

# CALIBRAÇÃO DE UMA CÉLULA DE CARGA PARA A DETERMINAÇÃO DA FORÇA DE ATRITO PARA UM TRIBÔMETRO COM PRINCÍPIO ROTATIVO

Artur Cavaler Quarezemin, arturcavalere@hotmail.com.

Patrik Neves, patrik.neves@hotmail.com

Richard de Medeiros Castro, richard.castro@satc.edu.br.

Elvys Isaias Mercado Curi, elvys.curi@satc.edu.br.

Departamento de Engenharia Mecânica - Faculdade SATC, Pascoal Meller, 73, Criciúma/SC, Brasil.

**RESUMO:** As medições da força e do coeficiente de atrito podem ser determinados por vários tipos de equipamentos denominados Tribômetros. No projeto e na concepção de qualquer parte de uma máquina, as características de atrito devem ser conhecidas, pois quaisquer mudanças das forças entre partes deslizantes podem afetar o funcionamento desses componentes. O objetivo desse artigo é realizar a calibração de uma célula de carga de tração, com o intuito de obter resultados confiáveis para a medição do coeficiente de atrito durante a utilização de um Tribômetro. O processo de calibração foi realizado mediante a inserção de pesos padrões com valores verdadeiros convencionais conhecidos, obtendo-se respostas na direção tangencial, correspondente aos valores da força de atrito. Os valores obtidos na calibração correlacionam como uma resposta linear, criando-se uma reta de correlação da tensão elétrica obtida da célula de carga, com a força medida na direção do atrito.

**PALAVRAS-CHAVE:** Calibração, Tribômetro, Atrito

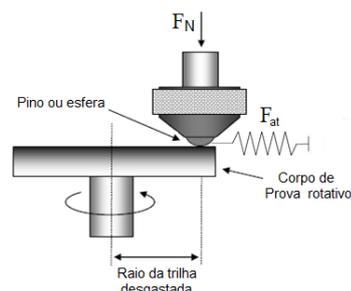
**ABSTRACT:** The measurements of force and friction coefficient can be determined by several types of equipment called Tribometers. In the design and conception of any part of a machine, the friction characteristics should be known, because any change of forces between sliding parts may affect the operation of these components. The aim of this paper is to perform the calibration of load cell traction, to obtain reliable results when measuring the coefficient of friction using a Tribometer. The calibration process was performed by inserting standard weights with known conventional true values, obtaining responses in the tangential direction, corresponding to the values of the frictional force. The values obtained in calibration correlate as a linear response, creating a straight correlation of voltage obtained from the load cell to measure the force in the direction of friction.

**KEYWORDS:** Calibration, Tribometer, Friction

## INTRODUÇÃO

Como forma de estudo dos fenômenos resultantes das interações de superfícies, a ASTM American Society for Testing and Materials apresenta o método chamado “Pino sobre Disco”. Utiliza-se de dois corpos de prova um em forma de pino, ou esfera, e outro em forma de um disco fino. A máquina que realiza o ensaio é denominada de Tribômetro, essa é capaz de quantificar a perda de massa, de volume e o coeficiente de atrito entre os dois materiais que estarão em deslizamento, nesse caso específico, em rotação. Essa máquina é utilizada para ensaios de desgaste abrasivo e atrito por escorregamento, com ou sem lubrificação para diferentes materiais. O coeficiente de atrito é medido aplicando uma força normal com valor conhecido e medindo-se a força de atrito através de uma célula de carga (ASM, 1992). A norma ASTM G99 (2004) diferentemente de muitas outras relativas ao desgaste, não determina quais tecnologias de automação deverão ser implementadas para a realização do ensaio e aquisição dos resultados, entretanto, esse artigo destina-se aos testes iniciais que foram realizados para a fabricação de um tribômetro. Basicamente esse dispositivo consiste em rotacionar o disco ou fazer movimentos circulares com o pino para que haja um

movimento discordante entre o pino e o disco. Ao final do ensaio obtém-se uma superfície com uma trilha circular no disco. A Fig. (1) ilustra o funcionamento teórico do dispositivo.



