

IMPLEMENTAÇÃO DE CÉLULA DE CARGA PARA AQUISIÇÃO DO COEFICIENTE DE ATRITO NO TRIBÔMETRO ASTM G65

Gabriel Savi Costa¹

Luan de Campos Corrêa²

Resumo: Ensaios de desgaste em materiais são realizados em diversos métodos, onde procedimentos devem ser seguidos. O método ASTM-G65 (ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais, G65 - Método de Teste Padrão para Medição de Abrasão Usando o Aparelho de Roda de Borracha e Areia) é um padrão de ensaio de desgaste abrasivo realizado por uma máquina denominada tribômetro. O Laboratório de Vibrações e Tribologia – LAVITRI da faculdade SATC dispõe da máquina baseada nessa norma. Notou-se a possibilidade de aprimoramento para que uma nova informação fosse obtida em conjunto ao desgaste. Através da instrumentação, realizada por um conjunto de aquisição de dados formado por célula de carga, amplificador de sinal, placa conversora de sinal, computador e o software LabVIEW®, poderia realizar a leitura do coeficiente de atrito do material. Modificações estruturais foram necessárias para que o novo sistema pudesse ser implantado. As modificações se deram por um redimensionamento do braço de suporte e inclusão de um sistema guia/patim delimitador de movimento. Após o aprimoramento, a máquina realiza o desgaste abrasivo e fornece o coeficiente de atrito. O cromo duro submetido ao ensaio obteve um coeficiente de atrito de 0,36 e um desgaste volumétrico de 2,8 mm³.

Palavras-chave: Tribômetro. Célula de carga. Desgaste. LabVIEW®. ASTM-G65.

1. INTRODUÇÃO

O estudo tribológico é definido como o ramo da ciência e da tecnologia preocupado com a interação de superfícies em movimento relativo e com associados, sendo incluso o atrito, desgaste e lubrificação conforme Hutchings e Shipway (2017). Diferentes tipos de ensaios de desgaste são utilizados na tribologia, tendo suas aplicações para diferentes casos. O método abordado nesse artigo é adaptado da norma *ASTM G65 – Standard Test Method for Measuring Abrasion Using the Dry Sand/Rubber Wheel Apparatus*, onde a máquina tribômetro executa o desgaste por

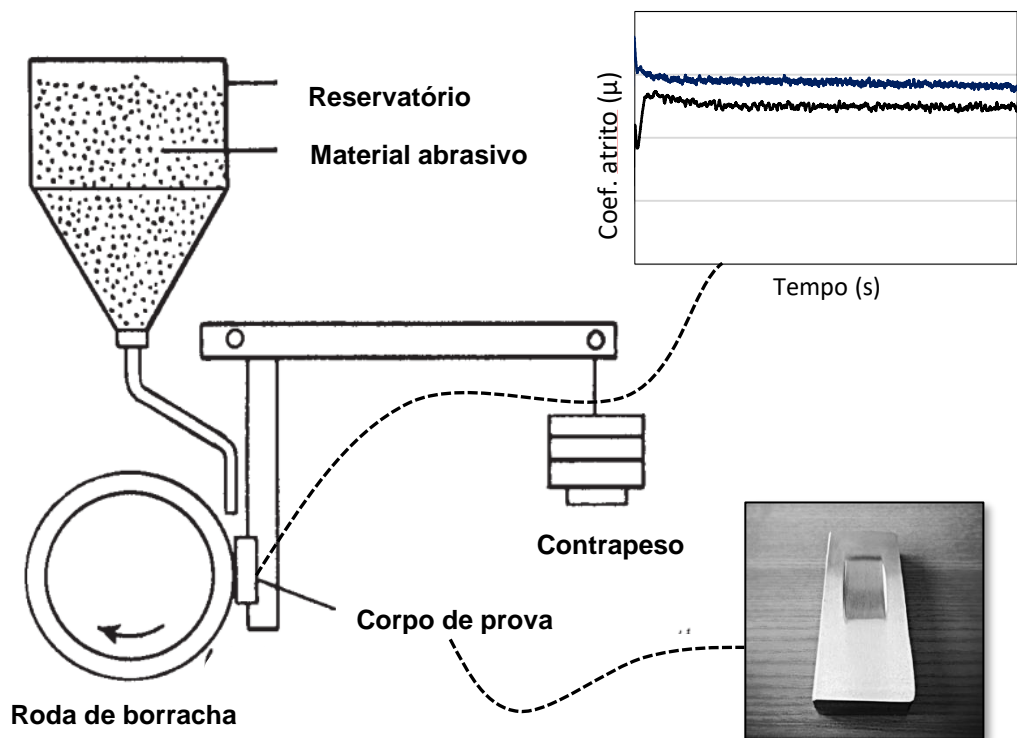
¹ Graduando em Engenharia Mecânica. E-mail: gabriel.savico@gmail.com

² Prof. Luan de Campos Corrêa. E-mail: luan.correa@satc.edu.br

uma roda de borracha em movimento rotativo, um suporte que fixa e pressiona o corpo de prova contra a roda de borracha, e um abrasivo escoado entre a roda de borracha e o corpo de prova, ilustrado na Fig. 01.

Além do desgaste, o atrito é outra variável importante a ser analisada, porém o método ASTM-G65 é limitado a mensurar apenas o desgaste de materiais. O intuito do trabalho é aprimorar o tribômetro do laboratório LAVITRE - Faculdade SATC para aquisição do coeficiente de atrito dos materiais. O aprimoramento da máquina complementa o ensaio tribológico, possibilitando obter, simultaneamente, a resistência ao desgaste e o coeficiente de atrito dos materiais.

Figura 01 - Princípio do teste de desgaste baseado na norma ASTM-G65



Fonte: adaptado da norma ASTM G65-00 (2019)

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Para que os processos de modificação e instrumentação sejam compreendidos alguns conceitos devem ser abordados. As fundamentações teóricas de instrumentação e tribologia aplicada ao método ASTM-G65, dão maior clareza ao entendimento dos processos necessários para implementação de uma célula de carga

num tribômetro ASTM-G65. Além disso, o entendimento físico da força de atrito é necessário para análise dos resultados obtidos pela célula de carga implementada.

2.1 TRIBOLOGIA

Conforme cita Texaco (2008), entende-se a tribologia como a ciência que se atenta com a interação de superfícies com o movimento relativo, incluindo o atrito, o desgaste e a lubrificação. O prefixo “tribo” da palavra origina-se do grego e significa atrito, já a palavra “logia” significa estudo ou conhecimento. Desplanques et al (2006) destaca que o tribômetro é uma máquina que visa testar o atrito e o desgaste dos materiais, é utilizado como uma ferramenta de apoio para estudos e também para entendimento de fenômenos tribológicos.

De acordo com Tecnovac (2008), um tribômetro padrão tem sua constituição dada por dois corpos de prova, um fixo (pino) e um rotor (geralmente um disco plano). Este pino pode ser constituído de qualquer geometria ou material, será pressionado perpendicularmente contra o disco, gerando uma superfície de deslizamento circular. O mais típico é o disco girar enquanto o pino está sendo pressionado, pode ocorrer o contrário em alguns equipamentos. O disco pode girar no plano horizontal ou vertical. A força (carga) gerada sobre o pino pode ser dada por pesos ou por um sistema pneumático ou hidráulico. As cargas tipicamente são baixas sendo que não passam de 100 N.

