

APLICAÇÃO DE CÉLULA DE CARGA CALIBRADA COM ARDUINO UNO EM ENSAIO DE RESISTÊNCIA DE VIGAS DE CONCRETO

Data de submissão: 08/05/2024

Data de aceite: 03/06/2024

Gabriel Conte

Instituto Federal Sul-rio-grandense
Passo Fundo, RS
<http://lattes.cnpq.br/0342501334658415>
<https://orcid.org/0000-0002-0483-0357>

Lorenzo de Giacometti Peruzzolo

Instituto Federal Sul-rio-grandense
Passo Fundo, RS
<http://lattes.cnpq.br/8909009521547016>

Gustavo da Costa Borowski

Instituto Federal Sul-rio-grandense
Passo Fundo, RS
<http://lattes.cnpq.br/1196186120309575>
<https://orcid.org/0009-0002-2078-0756>

Sabrina Elicker Hagemann

Instituto Federal Sul-rio-grandense
Passo Fundo, RS
<http://lattes.cnpq.br/1765602546954082>

RESUMO: Neste estudo, explora-se a aplicação de uma célula de carga calibrada com Arduino Uno para a realização de ensaios de resistência em vigas de concreto, visando aprimorar a precisão e eficiência das análises estruturais. A montagem do cabeamento estruturado da ferramenta de ensaio foi realizada com um circuito de

losango, ponte de Wheatstone, permitindo a medição da resistência elétrica alternada. O Arduino Uno é então utilizado para registrar as leituras de tensão e converter esses dados em valores de carga, permitindo a monitorização em tempo real. No entanto, esse equipamento possui apenas oito bits. Logo, para converter esse valor para 24 e reduzir o erro relativo percentual (ERP), utiliza-se um módulo conversor amplificador HX711, aliado à um display e botões para leitura analógica das informações digitais. A validação experimental foi realizada com ensaio de ruptura da viga à força cortante, com pesagem e valor máximo de carga sobre a prensa manual. Essa abordagem oferece precisão na medição e permite uma coleta de dados em tempo real, demonstrando-se como uma profícua ferramenta para engenheiros civis, pesquisadores e empreiteiros que desejem avaliar a integridade estrutural das vigas de concreto. Em trabalhos de pesquisa subsequentes, a análise de custos e a comparação entre o processo de calibração convencional e a abordagem proposta podem ser realizados.

PALAVRAS-CHAVE: Ponte de Wheatstone, Célula de Carga, Arduino Uno.

APPLICATION OF LOAD CELL CALIBRATED WITH ARDUINO UNO IN STRENGTH TESTING OF CONCRETE BEAMS

ABSTRACT: In this research, the application of a load cell calibrated with Arduino Uno to carry out resistance tests on concrete beams is explored, aiming to improve the precision and efficiency of structural analyses. The structured cabling assembly of the test tool was carried out with a diamond circuit, Wheatstone bridge, allowing the measurement of alternating electrical resistance. The Arduino Uno is then used to record voltage readings and convert this data into load values, allowing real-time monitoring. However, this equipment only has eight bits. Therefore, to convert this value to 24 and reduce the relative percentage error (ERP), an HX711 amplifier converter module is used, combined with a display and buttons for analog reading of digital information. Experimental validation was carried out with a shear force beam rupture test, with weighing and maximum load value on the manual press. This approach offers measurement precision and allows real-time data collection, proving to be a useful tool for civil engineers, researchers and contractors who wish to evaluate the structural integrity of concrete beams. In subsequent research work, cost analysis and comparison between the conventional calibration process and the proposed approach can be carried out.

KEYWORDS: Wheatstone Bridge, Load Cell, Arduino Uno.

INTRODUÇÃO

Células de carga rodoviárias são calibradas periodicamente para pesagens industriais ou laboratoriais. A aplicabilidade desses medidores varia conforme o ambiente e o usuário. Na engenharia civil, elas podem ser modeladas para pesagem de corpos de prova, estruturas em escala reduzida, entre outros. E utilizadas em prensas, hidráulicas ou manuais, e locais que necessitem uma maior precisão nas medições. Esses equipamentos podem ser calibrados com ferramentas variadas, contanto que sigam os parâmetros da portaria de nº 157 (Brasil, 2022) do Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO).