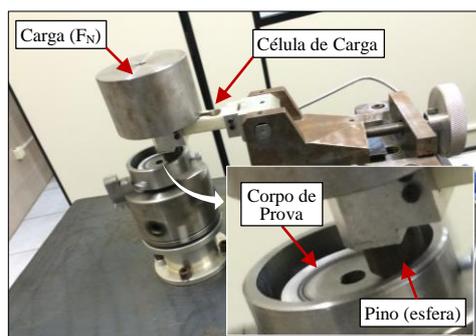
**Figura 1.** Esquema do dispositivo pino sobre disco (ASTM G-99, 2004)

Antes de realizar um ensaio em um tribômetro, assim como em qualquer outra máquina de ensaios que utilizem sensores para medição de alguma grandeza, é necessário que sua funcionalidade e confiabilidade sejam verificadas, sendo essas características metrológicas atendidas inicialmente pelo processo de calibração do sensor. A calibração é um conjunto de operações que estabelece, sob condições específicas, a

relação entre valores indicados por um instrumento de medição ou um sistema de medição, e os valores correspondentes das grandezas estabelecidas por padrões. O sensor presente na bancada pino sobre disco é uma célula de carga fabricada pelo princípio de extensometria (*strain gage*), onde a tensão elétrica varia de forma proporcional em relação a sua deformação elástica (Cappa *et al.*, 1996). Neste trabalho foram impostas forças conhecidas atuando na célula de carga, de modo similar à força de atrito que seria medida durante um ensaio, e através desse método foi possível e criar uma curva de correlação que dê sua equivalência nas medidas de força.

## METODOLOGIA

O procedimento experimental deste trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Vibrações e Tribologia (LAVITRI), do departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade SATC, seguindo os procedimentos padrões para o ensaio de desgaste pino sobre disco, de acordo com a norma ASTM G99-04. Na Fig. (1) é apresentado o Tribômetro em desenvolvimento.



**Figura 2.** Equipamento pino sobre disco em processo de desenvolvimento.

Como não é possível medir a força na célula de carga diretamente, foi utilizado o método de medida indireta (Abertazzi e Sousa, 2008), usando como referência os pesos padrões, portanto a calibração da célula de carga realiza-se com a medida da grandeza da tensão elétrica que provém da saída da resistência do extensômetro, a qual é coletada por uma placa de aquisição de dados com conversor A/D (análogo/digital). Após a coleta de dados de tensão elétrica, estes são analisados e convertidos em força (N), suportadas com os valores verdadeiros convencionais (VVC) dos pesos padrão, criando uma reta de tendência correlacionando as duas grandezas.

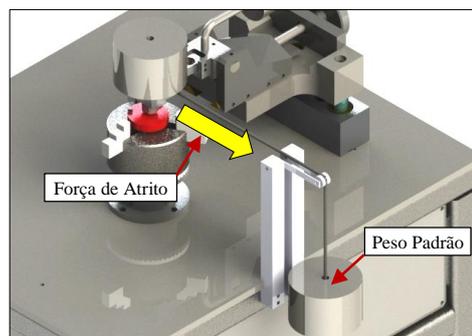
### Procedimento experimental

Materiais utilizados:

- Bancada pino sobre disco com célula de carga do tipo strain gage (extensômetro);
- Placa de aquisição de dados;
- Multímetro;

- Balança com 2 casas decimais de precisão;
- Inversor de Frequência;
- Notebook com softwares para aquisição e análise de dados;
- Bateria para alimentação da placa de aquisição de dados.

Para correlacionar tensão elétrica e força, foi aplicado diferentes cargas com pesos padrões variando de 0 a 3 Kg conforme a Fig. (2) sendo a faixa de trabalho da célula de carga para simular a força de atrito e medidos os sinais resposta de tensão elétrica em mV. Foi também realizado uma calibração com o pino sob ação de um carregamento de 30 N, que é o limite de sensibilidade da célula de carga.