2.2 MÉTODO ASTM-G65

Segundo Doering et al. (2011), o padrão ASTM G65 estabelecido para o método de avaliar o desgaste abrasivo de materiais envolve um corpo de prova retangular e uma roda de borracha com um abrasivo de areia sílica padronizada (AFS 50/70). O fluxo de abrasivo é direcionado entre a face da roda e da amostra, com vazão estabelecida numa faixa entre 300 e 400 g/min. A areia é introduzida entre a roda de borracha com diâmetro de 228,6 mm e o corpo de prova enquanto a roda de borracha gira a uma velocidade de 200 rpm com variação permitida de ± 10 rpm.

O procedimento possui variações no tempo de exposição ao desgaste e força aplicada no corpo de prova. Este método abrange cinco procedimentos recomendados para graus específicos de resistência ao desgaste ou espessuras do material de teste conforme Tab. 01 (ASTM G65-00, 2000).

Tabela 01: Parâmetros do teste

Procedimento especificado	Força específica (N)	Revoluções da roda	Característica do material
A	130	6000	Materiais de baixa a alta resistência ao desgaste
B	130	2000	Materiais de baixa a alta resistência ao desgaste que excedem 100mm ³ perdidos no procedimento A
C	130	100	Materiais de revestimentos finos
D	45	6000	Materiais de baixa resistência ao desgaste
E	130	1000	Materiais de baixa a média resistência ao desgaste

Fonte: adaptado de ASTM G65-00 (2000)

2.3 FORÇA DE ATRITO

Por Hutchings e Shipway (2017), a força de atrito é definida pela resistência encontrada entre dois corpos quando um se move pelo outro. Uma força tangencial F demonstrada na Fig. 02 é necessária para o deslocamento de um dos corpos sobre a outra face estacionário como.

A relação entre a força de atrito e a carga normal N , demonstrada na seguinte fórmula, é o coeficiente de atrito, e o símbolo para representa-lo é μ :

$$\mu = \frac{F_a}{N} \quad (1)$$

Onde:

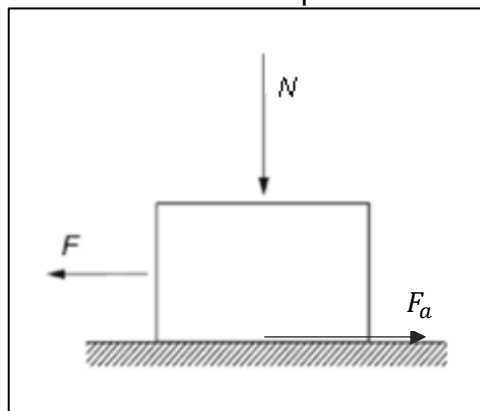
F_a : Força de atrito (N)

N : Força normal (N)

μ : Coeficiente de atrito (-)

O atrito estático acontece quando os dois corpos encostados estão relativamente parados um em relação ao outro. A força necessária para vencer o atrito estático e fazer um movimento inicial é chamada de força de ruptura. A força máxima de atrito normalmente ocorre em um pequeno deslocamento a partir do ponto de partida (WIT et al., 2018). Para Rabinowicz (1951), o atrito é uma função do deslocamento onde a força de ruptura é a força máxima de atrito ocorrendo num pequeno deslocamento a partir do ponto inicial.

Figura 02 – Uma força F é necessária para superar o atrito e causar movimento por deslizamento



Fonte: Adaptado de Hutchings e Shipway (2017)

O coeficiente de atrito entre duas superfícies segundo Caetano, depende da sua rugosidade e também da sua condição, seco ou molhado, uma vez que as superfícies molhadas, por qualquer tipo de fluido acaba comportando-se como um “lubrificante”, diminuindo, portanto, o coeficiente de atrito. O coeficiente de atrito entre duas superfícies depende também da temperatura. Valores de coeficiente de atrito entre borracha e aço podem ser observados na Tab. 02: logo abaixo.

Tabela 02: Coeficiente de atrito Borracha/Aço segundo

Materiais em contato	Condição	Coeficiente de atrito estático	Coeficiente de atrito cinético
Borracha/Aço	Seco	0,6-0,9	0,3-0,6

Fonte: Caetano

2.4 MODELO SIMPLES DE INSTRUMENTAÇÃO

Segundo Hansman (1999), a instrumentação visa transformar uma variável física, chamada mensurado, em uma medição adequada. Busca-se possuir uma medição com um significado que seja consistente e amplo, e é típico empregar um sistema padrão de unidade, onde a medição de um determinado instrumento compara-se com a medição de um outro.

O sensor é elemento principal na instrumentação, onde possui o papel de converter a entrada variável física em uma saída de variável de sinal. A variável de sinal pode ser manipulada em um sistema de transmissão, como um circuito elétrico ou mecânico. No caso de circuitos elétricos, a variável de sinal comum é a tensão. O sinal de saída do sensor poder ser exibido, gravado ou usado como sinal de entrada para dispositivos ou sistemas secundários. O sinal de uma instrumentação básica é transmitido para o dispositivo de exibição ou gravação, e pode ser lido por um observador humano. Os tipos de dispositivos de exibição são diversos, tendo variação de escalas simples, indicadores e sofisticados sistemas de exibição de computadores. Em casos onde a saída do sinal do sensor for pequena, há a necessidade de amplificação da mesma. Uma saída amplificada gera uma transmissão para o dispositivo de exibição ou gravação sendo possível a leitura.

2.5 INSTRUMENTOS ANALÓGICOS E DE LEITURA DIGITAL

Para Figliola (2018), um instrumento de leitura analógica gera uma indicação de saída contínua e diretamente análoga ao comportamento do então mensurando. Geralmente, pode ser a deflexão de um ponteiro ou traço de tinta em uma escala que é graduada, uma onda sonora ou então a intensidade de um feixe de luz. Isso mostra que a deflexão pode ser movida por alterações na tensão ou na corrente, ou também através de meios mecânicos, magnéticos ou ópticos, ou até a

combinações dos mesmos. A resolução de uma leitura analógica tem sua definição pelo menor incremento utilizável em sua escala de leitura. A definição do intervalo da leitura é feita pela diferença entre os valores mínimo e máximo que ele pode indicar e seu alcance é especificado por eles.

Um sensor de leitura digital fornece uma indicação de saída que é discreta. O valor do mensurando é diretamente proporcional ao valor da saída digital. A resolução de leitura é a menor parte variável no sinal de saída do sensor.

Diversos dispositivos digitais mesclam características de um sensor analógico com uma leitura digital, basicamente convertendo um sinal analógico em um sinal de saída digital. Nesse caso o conversor analógico para digital (CAD) é necessário. A saída do conversor entrega dados binários.

2.6 LabVIEW®

O LabVIEW® utiliza a linguagem de programação gráfica, utilizando ícones ao invés de linhas de comando na criação de suas aplicações. Além disso, diagrama o fluxo de dados através de nós, a determinada ordem de chegada das informações nesses nós passam a definir a sequência de execução do programa (Lopes, 2007).

A empresa fabricante, National Instruments (2014), classifica os programas de LabVIEW® como instrumentos virtuais, uma vez que, durante execução imitam instrumentos físicos, como osciloscópios e multímetros. Cada instrumento virtual contém funções que transformam os valores de entrada da interface e\ou exibem essa informação ao usuário.

