

## **DESENVOLVIMENTO DE EQUIPAMENTOS DE BAIXO CUSTO PARA REALIZAÇÃO DE ENSAIOS EXPERIMENTAIS PARA ENSINO DE RESISTÊNCIA DOS MATERIAIS**

Hugo Reggiani Siman Assis – hugo.assis@ufv.br  
Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Civil  
Av. P.H. Rolfs, Campus Universitário, LABENGE.  
36.570-900 – Viçosa – MG

João Victor Guimarães França – joao.v.franca@ufv.br  
Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Civil  
Av. P.H. Rolfs, Campus Universitário, LABENGE.  
36.570-900 – Viçosa – MG

Bruno Berger Quemelli – bruno.quemelli@ufv.br  
Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Civil  
Av. P.H. Rolfs, Campus Universitário, LABENGE.  
36.570-900 – Viçosa – MG

Diôgo Silva de Oliveira – diogooliveira@ufv.br  
Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Civil  
Av. P.H. Rolfs, Campus Universitário, LABENGE.  
36.570-900 – Viçosa – MG

José Carlos Lopes Ribeiro – jcarlos.ribeiro@ufv.br  
Universidade Federal de Viçosa – Departamento de Engenharia Civil  
Av. P.H. Rolfs, Campus Universitário, LABENGE.  
36.570-900 – Viçosa – MG

**Resumo:** *Uma das grandes dificuldades associadas ao ensino teórico das disciplinas da área de Resistência dos Materiais é a necessidade do aluno abstrair e imaginar a ocorrência de diversos fenômenos e comportamentos estruturais. Nesse sentido, associar aulas práticas que possibilitem ao aluno a observação direta desses fenômenos se faz como uma das estratégias mais eficazes para diminuir essa dificuldade. Por outro lado, a realização de ensaios experimentais geralmente demanda elevado recurso financeiro, tornando essa estratégia pouco viável. Sendo assim, o presente trabalho apresenta o desenvolvimento de equipamentos de baixo custo para a realização de aulas práticas na área. Os equipamentos compõem um sistema de aparato de apoio e aplicação de carga em pequenos elementos estruturais e um sistema de aquisição de dados feito com plataforma Arduino para leitura de deformação na estrutura. Os resultados medidos com os equipamentos construídos foram comparados com os medidos por equipamentos profissionais e apresentaram boa precisão.*

**Palavras-chave:** *Ensino de Resistência dos Materiais. Arduino. Ensaio experimental.*

## 1 INTRODUÇÃO

A Resistência dos Materiais é a área do conhecimento onde se estuda o comportamento dos materiais e a resposta de componentes mecânicos às demandas de aplicações práticas, sendo também conhecida como Mecânica dos Sólidos ou Mecânica dos Materiais (Beer *et al.*, 2015; Hibbeler, 2009). Seu conteúdo aborda desde os comportamentos idealizados de materiais e componentes mecânicos básicos utilizados em construções simples, até os comportamentos reais de materiais e componentes complexos atualmente em uso. Entre esses últimos destacam-se as aplicações de materiais clássicos como aço, madeira e concreto.

As disciplinas relativas à matéria Resistência dos Materiais são ministradas no início do ciclo profissional dos cursos de Engenharia Civil, Engenharia Mecânica, dentre outras engenharias que envolvem a área de Estruturas. Os profissionais dessa área são responsáveis pelo projeto (concepção, análise de comportamento, garantia de integridade e especificação de execução) e produção de componentes para as indústrias mecânicas e para a construção civil em geral.

As práticas didáticas no ensino de Resistência dos Materiais envolvem comumente explanação e resolução de exemplos teóricos por parte do professor com o auxílio do quadro negro e, em alguns casos, usa-se também a projeção de imagens por meio de projetor multimídia. No entanto, existe uma grande dificuldade dos alunos em visualizar as situações de aplicação prática, o que envolve a capacidade de imaginação para formular uma visão espacial. São frequentes as situações em que o aluno tem dificuldade de visualizar a configuração dos esforços, bem como as seções transversais nas quais eles estão atuando, o que faz com que o professor tenha que explicar várias vezes a mesma situação, de maneiras diferentes, e ainda sim, em alguns casos, sem sucesso.

