

# Instrumentação Eletrônica Aplicada a Análise de Deformação em Estruturas Metálicas

<sup>1</sup>Elton Fernandes dos Santos

Curso de Engenharia Elétrica, FACET  
UNEMAT, Sinop, Brasil  
eltonfernando90@gmail.com

<sup>2</sup>Vlademir de Jesus Silva Oliveira

Curso de Engenharia Elétrica, FACET  
UNEMAT, Sinop, Brasil  
vlademir.oliveira@unemat.br

<sup>3</sup>Wagner de Almeida Ferreira

Curso de Engenharia Civil, FACET  
UNEMAT, Sinop, Brasil  
wagnervt.almeida@gmail.com

<sup>4</sup>Julio César Beltrame Benatti

Curso de Engenharia Civil, FACET  
UNEMAT, Sinop, Brasil  
benatti@unemat.br

**Resumo**—Este trabalho concentra-se no estudo de um módulo de aquisição de dados para realizar ensaios de deformação em barras metálicas utilizando extensometria. O sistema consiste em um circuito de condicionamento de sinal compatível com a plataforma Arduino, onde, os dados coletados podem ser processados e armazenados. Ao longo desse trabalho foram abordadas as etapas de condicionamento de sinal como, amplificação e conversão analógica-digital.

O modelo proposto foi submetido a ensaios de prova de carga utilizando barra de aço CA 50, pois a mesma é amplamente utilizada em construção civil. Posteriormente foi realizado ensaio com treliça, no qual alguns sensores foram colocados em locais estratégicos para medir os pontos onde se esperava as máximas deformações. Os resultados obtidos apresentaram coerência ao compará-los com simulação realizada no software Ftool.

**Index Terms**—Amplificador de instrumentação, Arduino, extensômetro, prova de carga

## I. INTRODUÇÃO

O dimensionamento de um projeto estrutural realizado com base em estimativas pode alocar parte dos recursos de forma ineficiente, pois a estrutura adequada depende de vários fatores. A extensometria, que é a técnica utilizada para a análise experimental de tensões e deformações em estruturas mecânicas, pode ser utilizada para esse fim. Embora existam outros métodos, o uso de strain-gauge (medidor de deformação) é um dos mais versáteis. Este trabalho apresenta um modelo para processamento de sinal utilizando extensometria, no qual foi implementado em um módulo shield compatível com a plataforma Arduino e realizado um ensaio de prova de carga com barra metálica CA 50 utilizada em estruturas de concretos.

## II. DESENVOLVIMENTO

### A. strain-gauge

A preparação da superfície e colagem do extensômetro constitui-se numa etapa de grande importância, por isso deve-se verificar atentamente todas as recomendações dos fabricantes. Se essa etapa for conduzida de forma imprópria, os resultados serão comprometidos [1]. O objetivo é que o extensômetro reproduza fielmente as micro-deformações, para

isso a superfície dever ser uniforme e devidamente preparada, como na Figura 1.



Figura 1. Preparo da superfície.

A fixação pode ser feita com Cianoacrilato, vale lembrar, que a superfície deve estar livre de impurezas, para isso pode-se utilizar acetona. O procedimento de colagem pode variar dependendo da aplicação, porém para corpos metálicos o procedimento descrito acima é válido.

O extensômetro é projetado para medir somente as deformações longitudinais da grade. Por essa razão é importante identificar previamente a direção das deformações que deseja medir. Porém para medições específicas existem combinações de extensômetros angularmente dispostos que permite realizar medição em várias direções.

O tamanho é determinado pela característica do material usado no ensaio, em materiais heterogêneos requer-se uma área maior para que a variação de resistência seja representativa. A escolha do sensor adequado também depende das condições que o afetam durante o processo, as informações mais relevantes são expressas em código, que combinados formam o nome do sensor [2]. O modelo utilizado foi, BF-350-3-AA.

- BF: características referente ao material de fabricação do sensor.
- 350: Resistência ôhmica.
- 3-AA: característica geométrica.

Os extensômetros apresentam sensibilidade a temperatura, portanto, dependendo da aplicação, deve utilizar métodos de compensação.

