

PROPOSTA DE CORREÇÃO EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA DE VALORES DE DEFORMAÇÃO EM EXTENSÔMETROS PARA MONITORAMENTO ESTRUTURAL¹

João Arthur Côrtes Yamashita de PAULA²

Graduando em Engenharia Civil
IFSP, *Campus* Votuporanga

Claudiner Mendes de SEIXAS³

Docente do curso de Engenharia Elétrica
IFSP, *Campus* Votuporanga

Raphael Saverio SPOZITO⁴

Docente do curso de Engenharia Civil
IFSP, *Campus* Votuporanga

RESUMO

O uso de sistemas de monitoramento estrutural de forma contínua possibilita o fornecimento de informações para avaliações de danos, inspeções e tomadas de decisão, apesar do alto custo de implantação e necessidade de especialização para leitura de informações. O uso da plataforma Arduino para prototipagem com microcontroladores conectados a sensores de deformação (*strain gauge*) demonstram ser uma possibilidade de baixo custo para sistemas DAQ (*Data Acquisition* – Aquisição de Dados). No entanto, existem possíveis interferências ambientais em seu uso, tal como a temperatura e suas variações. Assim sendo, este estudo propôs a construção de um protótipo microcontrolador integrado a um sensor de deformação através do estudo de seu comportamento e do monitoramento de temperatura, em busca de padrão matemático entre seus valores e os dados brutos capturados que descreve essa interferência, de forma linear. A partir do tratamento prévio e conversão dos dados de deformação coletados pelo extensômetro, foi proposta uma equação a fim de corrigir esses valores experimentais com o intuito de obter resultados mais precisos quando comparados aos valores teóricos. A proposta de correção linear sobre os dados desse estudo mostrou-se viável, indicando a necessidade de investigações mais aprofundadas com a tecnologia utilizada.

Palavras-chave: Arduino; Extensometria; Monitoramento estrutural; Temperatura.

PROPOSAL FOR CORRECTION BASED ON THE TEMPERATURE OF STRAIN VALUES IN EXTENSOMETERS FOR STRUCTURAL HEALTH MONITORING

ABSTRACT

The continuous use of Structural Health Monitoring (SHM) systems becomes possible the provide valuable information to carry out damage assessments, inspections and decision making, despite the high cost of implementation and the need for specialization to read information. The use of the Arduino platform for prototyping with microcontrollers connected to strain sensors (*strain gauge*) proves to be a low-cost possibility for DAQ (*Data Acquisition*) systems. However, there are possible environmental interferences in their use, such as temperature and its variations.

¹ Trabalho realizado dentro do Grupo de Pesquisa em Automação e Inovação – GPAI

² Endereço eletrônico: joao.y@aluno.ifsp.edu.br

³ Endereço eletrônico: claudiner@ifsp.edu.br

⁴ Endereço eletrônico: rspozito@ifsp.edu.br

Therefore, this study proposed the construction of a microcontroller prototype integrated to a strain sensor through the study of its behaviour and temperature monitoring, in search of a mathematical pattern between its values and the captured raw data that describes this interference, in a linear correlation. Based on previous treatment and conversion of strain data collected by the extensometer, an equation was proposed to correct these experimental values to obtain more accurate results when compared to theoretical values. The proposed linear correction on the data from this study proved to be feasible, indicating the need for further investigations with the technology used.

Keywords: Arduino; Extensometry; Structural monitoring; Temperature.

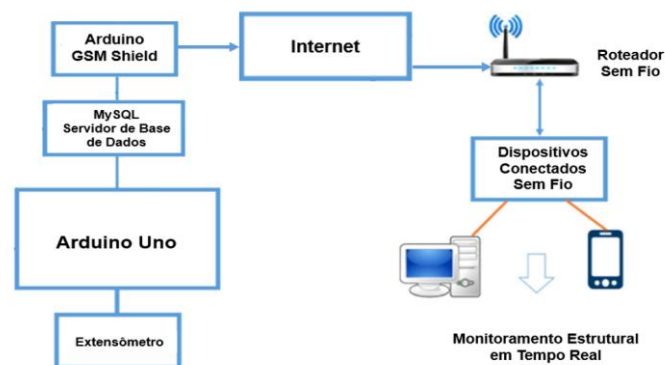
Introdução

O uso de sistemas de monitoramento estrutural (SHM - *System Health Monitoring*) de forma contínua possibilita o fornecimento de informações valiosas para efetuar avaliações de danos, inspeções e tomadas de decisão, além da possibilidade de identificação correta de elementos estruturais danificados (VALINEJADSHOUBI, BAGCHI e MOSELHI, 2019).

A metodologia da integração do SHM com o BIM (*Building Information Modeling*) se apresenta como uma ferramenta de auxílio para as tomadas de decisão visando a manutenção estrutural das edificações, pois possibilita uma melhor interpretação dos dados e a identificação de sensores de monitoramento com defeitos. Essa facilidade de interpretação dos dados de monitoramento é possibilitada pelos modelos tridimensionais do BIM (DELGADO, BUTLER, et al., 2018).

Dessa forma, o uso de microcontroladores pode ser adotado como um sistema DAQ (*Data Acquisition* – Aquisição de Dados), com possibilidade de comunicação por redes sem fio para envio de informações e seu armazenamento em banco de dados (VALINEJADSHOUBI, BAGCHI e MOSELHI, 2019). Uma estrutura conceitual desse sistema é indicada na Figura 1.

Figura 1 – Estrutura conceitual do sistema de monitoramento de deformação sem fio.



Fonte: Adaptado de Valinejadshoubi, Bagchi e Moselhi (2019, p. 7).

O uso de sensores de monitoramento do tipo *strain gauge* tem o objetivo da obtenção de dados de deformação por meio da variação de sua resistência elétrica. Nesse contexto Araújo Neto (2012) desenvolveu um sistema para monitoramento de blocos de fundação e identificou a necessidade de verificar a interferência da temperatura nos dados de deformação.

Silva et al (2019) utilizaram a plataforma Arduino com extensômetros de lâmina para obtenção de dados de deformação, constatando sua viabilidade. Silva (2019), com vistas ao desenvolvimento de sistemas de monitoramento de baixo custo, obteve resultados satisfatórios com o uso da plataforma Arduino com extensômetros de lâmina para a obtenção de dados de monitoramento. Apesar dos resultados promissores obtidos por Silva et al (2019) e Silva (2019), ambos autores não obtiveram resultados de longos períodos de monitoramento junto à análise da interferência da temperatura, o que necessita de investigações conforme já exposto por Araújo Neto (2012).