Em geral, a dificuldade desse entendimento, em parte herdada da disciplina de Mecânica Vetorial, tem sido o maior obstáculo encontrado pelos estudantes para obterem um bom desempenho nas disciplinas de Resistência dos Materiais, que pode ser creditada à dificuldade natural de desenvolver uma “visualização abstrata” dos diferentes mecanismos de comportamento envolvidos nos exemplos.

Diante desses fatos, entende-se que a melhor maneira de ensinar os princípios básicos dessa área de conhecimento é por meio da realização de ensaios experimentais de caráter didático, nos quais os alunos podem ver de perto a ocorrência dos fenômenos físicos e comparar dados medidos nos ensaios com os dados calculados pelos modelos teóricos clássicos.

Atualmente, diversas universidades já oferecem disciplinas de Laboratório de Resistência dos Materiais, basicamente por meio de um conjunto de aulas práticas. No entanto, a realização de ensaios experimentais em elementos estruturais é de elevado custo financeiro, pois exige equipamentos para aplicação de força, sistemas de apoio, sistemas de aquisição de dados, computadores para processamento de dados, além de ferramentas manuais e equipamentos para confecção dos corpos de prova.

Porém, com uma proposta puramente didática, não há a necessidade de medição de valores com elevada precisão nem de se trabalhar com cargas elevadas. Sendo assim, tem-se como objetivo o desenvolvimento de equipamentos simples e de baixo custo, capazes de representar os ensaios propostos e realizar a medição dos efeitos com razoável precisão como forma de consolidação do ensino teórico.

Tendo em vista essa necessidade, pretende-se com este trabalho a construção de alguns dos equipamentos para a execução de aulas práticas experimentais capazes de representar os princípios básicos da Resistência dos Materiais. Nesse artigo será apresentado apenas o equipamento para a realização de ensaio de flexão simples em pequenas vigas metálicas, o

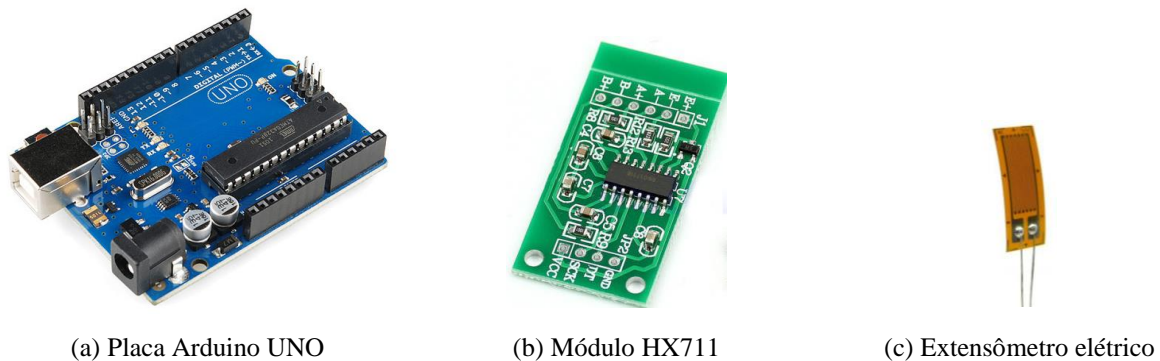
que compreende a construção de um aparato de apoio e aplicação de carga, bem como um sistema de aquisição de dados desenvolvido com a plataforma Arduino.

## 2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

### 2.1 Placa Micro controladora Arduino

Arduino é uma plataforma eletrônica de código aberto baseada em hardware e software fáceis de usar. Placas Arduino são capazes de ler entradas e transformá-las em um dado de saída utilizando uma linguagem de programação própria (baseada em linguagem C++) e cujos códigos podem ser escritos diretamente no próprio software Arduino (Arduino, 2018). No mercado brasileiro, essa placa possui valor aproximado de R\$ 55,00, possibilitando o desenvolvimento de equipamentos baratos. Na Figura 1a é mostrada uma placa Arduino UNO, que é um dos modelos de placa que atende às necessidades do presente projeto.