### B. Condicionamento de sinal

A ponte de Wheatstone é empregada em muitas aplicações, principalmente em medições de pequenos sinais. Uma ponte pode ser composta por quatro componentes, entre resistores e sensores. Dá-se o nome de um quarto, meia ou ponte completa, quando os resistores são substituídos respectivamente por um, dois, ou quatro sensores. Na Figura 2 apresenta-se uma ponte em um quarto.

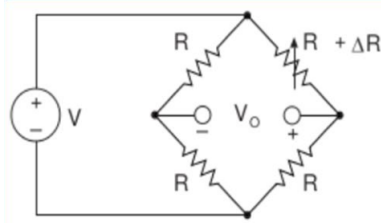


Figura 2. Ligação de 1/4 de ponte.

Considerando que os resistores sejam iguais e ideais e que o sensor tenha uma variação  $\Delta R$ , a diferença de potencial  $V_o$  pode ser calculada usando o conceito de divisor de tensão, resultando nas equações (1) e (2).

$$V_{o-} = \left( \frac{VR}{2R} \right) = \frac{V}{2} \quad (1)$$

$$V_{o+} = \left( \frac{VR}{2R + \Delta R} \right) = \left( \frac{V}{2 + \Delta R/R} \right) \quad (2)$$

A saída  $V_o$  é dada pela diferença das equações (2) e (1)

$$V_o = -\frac{V}{2} \left( \frac{\Delta R/R}{2 + \Delta R/R} \right) \quad (3)$$

Os amplificadores operacionais podem ser ajustados de acordo com as necessidades do projetista, isso os habilita para uma gama ampla de aplicações [3]. Uma das configurações mais utilizada em instrumentação, é o amplificador de diferença, visto na Figura 3.

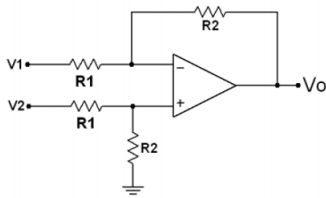


Figura 3. Configuração amplificador de diferença.

A saída do circuito é resultado da diferença das entradas multiplicado por um ganho, como apresentado na equação (8).

$$V_+ = \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} \quad (4)$$

$$\frac{V_1 - V_+}{R_1} = \frac{V_+ - V_o}{R_2} \quad (5)$$

$$V_o = -\frac{V_1 R_2}{R_1} + V_+ \left( \frac{R_2}{R_1} + 1 \right) \quad (6)$$

Substituindo equação (4) na equação (6).

$$V_o = -\frac{V_1 R_2}{R_1} + \left( \frac{V_2 R_2}{R_1 + R_2} \right) \left( \frac{R_2 + R_1}{R_1} \right) \quad (7)$$

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_2 - V_1) \quad (8)$$

Supondo que as entradas  $V_1$  e  $V_2$  estejam sujeitas ao sinal de ruído, a tendência é que esse sinal indesejado seja amplificado na saída, porém esse circuito possui uma característica chamada de razão de rejeição de modo comum (CMRR, common-mode rejection ratio), que é a capacidade de atenuar sinais idênticos nas entradas [3]. Dessa forma, o amplificador de diferença, usando resistores de precisão, amplifica apenas sinais diferenciais vindo da entrada.

O circuito projetado é a ligação de um amplificador diferencial aos polos da ponte, com acoplamento de um potenciômetro para ajuste. No caso da Figura 4 um dos resistores da ponte deve ser substituído pelo sensor.

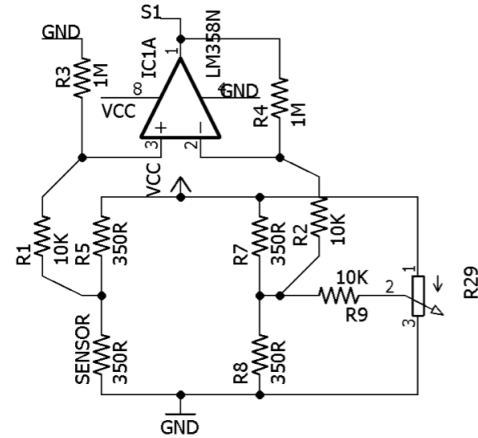


Figura 4. Circuito para condicionamento de sinal do sensor.