Andolfato et al (2004) também discutiram a interferência da variação de temperatura nos dados de deformação capturados, ocorrendo, segundo os autores, com maior intensidade na instalação de um quarto de ponte de Wheatstone.

Marques Júnior (2016, p. 31-38) fez uso de extensômetros e Arduino, em meia ponte de Wheatstone. Entretanto, como os valores da saída da célula de carga eram muito baixos foi necessário o uso de um amplificador de sinal.

Assim, essa pesquisa foi realizada com objetivo de analisar a interferência da temperatura ambiente em um sistema DAQ desenvolvido pelos autores para monitoramento estrutural, considerando longos períodos da coleta de dados de monitoramento. Para atingir o objetivo, foi utilizado um protótipo integrado com um modelo BIM para obtenção dos dados no monitoramento. Esse estudo permitiu, com períodos de coleta de dados com tempo de aproximadamente 5 horas, analisar a influência da temperatura nos sensores de deformação do sistema, nesse caso, considerando valores obtidos no ambiente da instalação do protótipo, sendo sugerida uma metodologia de correção dos valores de deformação em função da temperatura.

Referencial teórico

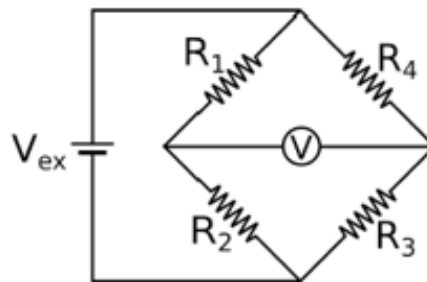
Conforme citado por Silva et al. (2019, p. 3), os extensômetros laminares descrevem a relação indicada na equação 1 entre a taxa de deformação ϵ e taxa de variação

de resistência $\Delta R_s/R_s$ diretamente proporcionais, sendo o fator de medição K (*gauge factor*, também denominado GF) a constante dessa proporcionalidade.

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

Silva et al. (2019, p. 3) também relataram a respeito da ponte de Wheatstone, conforme mostrada na Figura 2.

Figura 2 – Esquema da ponte de Wheatstone.



Fonte: Silva et al. (2019).

Pela igualdade conhecida entre os valores de resistência $R_1 = R_2 = R_3 = R$ e substituindo R_4 por um extensômetro (de resistência variável $R + \Delta R$) obtém-se a equação 2.

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

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 ($+\varepsilon$).

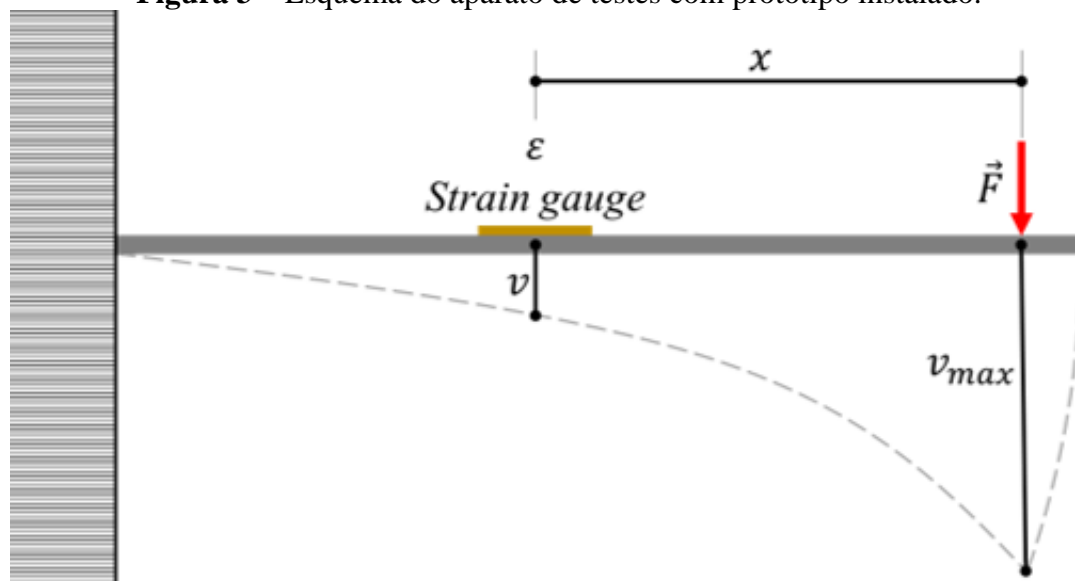
A partir dos valores da tensão na ponte e da taxa de variação da resistência obtém-se uma relação em que o valor da deformação (ε) é dado em função da tensão (V) obtida pelo desequilíbrio da ponte de Wheatstone e pela tensão aplicada na ponte (V_{ex}), conforme a equação 3.

$$\varepsilon = \frac{4V}{V_{ex} K} \quad (3)$$

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

A Figura 3 apresenta a ilustração de uma régua metálica engastada com uma força pontual \vec{F} sobre a extremidade livre, sendo assim produzidas as flechas v e $v_{m\acute{a}x}$. A variável v é a flecha na posição do extensômetro e $v_{m\acute{a}x}$ a flecha máxima, o que permite a comparação entre os valores de deformação obtidos de forma analítica e experimental.

Figura 3 – Esquema do aparato de testes com protótipo instalado.



Fonte: Autores (2022).

Pela via analítica, determina-se a deformação pela equação 4, de acordo com Silva et al (2019).

$$\varepsilon = \frac{F x y}{E I} \quad (4)$$

Sendo:

- F : módulo da carga pontual aplicada;
- x : distância horizontal entre a ponta de aplicação da força e o extensômetro;
- y : distância entre a linha neutra na seção e sua extremidade;
- E : módulo de elasticidade;
- I : momento de inércia do elemento (no eixo horizontal x).

Método

A régua metálica utilizada no experimento possui as características de material, conforme informações do fabricante, e geométricas, obtidas por meio da medição com régua e paquímetro, apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Dados materiais e geométricos da régua metálica.