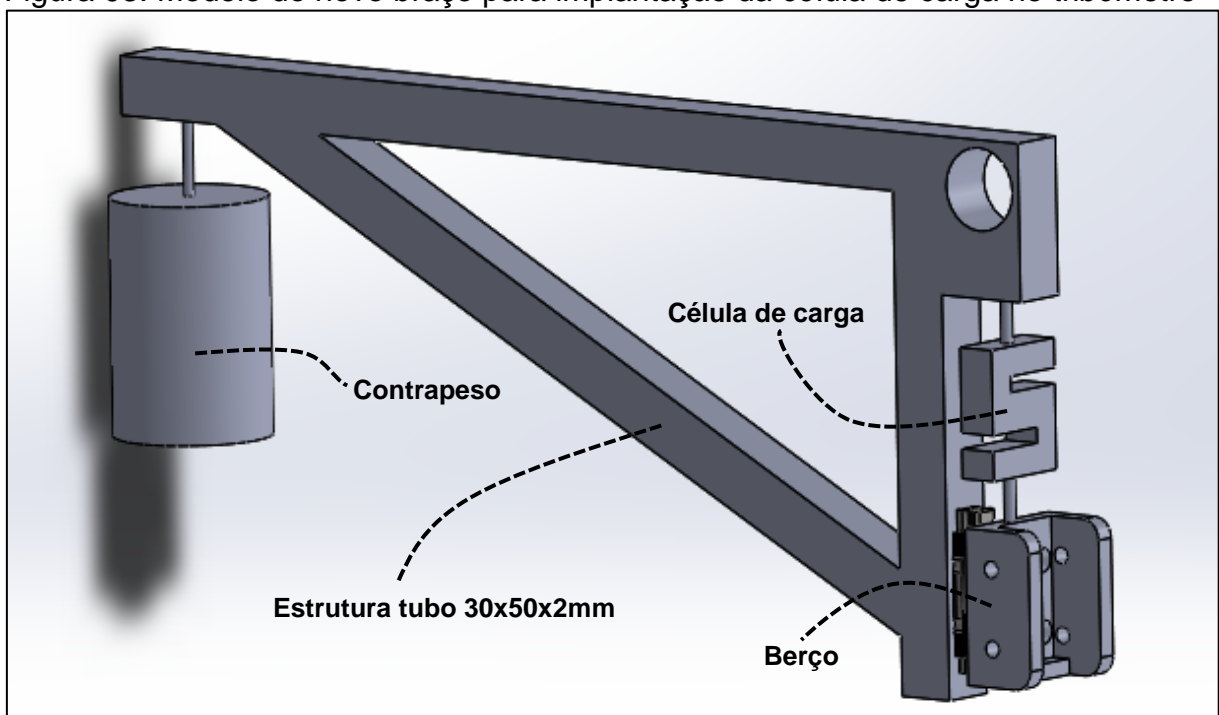
O LabVIEW® possui duas partes principais que podem interagir, o painel frontal (front panel) e o diagrama de blocos (block diagram). O Painel Frontal é a parte interativa com o usuário, apresentando os dados conforme solicitado, plota gráficos e possui botões que realizam as ações. Já o Diagrama de blocos é onde realiza-se a ação, o “cérebro”, onde a programação foi construída de acordo com o que o usuário necessita. Ambos trabalham juntos para o fim desejado (Rodrigues, 2011).

3. PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 ADEQUAÇÃO ESTRUTURAL DO BRAÇO

O braço original da máquina não possibilitou a montagem de alguns itens do conjunto de aquisição de dados: Guia/patim, célula de carga. Para implantação do sistema foi necessário o dimensionamento de um braço totalmente novo e que mantivesse a originalidade operacional. No guia/patim é fixado um berço que suporta o corpo de prova no ensaio conforme Fig. 03 e 04. O conjunto é conectado a célula de carga por barras roscadas e contra porcas para travamento.

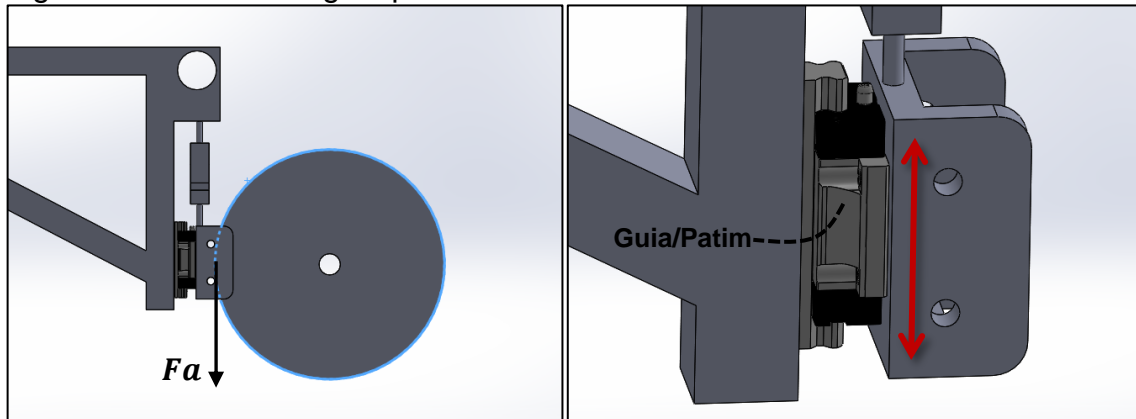
Figura 03: Modelo do novo braço para implantação da célula de carga no tribômetro



Fonte: do autor (2019)

A estrutura do novo braço é composta por tubos de 30mm por 50mm de espessura 2 mm reduzindo peso em relação ao original. Com isso, alocação do contrapeso teve que ser reposicionada ficando 24,66 mm mais distante do eixo de giro do braço para manter a mesma força normal entre o corpo de prova e a roda de borracha.

Figura 04: Detalhe do guia/patim



Fonte: do autor (2019)

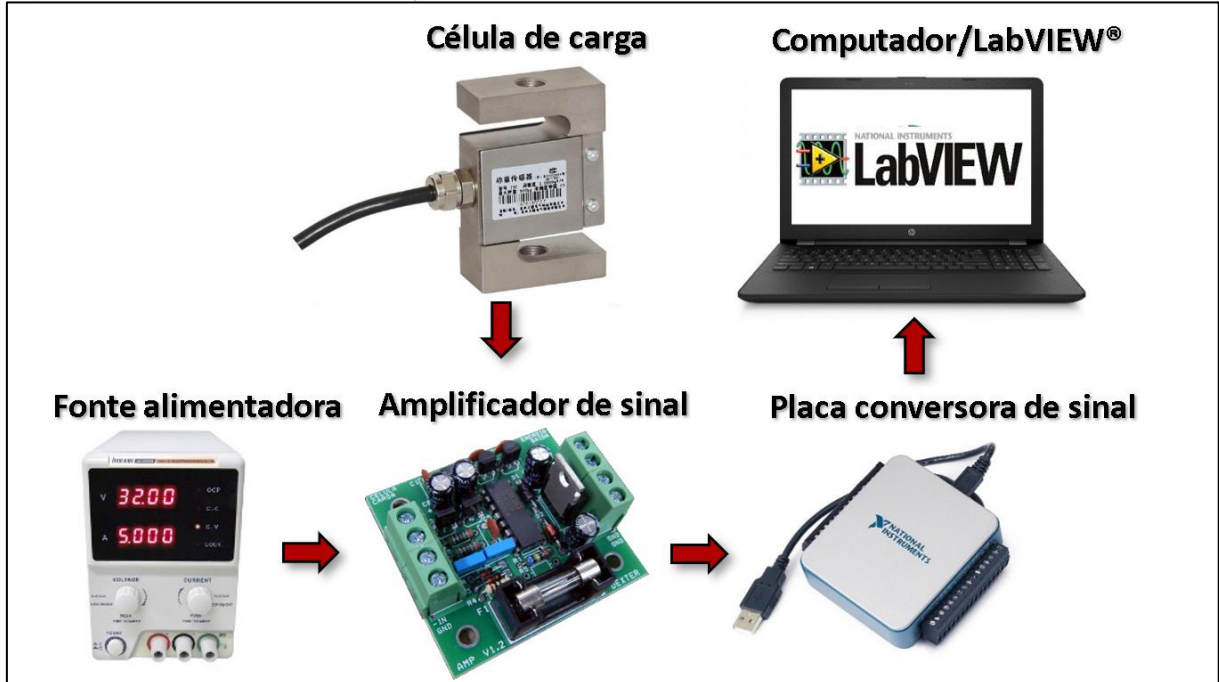
O sistema guia/patim possibilita a movimentação somente no sentido paralelo a força de atrito eliminando movimentos em graus de liberdade indesejados conforme Fig. 04.

