

**INSTITUTO FEDERAL DE
EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA**
RIO GRANDE DO SUL
Câmpus Farroupilha

ADEQUAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MÓDULO DE CARREGAMENTO DE UM EQUIPAMENTO PARA ENSAIOS DE ESTRUTURAS EM ESCALA REDUZIDA.

Jordan Gulden, eng.mec.jordan@gmail.com¹

Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹ Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha – RS.

Resumo: A fabricação de estruturas metálicas cada vez mais otimizadas é algo muito almejado para um melhor posicionamento no mercado, estruturas superdimensionadas, tendem a apresentar custos elevados, que consequentemente impactam negativamente em relação a margens de lucros. O desenvolvimento de modelos experimentais de baixo custo para confrontar modelos matemáticos e reais é uma opção atrativa, pois, muitas estruturas em escala real apresentam grandes dimensões e avaliar seu comportamento em uma situação de carga máxima pode ser inviável financeiramente. Em contrapartida, a representação experimental das condições de contorno que ocorrem frequentemente em sistemas estruturais, exige a construção de equipamentos apropriados, cuja complexidade envolvida nestes projetos limita a versatilidade quanto à utilização destes equipamentos para situações específicas. Por essa razão, o desenvolvimento de equipamentos experimentais aplicados ao estudo de estruturas mecânicas, representa uma vertente de pesquisa em desenvolvimento. Sendo assim, este trabalho tem como objetivo realizar adequação e calibração do módulo de carregamento em um equipamento para ensaios de estruturas em escala reduzida. Atendendo ao exposto, inicialmente, foi realizado o projeto e execução das modificações no módulo de carga. Posteriormente, realizou-se o projeto e construção do circuito eletrônico que compõe o sistema de aquisição das leituras das células de carga. Em seguida, foram realizadas as calibrações do sistema de aquisição, das células de carga e molas. Todas estas etapas realizadas atingiram os seus objetivos específicos, e o conjunto todo permitiu uma melhor integração do sistema desenvolvido.

Palavras-chave: Estruturas mecânicas, estudo experimental, escala reduzida, células de carga.

1. INTRODUÇÃO

Com o passar dos anos é notado um grande crescimento no custo do aço, um material muito utilizado na área industrial e de construção civil. Em decorrência disso, existe uma grande tendência na procura por estruturas mais otimizadas, que têm por objetivo principalmente evitar o desperdício de matéria prima. Esta procura por redução de custos que ocorre de maneira contínua, junto ao desenvolvimento de novos materiais, faz com que a procura por padronizações e desenvolvimentos de novas normas também sejam crescentes, porém a normatização majora condições dimensionais e de segurança, e isso pode acabar inviabilizando o desenvolvimento de um projeto em relação ao seu orçamento definido.

As estruturas mais utilizadas são os principais alvos dos estudos realizados, visando melhorar a margem de lucro nas mais diversas situações que o mercado necessita. Estruturas do tipo pórtico plano de aço são muito empregadas na área civil e industrial, o que consequentemente eleva a quantidade de interesse em projetos que visam a otimização deste tipo de estrutura.

Saber determinar a que tipo de esforços uma estrutura será sujeitada é uma parte muito importante do processo e muitas vezes, realizar um modelo matemático e validá-lo fisicamente em escala real pode tornar-se inviável, em algumas situações, o próprio modelo matemático pode ser extremamente complexo. Segundo Simitzes e Rezaeepazhand apud Kenan (2020), se existe um sistema cujo comportamento não pode ser expresso matematicamente apesar das suposições feitas, um processo de avaliação experimental abrangente pode ser necessário até que a sustentabilidade necessária e o desempenho desejado sejam alcançados.

Melo (2011), ainda enfatiza que modelos físicos apresentam vantagem em relação aos modelos matemáticos, pois eles não apresentam uma discretização do problema, por serem contínuos e possuírem uma representação da forma geométrica tridimensional.

Na grande maioria das vezes são realizados modelos experimentais em escala reduzida, um fator predominante para realização de um modelo em escala reduzida é a dificuldade da execução do modelo em escala real. Coutinho (2016), comenta que para sistemas grandes e superdimensionados, criar as condições reais de trabalho para testar o protótipo na maioria das vezes é impossível. Mesmo quando um teste de protótipo é possível, é caro, demorado e difícil de controlar.

Kenan (2020), apresentou um projeto de um guindaste em escala reduzida, ele utilizou a teoria da similitude e o Teorema Pi de Buckingham para realização do estudo experimental. Ele desenvolveu um modelo de elementos finitos que é capaz de calcular as frequências naturais, fatores de participação de massa e desenhar as formas modais de uma estrutura composta por elementos de pórtico espacial.

Como apresentado nas pesquisas referenciadas, é possível observar que a realização de modelos experimentais em escala reduzida é uma técnica reconhecida pelo meio científico, e o campo de possibilidades de estudos é abundante. Para realização de tais demandas, a necessidade de equipamentos próprios ou apropriados para realização de ensaios é fundamental.

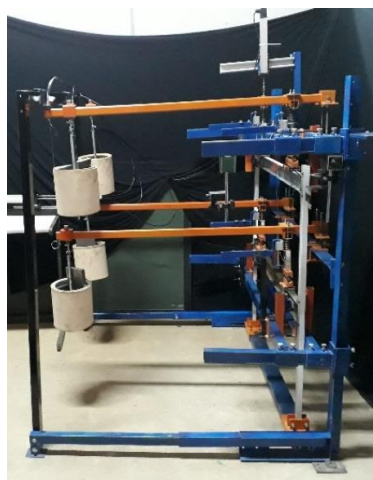
Com isso enfatizado, este trabalho tem como objetivo principal realizar adequação e calibração do módulo de carregamento em um equipamento para ensaios de estruturas em escala reduzida, possibilitando aplicação de carregamento vertical concentrado, realizar a calibração das células de cargas e molas utilizadas neste equipamento e construir um sistema para aquisição simultânea dos dados das células de cargas utilizadas no equipamento.

Os objetivos específicos do trabalho serão as adequações do equipamento, desenvolvimento de um sistema de aquisição para leitura de células de carga e, posteriormente, a calibração das células de carga, calibração das molas e calibração do sistema de aplicação da carga.

2. DESENVOLVIMENTO

2.1. Concepção inicial

Em conformidade com a proposta deste trabalho, inicialmente, foi realizada uma avaliação qualitativa quanto à operacionalidade do equipamento experimental para a realização de testes envolvendo estruturas em escala reduzida, desenvolvido por Pegoraro (2022). A Fig. 1 apresenta o equipamento construído, o qual foi idealizado com base nos seguintes requisitos exigidos para a execução dos testes (Pegoraro, 2022).



a) Vista lateral.



b) Vista isométrica.

Figura 1. Estrutura experimental construída. Fonte: Pegoraro (2022).

- Realizar carregamentos verticais distribuídos ou concentrados.
- Prover a capacidade de utilização do equipamento com diversas variações dimensionais que respeitem a capacidade máxima e mínima do equipamento.
- Permitir a operação em modo automatizado, de forma que as cargas sejam aplicadas de forma quase estática seguindo o protocolo de carregamento monotônico e repetido.
- Fornecer restrição dos graus de liberdade fora do plano de carregamento, evitando a flambagem da estrutura.
- Os pontos de aplicação de carga e de restrição devem permitir flexibilidade de posicionamento.
- Realizar a fixação da estrutura em teste em bases rígidas, conforme a definição teórica deste tipo de ligação.
- Contemplar um sistema de aquisição de dados e captação das forças aplicadas sobre a estrutura em teste.

Durante a realização dos testes experimentais, observou-se que o carregamento vertical aplicado ao espécime captado por células de carga, não estava atuando de maneira proporcional ao deslocamento empregado. Com isso, os conjuntos para aplicação de carga superior, registravam diferentes intensidades de carga para o mesmo incremento de deslocamento, conforme ilustrado na Fig. 2 a qual apresenta os resultados de um ensaio cíclico com quatro pontos de carga, sendo dois na viga superior do espécime e dois na viga inferior.

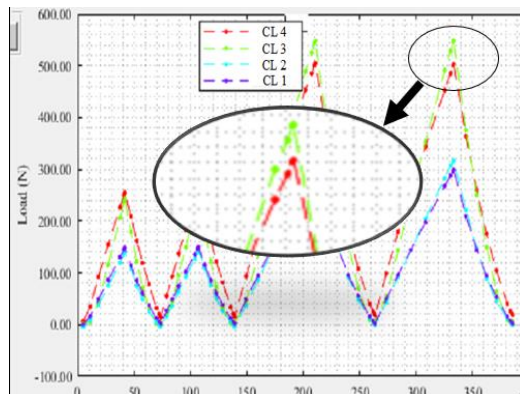
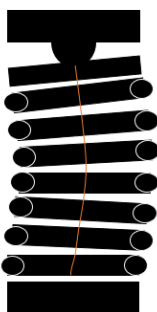


Figura 2. Gráfico dos resultados das células de carga 3 e 4. Fonte: Pegoraro (2022).

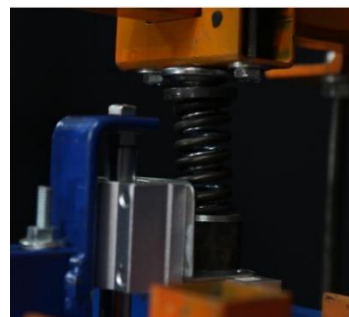
Como a problemática mencionada envolvia o sistema para aplicação de carga, foi realizado um estudo de movimento do módulo de carregamento, conforme apresentado na Fig. 2.

Como pode-se observar na Fig. 3, com a aplicação do carregamento, a mola que fica posicionada acima da célula de carga sofre uma deflexão lateral, quando sob compressão. Por essa razão, a relação entre o deslocamento aplicado e a força produzida na mola de compressão não se mantém linear, resultando nas diferenças entre as forças registradas pelas células de carga para o mesmo incremento de deslocamento, como destacado na Fig. 2.