Grandeza	Valor	Unidade de Medida
x	0,68	m
b	0,039	m
h	0,0129	m
y	0,00645	m
E	$2,05 \cdot 10^{11}$	Pa
$I = \frac{b \cdot h^3}{12}$	$\approx 6,976739 \cdot 10^{-9}$	m ⁴

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2020).

Quanto ao extensômetro, suas propriedades são indicadas na Tabela 2.

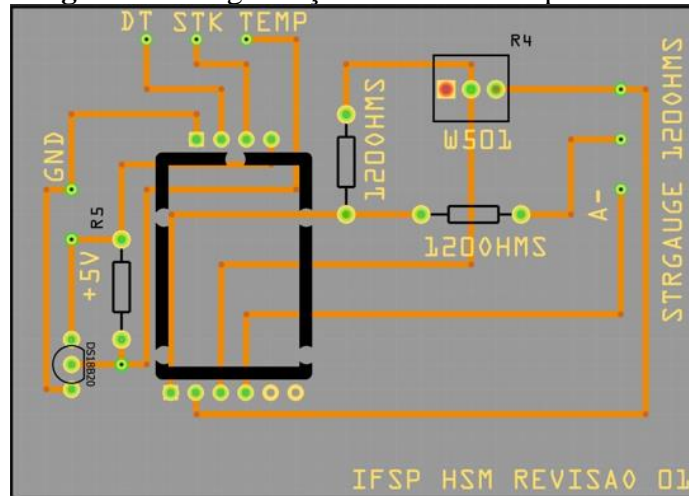
Tabela 2 – Dados extensômetro laminar *strain gauge*.

Grandeza	Valor	Unidade de Medida
<i>Gauge Factor (K)</i>	$2,08 \pm 1\%$	
Detecção de Resistência	$120 \pm 0,2$	Ω
<i>Grade/Classe</i>	“A”	
Data de Fabricação	14 de abril de 2020	m

Fonte: Elaborado pelo próprio autor (2020).

Para realizar a montagem do DAQ com uma ponte de Wheatstone, foi realizada a diagramação do circuito utilizando o software Fritzing, conforme Figura 4. Tal ação foi realizada com o objetivo de obter melhor estabilidade do DAQ, minimizando a variação em função do uso de protoboards, além de ser integrado um sensor de temperatura próximo ao chip do módulo HX711. A partir do diagrama definido, foi efetuado a montagem dos componentes e a programação do Arduino para a leitura dos valores de deformação.

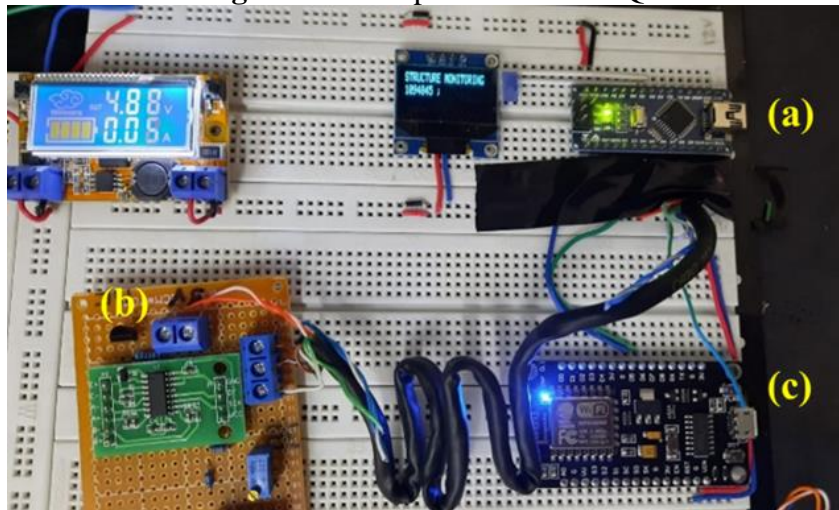
Figura 4 – Diagramação do módulo amplificador.



Fonte: Autores (2022).

Conforme ilustra a Figura 5, para implementação da comunicação sem fio, foi utilizado um Arduino Nano (Figura 5.a), que controla o componente Node MCU ESP8266 (Figura 5.c), além do módulo amplificador com a Ponte de Wheatstone (Figura 5.b).

Figura 5 – Componentes do DAQ.



Fonte: Autores (2022).

Foram realizados dois ensaios principais para a coleta de dados:

1. Sem aplicação de carga: com a régua metálica em completo repouso (deformação teórica nula) foram capturados dados de deformação e de temperatura ambiente. Valores médios de HX para cada temperatura foram analisados, em busca de uma relação constante ou linear;

2. Com aplicação de carga: foram adicionados pesos na extremidade livre da régua metálica e registradas as informações de deformação do extensômetro e da temperatura ambiente.

Para o uso de correção sobre os valores experimentais em relação aos efeitos de variação de temperatura, foram calculadas as diferenças entre deformações teóricas e experimentais com seus valores médios para cada temperatura, a fim de se obter uma constante de correção ou uma equação linear.

Para o tratamento inicial dos dados, após sua captura, primeiramente foram filtrados os dados conforme a temperaturas, aceitáveis os valores que forem capturados entre 17°C e 32°C, temperaturas ocorridas durante o experimento, e dessa forma, correspondente aos dois ensaios, houve dois tratamentos distintos:

1. Sem aplicação de carga: aceitar apenas valores que dentro do intervalo de 3 vezes o desvio padrão (superior e inferiormente);

2. Com variação de pesos sobre a régua metálica: foram estipulados limites pelo valor médio obtido pelo DAQ, somado a 5 vezes o intervalo interquartil (IQR) para o superior e subtraído 5 vezes o mesmo valor (IQR) para o inferior.

Após os dados serem devidamente tratados, ocorrem as conversões de grandezas, por meio da equação 5.

$$V = A * (HX) + B \quad (5)$$

Na qual:

- **V**: tensão elétrica obtida inicialmente por multímetro (mV);
- **HX**: valores capturados pelo amplificador de sinal;
- **A**: coeficiente angular para conversão linear, de aproximadamente $1,747 \times 10^{-6}$ conforme o trabalho de Paula e Spozito (2020);
- **B**: coeficiente linear da conversão, considerado nulo.