Figura 1 – Componentes eletrônicos compatíveis com Plataforma Arduino.



Fonte: Avia, 2012.

Para que essa placa micro controladora seja capaz de fazer a leitura de deformação em sistemas elétricos, é necessário utilizar um módulo amplificador de sinal compatível com a Arduino, denominado HX711 (Avia, 2012), mostrado na Figura 1b. Esse módulo tem valor aproximado, no mercado brasileiro, de R\$ 10,00. Na Figura 1c é mostrado o extensômetro elétrico que é colado na estrutura para que seja lida a deformação do material.

O extensômetro elétrico (*strain gage*) é um componente que é capaz de variar sua resistência elétrica a partir de uma deformação física, tornando possível a medição da deformação a que ele está sendo submetido pela Equação (1).

$$\frac{dR}{R} \propto \varepsilon \quad (1)$$

sendo:

$R$  - resistência do extensômetro;

$dR$  - variação de resistência; e

$\varepsilon$  - deformação específica.

A relação entre  $dR/R$  e a deformação específica  $\varepsilon$ , de acordo com a Equação (2), resulta em uma constante característica de cada tipo de extensômetro, conhecida como fator de sensibilidade ( $K_g$ ) ou fator *Gage*.



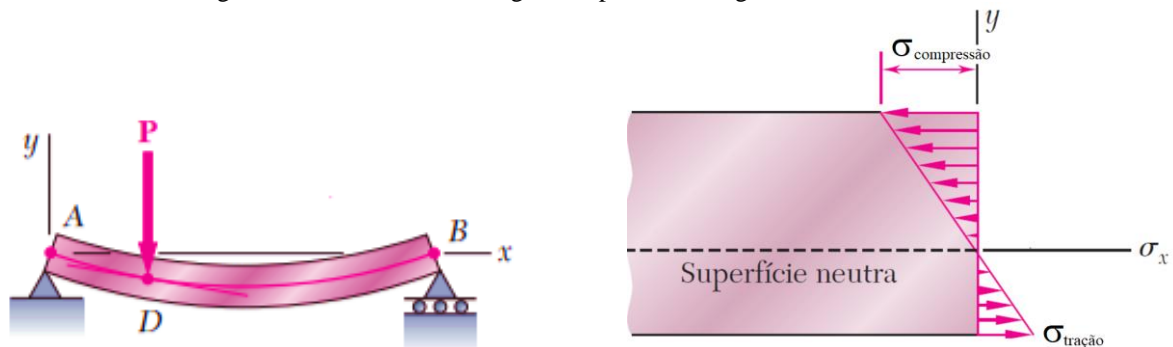
$$K_g = \frac{dR/R}{\varepsilon} \quad (2)$$

De posse desses componentes eletrônicos, é possível construir um equipamento para realizar a medição de deformação em estruturas.

## 2.2 Barras prismáticas submetidas à flexão simples

As vigas submetidas a carregamentos transversais ao seu eixo longitudinal estão sujeitas aos esforços internos de flexão e cisalhamento. O efeito do cisalhamento pode ser desconsiderado uma vez que se usa uma viga de comprimento muito maior que sua altura. A flexão provoca a curvatura do eixo da viga e gera tensões normais longitudinais que podem ser de tração ou compressão (Beer *et al.*, 2015).

Figura 2 – Tensões de flexão geradas por um carregamento transversal.



Fonte: Adaptado de Beer *et al.* (2015)

Pelas equações clássicas da resistência dos materiais, determina-se a tensão normal na flexão, dada pela Equação (3).

$$\sigma_x = -\frac{M_z y}{I_z} \quad (3)$$

sendo:

$\sigma_x$  – tensão normal na flexão no eixo longitudinal (considerado eixo  $x$ );

$M_z$  – momento fletor no ponto em estudo em torno do eixo perpendicular à carga e ao eixo longitudinal (considerado eixo  $z$ );

$y$  – distância do elemento à linha neutra da seção (deve-se considerar o eixo  $y$  crescendo para cima e  $x$  positivo para direita); e

$I_z$  – momento de inércia da seção transversal no eixo  $z$ .