Esta mola tem por objetivo a transferência da força de carregamento para a célula de carga.



a) Ilustração da deflexão da mola.



b) Acoplamento da mola com esfera transferidora.

Figura 3. Deflexão da mola fora do plano.



a) Não colinearidade do eixo de deslizamento do guia.



b) Conjunto célula de carga. Fonte: Pegoraro (2022).

Figura 4. Anomalias apresentadas no sistema.

A Fig. 5 apresenta a posição das células de carga no equipamento.

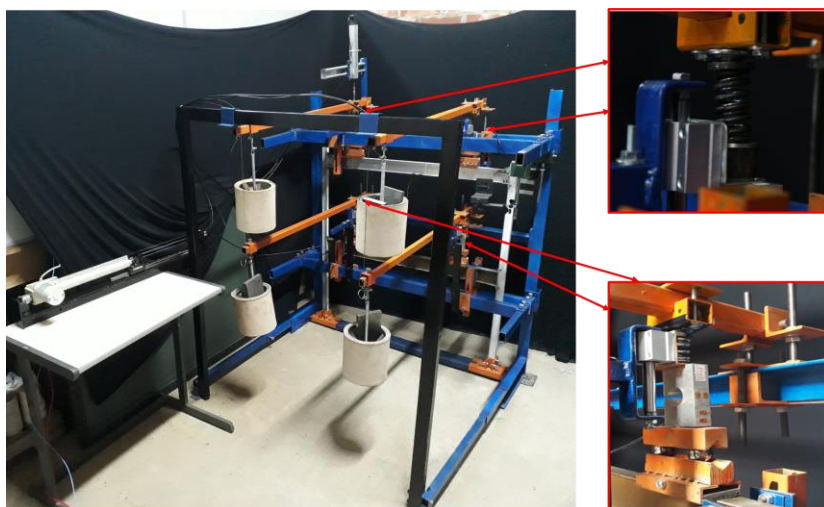


Figura 5. Posicionamento das células de carga no equipamento.

Uma vez identificado a origem da problemática, foi realizada uma investigação dos componentes de fixação e transmissão de carga na mola. Pôde-se observar as seguintes anomalias apresentadas na Fig. 3 e Fig. 4:

- Acoplamento da mola com esfera transferidora com defeitos geométricos e imperfeições, representado na Fig. 3b.
- Não colinearidade do eixo de deslocamento do guia ao eixo de carregamento, apresentado na Fig. 4a.
- Guia linear não garante estabilidade do conjunto célula de carga/mola/prismas, representado na Fig. 4b.

Os defeitos mencionados são os principais causadores da instabilidade lateral da mola sob compressão. Sendo assim, optou-se pela adequação do sistema para aplicação de carga.

2.2. Adequação do Sistema para Aplicação de Carga

Como observado na Fig. 3 e Fig. 4, o sistema previamente desenvolvido apresentava alguns fatores preponderantes para ocorrência da obtenção de resultados distintos para cada conjunto de células de carga.

Em decorrência disso, partindo do projeto previamente desenvolvido, apresentado na Fig. 6, iniciou-se o desenvolvimento de uma nova concepção, com o intuito de eliminar as discrepâncias encontradas.

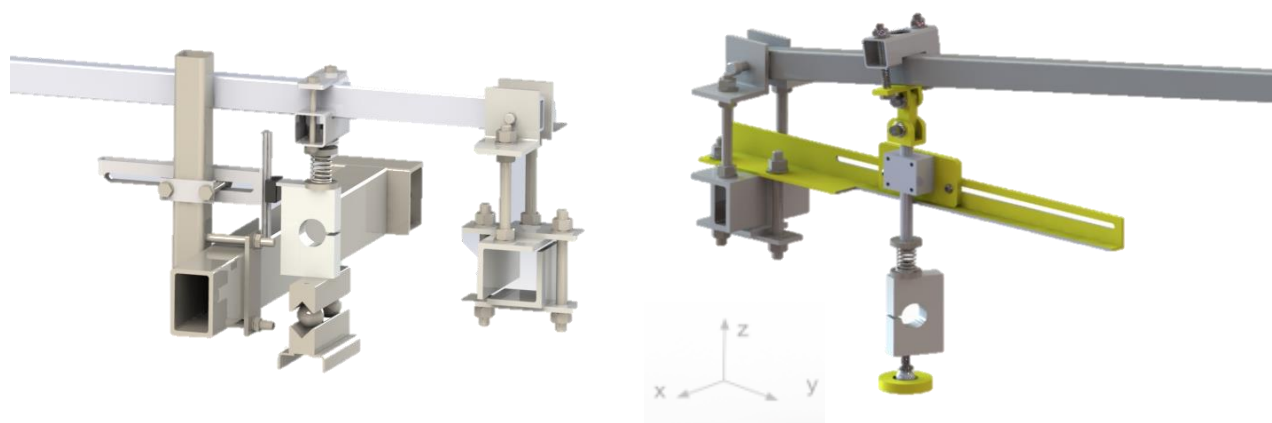


Figura 6. Projeto anterior.

Figura 7. Adequação proposta.

Utilizando o *Software Solidworks®*, realizou-se a modelagem em sólido 3D representada na Fig. 7. Um ponto relevante considerado para o desenvolvimento dos ajustes foi o grau de instabilidade apresentado pelo sistema de transferência de carga utilizado anteriormente, ele continha duas esferas transferidoras e dois prismas paralelos, que objetivavam o deslocamento livre no eixo horizontal (x), conforme plano coordenado da Fig. 7. Porém, este sistema apresentava elevada instabilidade aos módulos de carregamento. Como solução, optou-se pela exclusão do conjunto de

esferas, restringindo o grau de liberdade horizontal. Mediante essa decisão, o conjunto de esferas foi substituído por um suporte com uma base emborrachada, que restringe este grau de liberdade horizontal, conforme Fig. 8c.

Os principais componentes desenvolvidos como proposta de melhorias do sistema estão ilustrados na Fig. 7 sinalizados em amarelo.

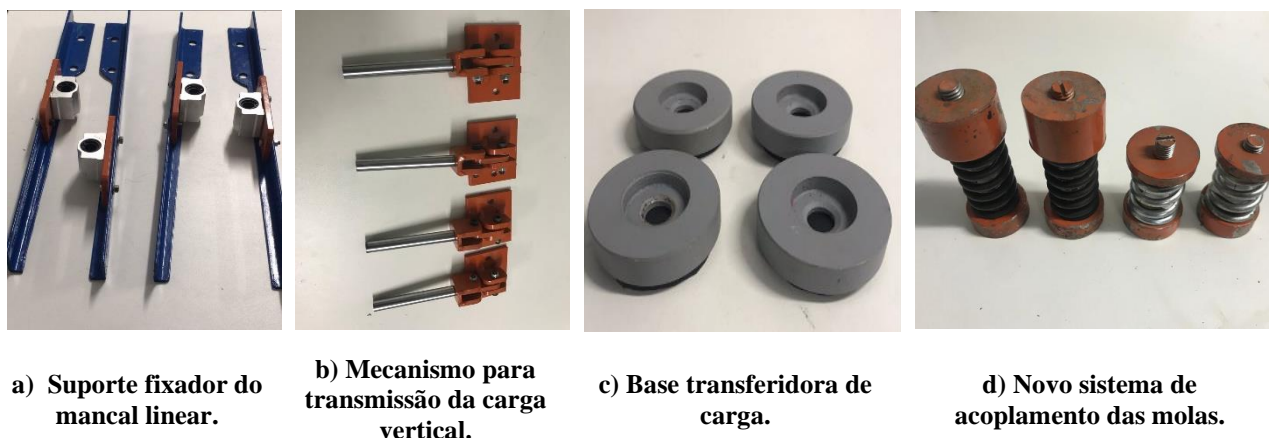


Figura 8. Subconjuntos do sistema para aplicação da carga.

A Fig. 8, apresenta respectivamente, o suporte fixador do mancal linear, o mecanismo para transmissão da carga vertical, que apresentam similaridade a um conjunto biela-pistão, a base transferidora de carga., que ficará disposta sobre a estrutura em teste, substituindo o sistema que utilizava esfera transferidora e, por final, o novo sistema de acoplamento das molas.

O mancal utilizado, aplicado ao sistema previamente desenvolvido, não fornecia restrição quanto a rotação, no eixo (x) e (y) do plano coordenado da Fig. 7, a escolha mais indicada para a situação proposta seria um mancal tipo “patins”. Portanto, como proposta de melhoria, utilizando o mancal disponível para o projeto, optou-se pela restrição da rotação do mancal, conforme a Fig. 8a.

O sistema da Fig. 8b tem por objetivo direcionar o vetor força de carregamento, convertendo o movimento angular da barra de carregamento em movimento linear do guia no mancal, reduzindo o vetor força no eixo das ordenadas, conforme plano coordenado ilustrado na Fig. 7.

O novo sistema de acoplamento das molas, apresentado na Fig. 8d sofreu uma alteração apenas no acoplador superior em relação ao construído em Pegoraro (2022), anteriormente ele recebia força de compressão por contato através de uma esfera transferidora, agora o sistema recebe a força de compressão pelo eixo do mancal, a Fig. 6 e Fig. 7 ilustram esta diferença no posicionamento.

2.3. Projeto das células de carga

Em Pegoraro (2022), foram construídas quatro células de carga “tipo C” para serem utilizadas como transdutores de força no equipamento experimental proposto, estas 4 células de carga não sofreram alterações neste trabalho, apenas foram realizadas as calibrações destas. O projeto dimensional do corpo das células de carga foi realizado em referência à metodologia apresentada por Nakka (2020), conforme Fig. 9 e Eqs (1) e (2).

