

ESTUDO DA EFICIÊNCIA PARA OBTENÇÃO DE DADOS DE DEFORMAÇÃO COM EXTENSÔMETROS DE LÂMINA (STRAIN GAUGE) UTILIZANDO A PLATAFORMA ARDUINO

JOÃO ARTHUR CÔRTEZ YAMASHITA DE PAULA¹, RAPHAEL SAVERIO SPOZITO²

¹ Estudante em Engenharia Civil –IFSP VTP, Bolsista PIVICT, IFSP Câmpus Votuporanga, joao.y@aluno.ifsp.edu.br

² Professor orientador, Mestre em Engenharia Civil, IFSP Câmpus Votuporanga, rspozito@ifsp.edu.br

Área de conhecimento (Tabela CNPq): 3.01.02.04-9 Mecânica das Estruturas

RESUMO: A necessidade de uma manutenção preventiva contra acidentes por colapso torna viável o incentivo a pesquisas sobre monitoramento estrutural e seus usos. Em virtude do desenvolvimento tecnológico, diversos componentes são disponibilizados no mercado a um baixo custo. O propósito deste trabalho é o estudo e a análise da eficácia da obtenção dos dados de deformação (*strain gauge*) utilizando a plataforma Arduino como um sistema de aquisição. Com o auxílio de um amplificador de sinal HX711 e os recurso da ponte de Wheatstone, foi possível construir o protótipo e instalá-lo a uma base de testes implementado com um motor de passo, que flexiona uma régua metálica onde o extensômetro está fixado, assim, foi possível a obtenção de dados de deformação com a imposição de um deslocamento (flecha), o qual possibilitou, por meio de cinco baterias de testes, a comparação de resultados analíticos e experimentais, em que todas apresentaram baixo desvio padrão, além dos erros relativos de duas baterias serem baixos, o que gera a necessidade de uma investigação mais profunda sobre a influência de outros fatores não identificados nesse estudo. De modo geral, o protótipo apresentou ser um sistema de obtenção de dados de deformação eficaz.

PALAVRAS-CHAVE: extensômetro; Arduino; Wheatstone; deformação.

EFFICIENCY STUDY TO OBTAIN DEFORMATION DATA WITH STRAIN GAUGES SENSORS USING THE ARDUINO PLATFORM

ABSTRACT: *The need for preventive maintenance against collapse accidents makes it possible to encourage research on structural monitoring and its uses. Due to technological development, several components are available on the market at a low cost. The purpose of this work is the study and analysis of the effectiveness of obtaining strain gauge data using the Arduino platform as an acquisition system. With the aid of an HX711 signal amplifier and the Wheatstone bridge features, it was possible to build the prototype and install it on a test base implemented with a stepper motor, which flexes a metal ruler where the extensometer is attached, as well, it was possible to obtain deformation data with the imposition of a displacement, which made it possible, through five batteries of tests, to compare analytical and experimental results, in which all presented low standard deviation, in addition to errors of two batteries are low, which creates the need for further investigation into the influence of other factors not identified in this study. In general, the prototype proved to be an effective deformation data collection system.*

KEYWORDS: *strain gauges; Arduino; Wheatstone; deformation.*

INTRODUÇÃO

Araújo Neto (2012, p. 11-19) observa o fato dos preocupantes números de degradação nas estruturas de concreto e acidentes por colapso demandarem uma maior necessidade de manutenção preventiva, o que indica a viabilidade do monitoramento estrutural.

Dentre os métodos destrutivos (DT) e não destrutivos (NDT), Taheri (2019, p. 493-494) aponta que nenhuma das classes fornecem dados continuamente, indicando a necessidade do uso de sensores inteligentes e técnicas de processamento de dados para minimizar os custos de manutenção.

Todavia, segundo Silva et al. (2019, p. 1-2), o custo relativamente alto e a carência de conhecimento específico dificultam a implementação de sistemas de monitoramento estrutural. Essa

condição incentiva pesquisas em busca de desenvolvimentos de técnicas de baixo custo, como o uso da plataforma Arduino, combinada com componentes como extensômetros de resistência elétrica, em busca de um sistema de aquisição de dados (DAQ).

Com extensômetros, as pesquisas de Araújo Neto (2012), de Silva et al. (2018), e de Silva et al. (2019) demonstraram análises satisfatórias na construção, no uso e na aquisição de dados de deformação com microcontrolador Arduino.