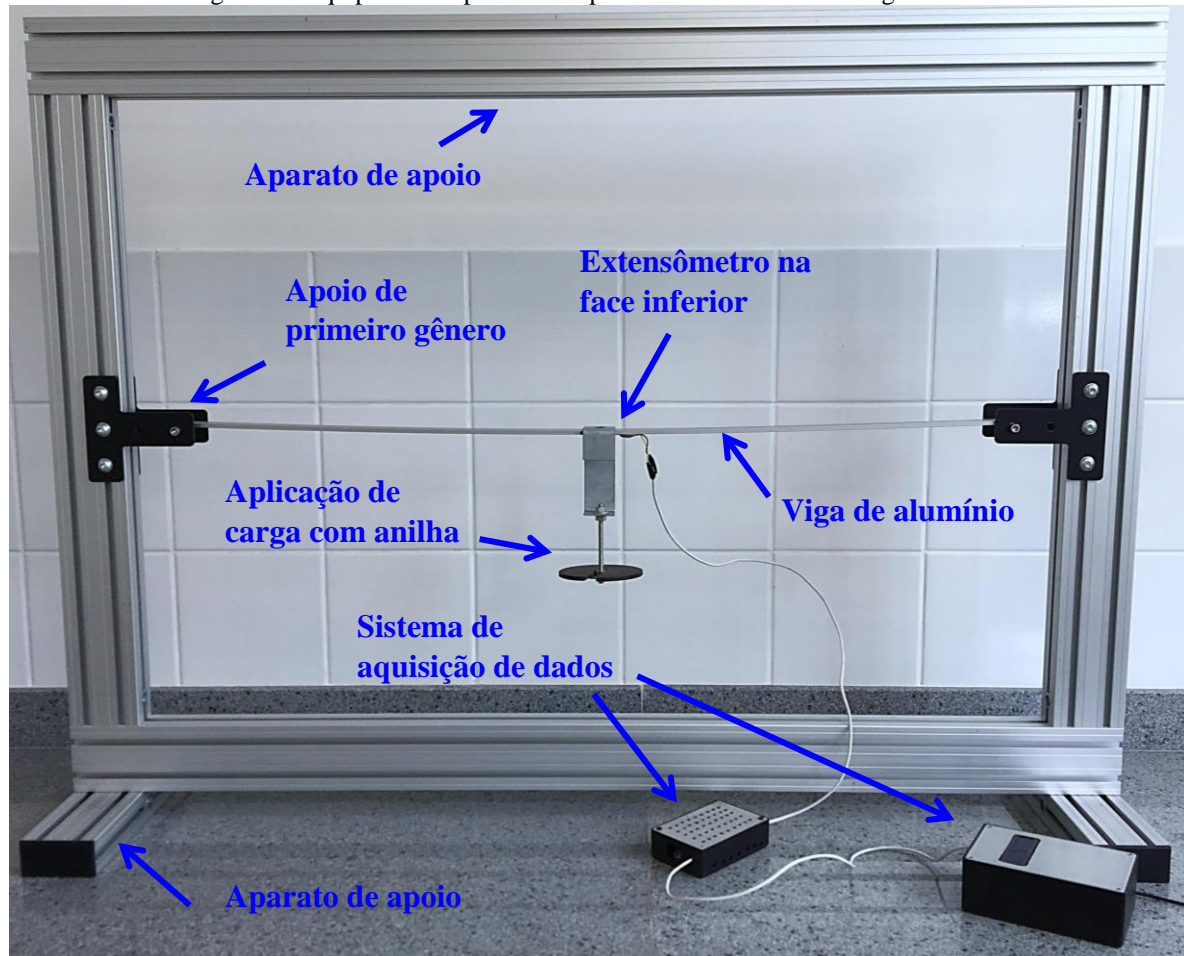
De posse das tensões normais, é possível obter as deformações normais, por meio da Lei de Hooke.