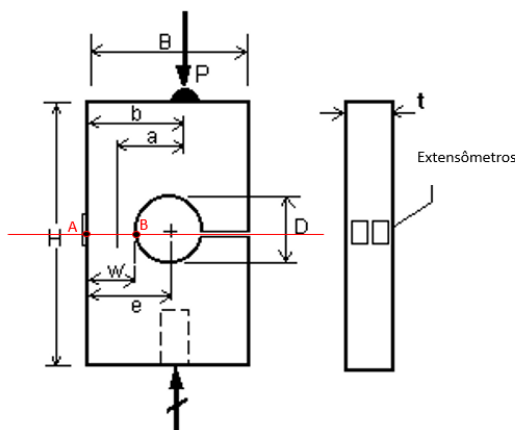


Figura 9. Parâmetros geométricos utilizados por Nakka. Fonte: Nakka (2020).

Conforme configuração geométrica da célula de carga “tipo C”, apresentada na Fig. 9, as tensões máximas atuam na seção “A-B”, também apresentada na Fig. 9, tal que o ponto de máxima concentração de tensão ocorre na superfície interna da furação, representado pelo ponto “B”. Esta tensão máxima é obtida pela superposição da tensão de flexão e tensão normal média, multiplicada pelo fator de concentração de tensão k_t , conforme Eq. (1).

$$\sigma_{m\acute{a}x} = -k \frac{P}{w t} \left(1 + \frac{6 a}{w} \right) \quad (1)$$

Da mesma forma, em se tratando da superfície externa da célula de carga, representado pelo ponto “A” da Fig. 9, a tensão máxima é obtida pela superposição da tensão de flexão e tensão normal média. Porém, neste caso, não se considera o efeito da concentração de tensão, como pode-se observar na Eq. (2).

$$\sigma_A = -\frac{P}{w t} \left(1 - \frac{12 \cdot (b^2 - ba)}{w^2} \right) \quad (2)$$

Com base na Eq. (1) e Eq. (2), fica claro que a tensão no ponto “B”, apresentado na Fig. 9, dada pela Eq. (1), representa o estado de deformação máxima de tensão atuante na célula de carga. Portanto, a Eq. (1) deve ser utilizada na definição dos parâmetros geométricos do corpo da célula de carga.

Uma vez estabelecidas as equações que governam o campo de tensões atuantes na seção crítica da célula de carga, a escolha de seus parâmetros geométricos foi realizada com base nas seguintes considerações:

- Força máxima de trabalho que o equipamento pode aplicar nos ensaios corresponde à carga nominal suportada pela célula de carga, equivalente a ± 4 kN.

- O material utilizado na fabricação do corpo da célula de carga foi o alumínio ASTM 6063 - T6, com tensão de escoamento $\sigma_e = 242$ MPa e tensão máxima $\sigma_u = 290$ MPa, conforme certificado de qualidade do fabricante.

Sendo assim, considerando as características geométricas, propriedades elásticas e resistência dos materiais, ao aplicar a Eq. (1), os parâmetros dimensionais obtidos para a célula de carga projetada estão apresentados na Fig. 10.

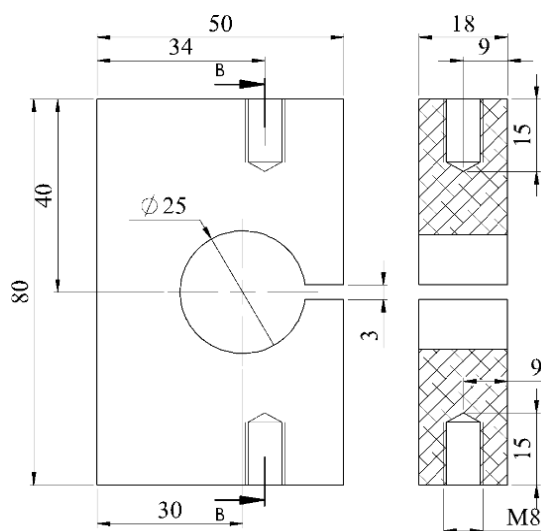


Figura 10. Dimensões da célula tipo “c”. Fonte: Pegoraro (2022).

Muito embora a superfície interna da furação contenha o ponto crítico de máxima tensão, conforme Eq. (1), uma das regiões de colagem dos extensômetros está localizada na face externa, tangente ao ponto “A”, apresentado na Fig. 8, devido à superfície plana facilitar a fixação dos transdutores. Tais extensômetros, colados paralelamente ao eixo longitudinal, são responsáveis pela medição das deformações normais provocadas pela aplicação da carga na célula de carga e, por essa razão, são denominados de extensômetros ativos. A utilização de dois transdutores possibilita a obtenção de uma deformação média atuante na seção transversal que passa pelo ponto “A”, da Fig. 9.

A construção de células de carga utilizando apenas dois extensômetros, o que caracteriza um circuito em meia-ponte de *Wheatstone*, permite a captação das deformações elásticas do material, sobrepostas às deformações térmicas por efeito da variação de temperatura. Em outras palavras, devido à variação de temperatura influenciar o campo de deformações do material, e, como a deformação é linearmente proporcional à força aplicada, qualquer incremento de deformação térmica pode mascarar a verdadeira força aplicada na célula de carga.

Como alternativa para o erro de leitura enunciado anteriormente, pode-se utilizar extensômetros passivos, formando um circuito em ponte completa. A utilização da ponte completa tem grande importância em sistemas em que se deseja observar repetibilidade para os mesmos valores de carga aplicada, pois, caso isso não ocorra, sempre que existir algum tipo de variação de temperatura ocorrerá variação na volumetria da área de colagem dos extensômetros, e esta variação será observada nos dados medidos.

Segundo Balbinot (2014) apud Fialho, L.F.L (2014), quando ocorre variação da temperatura, devem ocorrer os seguintes efeitos no extensômetro:

1. O fator K do extensômetro (Fator de *Gauge*), varia com a temperatura.
2. A grade do extensômetro irá sofrer um alongamento ou uma contração.
3. A célula sofrerá alongamento ou contração.
4. A resistência do extensômetro irá variar.

Sendo assim, além dos dois extensômetros ativos, são considerados também dois extensômetros passivos, colados transversalmente ao eixo longitudinal. Com a função de atuarem como compensadores de temperatura. A região de colagem dos extensômetros está localizada distante da seção “A-B”, da Fig. 9, evitando a ocorrência de deformações transversais por efeito de Poisson. A Fig. 11 ilustra o posicionamento definido para instalação dos 4 transdutores de deformação.



Figura 11. Célula construída. Fonte: Pegoraro (2022).

2.4. Calibração das células de carga

O processo de calibração dos transdutores consiste na obtenção dos dados de variação de resistência elétrica dos extensômetros devido à deformação elástica localizada na região de colagem dos extensômetros com a célula de carga. Posteriormente a obtenção dos dados de variação de resistência elétrica dos extensômetros, se torna possível a realização de uma interpolação linear, entre a variação de resistência elétrica (causada pela deformação dos extensômetros), e a carga aplicada.

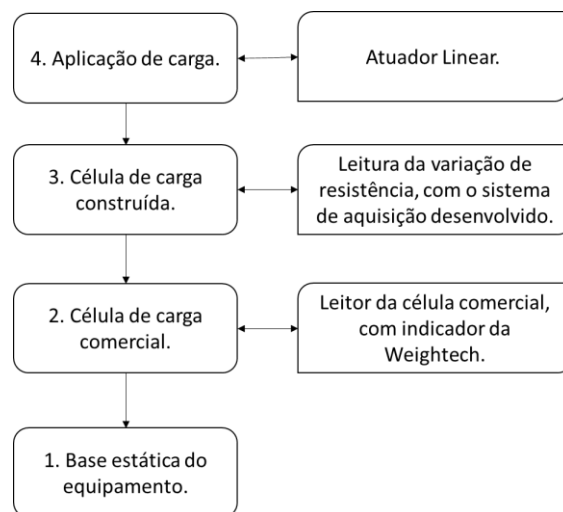
A aplicação do carregamento foi realizada através do deslocamento de um atuador linear elétrico da marca Santoro® com curso de 300 mm e capacidade de carga 6 kN. Este atuador foi controlado por um módulo Driver ponte H, 43a BTS7960 IBT2, e um micro controlador Arduino UNO. A programação para controle do atuador, foi realizada em linguagem Matlab®.

Para aquisição do valor de carregamento foi utilizado um indicador da Weigtech modelo WT1k e um transdutor comercial modelo MKCSR-5T com capacidade máxima de 50 kN e sensibilidade de 2 mV/V.

Para a coleta das informações de variação de resistência elétrica das células de carga, foi desenvolvido um sistema de aquisição que permite a leitura simultânea das 4 células, este sistema está apresentado na seção 2.6.



a) Montagem do sistema para calibração.



b) Esquema em bloco montado para calibração das células de carga.

Figura 12. Calibração das células de carga.

A Fig. 12b ilustra o esquema em blocos que foi montado para leitura dos dados de variação de resistência elétrica da célula construída, bem como a ordem de montagem do sistema. A Fig. 12a apresenta a montagem do sistema esquematizado, no equipamento.

De maneira a verificar a variação entre várias aplicações, foi definido, que para cada ciclo o método utilizado será o mesmo. Foi realizada uma medida do sistema sem carregamento, ou seja, com o atuador em sua posição zero de deslocamento, foram coletados os dados de resistência elétrica da célula de carga. Posteriormente, foram realizados incrementos de força de aproximadamente 100 N, através do deslocamento do atuador e então foram coletados os dados de variação de resistência elétrica para a carga atual.

Este procedimento de incremento de carga e coleta de variação de resistência elétrica foi executado 10 vezes para cada ciclo, totalizando ao final 1 kN de carregamento.

Ao final de cada ciclo, toda a carga do sistema foi removida, através do deslocamento do atuador para sua posição inicial. A Fig. 13 esquematiza os ciclos de carregamentos realizados, este procedimento foi realizado para cada uma das 4 células de carga.