E dessa forma ocorre finalmente a conversão de tensão elétrica para deformação, com o uso da equação 3, aplicando o *Gauge Factor*.

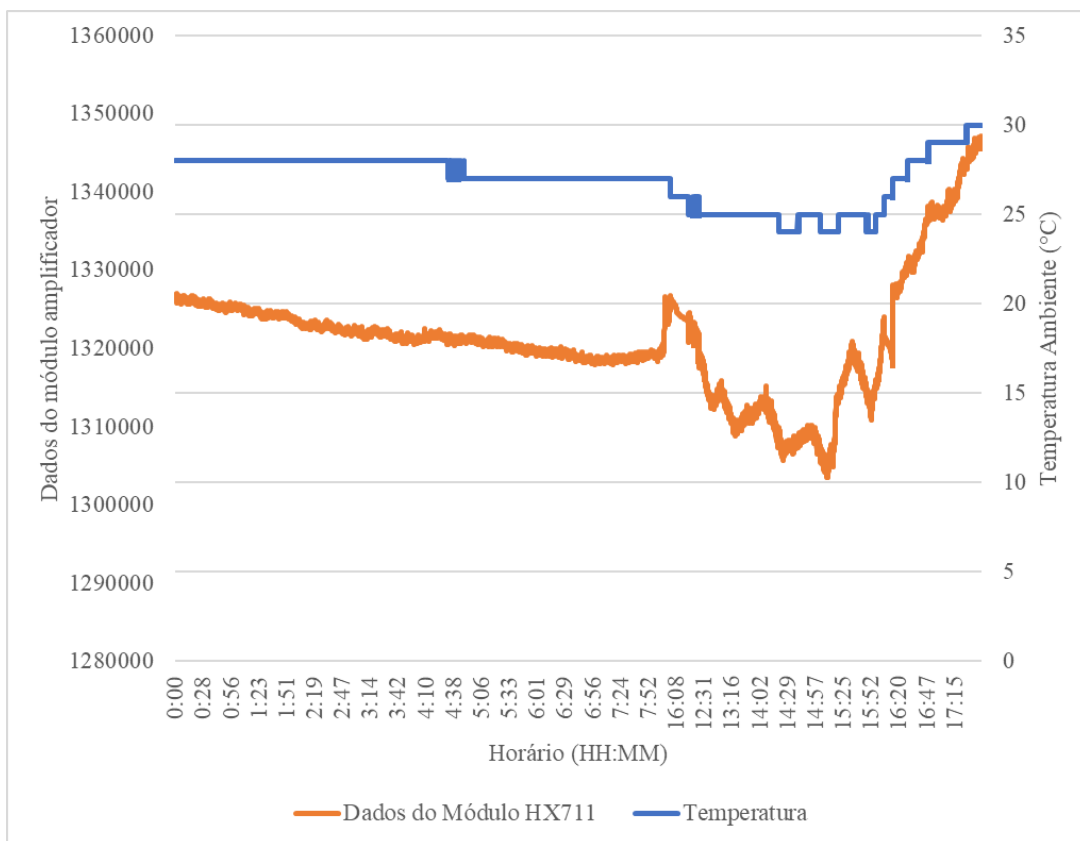
Como filtro inicial, foram descartados valores que extrapolassem o triplo do desvio padrão para a situação sem esforço da régua metálica.

A partir dessa apuração de dados, em busca da análise da temperatura e sua interferência, é estipulado o uso de uma relação linear para retificar os valores e diminuir os erros em comparação com valores obtidos analiticamente.

Resultados e Discussões

De um primeiro experimento, de leituras contínuas do DAQ sem aplicação de força, é apresentada a Figura 6, onde os dados apresentam variação conforme os valores de temperatura no decorrer do tempo.

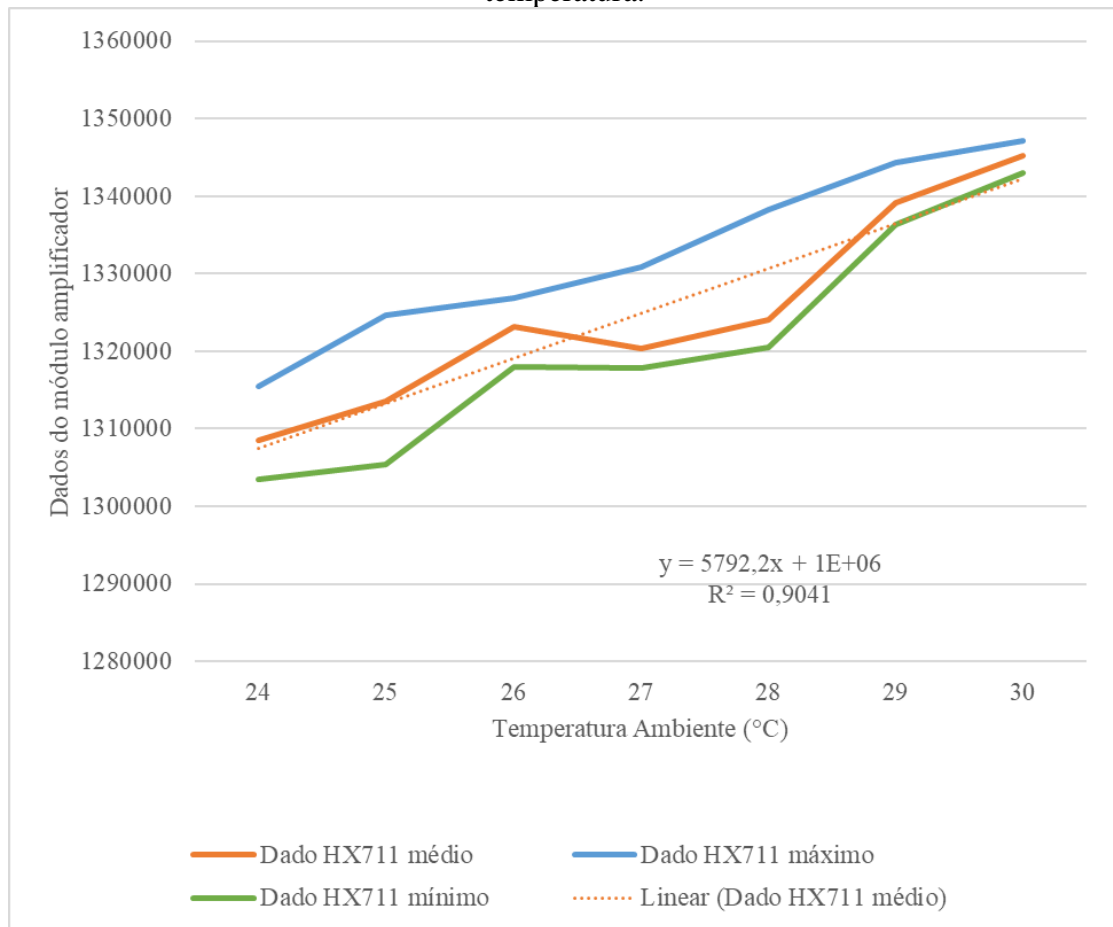
Figura 6 – Valores do amplificador e de temperatura ambiente ao longo do período.