## 3 DESENVOLVIMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE ENSAIO

### 3.1 Construção do aparato de apoio

Desenvolveu-se um aparato que fosse capaz de ser usado para vários tipos de ensaio e diferentes condições de vinculação da estrutura. Decidiu-se por usar um perfil estrutural de alumínio, montando o aparato de apoio mostrado na Figura 3. O aparato possui comprimento de 1200 mm e 1000 mm de altura, e os perfis em alumínio estrutural possuem seção transversal de 40 mm x 80 mm. O custo do aparato foi de aproximadamente R\$ 900,00.

Figura 3 – Equipamentos produzidos para ensaio de flexão em viga metálica.



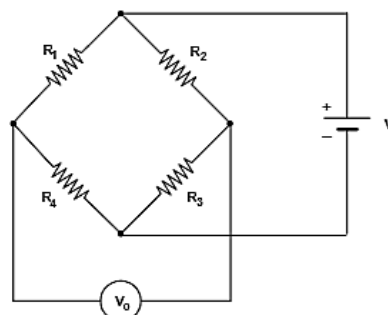
Os furos nos perfis para encaixe dos conectores foram executados no próprio Laboratório de Usinagem da UFV.

Na placa T, adaptou-se uma barra circular de aço para simular o apoio de primeiro gênero, sustentando a viga na vertical, mas permitindo a rotação no apoio. Decidiu-se aplicar cargas por meio de anilhas, usando um gancho metálico, como mostrado na Figura 3.

### 3.2 Construção do módulo de aquisição de dados

Para medir a deformação, foi construída uma ponte de Wheatstone, como mostrado na Figura 4.

Figura 4 – Ponte de Wheatstone.



Fonte: Takeya (2010)

Na ponte de Wheatstone (Takeya, 2010), quando os valores das resistências são iguais, o valor de  $V_o$  é igual a zero e se diz que a ponte está equilibrada. Partindo desse princípio, foram utilizados quatro extensômetros KFG-5-120-C1-11, com valor de resistência  $R$  igual a  $120 \Omega$  e fator de sensibilidade  $K_g$  de 2,1. Três desses foram colados em uma superfície fixa em que não serão deformados, enquanto o último foi colado na viga retangular a ser ensaiada.

Aplicando métodos de análise de circuitos, é possível escrever uma relação entre a tensão medida  $V_o$  e a tensão inicial  $V_i$  como sendo:

$$V_o = \frac{R_1 R_2 + R_3 R_4}{(R_1 + R_2)(R_3 + R_4)} V_i \quad (4)$$

Como, nos extensômetros, a variação da resistência  $dR$  é muito menor do que o seu valor de resistência  $R$ , pode-se reescrever a Equação (4) como:

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{1}{4} \left( \frac{dR_1}{R_1} - \frac{dR_2}{R_2} + \frac{dR_3}{R_3} - \frac{dR_4}{R_4} \right) \quad (5)$$

Substituindo a Equação (2) na Equação (5), obtém-se:

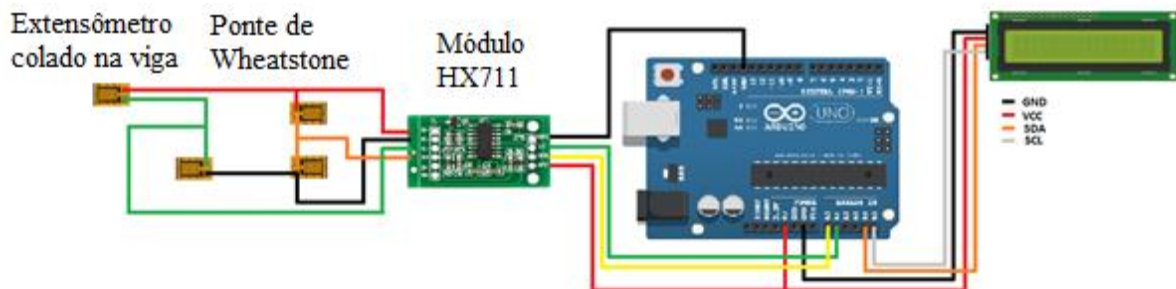
$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{K_g}{4} (\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \quad (6)$$