O ganho do amplificador deve ser ajustado de acordo com a aplicação. Embora seja possível determinar um ganho por métodos teórico, o mesmo pode não ser satisfatório e como geralmente os ensaios são destrutivos, convém realizar um procedimento de calibração, para isso dever ser utilizado uma prensa com medidor de carga, como na Figura 5.

A fim de evitar escorregamento, pode ser colocado algumas folhas de papel entre a barra e a mesa da prensa, o procedimento de calibração deve ser realizado até atingir carga máxima que será usada no ensaio de prova de carga.

### C. Processamento de sinal

O processo de conversão analógico-digital consiste em obter uma parcela do sinal analógico e representá-lo na forma digital. Embora quase toda informação possa ser representada no domínio digital, existem alguns fatores limitantes. O Arduino



Figura 5. prensa hidráulica usada nos ensaios.

possui um conversor A/D integrado de 10bits, ou seja, em uma escala de 0 a 5 volts serão representadas 1024 posições, portanto o menor valor de tensão que pode ser lido é de  $5/1024, (4.9mV)$ , a tensão de referência poder ser alterada para valores menores que 5V, porém o range diminui [4]. Outro fator é decorrente do processo de quantização, segundo [4] há um erro absoluto de  $\frac{1}{2}LSB$  nesse caso,  $4.9mV/2 = 2.45mV$ . A frequência de amostragem fica sujeita ao tempo de resposta da função analogRead(), que é cerca de  $100\mu s$ , porém essa é uma particularidade da plataforma Arduino onde o fator de divisão do prescaler é definido como 128, o prescaler pode ser reconfigurado alterando os 3 primeiros bits do registrador ADCSRA através de ferramentas nativas do microcontrolador AVR [5].

Para o armazenamento no cartão SD, foi utilizado a biblioteca SD.h e criado um arquivo .txt, onde os dados foram organizados em colunas e posteriormente importados para o Excel®.

### III. RESULTADOS

O sistema tem uma placa com suporte para até 3 sensores simultâneos, os pinos de saídas S1, S2 e S3, na Figura 7 devem ser ligadas aos pinos analógico do Arduino.

O algoritmo desenvolvido para coleta dos dados é mostrado no fluxograma na Figura 6.

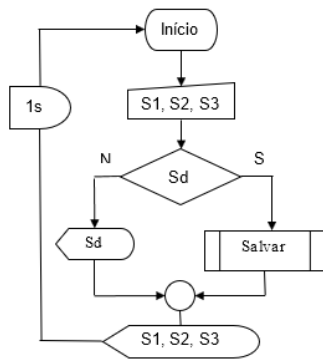


Figura 6. Fluxograma.

No módulo foi utilizado o CI LM358 com capacitores de desacoplamento ligados às fontes e resistores com tolerância de 1%. A Figura 7 apresenta o circuito impresso.



Figura 7. Circuito impresso.

Na Figura 8 é apresentado o gráfico da tensão elétrica por deformação do ensaio realizado com carga máxima de  $56KN$ .

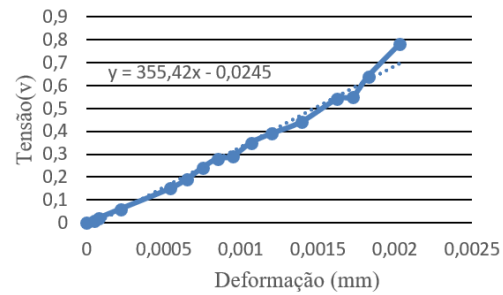


Figura 8. Deformação por tensão.

A tensão de saturação do amplificador depende da carga, nesse caso a saturação ocorreu em 0V e 3,5V. Assim o range de tensão mostrada no gráfico da Figura (8) (0V a 0,8V) pode ser aumentado, para isso basta determinar um novo ganho utilizando a equação (9).

$$G = \frac{3,5(100)}{0,8} = 437,5 \quad (9)$$

Onde 3,5 é a tensão de saturação, 100 o ganho do amplificador e 0,8 o range alcançado no ensaio.

Para assegurar que o amplificador não opere em saturação convém arredondar os valores de ganho sempre para baixo. Portanto para realizar um ensaio utilizando barra CA 50, contando que, a carga não ultrapasse  $56KN$ , o modelo apresentado comporta esse ensaio.