**Figura 2.** Desenho esquemático da aplicação de forças para calibração.

Foi medido e coletado os sinais durante o carregamento e o descarregamento, para analisar o efeito de histerese – tendência do sistema de conservar suas propriedades na ausência do estímulo que as gerou. Para captar a tensão elétrica decorrente da deformação da célula de carga, foi usado uma placa de aquisição de dados. A célula de carga é alimentada por uma bateria de 8,29 V. Essa placa era ligada a um notebook com um software instalado para captar os sinais de medição contínua da tensão elétrica. O sinal adquirido pelo sistema placa software apresentava presença de ruído elétrico e para eliminá-lo foi necessário transferir os sinais do domínio do tempo para domínio da frequência com a transformada de Fourier, filtrar o sinal e transferi-lo de volta para o domínio do tempo usando a transformada inversa de Fourier. Além disso também foi medido a tensão elétrica da placa em cada etapa de carregamento e descarregamento com um multímetro que não tem interferência do ruído elétrico, para comparar com as medidas do software e analisar se havia uma coerência entre as medidas adquiridas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi inicialmente medido os sinais apenas com o peso do suporte para colocação dos pesos padrões e em seguida adicionado os pesos até o limite da célula de carga e então os pesos foram sendo retirados. Cada etapa foi analisada durante 1 minuto.

**Tabela 1.** Correlação de tensão elétrica x massa, sem carregamento sobre o pino

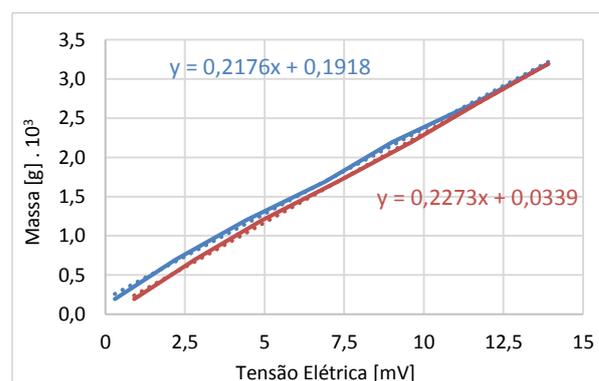
Aumento			
Medições	Massa [g]	Tensão [mV]	
		Multímetro	Software
1ª	194,48	0,3	0,8
2ª	194,48	0,3	0,8
3ª	694,11	2,2	2,6
4ª	1193,71	4,4	4,9
5ª	1693,32	6,9	7,3
6ª	2192,95	9	9,5
7ª	2692,61	11,6	12,0
8ª	3192,62	13,9	14,4
Decréscimo			
Medições	Massa [g]	Tensão [mV]	
		Multímetro	Software
9ª	3192,62	13,9	14,4
10ª	2692,61	11,7	12,1
11ª	2192,95	9,6	10,0
12ª	1693,32	7,3	7,8
13ª	1193,71	4,9	5,3
14ª	694,11	2,8	3,3
15ª	194,48	0,9	1,4
16ª	194,48	0,9	1,3

**Tabela 2.** Correlação de tensão elétrica x massa, com carregamento de 3 kg sobre o pino

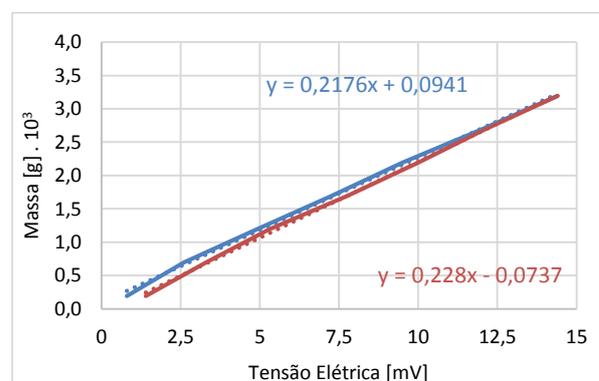
Aumento			
Medições	Massa [g]	Tensão [mV]	
		Multímetro	Software
1ª	194,48	0,1	0,4
2ª	194,48	0,1	0,4
3ª	694,11	0,5	1,0
4ª	1193,71	1,0	1,5
5ª	1693,32	1,5	2,1
6ª	2192,95	2,0	2,5
7ª	2692,61	2,6	3,1
8ª	3192,62	6,8	7,2
Decréscimo			
Medições	Massa [g]	Tensão [mV]	
		Multímetro	Software
9ª	3192,62	6,8	7,2
10ª	2692,61	6,3	6,7
11ª	2192,95	5,7	6,2
12ª	1693,32	5,2	5,6
13ª	1193,71	4,3	4,8
14ª	694,11	3,7	4,1
15ª	194,48	3,1	3,6
16ª	194,48	3,1	3,6