No sistema montado, apenas um dos extensômetros estará sujeito a deformações. Sendo assim, resume-se a Equação (6) em:

$$\varepsilon = \frac{4 V_o}{V_i K_g} \quad (7)$$

Portanto, pela Equação (7), a partir do valor da tensão medida  $V_o$  é possível calcular a deformação específica  $\varepsilon$ . Para medir o valor da tensão  $V_o$ , conectou-se ao Arduino o conversor HX711 para amplificar e ler o sinal analógico de tensão, convertendo-o em sinal digital, de acordo com a Figura 5.

Figura 5 – Esquema completo do circuito montado.



O programa desenvolvido neste trabalho utiliza a biblioteca do módulo HX711 que permite ler os valores medidos. Porém, esses valores são lidos como um sinal digital e precisam ser convertidos para o correspondente de tensão  $V_o$ .



Por meio de testes e do *datasheet* do conversor HX711, percebeu-se que o máximo valor de tensão capaz de ser lido é 15,5 V, com um sinal digital lido pelo Arduino correspondente ao número 8388608. Portanto, pela relação de proporcionalidade explicitada na Equação (8), pode-se calcular o valor da tensão  $V_o$  equivalente a cada sinal digital lido  $D$ .

$$V_o = D \frac{15,5}{8388608} \quad (8)$$

Implementando as Equações (7) e (8) no código, o programa irá ler um sinal digital  $D$ , o transformará em tensão medida  $V_o$  e calculará a deformação específica  $\epsilon$ .

Foram montadas duas carcaças, uma fechada para comportar o display LCD, o Arduino e o módulo HX711 e outra, com alguns furos para ajudar na dissipação de calor, para a ponte de Wheatstone de extensômetros, como mostrado na Figura 3.

O código de programação desenvolvido é apresentado a seguir:

```
//Incluindo bibliotecas
#include "HX711.h"
#include <Wire.h>
#include <LiquidCrystal_I2C.h>

//Definindo variáveis e configurações do LCD e selecionando as portas para o HX711
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,2,1,0,4,5,6,7,3, POSITIVE);
HX711 scale(A1, A0);

float Vo, tensao, def, def2, a, aux;
int ganho = 128; //128 - 20mV; 64 - 40mV; 32 - 80mV;
int t = 0;
int kg = 2.1;

void setup() {
  Serial.begin(115200);
  scale.tare();
  scale.set_gain(ganho);
  lcd.begin(16,2);
}

void loop() {
  //Ativando luz do LCD
  lcd.setBacklight(HIGH);

  //Loop para verificar se os valores do extensômetro estão estabilizados
  while (t<=4) {
    lcd.setCursor(4,0);
    lcd.print("Aguarde...");
    Vo = scale.get_value() * 15.5 / 8388608;
    def = 4 / kg * 1000 * (Vo / 4.01);
    def2 = 4 / kg * 1000 * ((scale.get_value(40) * 15.5 / 8388608) / 4.01);
    a=abs(abs(def2)-abs(def));
    if (a<=0.3){
      t++;
    }
    aux=def; //Obtém a deformação de tara
  }

  Serial.print(aux);
  lcd.setCursor(0,0);
  lcd.print("Deformacao: ");
  lcd.setCursor(0,1);
  lcd.print("Valor:");
  Vo = scale.get_value(5) * 15.5 / 8388608; //Cálculo da tensão Vo da ponte
  def = (4 / kg * 1000 * (Vo / 4.01))-aux; //Cálculo da deformação

  //Print do resultado no LCD
```

```
lcd.setCursor(8,1);  
lcd.print(def,1);  
lcd.setCursor(13,1);  
lcd.print("ue");  
}
```

#### 4 ENSAIO DE FLEXÃO EM VIGA BIAPIOADA

Como estudo de caso, realizou-se o ensaio de uma viga de alumínio com módulo de elasticidade  $E = 60$  GPa, seção transversal de 16 mm x 5 mm e vão entre apoios de 1,00 m. Aplicou-se uma carga de 0,129 kgf, equivalente à massa do gancho, no centro, acrescentando essa carga de 0,250 kgf duas vezes, por meio de anilhas (ver Figura 3). A cada estágio de carregamento, mediu-se, com o Arduino e com o sistema de aquisição de dados profissional Quantum X, a deformação específica no centro do vão, comparando os valores medidos com os calculados pela Equação (3).