Fonte: Autores (2022).

Assim, foram obtidos valores médios do amplificador (HX) para cada temperatura, obtendo assim uma relação linear entre os valores apresentados, conforme o apresentado no gráfico Figura 7.

Figura 7 – Valores médios, máximos e mínimos do amplificador em função da temperatura.



Fonte: Autores (2022).

A relação obtida entre a temperatura ambiente e os valores do amplificador de sinal é apresentada na equação 6.

$$HX = 5792,2 \cdot T + 1168463 \quad (6)$$

Onde:

- **HX**: valor bruto numérico obtido pelo amplificador (HX711);
- **T**: Temperatura ambiente (°C).

O segundo ensaio foi realizado com o mesmo sistema e diferentes cargas aplicadas e retiradas na extremidade da régua, cujas informações de deformações ϵ teóricas já calculadas estão presentes na Tabela 3.

Tabela 3 – Deformações teóricas em função dos pesos aplicados sobre régua metálica ao longo do tempo.

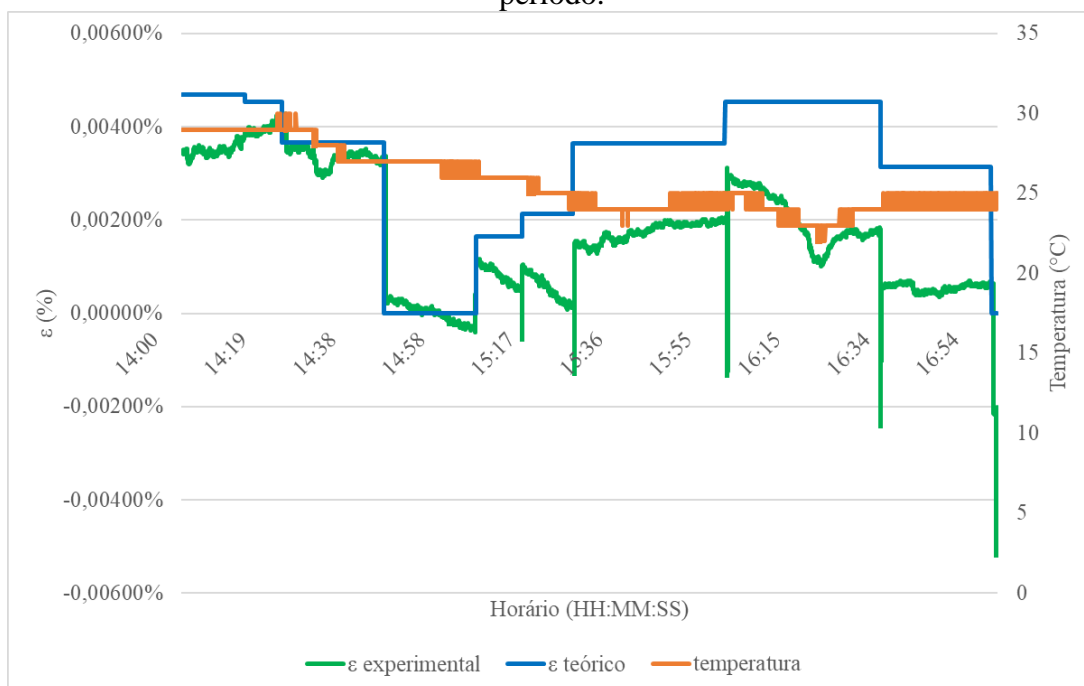
Horário	Peso (g)*	Peso Aplicado Total (g)	Deformação ϵ
13:10:00	500	500	0,00150%
13:24:00	265	765	0,00230%
13:38:00	300	1065	0,00320%
13:54:00	150	1215	0,00366%
13:59:00	345	1560	0,00469%
14:14:00	-50	1510	0,00454%
14:22:00	-295	1215	0,00366%
14:44:00	-1215	0	0
15:04:00	545	545	0,00164%
15:14:00	165	710	0,00214%
15:25:00	500	1210	0,00364%
15:58:00	300	1510	0,00454%
16:32:00	-465	1045	0,00314%
16:56:00	-1045	0	0

*Valores positivos indicam a inclusão de pesos, e negativos indicam a retirada de peso.

Fonte: Autores (2022).

Capturadas todas as informações, tratadas com o uso do IQR e convertidas através das equações 1 e 5, apresenta-se na Figura 8 os valores experimentais e teóricos de deformação, bem como os de temperatura correspondente.

Figura 8 – Valores de deformação teórica, experimental e temperatura ao longo do período.



Fonte: Autores (2022).