Desta forma, esse trabalho busca a análise do comportamento de extensômetros elétrico (*strain gauge*) com o uso de plataforma de hardware aberto (Arduino) para a obtenção de valores de deformação, submetendo um protótipo a testes de eficácia e verificando seus valores apresentado através de dados analíticos.

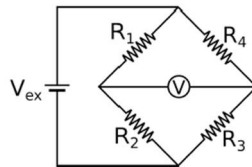
MATERIAL E MÉTODOS

Em referência aos extensômetros *strain gauge*, Silva et al. (2019, p. 3) descrevem a relação (1) entre a taxa de deformação ε e taxa de variação de resistência $\Delta R_s/R_s$ nos extensômetros laminares, em que ambos são diretamente proporcionais, havendo seu fator de medição K (*gauge factor*, também denominado GF):

$$K \varepsilon = \frac{\Delta R_s}{R_s} \quad (1)$$

Os autores também relataram a respeito da ponte de Wheatstone. Esse circuito consiste em quatro resistores, R_1 , R_2 , R_3 e R_4 formados em dois pares de paralelos (ou dois pares em série), com um medidor de grandeza elétrica (V), alimentado por uma fonte (V_{ex}) (Figura 1) formando uma ponte:

Figura 1 Esquema da ponte de Wheatstone.



Fonte: Silva et al. (2019).

Havendo a possibilidade de duas situações entre as resistências, equilíbrio e desequilíbrio, segue na TABELA 1 suas correspondentes equações características (2), (3), (4) e (5):

Tabela 1 Equilíbrio e desequilíbrio na ponte de Wheatstone e suas respectivas equações	
Equilíbrio	Desequilíbrio
$V = 0$ (2)	$V \neq 0$ (3)
$R_1 R_3 = R_2 R_4$ (4)	$V = \left(\frac{R_3}{R_3 + R_4} - \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right) V_{ex}$ (5)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor.

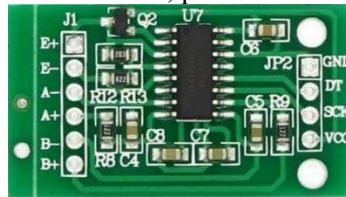
Assim como Silva et al. (2019) utilizaram a formação de quarto de ponte, que consiste na utilização de 3 resistores de resistência R conhecida, junto a um extensômetro (de resistência variável $R + \Delta R$) substituto de R_4 , e substituindo os itens na equação (5), obtêm-se a equação (6):

$$V = \left(\frac{R}{2R + \Delta R} - \frac{1}{2} \right) V_{ex} \quad (6)$$

De modo em que o sinal da variação de resistência ΔR está de acordo com a deformação: $+\Delta R$ corresponde a compressão ($-\varepsilon$), e $-\Delta R$ corresponde a tração: ($+\varepsilon$).

Marques Júnior (2016, p. 31-38) também fez uso de *strain gauges* ligados a um Arduino, em meia ponte, porém, como os valores da saída da célula de carga eram muito baixos, de 10 mV/V, foi necessário o uso de um amplificador de sinal HX711 (Figura 2), que também possui a função de conversor Analógico-Digital.

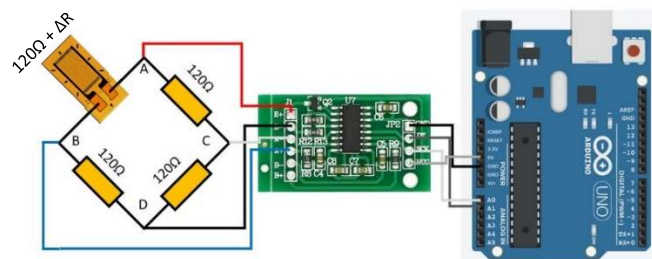
Figura 2 Amplificador de sinal e conversor A/D, posicionamento de suas entradas e saídas HX711



Fonte: Marques Júnior (2016, p. 35).

Seguindo os exemplos estudados de Marques Júnior (2016) e Silva et al. (2019), foi projetado o circuito de conexões entre o extensômetro laminar, a ponte de Wheatstone, o módulo HX711 e o Arduino UNO, em quarto de ponte, conforme ilustrado na Figura 3.

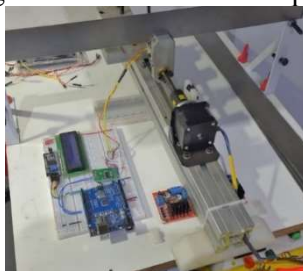
Figura 3 Conexões do protótipo com Arduino.