#### 5 RESULTADOS E ANÁLISES

Por meio do ensaio foram feitas as medições indicadas na Tabela 1. Os resultados obtidos são satisfatórios, principalmente quando levados em consideração os possíveis erros. Esses erros podem ser: grosseiros, devido à imprecisão em relação ao ponto de aplicação da carga dado o modelo da garra e por usar um módulo de elasticidade aproximado para o alumínio ao invés de obtê-lo experimentalmente; sistemáticos, devido à limitação da precisão dos instrumentos de medida e da influência do aparato no ensaio; e aleatórios, causados por motivos imprevisíveis e dificilmente mensurados, por exemplo, o clima.

Tabela 1 – Resultados experimentais e teóricos.

Carga aplicada (kgf)	Leitura do Arduino ( $\mu\epsilon$ )	Leitura do Quantum X ( $\mu\epsilon$ )	Erro em relação ao Quantum X (%)	Valor teórico ( $\mu\epsilon$ )	Erro em relação ao valor teórico (%)
0,129	78	76	2,63	77	1,30
0,379	226	220	2,73	225	0,44
0,629	375	369	1,63	373	0,54

#### 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os equipamentos desenvolvidos atenderam às expectativas, pois são capazes de representar o ensaio de flexão em uma viga metálica e demonstrar o conceito da deformação específica na flexão com aproximação satisfatória em relação aos valores de referência, teóricos e experimentais. O equipamento apresentou custo reduzido em relação às alternativas comerciais, além de ter sido produzido dentro da própria instituição de ensino, podendo ser utilizado até mesmo dentro da sala de aula.

##### *Agradecimentos*

Agradecemos o apoio do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Viçosa.



## REFERÊNCIAS

ARDUINO. **What is arduino?** Disponível em: <https://www.arduino.cc/en/guide/introduction>. Acesso em: 21 nov. 2018.

AVIA Semiconductor. **Hx711-24 Bit Analog to Digital Converter (ADC) for Weigh Scales.** Data Sheet. China. 2012.

BEER, F. P.; JOHNSTON, E. R.; DEWOLF, J. T.; MAZUREK, D. F. **Mecânica dos Materiais.** 7ª ed. Porto Alegre: McGrawHill, 2015.

FORSETI Soluções. **Perfil estrutural em alumínio.** Disponível em: <https://loja.forsetisolucoes.com.br/>. Acesso em: 19 fev. 2019.

HIBBELER, R. C. **Resistência dos Materiais.** 7ª ed. São Paulo: Pearson. 2009.

TAKEIA, T. **Análise Experimental de Estruturas** (Notas de Aula). Universidade de São Paulo. São Carlos. 2010.

## DEVELOPMENT OF LOW COST EQUIPMENTS FOR EXPERIMENTAL TESTS FOR THE DISCIPLINE OF STRENGTH OF MATERIALS

***Abstract:** One difficulty found teaching Strength of Materials is to help students abstracting and imagining structural mechanisms and their behaviors. Considering this, the use of practical classes that enable students seeing and measuring what is taught in the theory is a good method to decrease this difficulty. On the other hand, experimental tests usually demands high resources, turning this strategy unpractical. Therefore, this paper aims to develop low cost equipment for experimental tests which consists of a support and load application system for small structural elements and a data acquisition system using Arduino to read strains. The results measured with the built system have presented good precision when compared with other professional one.*

***Key-words:** Teaching of Strength of Materials. Arduino. Experimental test.*