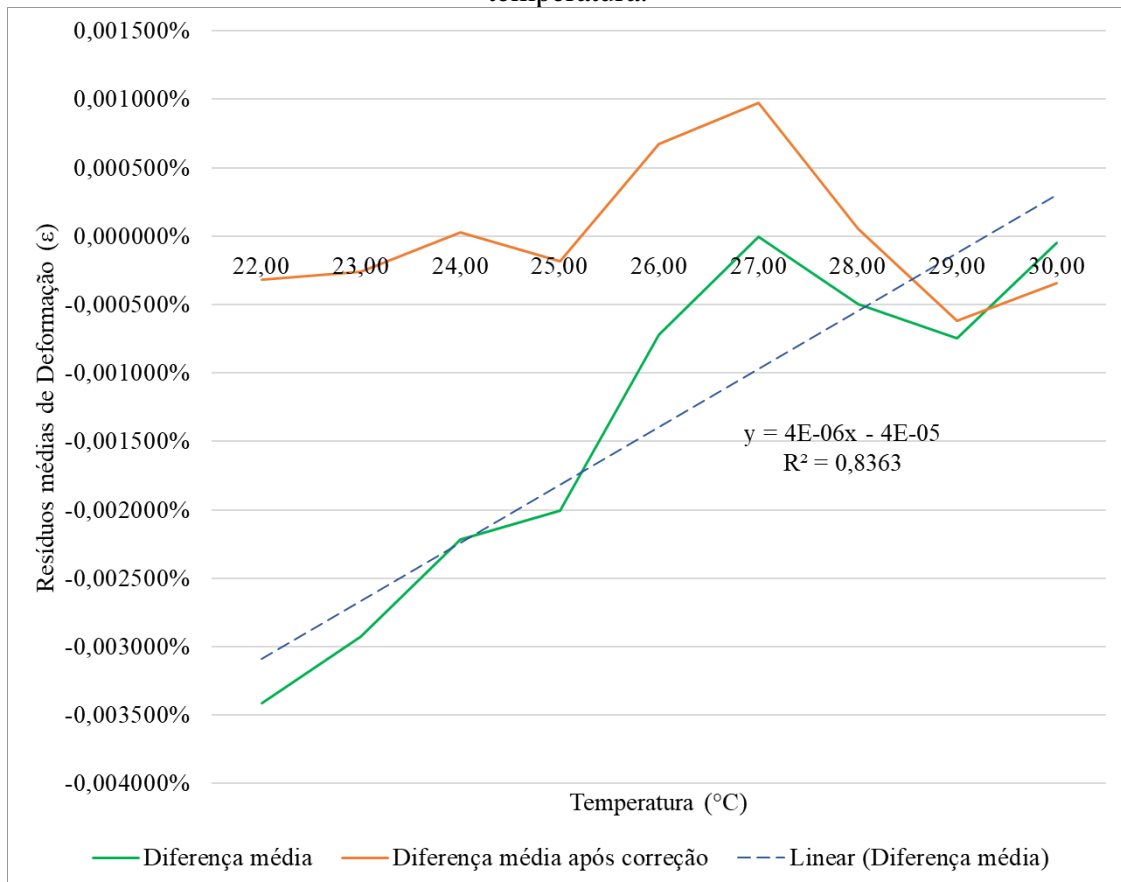
Pelo fato de haver diferença entre os valores experimentais e teóricos menores em um período e maiores em outro provavelmente relacionado à variação de temperatura, prosseguiu-se para uma investigação quanto à diferença entre os valores de deformação e os de temperatura. As diferenças foram definidas pela equação 7.

$$C_{\epsilon} = \epsilon_{experimental} - \epsilon_{teórico} \quad (7)$$

Onde C_{ϵ} representa a correção proposta diferença entre essas deformações, para assim encontrar uma correlação linear com a temperatura apresentada.

Dessa forma, foi devidamente encontrado o emprego de uma correlação linear com a temperatura apresentada, conforme apresentado pela Figura 9, na qual os valores médios de diferença aproximaram-se de zero após o processo de subtração de cada valor dessa função linear sobre o seu respectivo dado experimental.

Figura 9 – Diferença entre deformações experimentais médias e correções pela temperatura.



Fonte: Autores (2022).

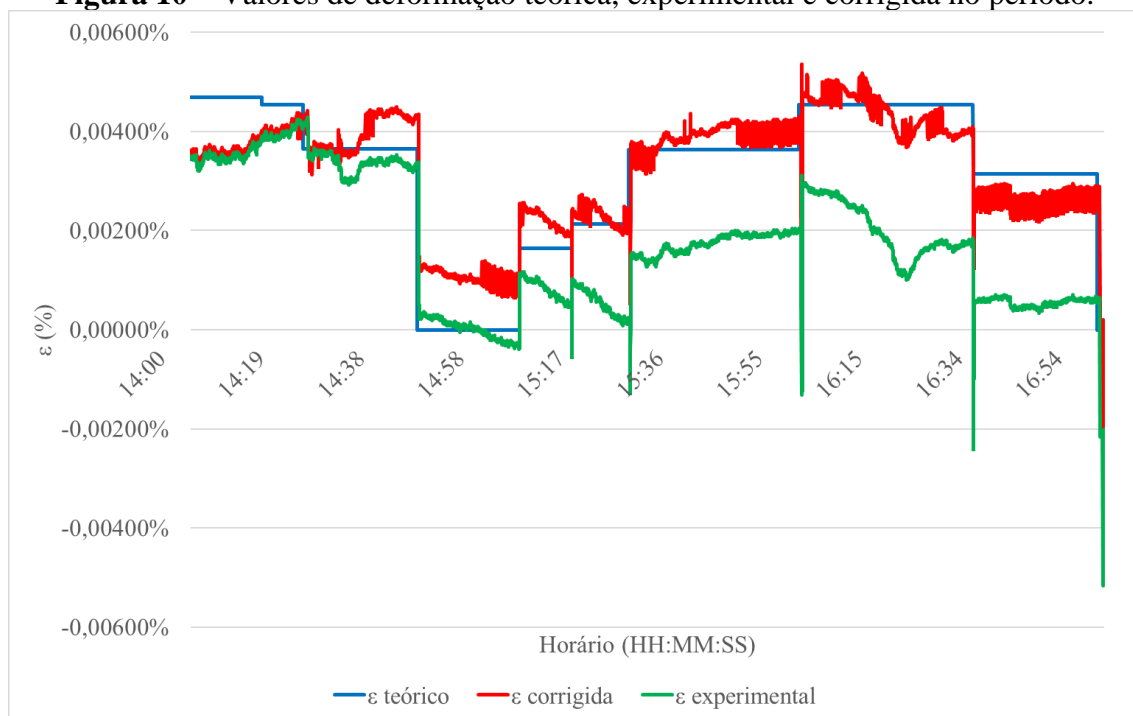
De modo mais detalhado, na equação 8 é promovida a relação entre temperatura e diferença entre deformações (teórica e experimental).

$$C_{\varepsilon} = 4,2385 * 10^{-06} T - 1,24174 * 10^{-04} \quad (8)$$

É observado que não se trata de erros percentuais, mas de diferenças entre valores, uma vez a unidade de medida de deformação foi definida aqui como percentual para facilitar a interpretação dos resultados numéricos.