O uso da prototipagem eletrônica, ou seja, da versão prévia do quadro elétrico com Arduino Uno para modelar equipamentos técnicos é amplamente divulgado na automação residencial, contudo, na área industrial da construção, possui referência bibliográfica escassa. Nos últimos cinco anos, trabalhos como o de Oliveira *et al.* (2020), demonstraram que essa ferramenta “constitui uma alternativa importante para viabilizar o uso de experimentos de ensino e aprendizagem no ambiente educacional, como também de forma a facilitar a prototipagem, implementação ou emulação do controle de sistemas interativos (...) a um custo acessível”.

Outrossim, outros setores, como os industriais, mostram a relevância técnica da acessibilidade dessa calibração, visto que, alguns ramos de produção seriam inviáveis sem alternativas como a prototipagem eletrônica. No entanto, alguns autores questionam a confiabilidade da utilização dessas ferramentas. Morais, Shaeffer e Marcelino (2023), a partir da indústria manufatureira do processo de estampagem, afirmaram que:

"A utilização da célula de carga ou transdutor de deslocamento para medir a força de atrito do processo é confiável, porém os sensores têm um limite de posicionamento em relação a sua instalação nos equipamentos, quanto mais atuadores forem usados e integrados ao processo será possível uma rápida resposta e correção do processo conforme a detecção da falha." (Morais, Shaeffer e Marcelino, 2023)

Portanto, para medir a resistência elétrica alternada de uma célula de carga, de forma precisa, sob pressão de compressão em ensaios de resistência de vigas de concreto, foi proposta a montagem e calibração de uma célula de carga rodoviária convencional, do tipo coluna, com Arduino Uno.

Este trabalho objetiva analisar a aplicação de células de carga calibradas com Arduino Uno para realizar ensaios de resistência em vigas de concreto, com foco na melhoria da precisão e eficiência das análises estruturais com um projeto mais acessível economicamente. Mutuamente, espera-se apresentar a montagem do cabeamento estruturado da ferramenta de ensaio, incluindo o uso de uma ponte de Wheatstone para medição da resistência elétrica alternada, e a transformação de leituras de tensão em valores de carga em tempo real.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Segundo Pegorini (2021), nos circuitos de losango, também conhecidos como Pontes de Wheatstone, a tensão de excitação, ou seja, a energia contínua de uma fonte externa é fornecida para o sistema e a tensão de saída gera uma medida em relação aos dois terminais de cobre centrais. No ensaio com a célula de carga, essa extremidade é dotada de extensômetros uniaxiais, visto que, não há exigência técnica para medições em outras dimensões na análise de ruptura de uma viga por força cortante. Esses medidores elétricos utilizados também são conhecidos como strain-gauges e podem ser medidores de deformação ou de fadiga de materiais.

Em uma análise dos circuitos de medição, a empresa *Omega Engineering* (2015), demonstrou que, divergindo do circuito de Ohm e da ponte de Chevron, o arranjo entre os canais de resistência da Ponte de Wheatstone deve manter o equilíbrio entre os seus resistores conectados pelos extensômetros. A Figura 1 apresenta a configuração elétrica desse esquema operacional considerando a estabilidade entre os resistores. Nessa situação aplica-se a 2ª lei de Kirchhoff, ou seja, considera-se que a soma dos potenciais elétricos em cada malha do circuito e a corrente que passa pelo Galvanômetro (G) seja sempre nula e, portanto, os produtos das resistências cruzadas gerem uma igualdade. Dessa forma, se houvessem falhas nas conexões strain-gauges, o multímetro indicaria, facilitando a montagem da célula de carga e da prototipagem eletrônica inteira.

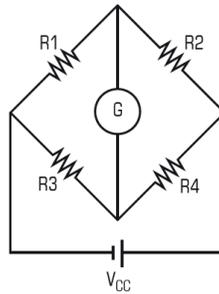


Figura 1. Ponte de Wheatstone.

Fonte: Hangar MMA, 2015

No século XX, Martins E Tamagna (1993) prescreveram que “o tipo de célula de carga adequado para a determinação de forças dinâmicas” poderia ser determinado a partir de dados experimentais. Portanto, as empresas fornecedoras de ferramentas industriais criaram fichas técnicas com a funcionalidade específica de cada um destes materiais.