3.2 SISTEMA DE AQUISIÇÃO

Para leitura dos dados no computador, o sinal elétrico da célula de carga deve ser amplificado devido a sua baixa tensão de resposta. O amplificador para célula de carga DEXTER V1.2 utilizado, tem uma amplificação de 200 a 300 vezes, chegando à tensão necessária para leitura da placa de tratamento de sinal. Para funcionamento do amplificador é necessária uma fonte alimentadora de tensão.

Os computadores realizam comunicação através de sinais digitais, sendo necessário uma conversão do sinal analógico, da célula de carga, para digital. A placa NI-6002 utilizada, realiza a leitura do sinal de tensão e fornece digitalmente ao computador. No processamento e visualização dos dados, utilizou-se o software LabVIEW®, através de um notebook conforme o sistema abaixo Fig. 05.

Figura 05: Sistema de aquisição de dados

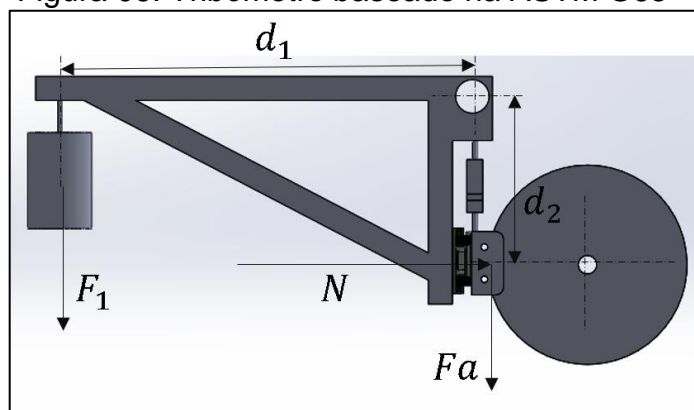


Fonte: do autor (2019)

3.2 DIMENSIONAMENTO DO TRANSDUTOR DE MEDIDA DE FORÇA

Para aquisição da força de atrito no tribômetro, foi definido uma célula de carga devido a sua confiabilidade, aplicação no novo braço e a possibilidade de adquirir dados através da instrumentação. O dimensionamento da célula de carga foi realizado através das Eq. 2 e 1 que resultam na força de atrito máximo que o sensor é submetido, demonstrado na Fig. 06.

Figura 06: Tribômetro baseado na ASTM G65



Fonte: do autor (2019)

Dados:

F_1 : 51,325 N.

d_1 : 0,513 m.

d_2 : 0,205 m.

$$F_1 \cdot d_1 = N \cdot d_2 \quad (2)$$

$$N = 128 \text{ N}$$

Onde:

F_1 : Força peso do Braço/Contrapeso (N)

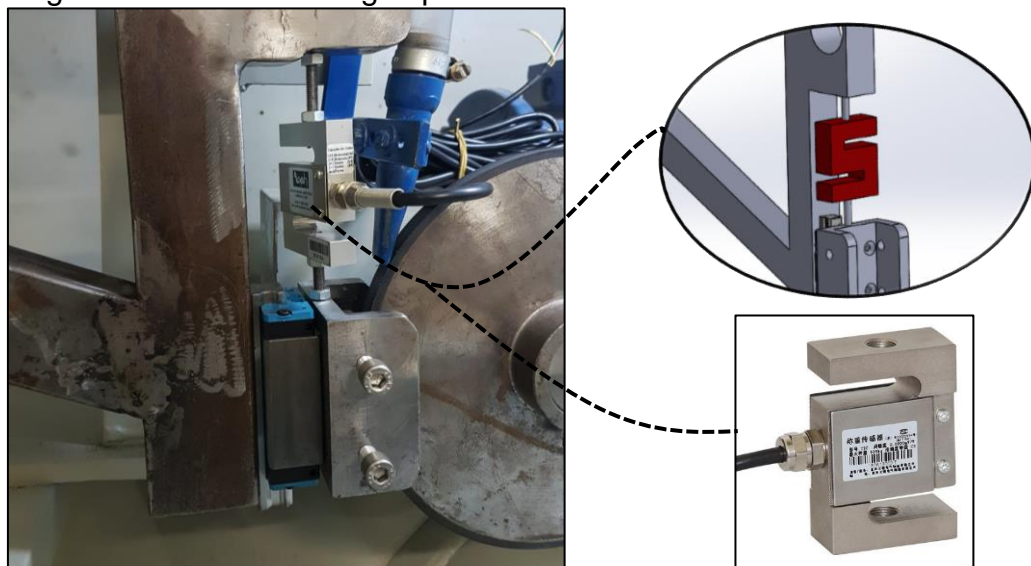
d_1 : Distância do Braço/Contrapeso até o eixo (m)

d_2 : Distância da amostra até o eixo (m)

N : Força normal (N)

Considerando o contato somente entre borracha e aço, com coeficiente de atrito máximo de 0,9 (CAETANO) e a força normal encontrada de 128 N, a maior força que a célula de carga é submetida equivale a 115 N conforme Eq. 1.

Figura 07: Célula de carga tipo “S” instalada



Fonte: do autor (2019)

A célula de carga dimensionada é do tipo “S” modelo TSD-10, conforme Fig. 07, disponibilizada pelo laboratório LAVITRI – Faculdade SATC. Sua capacidade de

leitura é de 10 kg ou 98 N com possibilidade de sobrecarga em 150% sem danos ao funcionamento conforme Tab. 03. Além disso, o abrasivo entre a borracha e o aço age como lubrificante diminuindo o coeficiente de atrito, possibilitando a capacidade disponível de 98 N, menor que o 115 N calculado.