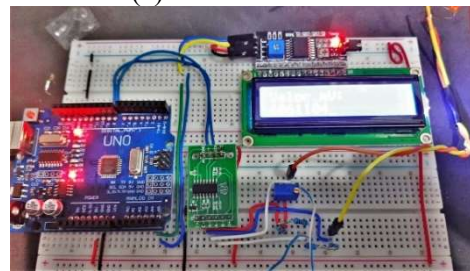
Fonte: o próprio autor.

A construção do sistema para a obtenção das deformações experimentais será realizada com um sistema mecânico, implementado com motor de passo para impor deslocamentos mais precisos (Figura 4.a), permitindo que a obtenção de valores de deformação experimentais possa ser comparada com resultados analíticos. A programação do Arduino foi realizada com o uso do programa *Arduino IDE* (*Integrated Development Environment*).

Figura 4 Sistema mecânico para deformação de elemento (a) e detalhe do circuito Arduino (b).



(a)



(b)

Fonte: o próprio autor.

Com o protótipo construído e o extensômetro aderido à régua metálica, submetendo-o a esses testes, relaciona-se a tensão medida em um voltímetro de referência (V) com os valores apresentados pelo Arduino (n), e utilizando o método dos mínimos quadrados, obtêm-se os valores dos coeficientes A e B na equação (7):

$$A n + B = V \quad (7)$$

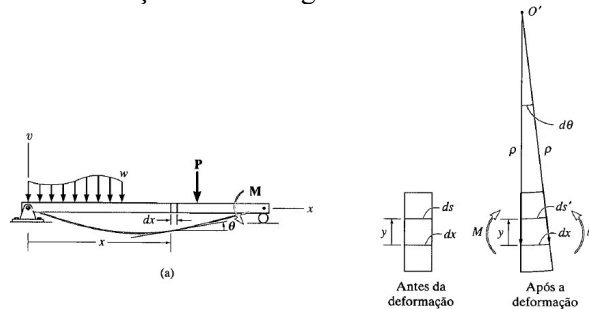
Com os valores da tensão na ponte, e trabalhando com a taxa de variação da resistência na situação quarto de ponte, encontra-se na equação (8) uma equação em que o valor da deformação (ϵ) é dado em função da tensão (V) obtida pelo desequilíbrio da ponte de Wheatstone e pela tensão aplicada na ponte (V_{ex}):

$$\varepsilon = \frac{4 V}{V_{ex} K} \quad (8)$$

Assim, obtidos os valores de variação da resistência elétrica do extensômetro e o valor do fator de medição (K) do extensômetro, é possível pela equação (1) obter a deformação do extensômetro pelo resultado experimental.

A análise dos resultados experimental de deformações será comparada com valores analíticos, obtidos da deformação pela imposição da flecha que será conhecida. Segundo Hibbeler (2010, p. 451), o carregamento de uma viga, no caso considerado sendo bi apoiada, resulta na deformação no sentido do eixo longitudinal da viga (dx), conforme ilustrado na Figura 5.

Figura 5 Deformação de uma viga em um elemento infinitesimal.



Fonte: Hibbeler (2010, p. 451).

Assim, a formulação para a obtenção dos valores da flecha no centro da viga (v_{max}) é indicada por Hibbeler (2010, p. 633). Considerando a seção do elemento que será deformado (imposição da flecha v_{max}) pelo motor de passo, e conhecida as variáveis E (módulo de elasticidade) do aço, material da régua, e I (momento de inércia) da seção, é possível calcular a tensão no material (σ) no ponto desejado com $y = h/2$. Assim, partindo do princípio da Lei de Hooke ($\sigma = E \varepsilon$), a deformação pode ser obtida de forma analítica.

A formulação utilizada para a obtenção dos valores de deformação, considerando o valor da flecha conhecida, é indicada no Quadro 1.

Quadro 1 Fórmulas para obtenção da deformação de forma analítica.

Flecha máxima:	I (momento de Inércia)	Momento viga bi-apoiada ($x = L/2$):
$v_{max} = \frac{-P L^3}{48 E I}$	$I = \frac{bh^3}{12}$	$M = \frac{P L}{4}$
Tensão na seção: $\sigma = \frac{M}{I} y$	Deformação: $\varepsilon = \frac{\Delta L}{L}$	

Fonte: Hibbeler (2010).