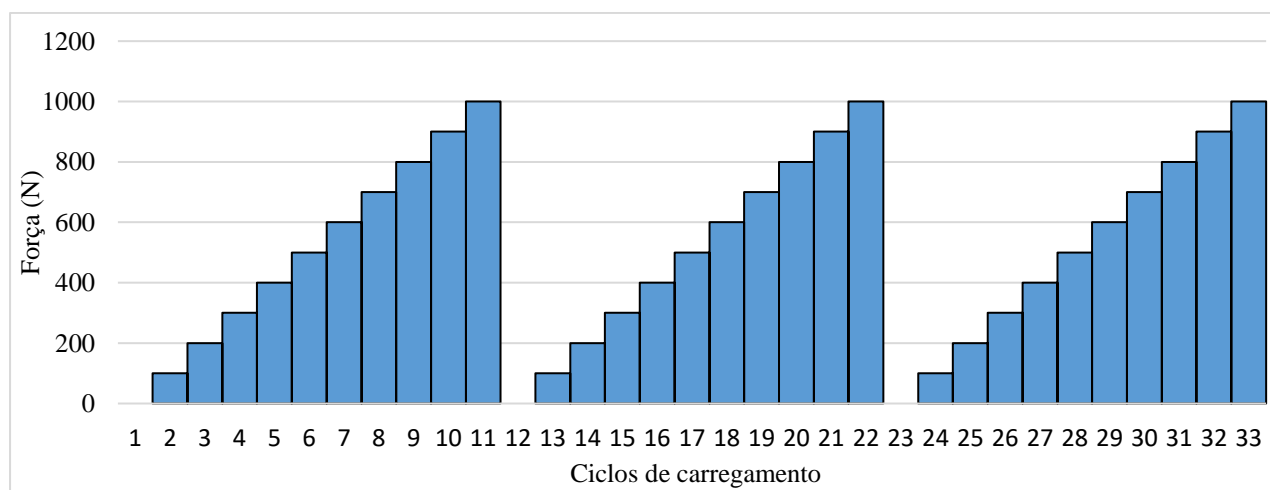


Figura 13. Método de calibração.

A Tab. 1, mostra os 3 ciclos medidos da célula 1, estes dados estão apresentados graficamente na Fig. 14. Foram criadas curvas de ajustes referentes a estes dados medidos de Força (N) e variação de resistência elétrica (V), o coeficiente de determinação e coeficientes de correlação de Pearson referente a cada interpolação linear coletada, encontram-se na legenda da Fig. 14, este mesmo processo foi realizado para as células 2, apresentados na Fig. 16, 3 apresentados na Fig. 17 e 4 na Fig. 18.

Tabela 1. Ciclos medidos na célula 1.

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Força (N)	Saída (V)	Força (N)	Saída (V)	Força (N)	Saída (V)
0,0000	0,1711	0,0000	0,1687	0,0000	0,1684
103,8879	0,1953	114,4827	0,1972	89,7125	0,1905
242,1108	0,2286	218,8611	0,2219	193,9437	0,2158
306,6606	0,2442	311,5656	0,2446	311,2713	0,2443
414,7668	0,2700	416,2383	0,2703	402,1610	0,2664
513,0630	0,2936	496,8275	0,2893	508,2071	0,2926
606,8957	0,3168	600,7644	0,3140	602,6283	0,3144
698,9625	0,3398	701,7093	0,3385	701,7093	0,3385
789,6560	0,3621	785,4377	0,3583	811,8756	0,3654
890,3066	0,3860	888,0993	0,3838	892,1214	0,3843
990,2214	0,4106	976,9289	0,4051	981,8829	0,4061

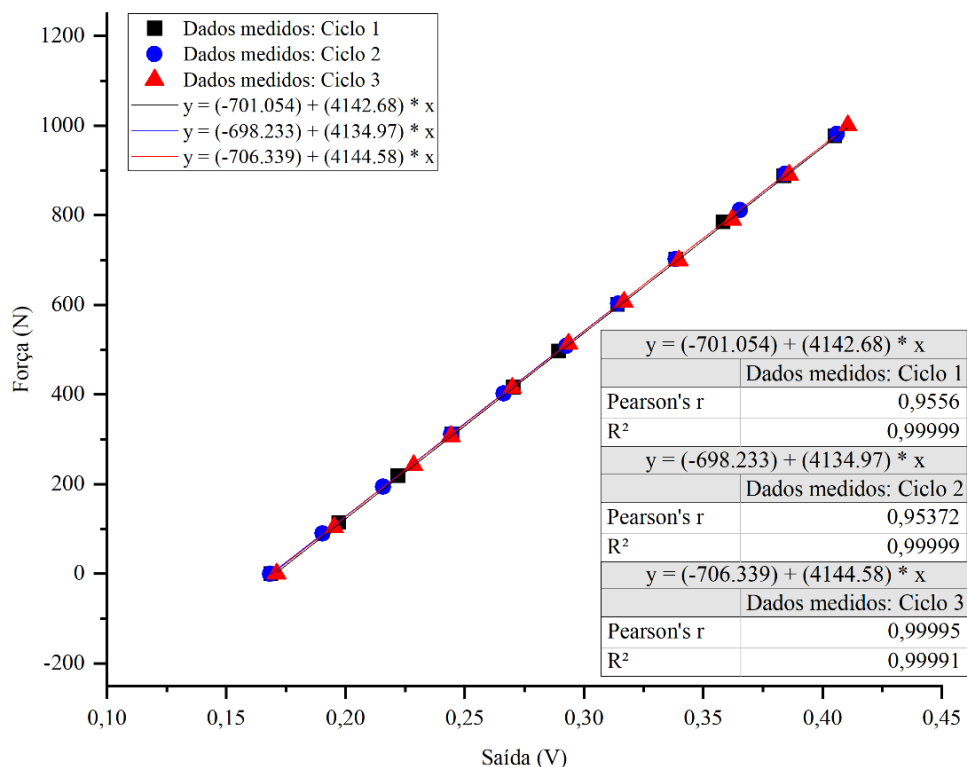


Figura 14. Dados medidos e curvas de ajustes da célula 1.

Outro detalhe extremamente importante, durante a execução de testes em protótipos, é o posicionamento das células de carga no módulo de carregamento, pois qualquer movimento em algum componente gera oscilação nos dados coletados de variação da resistência elétrica, o que pode acabar comprometendo a interpretação dos resultados durante um teste em uma estrutura.

Tabela 2. Resultados obtidos da célula 1.

Ciclo	Equação	Força (N)	Saída (V)
Ciclo 1	$y = (-701,054) + (4142,68).x$	4000	1,1347
Ciclo 2	$y = (-698,233) + (4134,97).x$	4000	1,1353
Ciclo 3	$y = (-706,339) + (4144,58).x$	4000	1,1355
Média			1,1353
Desvio padrão			0,0004
Coefficiente de variação			0,04%

No equipamento foi possível aplicar a carga máxima de aproximadamente 1 kN, o que representa 25% do valor nominal de cada um dos transdutores, porém com esta porcentagem, é possível realizar uma projeção de carregamento para a carga nominal das células que é 4 kN. Este procedimento considera que a célula seguirá a linearidade de acordo com a inclinação da curva de ajuste, esta projeção para a carga máxima da célula de carga tem como objetivo a obtenção da máxima dispersão entre as curvas geradas, o mesmo procedimento foi realizado por Vieira (2016).

Na Tab. 2, estão dispostos os dados referentes a célula 1. O principal dado apresentado é o coeficiente de variação que é obtido através da razão entre o desvio padrão dos dados e a média dos dados de saída projetados para 4kN.

Para a célula 1 o coeficiente de variação encontrado foi de 0,04%, o que representa uma elevada homogeneidade dos dados medidos. Vieira (2016), encontrou coeficientes de variação para uma célula desenvolvida variando entre 0,026% e 0,29%, aplicando o mesmo método.

Após finalizado cada ciclo de 10 carregamentos, antecedendo o início de cada novo ciclo, foram realizados intervalos de aproximadamente 40 segundos, este procedimento foi realizado visando amenizar possíveis efeitos de histerese de carregamento que poderia vir a comprometer a repetibilidade de cada célula de carga.

Toso (2012) apresenta a histerese como a tendência que um material ou sistema tem de conservar suas propriedades após a remoção de seus estímulos. Ela é definida como a máxima diferença entre as saídas lidas para um mesmo carregamento.

Tabela 3. Resultados medidos da célula 2.

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Força (N)	Saída (V)	Força (N)	Saída (V)	Força (N)	Saída (V)
0,0000	0,1212	0,0000	0,1142	0,0000	0,1120
115,5128	0,1556	122,0364	0,1535	114,4337	0,1491
220,8722	0,1871	210,6207	0,1810	205,3233	0,1776
309,6036	0,2124	337,4150	0,2199	325,9373	0,2151
411,7257	0,2448	424,6749	0,2466	407,8017	0,2397
497,3670	0,2712	506,1470	0,2721	491,1867	0,2656
592,0335	0,3004	589,2377	0,2970	593,2107	0,2972
704,1128	0,3346	684,6890	0,3242	698,2268	0,3290
807,7064	0,3658	787,9392	0,3558	775,7748	0,3518
877,0140	0,3863	889,4237	0,3861	882,9000	0,3842
996,1074	0,4211	996,1074	0,4189	986,5427	0,4157

Como pode ser observado na Tab. 3 os resultados medidos para a célula 2 também apresentaram repetibilidade, semelhante a célula 1. Ao ser avaliado os dois últimos valores dos ciclos 1 e 2, referentes a célula 2, pode ser observado que coincidentemente o valor de força em Newtons, apresenta uma diferença muito pequena de variação de resistência elétrica, aproximadamente 0,0022.