Tabela 03: Características da célula de carga TSD-10

Capacidade	10 kg
Material	Alumínio Anodizado
Sensibilidade	2,00 mV/V +/- 10%
Não Linearidade	< 0,02% FSO
Histerese	< 0,02% FSO
Creep ou Fluência	30 Min: <0,03% FSO
	8 H: <0,05% FSO
Equilíbrio do Zero	+/- 1%
Faixa de Temperatura Operacional	-10 °C a +60 °C
Faixa de Temperatura Nominal (Compensada)	-5 °C a +50 °C
Máximo Erro	0,03%
Efeito da Temperatura na Calibração	0,025% FSO
Efeito da Temperatura no Zero	0,025% FSO
Sobrecarga Segura (Sem Ruptura)	150 % FSO
Sobrecarga de Ruptura	300 % FSO
Tensão Recomendada	10 V
Tensão Máxima de Excitação VDC Ou VCA	15 V
Resistência Elétrica Entrada	350 W +/- 30 W
Resistência Elétrica Saída	350 W +/- 3 W
Resistência de Isolação (50 V)	> 2 GΩ
Grau de Proteção	IP-66

Fonte: adaptado de NE Balanças(2018)

3.3 AJUSTE DE SENSIBILIDADE

Os transdutores de força possuem retas de sensibilidade, onde, para cada força exercida há uma variação na tensão do sinal. Essa reta possui uma função representada na Eq.3 com dois coeficientes: angular e linear. A equação da reta é o resultado da variação dos sinais com a força de pesos padrão. O procedimento foi realizado três vezes para garantir a repetitividade dos resultados conforme Tab. 04, e

sua média representada no gráfico da Fig. 07. Foram utilizados múltiplos pesos de 9,81 N, acrescentados até 49,05 N conforme Fig. 08 e 09.

Figura 08: Representação da adição de peso



Fonte: do autor (2019)

$$y = ax + b \quad (3)$$

Onde:

a : coeficiente angular da reta

b : coeficiente linear da reta

R^2 : Coeficiente de correlação linear

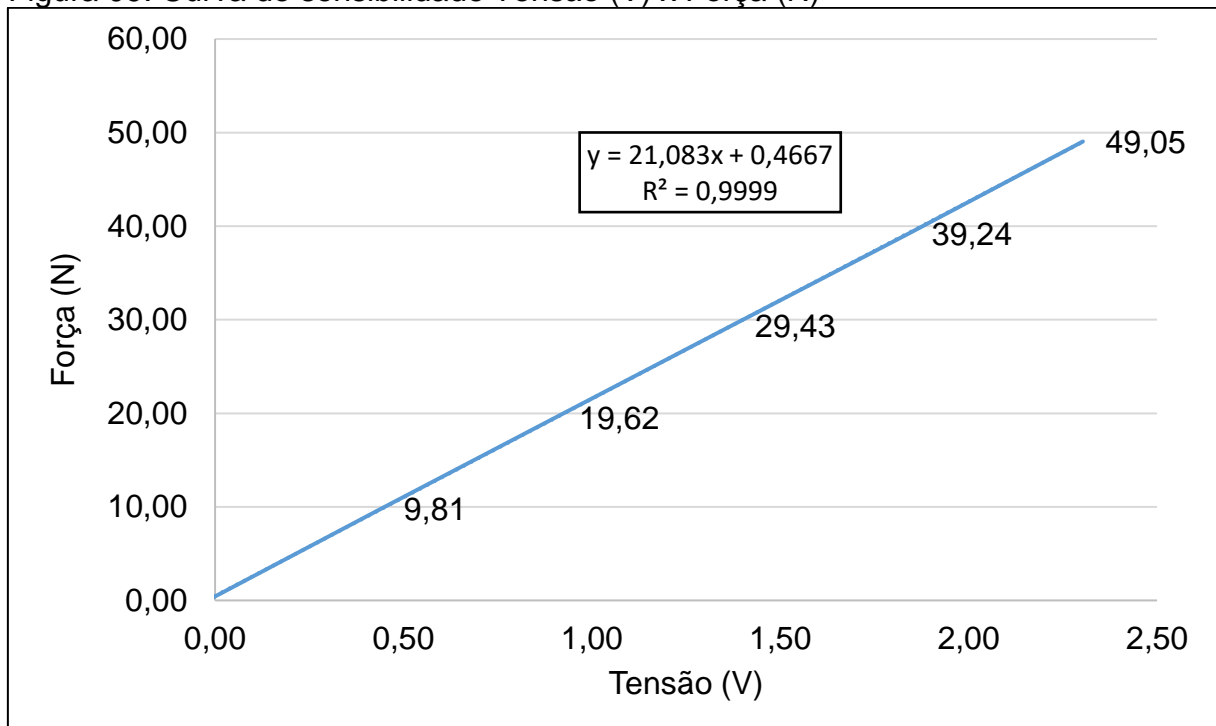
Tabela 04: Resultados do ajuste de sensibilidade

TSD – 10kg			
Ensaio	Coef. angular	Coef. linear	Correlação linear
1	21,052	0,4627	0,9999
2	21,089	0,4671	0,9999
3	21,108	0,4703	0,9999
Média	21,083	0,4667	0,9999

Fonte: do autor (2019)

O ajuste é aplicado no software de processamentos dos dados possibilitando transformar os sinais elétricos em medida de força.

Figura 09: Curva de sensibilidade Tensão (V) x Força (N)



Fonte: do autor (2019)

3.4 VALIDAÇÃO DO SENSOR

A Fig. 10 demonstra o sensor instalado de forma paralela a força tangencial que a roda de borracha exerce no corpo de prova. O corpo de prova é fixado por um sistema de guia/patim que possibilita somente a movimentação vertical em um grau de liberdade, eliminando assim variáveis indesejáveis. Após a instalação foi necessário a criação do programa para aquisição e análise dos dados.

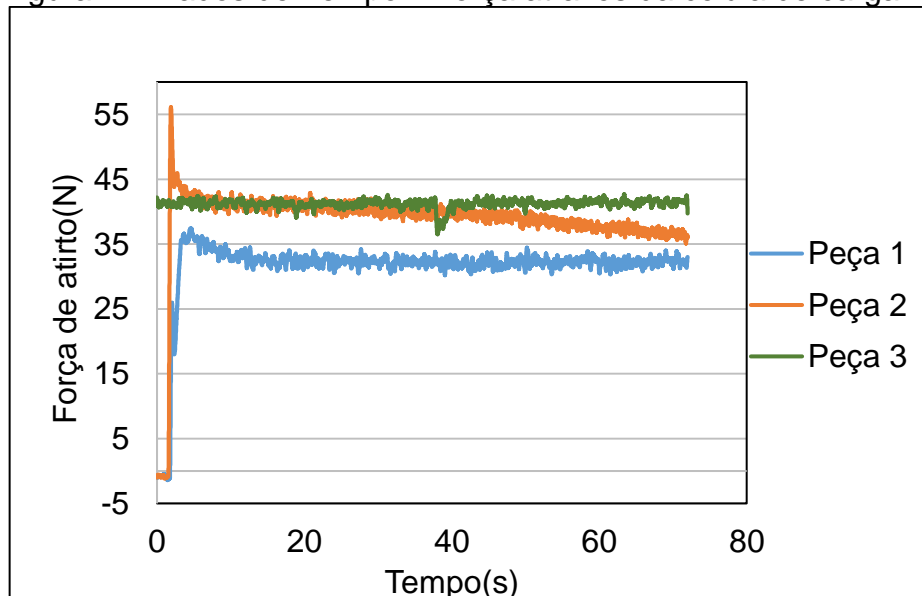
Obteve-se valores de força diferentes nos três tipos de materiais metálicos disponíveis no laboratório, com destaque do material da peça 2 que era revestido por um polímero, tendo diminuição da força de atrito assim que superfície coberta desgastou e chegou ao metal. Os materiais submetidos ao teste apresentaram forças de atrito diferentes, validando assim a eficácia do sensor. Os resultados podem ser observados na Fig. 11.