Nas duas primeiras medições (1ª e 2ª) e nas últimas (15ª e 16ª) apresentadas na Tab. (1) e (2), foram medidos os sinais sem nenhum peso padrão adicionado ao suporte, sendo que na 1ª e na 16ª medição o inversor

de frequência encontrava-se desconectado da rede elétrica, entretanto, na 2ª e na 15ª medição o mesmo estava conectado na rede, sem funcionar o motor. O objetivo foi verificar a influencia do campo magnético sobre a aquisição dos dados do sistema de medição. Notou-se através das medições com o software, que o campo magnético produzido pelo inversor de frequência foi significativo, mesmo com os cabos blindados do sistema de alimentação. Com isso, foi necessária a utilização de algoritmos da transformada de Fourier, para filtrar essas interferências do sinal verdadeiro. Nota-se pelos dados das Tab. (1) e das Fig. (3) e (4), onde não houve carregamento, que os resultados apresentaram uma aceitável linearidade entre aumento (azul) e decréscimo (vermelho) da tensão elétrica, enquanto que os dados da Tab. (2) e das Fig. (5) e (6) não apresentaram um comportamento linear, devido à ação do carregamento (3 kg) sobre o pino. O que ocorre é que a célula de carga tem dificuldade de sair da inércia e se deformar e, na liberação da força ele tende a manter-se deformado. Esse fenômeno pode ser explicado pela curva de histerese, ocorrido devido à rugosidade das superfícies em contato do disco e da esfera do pino (Fidélis, 2006).

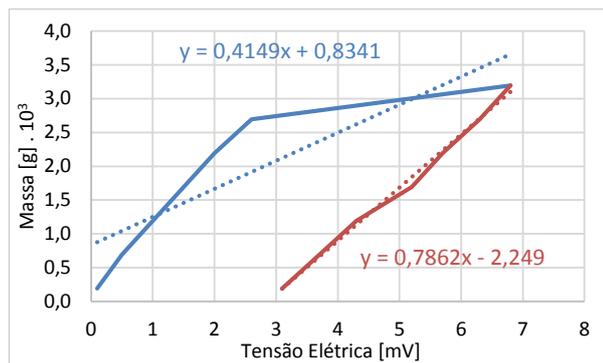


**Figura 3.** Curvas de correlação entre aumento e decréscimo de tensão elétrica, com multímetro

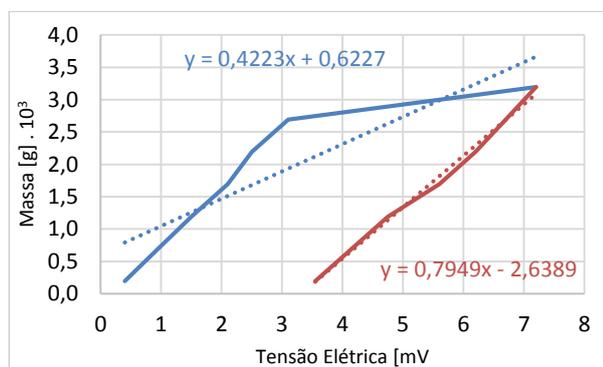


**Figura 4.** Curvas de correlação entre aumento e decréscimo de tensão elétrica, com software

Analisando as Fig. (3) e (4) pode-se perceber que as retas obtidas com o multímetro e o sistema placa-software foram muito semelhantes, mostrando coerência nos dados obtidos.