O módulo desenvolvido nesse trabalho foi utilizado para realizar dois ensaios, pouco pode se dizer do primeiro ensaio, descrito no artigo de [6], a carga máxima aplicada foi distribuída entre a barra e a estrutura de concreto que a envolvia, portanto, o ganho do amplificador foi mal dimensionado, necessitando de outro aparelho para aferir a medição. Já no

trabalho de [7] sabia-se, exatamente qual força seria aplicado a estrutura, o ensaio foi realizado colocando 3 sensores em uma treliça e comparado os resultados obtidos com simulação no software Ftool. Segundo o autor, ao considerar um modelo ideal da estrutura, os resultados não foi coerente, portanto ao inserir as excentricidades e o momento fletor, os resultados foram bem próximos das medições, ou seja, utilizar modelos ideais nem sempre pode ser a melhor opção.

#### IV. CONCLUSÃO

Os resultados obtidos foram satisfatórios, apresentando precisão considerável e praticidades ao realizar as medições. Os potenciômetros acoplados a ponte de Wheatstone permitem ajustar o valor de medida inicial, assim é possível realizar medições em ensaios de tração (escala crescente) ou de compressão (escala decrescente), fazendo apenas alteração no valor inicial das medições, com o ajuste do potenciômetro.

Com o amplificador de diferença foi possível ajustar o sinal para a entrada do conversor A/D, porém dependendo do ensaio, pode ser necessário reajustar o ganho. Embora a resolução utilizada permitisse, não foi possível usar uma precisão com mais de 2 casas decimais, pois forças residuais internas ao corpo de prova provocam instabilidade, causando oscilações na saída. Configuração de “1/2” ponte utilizando extensômetro de 90°, ajuda inibir os efeitos das forças residuais internas, possibilitando uma medição mais precisa caso seja necessário.

#### AGRADECIMENTOS

Os autores são gratos ao Mestre Maicon José Hillesheim por auxiliar nos ensaios realizados.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Excel sensores. preparação da superfície e colagem do extensômetro na peça. 1.ed. São paulo, 2004,4p. modelo- Manual de instrução
- [2] AGS-TECH,Coding System of Strain Gau- ges, Albuquerque novo México. In: [https://www.elecrow.com/wiki/images/4/48/Coding\\_System\\_of\\_Strain\\_Gauges-AGS-TECH\\_Version.pdf](https://www.elecrow.com/wiki/images/4/48/Coding_System_of_Strain_Gauges-AGS-TECH_Version.pdf)(acessado em 15 de Outubro de 2017)
- [3] A. J., PERTENCE, Eletrônica analógica: Amplificadores operacionais e filtros ativos: 6 ed. Rio de Janeiro,Bookman, 2007.
- [4] ATMEL, AVR120: Characterization and Calibration of the ADC on an AVR, application note. In: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-2559-Characterization-and-Calibration-of-the-ADC-on-an-AVR\\_ApplicationNote\\_AVR120.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-2559-Characterization-and-Calibration-of-the-ADC-on-an-AVR_ApplicationNote_AVR120.pdf)(acessado em 15 de Novembro de 2017)
- [5] ATMEL, Atmel 8-bit microcontroller with 4/8/16/32KBYTES in-system programmable flash, datasheet. In: [http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P\\_datasheet\\_Complete.pdf](http://www.atmel.com/Images/Atmel-8271-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega48A-48PA-88A-88PA-168A-168PA-328-328P_datasheet_Complete.pdf)(acessado em 15 de Novembro de 2017)
- [6] W. A., Ferreira, J. C. B. Benatti,Análise do comportamento de estaca escavada, instrumentada, em solo da região de Sinop/MT. 2017. 9p. Monografia (engenharia Civil)- UNEMAT, universidade do estado do Mato Grosso, Sinop.
- [7] M. H. Batelo, M. J. Hillesheim, Análise experimental da capacidade resistente de uma treliça metálica composta por perfis formados a frio.2017. 9p. Monografia (engenharia Civil)- UNEMAT, universidade do estado do Mato Grosso, Sinop.
- [8] NBR 14762, Dimensionamento de estruturas de aço constituídas por perfis formados a frio. Rio de Janeiro, 2010.
- [9] GRANTE, Apostila de extensometria. Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.