Figura 10: Conjunto braço do tribômetro



Fonte: do autor (2019)

Figura 11: Dados de Tempo x Força através da célula de carga



Fonte: do autor (2019)

3.5 ENSAIO DE DESGASTE ADAPTADO DA ASTM-G65

O ensaio utilizado de roda de borracha e areia obtém resultados através da relação da perda volumétrica da amostra e sua respectiva densidade específica. O ensaio realiza um desgaste abrasivo à baixa pressão, feitos pelo contato entre amostra, roda de borracha e areia. Alguns parâmetros antes de dar início aos testes são estabelecidos para ter aplicar o procedimento idêntico ao acadêmico Santana (2018) adaptado da norma ASTM-G65. Os valores são apresentados pela Tab. 05.

Tabela 05: Parâmetros para ensaio de desgaste

Parâmetro	Valores	Parâmetros	Valores
Vazão de areia	300 g/min	Granulometria da areia	30 mesch
Força normal aplicada	128 N	Rotação da roda	200 rpm
Tempo de cada intervalo	5 min	Tempo total por amostra	30 min
Ensaio por amostra	6		

Fonte: do autor (2019)

Além da análise de perda mássica, a ASTM G65-16 desenvolveu uma classificação de materiais através da perda volumétrica conforme Eq. 4.

$$VL = \frac{LM}{\rho} \cdot 1000 [mm^3] \quad (4)$$

Onde:

LM = Perda de massa (g)

ρ = Densidade (g/cm³)

VL = Perda volumétrica (mm³)

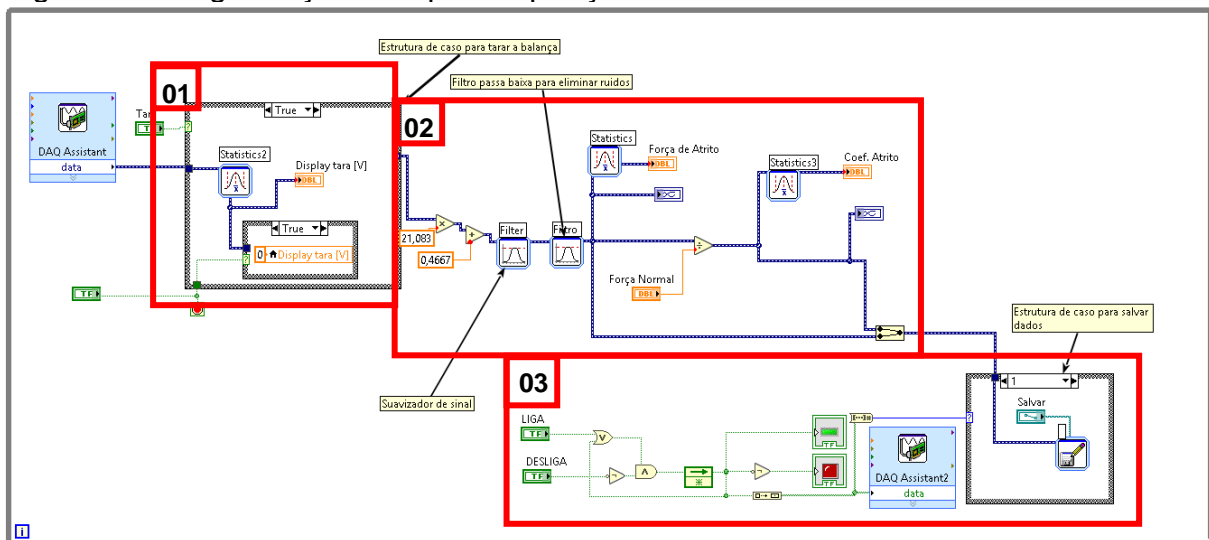
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo, serão apresentados os resultados da força e coeficiente de atrito do material cromo duro submetido ao teste ASTM-G65 e juntamente validar a permanência da originalidade do funcionamento da máquina pós modificação.

4.1 PROGRAMA DE AQUISIÇÃO E ARMAZENAMENTO DE DADOS

Após a validação do sensor, foi desenvolvido o programa final fornecendo os resultados de força e coeficiente de atrito. As Fig. 12 e 13 indicam a estrutura lógica do programa e a interface de utilização.

Figura 12: Programação final para aquisição e armazenamento de dados

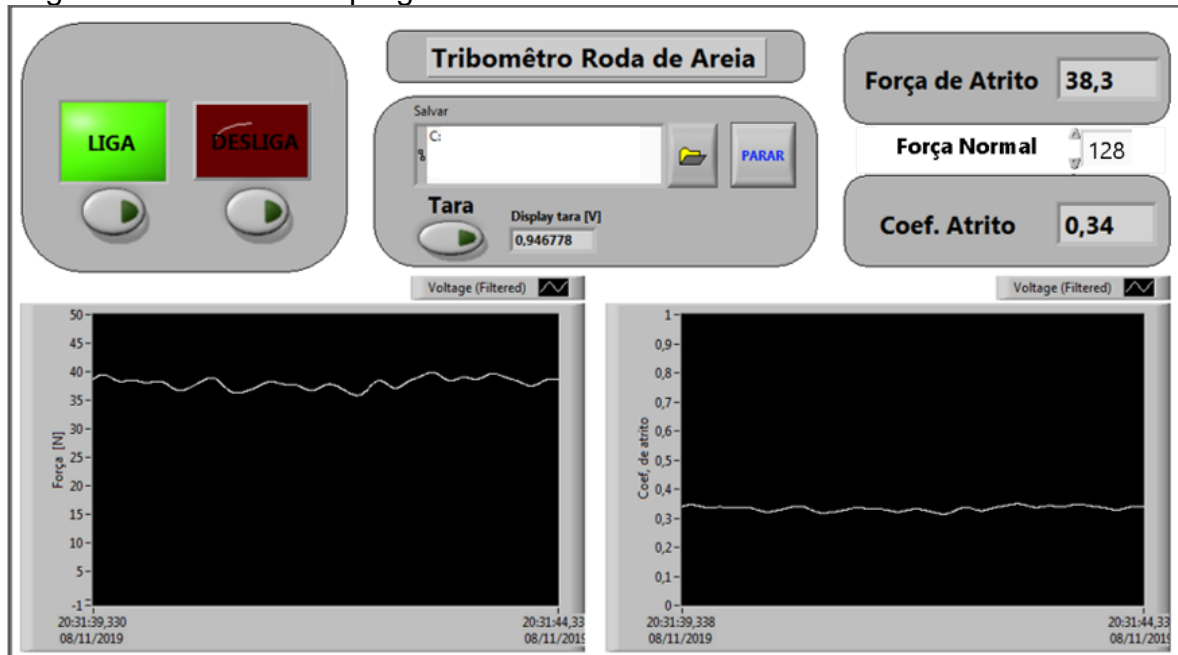


Fonte: do autor (2019)

As indicações numéricas são as etapas de processamento dos dados. No destaque 01 foi implantado um sistema de tara onde os valores de força e coeficiente de atrito são zerados. Já no destaque 02 foi inserida a equação da reta da Fig. 07 transformando o sinal de tensão em dados de força. Para melhorar o sinal também foram implantados filtros de passa-baixo com referência em 2,16 Hz e um suavizador de sinal que reduz ruídos durante o processo. Por fim, o destaque 03, que realiza o armazenamento dos dados.

