14].

Devido à dificuldade de estabilização, não foi possível dimensionar o tempo de calibração para validar as expectativas apresentadas em outro estudo [10].

Outra vantagem percebida neste trabalho foi a flexibilidade de montagens e configurações possíveis para a utilização do conceito, já que poderia ser verificado o melhor custo x benefício para a necessidade do usuário.

Com os testes e resultados obtidos foi possível constatar que o conceito patenteado é funcional e extremamente adequado para as exigências de calibração de transdutores de torque atualmente, apresentando inclusive resultados compatíveis com o método convencional atual. O que irá diferenciar o nível e classe de transdutores de torque a serem atendidos será a disponibilidade para custear o sistema, principalmente o de medição da variação angular e o de rotação (automática ou manual).

REFERÊNCIAS

- [1] Park Y, Kim M and Kang D 2007 Meas. Sci. Technol 18 3273–3278
- [2] Röske, D 2014 Metrologia 51 87–96
- [3] Zhimin Z, Yue Z, Bin G, Feng M, Tao L, Honglei J and Ming D 2009 Proceedings of the IMEKO World Congress 339-342
- [4] Atsuhiko N, Koji O and Kazunaga U 2014 Measurement 49 77–90
- [5] Atsuhiko N, Koji O and Kazunaga U 2015 Measurement 61 1–8
- [6] Koji O, Takashi O, Kazunaga U and Furuta E 2002 “Design and development of 20 kNm deadweight torque standard machine” Proceedings of the IMEKO World Congress
- [7] Zhimin Z, Yue Z, Bin G, Feng M, Tao L, Honglei J and Ming D 2009 Proceedings of the IMEKO World Congress 339-342
- [8] Park Y, Kim M and Kang D 2007 Meas. Sci. Technol 18 3273–3278
- [9] Taccola G and Leão R 2013 Instituto Nacional da Propriedade Industrial BR1020130327786
- [10] Taccola G and Leão R 2015 Congresso Brasileiro de Metrologia 515-518
- [11] Caldas H and Magalhães M Cad.Cat.Ens.Fís., v.17, n.3: p.257-269, dez.2000
- [12] Dantas A 2007 Dissertação submetida à Universidade Federal do Rio Grande do Norte
- [13] Fruchtengarten J 2005 Dissertação submetida à Universidade de São Paulo Sobre a Flambagem de Vigas de Aço por meio da Utilização de uma Teoria Não-Linear Geometricamente Exata.
- [14] Filho H 2015 Revista Banas Qualidade A Calibração de Dispositivos para Medição de Torque Estático