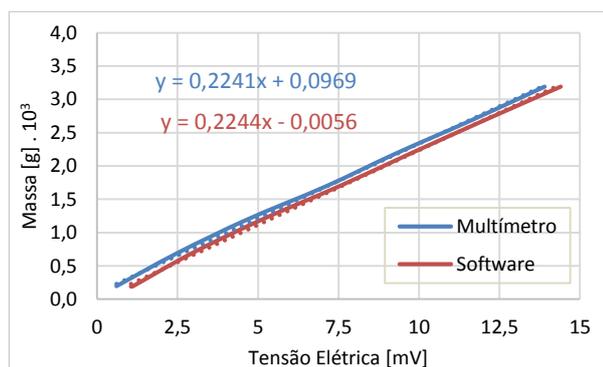


**Figura 5.** Curvas de correlação entre aumento e decréscimo de tensão elétrica, com multímetro



**Figura 6.** Curvas de correlação entre aumento e decréscimo de tensão elétrica, com software.

Com os dados fornecidos pela Tab. (1) e pelas curvas representadas pelas Fig. (3) e (4), foi possível construir as curvas médias de correlação entre o sistema medido através do multímetro e também pelo sistema software/placa de aquisição de dados. Na Figura (7) é apresentado esses resultados.



**Figura 7.** Retas de correlação entre tensão elétrica e força, sem carregamento

Percebe-se que as curvas das Fig. (5) e (6) não trazem informações claras a respeito dos dados necessários para a calibração. Isso ocorre, pois quanto maior o carregamento, maior será a deformação no material da célula de carga, aumentando o efeito da histerese. Assim, foi usada a média das equações das retas de tendência da Fig. (7), obtendo-se um coeficiente igual a 0,22425.

## CONCLUSÃO

Foi perceptível que a metodologia utilizada durante a realização do experimental, possibilitou ótimos resultados justificado pela coerência dos valores encontrados na literatura. Observou-se que o sistema de aquisição de dados utilizado através de uma placa e um software específico, trouxe uma maior automatização, devido o fato de poder realizar uma coleta contínua de dados durante o experimento. Também foi possível através dos dados e expressões adquiridos, criar uma correlação entre a tensão elétrica medida e força, possibilitando assim a realização de um primeiro ensaio para determinação do coeficiente de atrito entre um aço inoxidável da esfera e um aço AISI 1020 do disco, resultando em um coeficiente de atrito 0,47, que teve coerência com resultados já publicados em meios científicos, divulgados por Pantaleón *et al.* (2012), com valores em torno de 0,4 e 0,7.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao coordenador e prof. Dr. Eng. Luiz Carlos de Cesaro Cavaler do curso de Engenharia Mecânica, aos acadêmicos Yan Medeiros Morona e Lucas Bittencourt Guedes pelas contribuições na parte experimental desse trabalho e também a Faculdade SATC pela disponibilidade de utilização dos equipamentos do LAVITRI.

## REFERÊNCIAS

- Albertazzi, A. G. Jr; Sousa, A. R. 2008, "Fundamentos de Metrologia Científica e Industrial", Ed. Manole, Barueri, S.Paulo, Brazil, 408p.
- ASM International. ASM Handbook. Volume 18 - Friction, Lubrication and Wear Technology. 4 ed., Vol. 18. Detroit, USA, 1992, 1879p.
- ASTM G99/2004 - American Society for Testing Materials. Standard Test Method for Wear Testing With a Pin on Disc Apparatus. West Conshohocken, PA.
- Cappa, P.; Del Prete, Z. and Marinozzi, F.,1996, "Experimental Analysis of a New Strain-Gage Signal Conditioner Based on a Constant-Current Method", ELSEVIER - Sensors and Actuators A: Physical, Vol.55, pp. 173-178.
- Fidélis, G. C., 2006, "O que é Histerese?", Metrologia e Qualidade, n.10, Florianópolis, Brazil, pp. 1-5.
- Pantaleón, E. M.; Tanaka, D. K. e Bernardes, F. G., 2012. "Análise das Variações do Coeficiente de Atrito e as Correlações com os Mecanismos de Desgaste". Holos - Revista de Divulgação Científica e Tecnológica do IFRN, Ano 28, Vol. 1, pp 62-72.

## DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo apresentado neste trabalho.