A interface do programa é simples e mostra os dados de força e coeficiente de atrito em forma numérica e em gráficos. Para armazenamento dos dados basta iniciar o programa e habilitar o botão “LIGA” que os já estarão sendo armazenados na pasta selecionada conforme Fig. 11. No programa a força normal pode ser alterada, dando possibilidade de utilizar o programa com a classe “D” do método ASTM G65, Tabela 01.

Figura 13: Interface do programa



Fonte: do autor (2019)

4.2 VALIDAÇÃO DA ORIGINALIDADE PROCESSUAL DA MÁQUINA

O ensaio após a modificação tem o intuito de confirmar a mesma eficácia em relação ao sistema original, com um desgaste do material similar após a modificação da máquina. O material que foi submetido ao teste é o cromo duro com uma exposição total de trinta minutos de desgaste intervalados em seis etapas de cinco minutos. O ensaio é fora de padrão do método ASTM G65 pois para o material em questão deve-se ser submetido o processo C da norma e realizar medições com uma balança de resolução 0,0001 g, tendo disponível somente com 0,01 g. O comportamento do material se deu conforme a Tab. 06.

Tabela 06: Ensaio de roda de borracha ASTM-G65

Perda de massa do material (g)			
Amostra Cromo Duro n°1		Amostra Cromo Duro n°2	
Tempo	Peso	Tempo	Peso
00:00	102,14g	00:00	102,29g
05:00	102,14g	05:00	102,29g
10:00	102,14g	10:00	102,28g
15:00	102,13g	15:00	102,28g
20:00	102,13g	20:00	102,28g
25:00	102,12g	25:00	102,27g
30:00	102,12g	30:00	102,27g
Perda de massa	0,02g	Perda de massa	0,02g

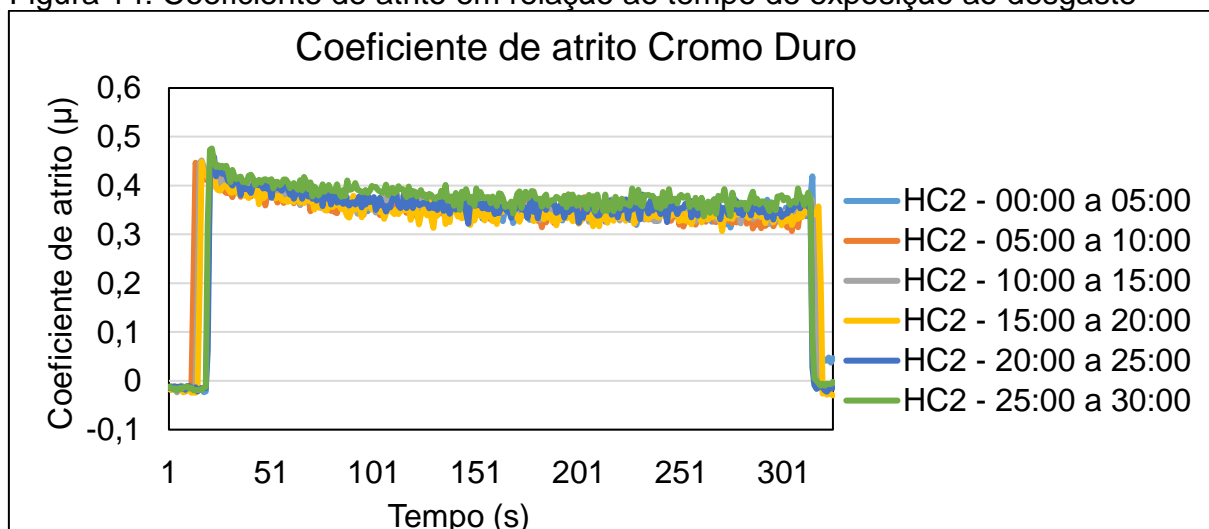
Fonte: do autor (2019)

O material teve perda volumétrica de 2,80 mm³ conforme Eq. 4 e 0,02 g em perda mássica, próximo ao resultado obtido no artigo de Santana (2019) com 0,0163 g na máquina original. Os resultados mostram um desgaste 22,7% maior. A resolução de 0,01 g da balança utilizada impossibilitou uma maior precisão nos resultados obtidos.

4.3 COEFICIENTE DE ATRITO DO CROMO DURO

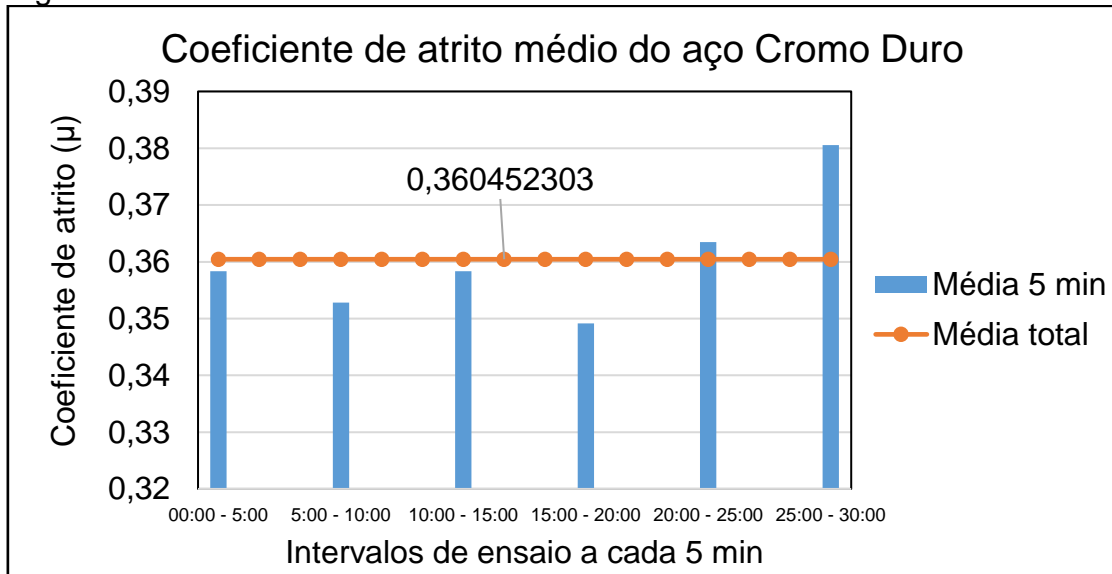
Com os dados fornecidos pela instrumentação o material submetido ao ensaio apresentou os seguintes resultados em relação ao atrito, conforme Fig. 14 e 15.