E desse modo, somando as respectivas correções dadas por pela equação 8 aos valores experimentais, foi obtido o gráfico de deformação corrigida (Figura 10), relacionando os valores teóricos e a temperatura, agora mais condizente com os resultados teóricos, efeito obtido pela aplicação dessa função corretiva.

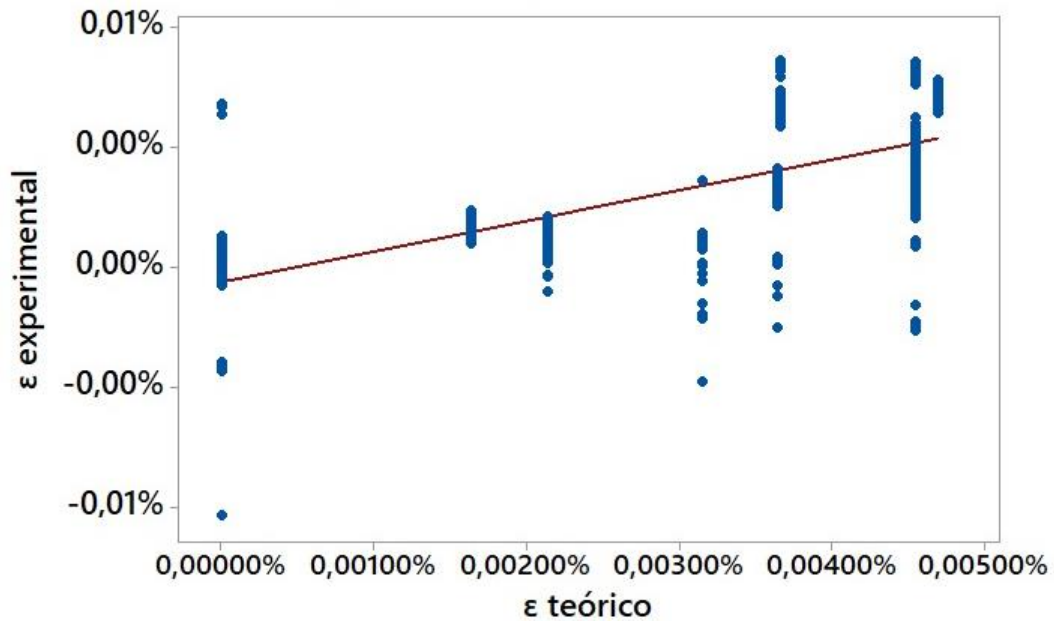
Figura 10 – Valores de deformação teórica, experimental e corrigida no período.



Fonte: Autores (2022).

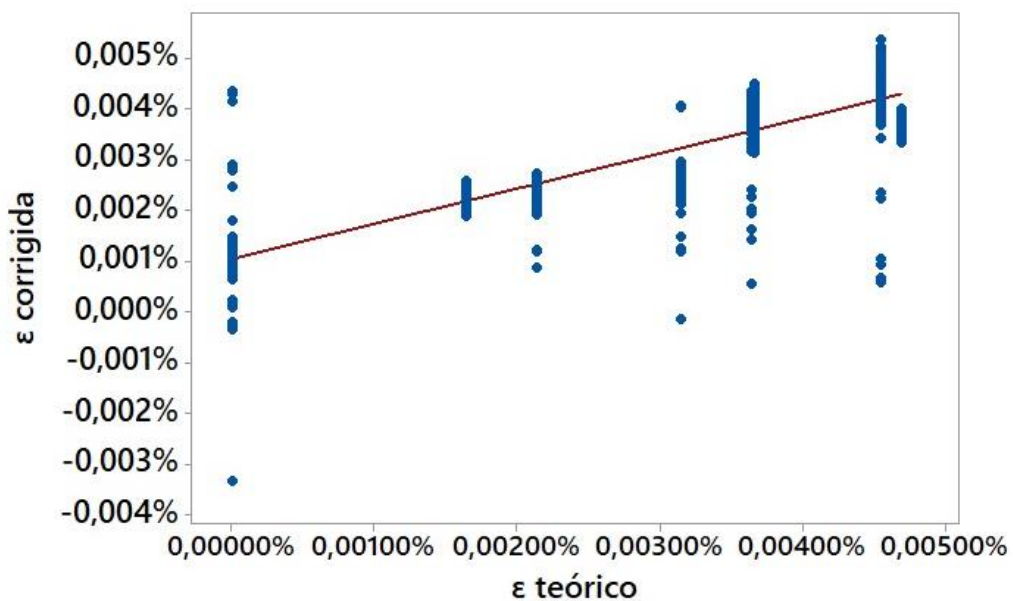
Os gráficos de dispersão expostos em Figura 11 e Figura 12 exibem respectivamente a relação entre os valores de deformação teóricos, obtidos pela equação 4, e experimentais, tratados com IQR e convertidos pelas equações 1 e 5, anteriores e posteriores à correção proposta com o uso da equação 8, onde ocorreu um aumento no coeficiente de determinação (R^2) de 51% para 79%.

Figura 11 – Dispersão de valores experimentais versus teóricos anteriores à correção.



Fonte: Autores (2022).