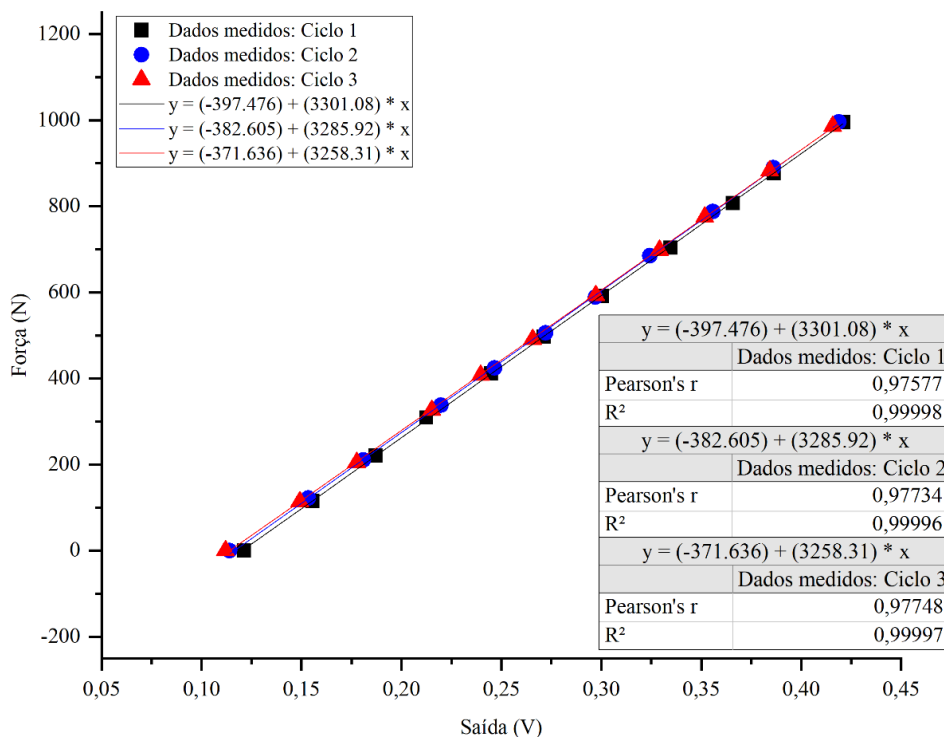


Figura 15. Dados medidos e curvas de ajustes da célula 2.

Tabela 4. Resultados obtidos da célula 2.

Ciclo	Equação	Força (N)	Saída (V)
Ciclo 1	$y = (-397,476) + (3301,08).x$	4000	1,3321
Ciclo 2	$y = (-382,605) + (3285,92).x$	4000	1,3337
Ciclo 3	$y = (-371,636) + (3258,31).x$	4000	1,3416
Média			1,3337
Desvio padrão			0,0051
Coefficiente de variação			0,38%

Para a célula 3 os dados referentes aos ciclos apresentados estão dispostos na Tab. 7.

Tabela 5. Resultados medidos da célula 3.

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Força (N)	Saída (V)	Força (N)	Saída (V)	Força (N)	Saída (V)
0,0000	0,4444	0,0000	0,4485	0,0000	0,4500
94,8137	0,4202	107,4195	0,4201	107,6157	0,4212
213,0732	0,3896	220,3326	0,3913	209,1492	0,3950
322,5528	0,3618	313,2824	0,3678	320,9832	0,3665
402,4062	0,3417	414,2273	0,3425	420,2114	0,3421
502,0268	0,3168	507,7656	0,3190	513,2592	0,3190
606,5523	0,2909	600,1268	0,2965	595,7123	0,2986
701,4150	0,2688	702,4941	0,2724	700,0416	0,2738
804,8124	0,2428	801,5261	0,2485	791,6670	0,2510
892,4157	0,2216	885,4997	0,2271	885,3525	0,2273
969,0809	0,2041	982,9620	0,2027	988,6518	0,2032

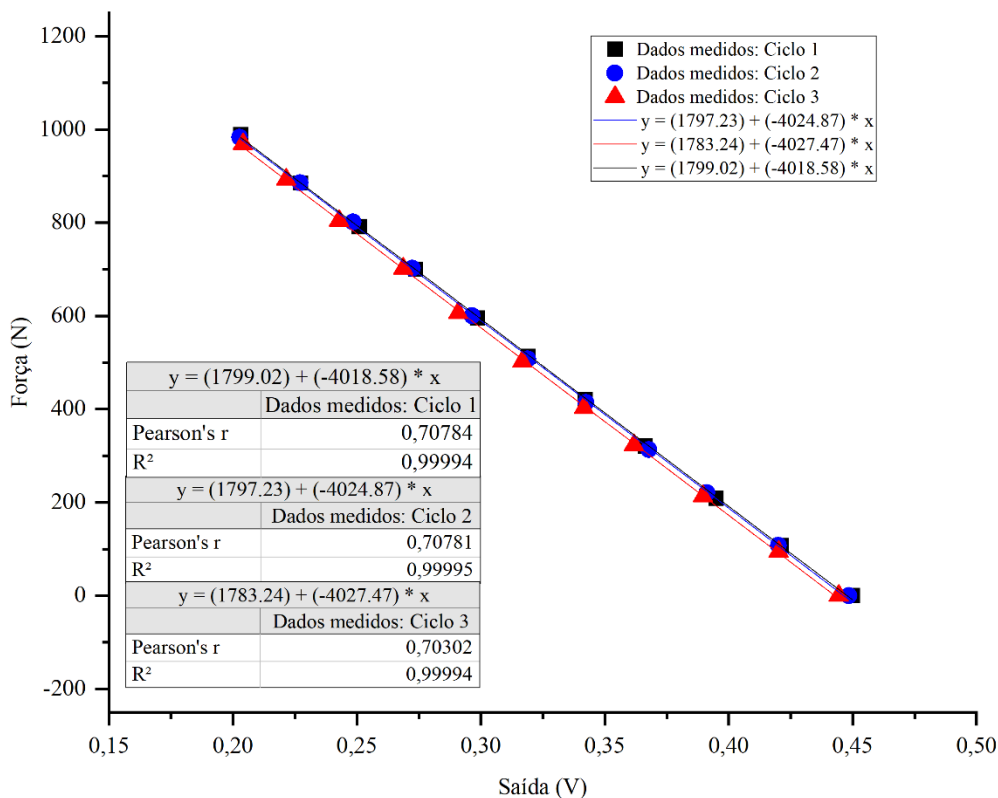


Figura 16. Dados medidos e curvas de ajustes da célula 3.

Tabela 6. Resultados obtidos da célula 3.

Ciclo	Equação	Força (N)	Saída (V)
Ciclo 1	$y = (1799,02) + (-4018,58).x$	4000	-0,5477
Ciclo 2	$y = (1797,23) + (-4024,87).x$	4000	-0,5472
Ciclo 3	$y = (1783,24) + (-4027,47).x$	4000	-0,5504
Média			-0,5477
Desvio padrão			0,0017
Coefficiente de variação			-0,31%

Tabela 7. Resultados medidos da célula 4.

Ciclo 1		Ciclo 2		Ciclo 3	
Força (N)	Saída (V)	Força (N)	Saída (V)	Força (N)	Saída (V)
0,0000	0,7552	0,0000	0,7615	0,0000	0,7664
109,9701	0,7264	109,3815	0,7308	108,5967	0,7332
208,2173	0,7021	195,5133	0,7085	182,7113	0,7130
315,5387	0,6753	313,1352	0,6785	323,4848	0,6760
410,5485	0,6513	415,0121	0,6522	409,3713	0,6543
503,2040	0,6280	509,2371	0,6284	507,4713	0,6292
589,3848	0,6062	590,2187	0,6077	604,0998	0,6041
703,6223	0,5769	716,7677	0,5748	701,6112	0,5790
787,6449	0,5563	792,2066	0,5556	804,7634	0,5526
872,2071	0,5345	883,8810	0,5325	881,7719	0,5329
985,0712	0,5068	979,2342	0,5080	988,0142	0,5062

Para evitar o comprometimento dos dados de variação de resistência elétrica, durante a coleta destes, foi tomado um extremo cuidado para que o sistema não se movimentasse, principalmente durante o reinício dos carregamentos, pois neste instante a carga era toda retirada da célula, deixando-a livre.

Porém mesmo assim durante o ciclo de carregamento 2, referente a célula 4, ocorreu uma movimentação na célula de carga, ocasionando em uma alteração no coeficiente angular da curva de ajuste da célula de carga referente a este ciclo.

As células 3 e 4 demonstraram coeficientes de variação negativos, isso se dá devido a montagem da ponte não ter ficado em equilíbrio, ou seja, no momento da montagem dos extensômetros, não foi realizado o procedimento ilustrado na Fig.17. O resultado disso é que nas saídas medidas através do sistema de aquisição foram encontrados valores decrescentes para variação de resistência elétrica dos extensômetros. Ainda assim, foi possível a obtenção dos dados estatísticos referentes a estas duas células de carga.

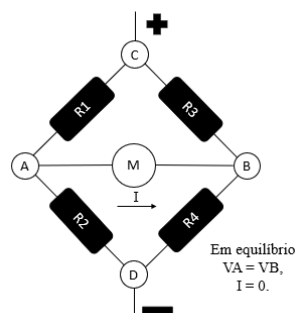


Figura 17. Ponte de Wheatstone.

A Fig. 17 apresenta um esquema da ponte de *Wheatstone* em equilíbrio.

O valor obtido da ponte montada respeita a Eq. (3), onde as resistências representadas por R1, R2, R3 e R4, são os extensômetros.

$$\frac{R1}{R2} = \frac{R3}{R4} \quad (3)$$

Nas células de carga que o valor medido na saída é negativo a montagem deste circuito não está de acordo com a Eq. (3).