Com o intuito de verificar a célula de carga ideal para ensaios de força cortante que comprovem o valor de deformação, ou seja, a resistência de uma viga de concreto, armado ou não, urge a necessidade da classificação e detalhamento do funcionamento dos principais modelos comerciais desse medidor. No entanto, ressalta-se que, apesar da variedade de deformadores por compressão, todos são formados ou projetados com base em sensores e tensões usuais.

O modelo de ponto único, *Single Point*, de célula de carga é o mais utilizado em balanças residenciais, comerciais e industriais para pesagens de até 500 kg. No entanto, em um ensaio de ruptura, as medições da carga de deformação da viga iniciam em uma tonelada. Portanto, esse equipamento não atende os pré-requisitos de ensaio: suporte de pesagem de quarenta toneladas e com grau de proteção IP superior à 54. Logo, analisaram-se as células de carga rodoviárias. Elas foram aprovadas com êxito, visto que, a classe *Dual Shear Beam* em aço carbono e com sapata articulada ou sem essa base, assim como a classe Coluna (C), atendiam ao projeto de ensaio.



Figura 2. Célula de Carga Rodoviária tipo Coluna.

Fonte: Weightech, 2017.

Segundo Tomazi e Spohn (2020), a plataforma de prototipagem eletrônica ou de hardware de projeto aberto, Arduino Uno, “possui 14 pinos de entrada e saída digitais e 6 pinos de entrada analógica, uma conexão USB, que permite a comunicação entre o computador e a placa, possibilitando a gravação do software na memória do microcontrolador”. No ensaio, esse espaço interno foi programado e calibrado para a leitura da resistência elétrica alternada proveniente da deformação dos extensômetros uniaxiais da célula de carga.

Em consonância com a evolução das capacidades do Arduino Uno, conforme supracitado, o potencial de aplicação desta plataforma teve notório acréscimo na última década. Essa expansão é reflexo da versatilidade e acessibilidade do Arduino, tornando-o uma ferramenta indispensável em projetos que variam desde a leitura da resistência elétrica alternada de extensômetros uniaxiais, como discutido por Tomazi e Spohn (2020), até o desenvolvimento de sistemas de automação, coleta de energia e uma ampla gama de outras funcionalidades, como destacado por Felisardo, Santos e Galrão (2023).

Em suma, devido aos custos reduzidos de dispositivos e sensores, e graças ao aumento do uso de tecnologias computacional, o desenvolvimento de sistemas automatizados vem aumentando, tanto em termos da comunidade científica, quanto no aspecto industrial. Nesta perspectiva, as placas Arduino tem aplicações ilimitadas na prototipagem que podem ser realizadas por profissionais e amadores. A utilização desses microcontroladores é crucial para diferentes áreas, implantando para aquisição de dados e controle de comandos em dispositivos de segurança, em sistemas operacionais e na averiguação da segurança de um ambiente. (Felisardo, Santos e Galrão, 2023, p. 21)

METODOLOGIA

Esse trabalho se caracteriza como uma pesquisa experimental, com o desenvolvimento de um protótipo para leitura das cargas e a sua aplicação em um ensaio de viga de concreto. A pesquisa se divide em três etapas: construção do protótipo, programação e calibração e o ensaio da viga.

O protótipo foi desenvolvido com o emprego de uma plataforma Arduino Uno, tela LCD 2x16, dois botões, módulo conversor analógico para digital HX-711 e um case. A escolha pelo Arduino se deu pelo baixo custo, facilidade de montagem e de programação e a disponibilidade do equipamento. O módulo HX-711 foi escolhido por ter capacidade de conversão analógica digital de 24 bits, de fácil utilização e com capacidade de leitura suficiente para a amplitude de medição da célula de carga estudada.

A célula de carga utilizada tinha capacidade real e nominal de 40 e 30 toneladas, respectivamente. Ela era do tipo coluna (C) com instrumentação em uma ponte de Wheatstone completa, da marca Berman Load Cells. Esse medidor de variação elétrica é feito inteiramente de aço inoxidável, com cabo de 20 metros e 6 fios, conforme a figura 2. Essa decisão foi pautada pelo grau de proteção de entrada, Ingress Protection (IP), de

intemperismos no seu armazenamento ou em sua utilização. A classe Dual Shear Beam em aço carbono atendia aos pré-requisitos do projeto de ensaio, no entanto, seu IP era de 67 e o do tipo C era 68.