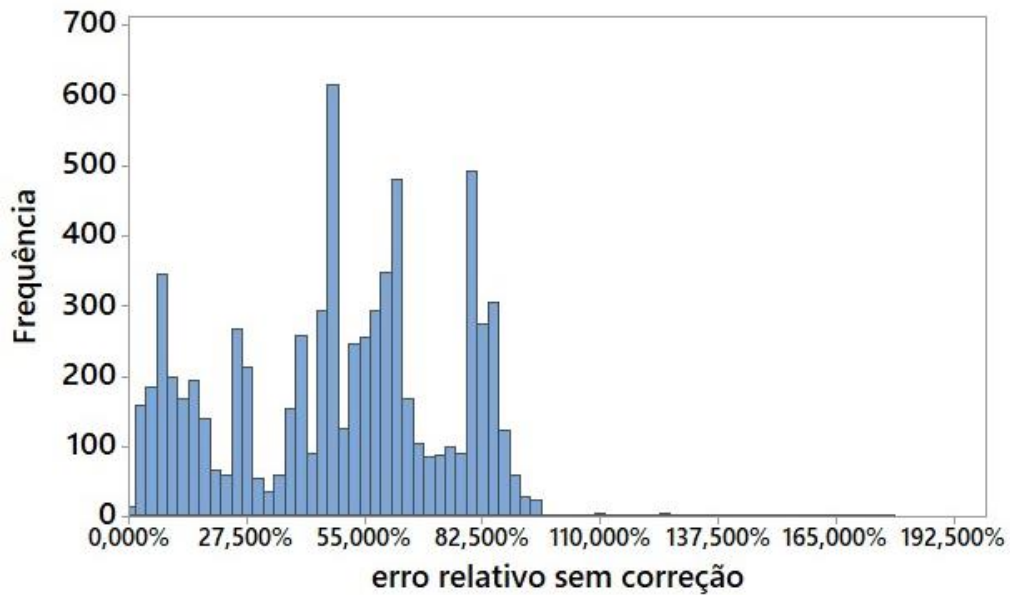
Figura 12 – Dispersão de valores experimentais versus teóricos posteriores à correção.



Fonte: Autores (2022).

Ao analisar os erros, a Figura 13 apresenta seu histograma antes do uso da equação proposta para correção, sendo sua maior frequência próxima aos cinquenta por cento, com alcance até os noventa por cento.

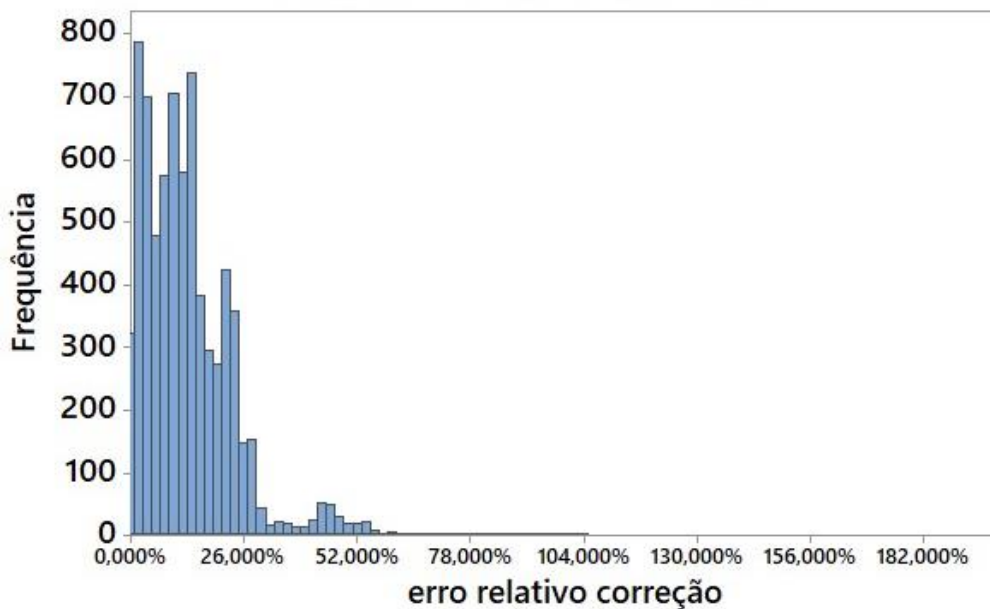
Figura 13 – Histograma de erros relativos antes da aplicação de correção.



Fonte: Autores (2022).

Já com a aplicação da correção proposta, a Figura 14 apresenta a maior parte dos erros relativos em até vinte e cinco por cento, o que comprova efetivamente sua viabilidade.

Figura 14 – Histograma de erros relativos após a aplicação de correção.



Fonte: Autores (2022).

A proximidade dos valores corrigidos com os valores teóricos indica benefício no uso da equação de correção, uma vez que os erros relativos apresentaram uma média de 48,49%, e após o uso da equação proposta esse valor foi reduzido para 12,95%, o que indica a viabilidade do seu emprego no caso estudado. Inclusive, é possível esse recurso se sujeitar a ajustes e implementações em outras ferramentas, como na sua união ao uso de softwares, o que oportuna estudos futuros com esse foco.

Conclusão

Os resultados deste estudo, em consonância com a pesquisa de Adolfato et al. (2004) e os princípios da extensometria laminar, permitiram alcançar o objetivo proposto do estudo. A integração eficiente do extensômetro laminar, amplificador de sinal e microcontrolador demonstrou ser inestimável para o monitoramento estrutural, capturando com precisão dados de deformação. Esses dados elucidaram uma marcante influência das flutuações de temperatura ambiente no sistema de aquisição, destacando a imperatividade de incluir essa variável nas avaliações.

A estratégia de correção por meio de uma função linear, correlacionada à temperatura, apresentou êxito na otimização da precisão dos resultados, notavelmente em contextos de quarto de ponte de Wheatstone. Contudo, variações mais sutis provavelmente originadas de imprecisões experimentais e propriedades dos materiais persistem, sugerindo potenciais futuras explorações, como ajustes no software e medição de temperatura de forma mais precisa.

Referências

ANDOLFATO, R. P.; Camacho, J. S.; Brito, G. A. de. **Extensometria Básica**. UNESP, Ilha Solteira, 2004.

ARAÚJO NETO, G. N. 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.

DELGADO, J. M. D. et al. **Structural Performance Monitoring Using a Dynamic Data-Driven BIM Environment**. Journal of Computing in Civil Engineering, v. 32, n. 3, fev. 2018. ISSN 0887-3801.

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>.

MARQUES JÚNIOR, A. L. **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.

PAULA, J. A. C. Y. de; SPOZITO, R. S. **Estudo da eficiência para obtenção de dados de deformação com extensômetros de lâmina (strain gauge) utilizando a plataforma arduino.** 11º. Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP - 2020. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de São Paulo. Presidente Epitácio, 2020.

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>.

VALINEJADSHOUBI, M.; Bagchi, A.; Moselhi, O. **Development of a BIM-Based Data Management System for Structural Health Monitoring with Application to Modular Buildings: Case Study.** Journal of Computing in Civil Engineering, v. 33, n. 3, maio, 2019.

Enviado em: 13/06/2023