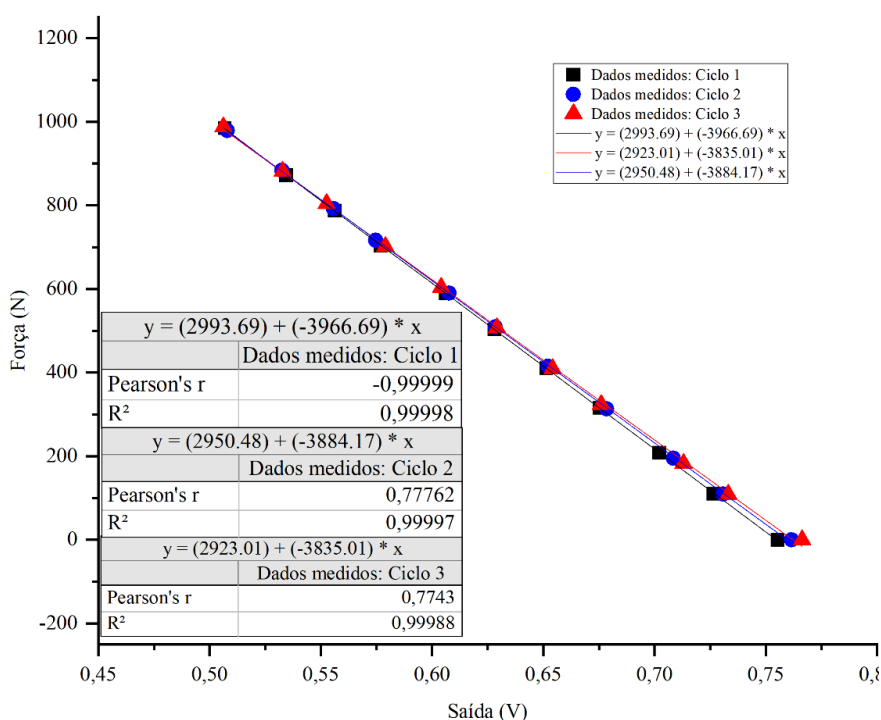


Figura 18. Dados medidos e curvas de ajustes da célula 4.

Tabela 8. Resultados medidos da célula 4.

Ciclo	Equação	Força (N)	Saída (V)
Ciclo 1	$y = (2993,69) + (-3966,69).x$	4000	-0,2536
Ciclo 2	$y = (2950,48) + (-3884,17).x$	4000	-0,2702
Ciclo 3	$y = (2923,01) + (-3835,01).x$	4000	-0,2808
Média			-0,2702
Desvio padrão			0,0137
Coefficiente de variação			-5,07%

A célula 4 demonstrou a maior variação em relação as outras 3 células. A Fig. 18 ilustra esta ampliação na dispersão, que é decorrente da diferença do ângulo entre as 3 curvas.

Na Tab. 8 pode ser observado que ao aplicar a projeção para 4 kN essa dispersão apresenta um coeficiente de variação de 5,07% no mesmo ponto para as três curvas de ajuste referente aos dados interpolados de variação de resistência elétrica e força.

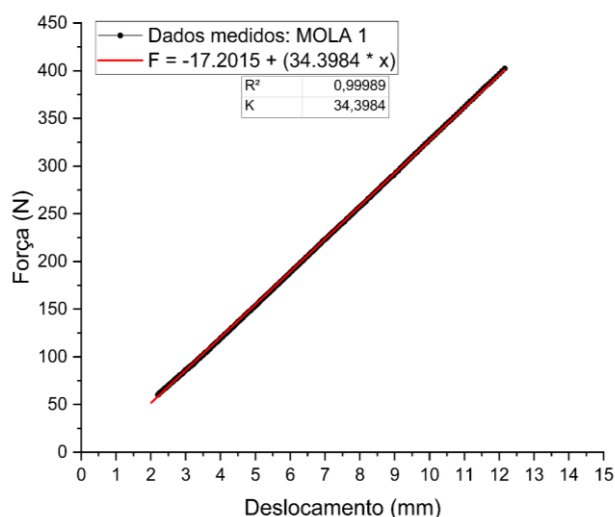
2.5. Calibração das molas

Para a determinação das constantes elásticas das molas, foi utilizada uma máquina de ensaios universal, modelo EMIC, DL20000, que fornece conforme parametrização definida, os dados de carga aplicada e seu respectivo deslocamento. Inicialmente, foram realizadas pré-cargas nas molas com o intuito de eliminar ruídos provenientes de folgas na montagem do sistema no equipamento, e na sequência iniciou-se o carregamento progressivo até a carga final definida.

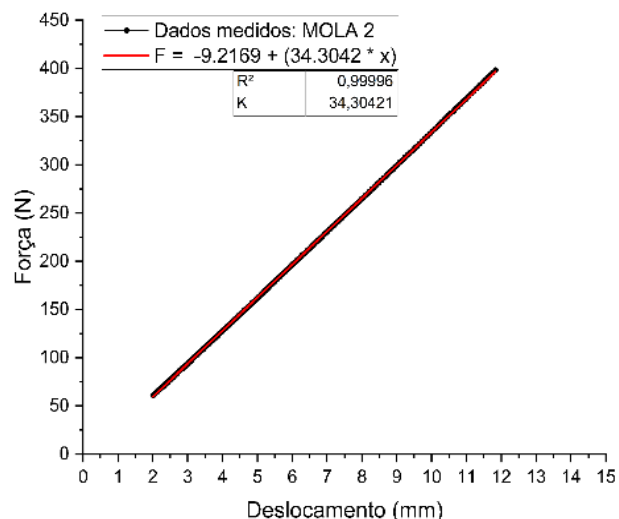
Este procedimento foi realizado quatro vezes para cada mola e, após isso, foram gerados dados médios de força e deslocamento, referentes aos dados obtidos de cada uma das repetições. Este procedimento foi realizado para as quatro molas, denominadas mola 1, mola 2, mola 3 e mola 4.

Foram medidos aproximadamente 230 pontos de Força, para cada um dos ciclos das molas.

Com os dados médios de Força e deslocamento referentes a cada uma das molas, foi gerado um gráfico interpolando linearmente a força e deslocamento, por meio do qual, se torna possível a geração da curva correspondente a estes dados interpolados. A inclinação referente a esta curva gerada é a constante elástica da mola. Para isso foi considerado que as molas que foram medidas obedecem a lei de Hooke.

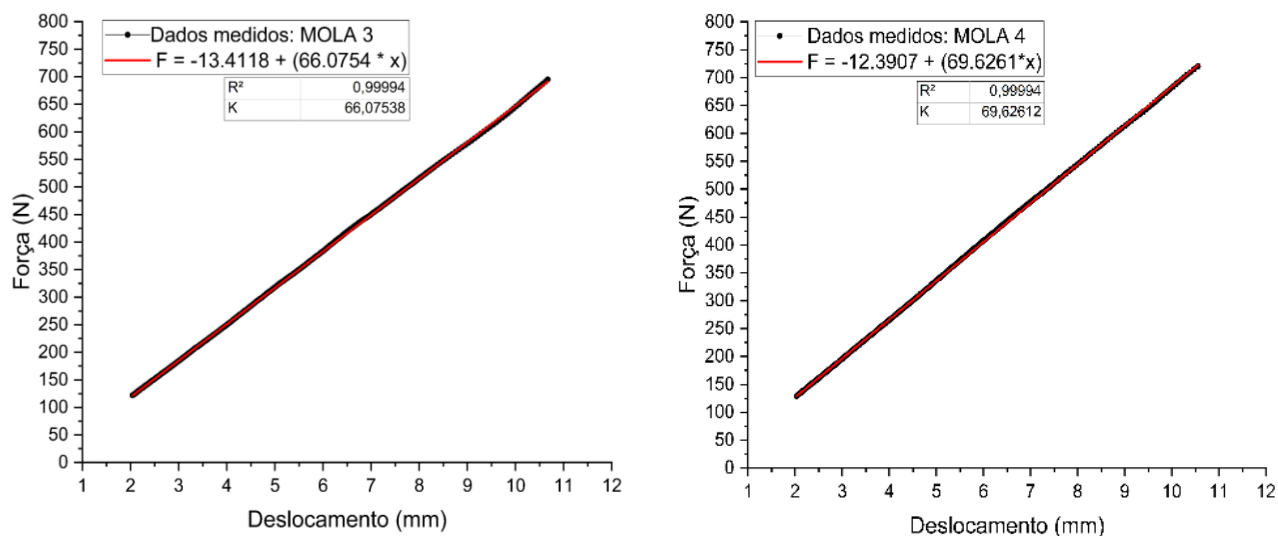


a) Dados medidos e curvas de ajustes - Mola 1.



b) Dados medidos e curvas de ajustes - Mola 2.

Figura 19. Calibração das molas superiores.



a) Dados medidos e curvas de ajustes - Mola 3.

b) Dados medidos e curvas de ajustes - Mola 4.

Figura 20. Calibração das molas inferiores.

Conforme a Fig. 19 e Fig. 20, que apresenta os dados medidos de cada par de mola e suas respectivas curvas geradas, as molas apresentam linearidade e elevada similaridade as curvas de ajustes, fato que pode ser observado em seus respectivos coeficientes de determinação, em todos os casos, muito próximo ao seu valor máximo, que é 1.

2.6. Sistema de aquisição

O monitoramento das células de carga foi realizado através de um sistema de aquisição desenvolvido para leitura simultânea das 4 células de cargas utilizadas no equipamento. A Tab. 9 especifica à lista dos componentes utilizados no desenvolvimento do sistema.

Grante apud Bezerra (2014) comenta sobre a importância da criação de um circuito de medição para leitura de extensômetros, pois a variação ôhmica do extensômetro é muito pequena e não pode ser medida diretamente por um osciloscópio ou multímetro.

$$\frac{\Delta R}{R} = k \cdot \epsilon \tag{4}$$

ΔR = variação de resistência [Ω]

R = resistência inicial [Ω]

k = fator do extensômetro, adimensional

ϵ = deformação, adimensional

A Eq. (4) mostra quais os parâmetros relevantes a variação de resistência de um extensômetro.