De forma síncrona, considerou-se a facilidade em sua montagem e compatibilidade com uma prensa manual de 30 toneladas disponível para ensaios no laboratório do Instituto Federal Sul-rio-grandense, Campus Passo Fundo. E verificou-se um Erro Relativo Percentual (ERP), o qual, depende da sensibilidade fornecida pelo fabricante, aceitável. Esse fator é oriundo da origem da ferramenta utilizada no ensaio, a célula de carga revendida pela empresa Weightech (2017) com sensibilidade de, aproximadamente, $2,0 \pm 0,002$ mV/V. A partir dessa medida, ponderou-se um erro total máximo de, aproximadamente, 0,02% da capacidade nominal de trinta toneladas. Contudo, após ajuste da resistência de saída modelou-se um ERP de 0,01%, gerando assim, um erro máximo de três kg após trinta toneladas

E Na prototipagem de hardware, essa ferramenta foi conectada em uma caixa plástica provisória que continha: Arduino Uno, módulo HX711, display, botões e fios conectores. Montado o protótipo, a fase seguinte foi a programação e a calibração do mesmo. A linguagem utilizada na codificação do instrumento foi C++, por meio da plataforma Arduino IDE e foram utilizadas as bibliotecas HX711.h, Wire.h e LiquidCrystal_I2C.h. Nesse contexto, foram desenvolvidas duas programações, uma para a calibração, com o objetivo de definir o fator de calibração entre a medida física e a leitura digital do sistema e outra para o emprego do protótipo no ensaio.

No entanto, o Arduino Uno possui algumas limitações operacionais. Dentre elas, destaca-se a capacidade de leitura de 8 bits, necessitando de um módulo conversor amplificador. No ensaio de resistência de vigas de concreto, para melhorar a precisão da sensibilidade da célula de carga, utilizou-se uma placa HX711, conforme a figura 3.

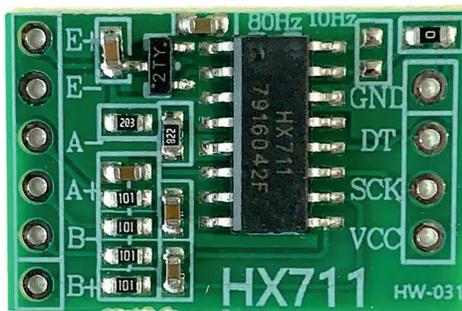


Figura 3. Módulo Conversor Amplificador HX711.

Fonte: Piscaled, 2023.

Portanto, as conexões entre a célula de carga e o Arduino Uno passam pelo módulo. A lateral direita dessa peça é conectada com o aparelho de prototipagem eletrônica e o lado esquerdo com a ferramenta de medição. As saídas GND e VCC são os diferenciais de potencial, indicando, respectivamente, a Voltagem de Corrente Contínua e o *Ground*, termo em inglês para a fiação terra ou, neste ensaio, para o polo negativo, conforme a figura 1.

Mutuamente, as leituras de dados em tempo real eram captadas pelos pinos A+ e A-, ou seja, o amplificador positivo e o negativo. Essas entradas são as conexões com sinais opostos que recebem o sinal de tensão da célula de carga quando ela é deformada pelo peso aplicado e geram uma diferença de tensão amplificada e transmitida pelas saídas na direita. Os dados são enviados em série, bit a bit, por meio do pino de data, DT, mas para isso necessita de pulsos de relógio em série, os quais, são fornecidos pelo pino SCK ou Serial Clock, termo em inglês para relógio serial, para saber quando deve ler ou escrever no display ou no monitor de calibração.

Outrossim, na fase de desenvolvimento deste protótipo, foi implementado um procedimento de tara e determinação do valor máximo, mediante a interação com os botões incorporados ao sistema. A tara, neste contexto, permite a compensação de quaisquer leituras residuais, garantindo que a célula de carga esteja em seu estado de equilíbrio antes das medições. Para estabelecer a tara, o operador pressiona o botão correspondente, instruindo o sistema a registrar o valor atual como referência zero. Da mesma forma, para registrar o valor máximo, os botões são acionados para reter o pico de carga durante o ensaio. Esses procedimentos contribuíram significativamente para a precisão das medições obtidas durante os ensaios de força cortante realizados nas vigas de concreto, permitindo um controle mais eficaz das variáveis do experimento, conforme projetado pelos autores.