Figura 14: Coeficiente de atrito em relação ao tempo de exposição ao desgaste



Fonte: do autor (2019)

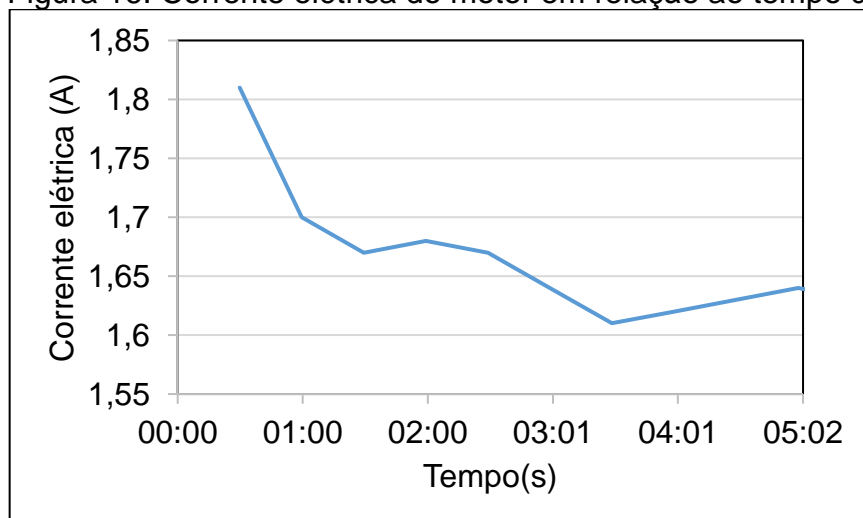
Figura 15: Coeficiente de atrito média do Cromo Duro



Fonte: do autor (2019)

O coeficiente de atrito médio total do material é de 0,36. No início do processo de desgaste, há uma diminuição do atrito em relação ao tempo e tende a estabilização posteriormente conforme Fig. 14. Tal comportamento é evidenciado nas literaturas por conta do aumento da temperatura do material. Como outra forma de validar essa redução no coeficiente do atrito em relação ao calor, foram coletados dados de corrente elétrica do motor durante o ensaio, demonstrando na Fig. 16.

Figura 16: Corrente elétrica do motor em relação ao tempo de ensaio



Fonte: do autor (2019)

O motor elétrico da máquina tribômetro move a roda de borracha consumindo determinada potência energética que é diretamente proporcional a corrente elétrica. Quanto maior o torque que o motor precisa realizar para rotacionar o seu eixo, maior será a potência necessária. No início do ensaio a corrente elétrica é superior, tendo uma redução gradativa com o tempo, convergindo com os dados de força de atrito coletados.

5. CONCLUSÃO

O tribômetro manteve sua originalidade operacional após a modificação tendo o coeficiente de atrito do material como um dado adicional, sendo possível a visualização do mesmo em tempo real e realizar armazenamento para análise. Estáveis leituras de sinal foram encontradas devido a qualidade dos componentes utilizados no projeto.

O programa desenvolvido em LabVIEW® mostrou-se de fácil utilização, possibilitando a continuidade de coleta de dados de coeficiente de atrito por outros usuários. Com isso, o desenvolvimento de um banco de dados dos coeficientes de atrito de poderá ser realizado em conjunto com trabalhos acadêmicos que utilizarem o tribômetro.

Possíveis revestimentos ou tratamentos térmicos nos materiais poderão ser descobertos durante o teste através da variação do coeficiente de atrito. O tempo exato de resistência ao desgaste será evidenciado nos dados armazenados quando a força de atrito variar.

Nos ensaios realizados, conforme literaturas citadas, nota-se uma diminuição no coeficiente de atrito do material à medida que o tempo passa e o material aumenta de temperatura. A cada intervalo de medições do corpo de prova há um resfriamento e no início do processo seu coeficiente de atrito é maior que no final da etapa.

Sugere-se a realização de mais ensaios visando assim maior fidedignidade aos achados, e realizar também, medições com uma balança de maior resolução.

Agradecimentos

Agradeço aos familiares, colegas, orientador, professores e a instituição que de forma sempre honrosa me deram todo o suporte possível.

REFERÊNCIAS

ASTM G65-00, Método de teste padrão para medição abrasão utilizando o aparelho roda / borracha seca Areia, ASTM International, West Conshohocken, PA, 2000 www.astm.org

CAETANO, Mario J. L.. Atrito e Coeficiente de atrito. [s.l]: Ctborracha, . Disponível em: <<https://www.ctborracha.com/borracha-sintese-historica/propriedades-das-borrachas-vulcanizadas/propriedades-tribologicas/>>. Acesso em: 05 maio 2018.

Desplanques Y., Roussette O., Degallaix G., M. Francois, Bulthé A-L., Sabatier L., 2006. “A reduced-scale test for pad-disc contact tribological analysis in railway braking”, *Wear* 262, 2006.

DOERING, Asno et al. Evaluation of ASTM G65 Abrasive – Spanning 13 Years of Sand. Elsevier, Houston, Tx, Usa, v. 271, p.1252-1257, 29 jul. 2011. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004316481100144X>>. Acesso em: 29 jul. 2011.

FIGLIOLA, Richard S.. Operational Modes of Instrumentation. Crc Press Llc, Clemson University, p.4-6, 1999. Disponível em: <<https://studfiles.net/preview/959281/>>. Acesso em: 23 set. 2018.

HANSMAN, John. Measurement, Instrumentation & Sensors Contents: Measurement Characteristics. Massachusetts: Massachusetts Institute Of Technology, 1999. 1104 p. Disponível em: <<http://www.kelm.ftn.uns.ac.rs/literatura/si/pdf/Measurement%20Instrumentation%20Sensors.pdf>>. Acesso em: 22 set. 2018.

HUTCHINGS, Ian; SHIPWAY, Philip. Tribology: Friction and Wear of Engineering Materials. University Of Cambridge,uk: Elsevier, 2017.

Lopes, V. J. S., “Instrumentação Virtual aplicada ao ensino experimental de engenharia elétrica”. Dissertação de Mestrado, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. São Paulo, Brasil, 2007.

National Instruments, “Newletters: O que é o LabVIEW®?”. Disponível em: <http://www.ni.com/newsletter/51141/pt/>. Acesso em 11/12/2017. Publicação: 18/02/2014.

NE BALANÇAS. TSD - Dados Técnicos. Lauro Freitas, Ba, 2018. Disponível em: <<http://www.nebalancas.com.br/aeph-tds.html>>. Acesso em: 06 nov. 2019.

RABINOWICZ, Ernest. The Nature of the Static and Kinetic Coefficients of Friction. Journal Of Applied Physics, [s.l.], v. 22, n. 11, p.1373-1379, nov. 1951. AIP Publishing. <http://dx.doi.org/10.1063/1.1699869>.

RODRIGUES, J. L. M., “Concepção de um banco de ensaios para o conjunto motor/hélice”. Dissertação de Mestrado, Universidade do Minho – Escola de engenharia. Braga, Portugal, 2011.

SANTANA, Henrique Gomes. AVALIAÇÃO DE REVESTIMENTOS PROTETORES PARA AUMENTAR A DURABILIDADE DOS CORPOS MOEDORES DO MOINHO DE CÂMARA VERTICAL. 2019. 21 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Satc Educação e Tecnologia, Criciúma, 2019.

TECNOVAC. “Catálogos de tribômetros”. Disponível em: <[http:// www.tecnovac.es](http://www.tecnovac.es)>. Acesso em: 20 set 2018.

Texaco. Glossário. Disponível em: <<http://www.texacoursa.com/Portuguese/glossary/t.html>> Acesso em: 20 setembro 2018.

WIT, Carlos Canudas de et al. Friction Models and Friction Compensation. Cnrs-inpg-ujf. Laboratoire D'automatique de Grenoble, France, p. 4-6. set. 2018. Disponível em: <http://cats-fs.rpi.edu/~wenj/ECSE4962S04/astrom_friction.pdf>. Acesso em: 29 set. 2018.