A Fig. 21, ilustra de forma esquemática a montagem dos componentes e as ligações do circuito desenvolvido para aquisição dos dados.

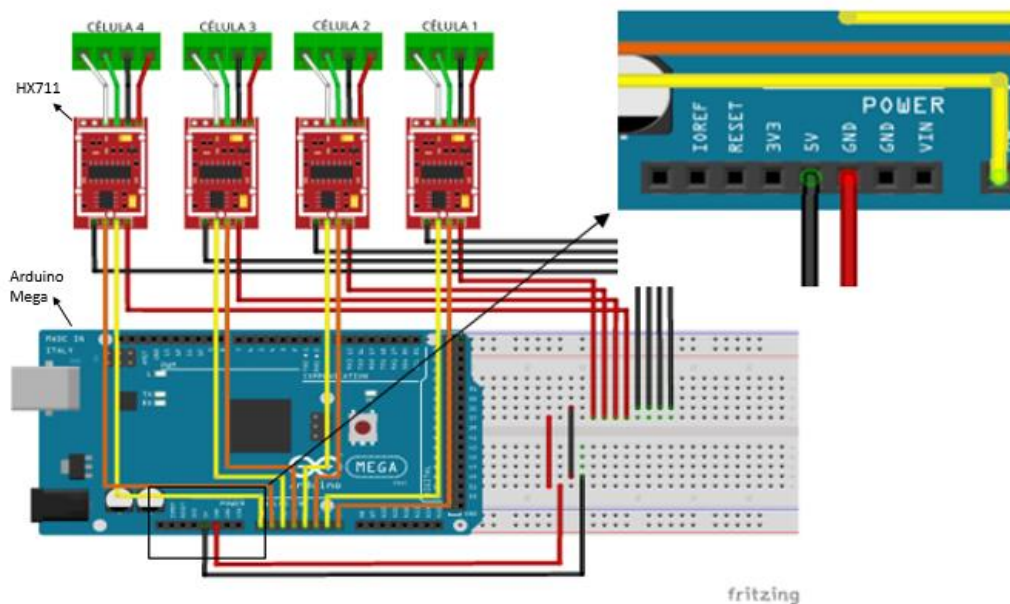


Figura 21. Circuito montado para leitura simultânea dos transdutores.

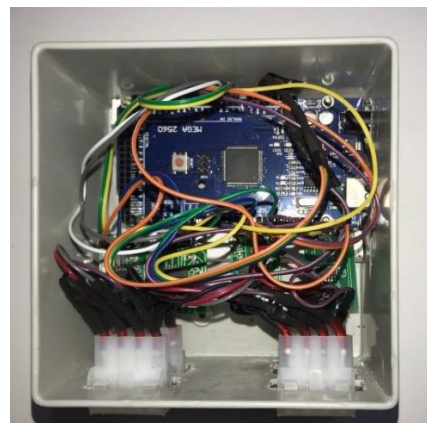
A Fig. 22, apresenta o sistema de aquisição construído. Todas as conexões que não seriam modificadas ao alterar as entradas no microcontrolador foram soldadas, evitando possíveis interferências por mal contato, que poderiam refletir na coleta de dados de resistências elétrica. Como é possível observar na Fig. 21, a tensão de alimentação aplicada é de 5 V e este parâmetro foi considerado na Eq. (5) para o cálculo da variação da resistência elétrica encontrada nas células de carga.

Tabela 9. Lista de componentes utilizados para desenvolvimento do circuito.

Componentes	Quantidade (unidades)
Microcontrolador Arduino MEGA 2560 R3	1
Cabo USB - Arduino	1
Módulo HX711	4
Conectores de 4 vias (macho e fêmea)	4
Caixa de passagem 150x150x68mm	1
Jumpers	34



a) Sistema de aquisição desenvolvido.



b) Circuito montado.

Figura 22. Sistema de aquisição

O principal componente utilizado para a aquisição dos dados foi o módulo HX711, que é um conversor analógico digital (ADC) de 24 bits de precisão. Ele foi projetado para utilização em transdutores e aplicações de controles industriais para realizar a interface diretamente com um sensor de ponte, realizando a amplificação dos sinais da célula e reportando para outro microcontrolador. O ganho pode ser selecionado entre 3 opções, 32, 64 e 128 bits. Uma grande vantagem da utilização do módulo HX711 é a velocidade de resposta elevada e forte resistência a interferências. (YIDA, 2014).

Aprilyana (2019), desenvolveu um sistema para medir a força de tração aplicada em uma célula “tipo S”, em seu trabalho foi utilizado também o módulo HX711 e um Arduino como microcontrolador. O maior erro encontrado foi de 4,8%, e o menor erro encontrado foi de 0,01%.

Para contemplar todos os componentes do circuito de forma segura e evitando interferências por mal contato proveniente das ligações entre os componentes, foi desenvolvido um *case*, que permite por meio dos conectores 4 vias um acoplamento rápido entre os transdutores desenvolvidos e o circuito de amplificação do módulo HX711 que alimenta o micro controlador Arduino Mega 2560 R3. As ligações realizadas entre o conector 4 vias e os módulos foram soldadas com estanho na pinagem referente ao ganho de 128 bits.

Com o intuito da realização da leitura dos dados enviados ao microcontrolador, foi desenvolvido um algoritmo disponível no anexo 1, que converte os sinais analógicos em tensão (V), de acordo com a Eq. (5).

$$\frac{16777215}{5} = \frac{X}{Y} \quad (5)$$

Onde X representa o valor do sinal obtido da célula, ele é equivalente a variação de resistência demonstrada na Eq. (4), e Y é o valor da tensão em Volts com o ganho selecionado. O valor de Y foi plotado pelo microcontrolador em sua serial.

3. RESULTADOS

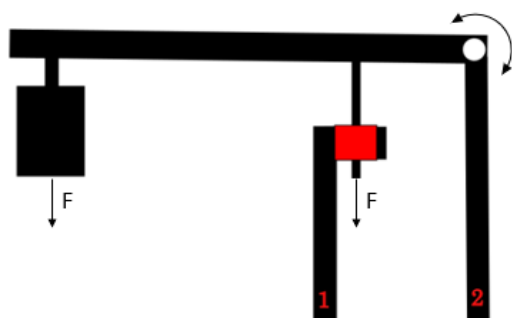
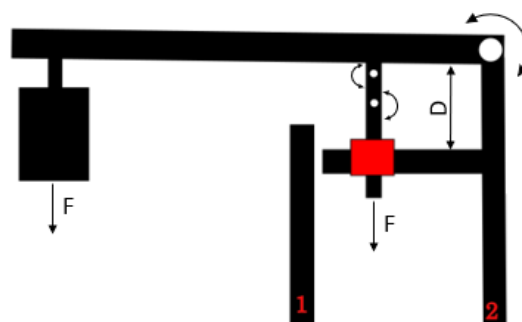
3.1. Adequação do equipamento:

Na Fig. 24 encontra-se um diagrama esquemático com a situação previamente desenvolvida para o sistema de carregamento do equipamento, nele é possível observar que o guia do eixo de aplicação de força, representado pelo retângulo em vermelho, está fixo na barra 1, que é uma barra que tem o objetivo de apenas limitar o deslocamento da estrutura a ser ensaiada. A Fig. 23 ilustra o sistema atual montado após as alterações.



Figura 23. Configuração atual do módulo de carregamento.

Outro fator que acabou proporcionando reduções no tempo de setup de montagem da estrutura no equipamento foi a padronização da dimensão “D” que está apresentada na Fig. 25. Na parte superior do eixo guia foram acrescentadas duas articulações, que objetivam a conversão do movimento angular da barra em movimento linear do eixo no mancal.

ANTERIOR**Figura 24. Diagrama esquemático situação anterior.****ATUAL****Figura 25. Diagrama esquemático situação atual.**

3.2. Calibração das células de carga

As calibrações das células de carga apresentaram resultados estatísticos que atestam a linearidade de ambas, um fator que deve ser considerado e que ocasiona alterações em relação a inclinação da curva para cada ciclo é o posicionamento dos parafusos de apoio, qualquer rotação em relação a rosca destes, ocasionam pequenas alterações na angulação do vetor de força na célula, que ocorre, devido a colinearidade entre estes parafusos não ser perfeita.

Como a interpolação dos dados de variação de resistência elétrica de cada ciclo de carregamento demonstra repetibilidade e o único fator que pode impactar na variação da inclinação da curva de calibração da células é a algum tipo de movimentação nas células de cargas, a sugestão de solução é a obtenção do ângulo da curva no momento da realização de cada ensaio, como uma espécie de tara, e manter uma pequena pré-carga após isso, visando a permanência da posição dos componentes de acordo com a posição inicial.

3.3. Calibração das molas

Os resultados das calibrações das molas apresentaram-se satisfatórios, conforme o previsto, o comportamento para todas demonstram que elas respeitam a Lei de Hooke. O que permite a obtenção de suas constantes elásticas.

A Tab. 10 apresenta a constante elástica de cada uma das molas.

Tabela 10. Lista de componentes utilizados para desenvolvimento do circuito.

Molas	Constante elástica, K (N/mm)
1	34,39 N/mm
2	34,30 N/mm
3	66,07 N/mm
4	69,62 N/mm

3.4. Sistema de aquisição.

O sistema de aquisição desenvolvido para leitura das 4 células simultâneas mostrou-se muito eficiente durante a etapa de calibração. A velocidade da obtenção dos dados oriundos da deformação dos extensômetros é instantânea, a frequência de obtenção dos dados foi de 10 Hz. O sistema desenvolvido apresentou resistência a interferências externas, que eram notadas no sistema de aquisição utilizado por Pegoraro (2022).