Posteriormente, o processo de calibração supracitado foi realizado com o auxílio de uma prensa hidráulica de 100 toneladas com célula de carga própria e acoplada ao sistema, devidamente calibrada, e que serviu de referência para o ajuste da célula de carga estudada. A técnica empregada foi a **aplicação de** carregamento até valores pré-definidos e na sequência encontrar o fator de calibração que fizesse o protótipo corresponder a mesma carga.

Esse valor foi obtido com o emprego de três carregamentos distintos, de 50 kN, 100 kN e 150 kN, a fim de identificar a linearidade da célula e encontrar um fator de correção médio. Os coeficientes de calibração obtidos são apresentados na Tabela 1, junto com o erro em relação à média e a demonstração quantitativa de uma variabilidade pequena, confirmada por um desvio padrão no valor de 143,2 e um coeficiente de variação dos fatores de 1,29%.

Carga	Fator de Correção	Erro
50 kN	10889	-1,40%
100 kN	11069	0,23%
150 kN	11172	1,17%
Média	11043,333...	-

Tabela 1. Coeficientes de calibração.

Fonte: Autores, 2023.

Após a calibração, a etapa final do trabalho foi a aplicação do conjunto protótipo e célula de carga em um ensaio de uma viga de concreto. A viga era curta, possuía comprimento de 70 centímetros, largura de 15 centímetros e altura de 30 centímetros, sendo ensaiada a flexão com uma carga centrada e um vão de 60 cm. Esse modelo foi dimensionado para ruptura a força cortante por tração e servirá de base para o desenvolvimento de um trabalho futuro com ensaios de vigas curtas reforçadas ao cisalhamento.

No ensaio de ruptura por tração do aço, esperava-se que o limite de escoamento desse material com diâmetro nominal de 16mm fosse superado e rompesse. Em projetos de concreto armado, para evitar esse comportamento, utiliza-se a Norma Brasileira (NBR) 6118/2023, na qual, define-se que a parcela de força cortante resistida pela armadura transversal (V_{sw}) deve ser maior ou igual à solicitante (V_{sd}) reduzida da parte resistida por mecanismos complementares ao modelo de treliça (V_c). As figuras 4 e 5, elaboradas pelos autores, mostram a aplicação da célula de carga com um suporte de tubulação PVC, para impedir movimentações não axiais ao eixo de compressão, sob a prensa manual, na qual, foram feitos os ensaios das três vigas curtas à tração da armadura por força cortante.



Figura 4. Célula de carga com suporte em PVC

Fonte: Autores, 2023.



Figura 5. Prensa com a célula de carga

Fonte: Autores, 2023.

A célula de carga, com a prototipagem eletrônica calibrada para medição da deformação de seus extensômetros, foi validada no ensaio de força cortante comparando com o resultado analógico apresentado pelo leitor de carga existente no topo da prensa. Na figura 6, elaborada pelos autores, ilustra-se essa relação por meio de um gráfico que apresenta a carga aplicada em função do deslocamento vertical no centro do vão. Esse gráfico foi essencial para verificar a eficácia e a confiabilidade da célula de carga em sua nova configuração eletrônica.

Além disso, o acompanhamento do padrão de fissuração da viga, indicou uma estrutura com ruptura por força cortante-flexão, ou seja, as fissuras de cisalhamento atingiram o banzo comprimido do concreto armado. As demais estruturas, obtiveram ruptura por tração conforme esperado.

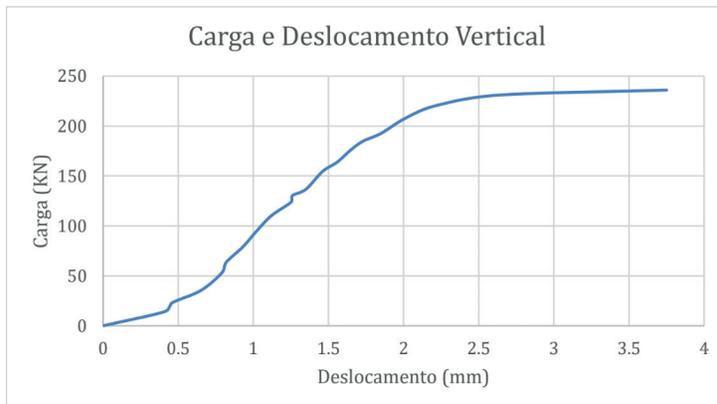


Figura 6. Gráfico carga e deslocamento vertical da viga

Fonte: Autores, 2023.