Partindo dos conceitos apresentados por Hibbeler, apresentados no Quadro 1, foi possível equacionar o valor da taxa de deformação em função da espessura (h), flecha máxima (v_{max}), e comprimento (L) da régua, na expressão (9).

$$\varepsilon = -\frac{6 h v_{max}}{L^2} = -\frac{12 y v_{max}}{L^2} \quad (9)$$

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A respeito da construção do protótipo (Figura 4.b), o circuito foi construído com êxito e integrado ao sistema mecânico para a obtenção dos valores de deformação pelo método experimental. Além disso, foi realizado o procedimento para obtenção do valor de tensão (milivolts) em função do

valor obtido do amplificador HX711. A partir desse processo, foi possível calcular a deformação do extensômetro.

Por conta da dificuldade de zerar o valor de tensão a ser amplificado pelo HX711, com o uso do *trimpot*, foi considerado que a deformação imposta estaria relacionada com as diferenças de deformação experimentais, as quais são calculadas por meio da equação (8).

Assim, foram realizadas cinco baterias de testes para obtenção dos dados (valores de deformação) experimentalmente, cujos seus resultados são apresentados na Tabela 1. O procedimento de obtenção dos valores de deformações foi realizado de maneira cíclica. Essa funcionalidade é permitida devido à programação que ocorreu no Arduino.

Em análise aos dados da Tabela 1, é possível deduzir que os valores obtidos experimentalmente através de deformação apresentam um desvio baixo. No entanto, analisando os valores de deformação teórico e experimentais, comparando-os, as baterias 1 e 2 resultaram em valores com baixos erros relativos. No caso das baterias 3, 4 e 5, os erros relativos não tiveram o mesmo comportamento que os das baterias anteriores. Acredita-se que esse comportamento pode ter ocorrido por fatores que não foram possíveis de serem identificados no experimento.

Tabela 2 Resumo dos resultados obtidos nas baterias de testes.

Valor	Baterias de Teste				
	1	2	3	4	5
$\Delta\epsilon$ teórico	-0,0146%	-0,0242%	-0,0098%	-0,0104%	-0,0071%
$\Delta\epsilon$ m. exp.	-0,0164%	-0,0291%	-0,0162%	-0,0172%	-0,0116%
Desvio Padrão	0,0001%	0,0001%	0,0002%	0,0002%	0,0002%
Nº Leituras	114	120	109	90	91
Erro Relativo	12,69%	20,18%	64,40%	64,85%	63,20%

Fonte: próprio autor.

CONCLUSÕES

Considerando o objetivo inicial do experimento, acredita-se que esse foi atingido. Em referência à obtenção de dados de deformação com Arduino, integrado à um extensômetro laminar (*strain gauge*), o sistema apresentou-se eficaz.

Apesar da eficácia, a metodologia utilizada deve ser mais bem investigada em função das variações que foram encontradas em alguns momentos na coleta de dados.

Por fim, o sistema pode viabilizar novos estudos com a implementação de novas variáveis que possam interferir nas medições, como por exemplo, a variação de temperatura.

REFERÊNCIAS

- Araújo Neto, Gilberto Nery de. **Contribuição ao desenvolvimento de técnicas de monitoramento remoto para blocos de fundação de edifícios em concreto armado com vistas à durabilidade** / G.N. de Araújo Neto. São Paulo, 2012.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 8522: Concreto — Determinação dos módulos estáticos de elasticidade e de deformação à compressão**. Rio de Janeiro, 2017.
- HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**, 7ª Ed., Pearson Prentice Hall, 2010.
- Marques Júnior, Antonio Luiz. **Automatização de uma bancada de atrito e desgaste para seleção de materiais de uma bomba de sangue centrífuga implantável** / Antonio Luiz Marques Júnior. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. São Paulo: [s.n.], 2016.
- Silva, J. B. L. P. et al. **Desenvolvimento de sistema de baixo custo para monitoramento de integridade estrutural**. Revista Matéria: ISSN 1517-7076 artigo e-12528, 2019. CEATEC – Centro de Ciências Exatas, Ambientais e de Tecnologia, da Pontifícia Universidade Católica de Campinas.
- Silva, A. L. et al. **A study of strain and deformation measurement using the Arduino microcontroller and strain gauges devices**. Revista Brasileira de Ensino de Física, vol. 41, nº 3, e20180206 (2019). Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2018-0206>>.
- TAHERI, Shima. **Construction and Building Materials 204 (2019) 492-509. A review on five key sensors for monitoring of concrete structures**. Faculty of Science and Engineering, Macqarie University, 2109 NSW, Australia. 2019.