Em todos os testes realizados nas células de carga, com o sistema atual, não foram detectadas variações que pudessem gerar dúvidas quanto a repetibilidade da obtenção dos dados em relação ao sistema de aquisição, isso pode ser observado nos levantamentos das curvas de calibração para as células de carga, que apresentaram variações extremamente baixas. O que prova que este sistema é confiável e poderá ser utilizado para geração de leituras simultâneas de 4 células de carga ou individuais, de acordo com a aplicação desejada, suprimindo a necessidade do equipamento e aumentando a praticidade, que por consequência, ocasiona em uma redução no tempo da montagem do equipamento.

4. CONCLUSÃO

Todas etapas propostas do projeto atenderam às expectativas idealizadas. Em relação ao desenvolvimento dos ajustes no equipamento que foram realizados, o sistema atual permitiu um deslocamento linear da mola, evitando as deflexões laterais existentes no sistema previamente desenvolvido, também foi notado um ganho elevado na estabilidade do sistema em decorrência da nova base da célula de carga.

O sistema de aquisição desenvolvido apresentou elevada praticidade, velocidade e confiabilidade para obtenção dos dados de saída de cada uma das células de carga, além de que a utilização do microcontrolador Arduino corroborou a uma considerável facilidade em relação a customização tanto do sistema quanto dos dados obtidos por ele, eliminando a necessidade de utilização de uma fonte de alimentação externa, que anteriormente era utilizada. A utilização de conectores 4 vias, macho e fêmea, forneceram padronização na montagem do sistema, evitando a possibilidade de montagem incorreta da célula de carga no sistema de aquisição, que poderiam comprometer os resultados obtidos.

A calibração das células de carga apresentou coerência em relação às referências utilizadas, demonstrando elevado grau de linearidade e repetibilidade, dados que foram provados com os valores dos coeficientes de variação referente a cada uma delas.

As molas demonstraram linearidade, confirmando que ambas seguem a Lei de Hooke, as curvas de ajustes referentes aos dados medidos apresentam elevada correlação que pode ser verificada pelo coeficiente de determinação de cada uma delas.

Como sugestão de trabalhos futuros, ainda é necessário desenvolver um algoritmo que permita integração entre o deslocamento do atuador e a obtenção dos dados de forma autônoma para este novo sistema de aquisição, e assim usufruir de forma simultânea todo o equipamento.

5. AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer imensamente aos meus pais, Janete e Claudiomir, que me forneceram os alicerces necessários para que eu pudesse estar realizando meu sonho.

Agradeço ao meu irmão Janriê pelo companheirismo.

A minha querida avó Ilda (in memoriam), que carregou em minhas lembranças.

Obrigado a minha namorada Júlia, que sempre me forneceu apoio nos momentos de dificuldade.

Agradeço a todos os docentes do Campus, por terem compartilhado de suas sabedorias, experiências e tempo, principalmente ao Doutor Adelano, meu orientador durante este ano de muito trabalho.

Um agradecimento especial ao Mestre Carlos Eduardo Avelleda (in memoriam), que certamente está vibrando com a conquista do primeiro piloto do baja do Campus Farroupilha.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Kenan, H., Azeloğlu, O., 2020. "Design of scaled down model of a tower crane mast by using similitude theory". *Engineering Structures*, Volume 220, 110985, ISSN 0141-0296, Disponível em URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.110985>.
- Melo, L. R. T., 2011. Monitoração de modelos físicos reduzidos para investigação do comportamento de estruturas em escala real. Dissertação, Escola Politécnica da Universidade de São Paulo;
- P. Coutinho. et al, 2016. "Reduced scale models based on similitude theory: A review up to 2015". *Engineering Structures* Volume 119, Pages 81-94, ISSN 0141-0296, Disponível em URL: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2016.04.016>.
- PEGORARO, Lucas, Projeto e construção de um equipamento experimental para realização de testes envolvendo estruturas mecânicas em escala reduzida. 2022. 21 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia, Campus Farroupilha, Rio Grande do Sul, 2022.
- NAKKA, Richard, 2020. "Strain Gage Load Cell for Thrust Measurement". Richard Nakka'S Experimental Rocketry Web Site. Disponível em: URL: <https://www.nakka-rocketry.net/strainlc.html#Appendix>. Acesso em: 10 out. 2022.
- TOSO. A.M, Desenvolvimento de uma plataforma de forças para medição e análise dos esforços verticais para modelamento biodinâmico da caminhada humana. Orientador: Dr. Herbert Martins Gomes. 2012. 122 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 2012.
- FIALHO, Luiz Filipe Lopes et al, 2014. Simulação e projeto de células de carga. p. 48, Disponível em URL: https://www.researchgate.net/profile/Luiz-Filipe-Fialho/publication/274251429_Simulacao_e_Projeto_de_Celulas_de_Carga/links/55197d800cf244e9a4579696/Simulacao-e-Projeto-de-Celulas-de-Carga.pdf. Acesso em: 15 out 2022.

- VIEIRA. M.O, 2016. Desenvolvimento, construção e calibração de uma célula de carga extensométrica, utilizando o Método de Elementos Finitos. Volume 19, n.35, P 25-36. Disponível em URL: <https://silo.tips/download/desenvolvimento-construao-e-calibraao-de-uma-celula-de-carga-extensometrica-util>.
- BEZERRA. B, Desenvolvimento de um sistema de medição de força para mensurar a carga real aplicada por usuário em um aparelho de musculação. Orientador: Dr. Marcos Roberto Rodacoski. 2014. 84 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Paraná, 2014.
- YIDA, 2019. "10 Things you can do with your HX711 and Load Cell" Web Site. Disponível em: URL: <https://www.seeedstudio.com/blog/2019/11/26/10-things-you-can-do-with-your-hx711-and-load-cell/>. Acesso em: 12 Out. 2022.
- APRILYANA, Gita; SETIONINGSIH, Endang Dian; TRIWIYANTO, Triwiyanto. Design of Force Meter for Traction Unit. Indonesian Journal of Electronics, Electromedical Engineering, and Medical Informatics, v. 1, n. 2, p. 57-60, 2019.

ABSTRACT

Jordan Gulden, eng.mec.jordan@gmail.com¹

Adelano Esposito, adelano.esposito@farroupilha.ifrs.edu.br¹

¹ Federal Institute of Education, Science and Technology of Rio Grande do Sul – Campus Farroupilha, Avenida São Vicente, 785, Bairro Cinquentenário, CEP 95180-000, Farroupilha - RS.

Abstract: *The fabrication of increasingly optimized metallic structures is a lot of something much wanted for a better positioning in the market, oversized structures, tend to have high costs which consequently impact negatively in relation to the margins of profit. The development of experimental models of low cost to confront mathematical and real models is an attractive option, because, a lot of structures in real scale present big dimensions and to evaluate their behavior in a maximum load situation may be financially unfeasible. On the other hand, the experimental representation of the boundary conditions that often occur in structural systems, require the construction of appropriate equipment, whose complexity involved in these projects limits the versatility regarding the proper use of this equipment for specific situations. For this reason, the development of experimental equipment applied for study of mechanical structures, represents of strand study in development. Thus, this work has as an objective accomplish loading module adequacy and calibration in a testing equipment of structures in reduced scale. Given the above initially, the project and execution of the modifications in the load module were carried out. Posteriorly, the project and built to electronic circuit that composes the system of load cell reading acquisition were carried out. Then the calibrations of acquisition system, load cells and springs were carried out. All performed phases reached the specific objectives, and all the set allowed a better integration of the developed system.*

Keywords: *Mechanical structures, experimental study, reduced scale, load cells.*

ANEXO 1. ALGORITMO PARA LEITURA DOS TRANSDUTORES.

```
#include "HX711.h"

#define LC1_DOUT_PIN  A6
#define LC1_SCK_PIN  A7
#define LC2_DOUT_PIN  A4
#define LC2_SCK_PIN  A5
#define LC3_DOUT_PIN  A2
#define LC3_SCK_PIN  A3
#define LC4_DOUT_PIN  A0
#define LC4_SCK_PIN  A1

HX711 balanca1;
HX711 balanca2;
HX711 balanca3;
HX711 balanca4;

float valor1 = 0;
float acum1 = 0;
float valor2 = 0;
float acum2 = 0;
float valor3 = 0;
float acum3 = 0;
float valor4 = 0;
float acum4 = 0;
```

```
void setup() {
  Serial.begin(115200);
  Serial.println("Teste HX711");
  Serial.println("Iniciando a balanca");

  balanca1.begin(LC1_DOUT_PIN, LC1_SCK_PIN, 128);
  balanca2.begin(LC2_DOUT_PIN, LC2_SCK_PIN, 128);
  balanca3.begin(LC3_DOUT_PIN, LC3_SCK_PIN, 128);
  balanca4.begin(LC4_DOUT_PIN, LC4_SCK_PIN, 128);
}

float media_dados1(){
  for (int i = 0; i < 10; i++){
    acum1 = (acum1 + balanca1.get_value(1))/2;
  }
  return acum1;
}

float media_dados2(){
  for (int i = 0; i < 10; i++){
    acum2 = (acum2 + balanca2.get_value(1))/2;
  }
  return acum2;
}

float media_dados3(){
  for (int i = 0; i < 10; i++){
    acum3 = (acum3 + balanca3.get_value(1))/2;
  }
  return acum3;
}

float media_dados4(){
  for (int i = 0; i < 10; i++){
    acum4 = (acum4 + balanca4.get_value(1))/2;
  }
  return acum4;
}

void loop() {
  valor1 = media_dados1();
  Serial.print("balanca1: ");
  Serial.println(((valor1*5)/16777215), 8);

  valor2 = media_dados2();
  Serial.print(" balanca2: ");
  Serial.println(((valor2*5)/16777215), 8);

  valor3 = media_dados3();
  Serial.print(" balanca3: ");
  Serial.println(((valor3*5)/16777215), 8);

  valor4 = media_dados4();
  Serial.print(" balanca4: ");
  Serial.println(((valor4*5)/16777215), 8);

  delay(100);
}
```