Os valores lidos na prensa pelo operador foram comparados com os utilizados na construção do gráfico. A análise qualitativa indicou que as leituras do protótipo eram compatíveis com o comportamento da viga, sendo que o padrão de deslocamento seguiu o esperado pelo padrão de ruptura e a carga máxima identificada pela célula foi próxima ao planejado, pois a viga tinha sido dimensionada para resistir à, no máximo, 250 kN.

Portanto, em suma, neste estudo, um protótipo foi desenvolvido, composto por um Arduino Uno, uma tela LCD 2x16, dois botões, um módulo conversor analógico para digital HX-711 e um case. A célula de carga empregada tinha uma capacidade de 40 toneladas, sendo do tipo coluna e equipada com uma ponte de Wheatstone completa da marca Berman Load Cells. O protótipo foi programado em C++ utilizando a plataforma Arduino IDE e calibrado para estabelecer o fator de conversão entre a medida física e a leitura digital. Após a calibração, o sistema foi aplicado com sucesso em um ensaio de força cortante de uma viga curta de concreto, com dimensões específicas para o teste, servindo como base para futuros trabalhos relacionados a ensaios de vigas curtas reforçadas ao cisalhamento.

RESULTADOS

O processo de calibração do protótipo desenvolvido neste estudo adotou etapas rigorosas para garantir a precisão das medições obtidas. Primeiramente, a célula de carga de 40 toneladas, do tipo coluna e equipada com a ponte de Wheatstone da marca Berman Load Cells, foi cuidadosamente montada e conectada ao módulo conversor analógico para digital HX-711. Em seguida, um procedimento de aferição foi conduzido utilizando pesos-padrão devidamente certificados com a prensa hidráulica. O protótipo, exposto na figura 7, elaborada pelos autores, foi programado em C++ utilizando a plataforma Arduino IDE para registrar as saídas da célula de carga em resposta a diferentes pesos aplicados com apresentação de carga e de valor máximo em quilo Newtons (kN) e, sob alteração manual dos botões, em toneladas (t).



Figura 7. Prototipagem de hardware com Arduino Uno

Fonte: Autores, 2023.

Os dados resultantes foram utilizados para estabelecer um fator de conversão com precisão de pesagem de 0,01% e de programação de, aproximadamente, 1% entre a medida física e a leitura digital, assegurando que as medições subsequentes refletissem com exatidão as forças aplicadas nas vigas de concreto durante os ensaios.

Após a conclusão da calibração, o sistema demonstrou sua robustez e eficácia em um ensaio de força cortante realizado em uma viga curta de concreto especialmente dimensionada para o teste. As medições obtidas durante o ensaio foram comparadas com os valores esperados, validando assim a precisão do protótipo. A Figura 8, elaborada pelos autores, apresenta de forma visual a ruptura, na prensa manual, por tração da armadura da viga sob a influência da força cortante, comprovando a capacidade do sistema com a célula de carga em registrar esses eventos com precisão.



Figura 8. Ruptura da viga na prensa manual

Fonte: Autores, 2023.

Este processo meticuloso de prototipagem eletrônica não apenas assegurou a confiabilidade das medições, mas também estabeleceu uma base sólida para futuras pesquisas relacionadas a ensaios de vigas curtas reforçadas ao cisalhamento. Os resultados da calibração destacam a importância da precisão e da confiabilidade do protótipo desenvolvido, abrindo caminho para investigações mais aprofundadas e aplicações práticas em engenharia estrutural e ciências afins.

CONCLUSÕES

A validação experimental realizada, com o ensaio de ruptura da viga à força cortante, demonstrou eficácia e precisão em tempo real das medições apontadas no display com alterações em toneladas e em quilo newtons (kN), conforme programação. Os resultados obtidos permitiram a coleta de dados da avaliação da ruptura e da integridade estrutural das vigas de concreto em escala reduzida.

Para futuros trabalhos de pesquisa, sugere-se a realização de análises de custos para avaliar a viabilidade econômica dessa abordagem de calibração e ensaio em comparação com os métodos convencionais industriais. Além disso, a expansão deste estudo para outras ferramentas, como a célula de carga rodoviária do tipo *Dual Shear Beam*, ou para outras áreas de ensaios de resistência e estruturas podem revelar novas aplicações e oportunidades para aprimorar ainda mais a eficiência e precisão das análises estruturais.

REFERÊNCIAS

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento, Indústria e Comércio Exterior (MDIC). Portaria nº 157. Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial (INMETRO), 2022.

DE MORAIS, J. B. M.; SHAEFFER, L. .; MARCELINO, R. . **UTILIZAÇÃO DE IOT PARA AQUISIÇÃO DE DADOS E MONITORAMENTO NO PROCESSO DE ESTAMPAGEM INDUSTRIAL – UMA REVISÃO**. REVISTA FOCO, [S. l.], v. 16, n. 02, p. e969, 2023. DOI: 10.54751/revistafoco.v16n2-093. Disponível em: <https://ojs.focopublicacoes.com.br/foco/article/view/969>. Acesso em: 8 mai. 2023.

FELISARDO, R. J. A.; SANTOS, G. N. dos; Galvão, G. D. . **Uso do arduino como ferramenta de prototipagem para desenvolvimento de dispositivos automáticos: uma revisão**. Caderno De Graduação - Ciências Exatas E Tecnológicas - UNIT - SERGIPE, 8(1), 11–26. Disponível em: <https://periodicos.grupotiradentes.com/cadernoexatas/article/view/11325>. Acesso em: 08 set. 2023.

HANGAR MMA, **Ponte de Wheatstone**. 2021. Glossário. Disponível em: <https://hangarmma.com.br/glossary/glossary-categories/ponte-de-wheatstone/>. Acesso em: 5 de ago. de 2023.

OLIVEIRA, A. C. de M. *et al.* **Protótipo de monitoramento de nível para reservatório com célula de carga**. Anais Semana Nacional de Ciência E Tecnologia (SNCT), v. 2, n.1, p. 712–716, out. 2021. Disponível em: <https://periodicos.ifs.edu.br/periodicos/SNCT/article/view/1067>. Acesso em: 08 set. 2023.

OMEGA ENGINEERING, **Circuitos de medição**. 2015. Disponível em: <https://br.omega.com/prodinfo/ponte-wheatstone.html>. Acesso em: 12 ago. 2023.

PEGORINI, Leonardo Pessin. **Sistema microcontrolado para monitoramento remoto do consumo de gás liquefeito de petróleo**. Orientador: Prof. Dr. Alexandre Mesquita. 2021, 105 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Curso de Engenharia Elétrica) - Ciências Exatas e Engenharias, Universidade de Caxias do Sul, Caxias do Sul, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ucs.br/xmlui/handle/11338/11198>. Acesso em: 10 set. 2023.

PISCALED. **Módulo Célula De Carga 24 Bits Hx711 - Balança**. 2023. Disponível em: <https://www.piscaled.com.br/modulo-celula-de-carga-24-bits-hx711-balanca>. Acesso em: 25 jun. 2023.

TAMAGNA, A. . **Células de cargas dinâmicas**. Salão de Iniciação Científica Porto Alegre UFRGS/PROPESQ. 05 ed. Porto Alegre, RS. Livro de resumos. 1993.

TOMAZI, Rodrigo Miguel; SPOHN, Marco Aurélio. **Análise do impacto da reprogramação do clock do microcontrolador ATmega328P na previsibilidade do FreeRTOS no Arduino Uno**. Revistas de Sistemas e Computação - RSC, [s. l.], v. 10, ed. 3, p. 231-225. Disponível em: <https://revistas.unifacs.br/index.php/rsc/article/view/6722>. Acesso em: 10 set. 2023.

WEIGHTTECH. **Ficha Técnica – Célula de Carga Rocker Column**. 2017. Disponível em: www.weighttech.com.br. Acesso em: 17 jun. 2023.