

## CONSTRUÇÃO E VALIDAÇÃO DE UM PROTÓTIPO PARA ESTUDO DE FLEXÃO COMANDADO PELA PLATAFORMA ARDUÍNO®

Bruno Areal de Santana (SEEDUC-RJ) profbfisica@hotmail.com  
Claudia Mazza Dias (IM-UFRRJ) mazzacaudia@gmail.com  
Frederico Alan de Oliveira Cruz (UFRRJ) frederico@ufrrj.br

**Resumo:** Este trabalho apresenta uma proposta de construção de um protótipo de dispositivo para ensaio de flexão para materiais de baixa resistência mecânica, sendo realizado um estudo de caracterização das propriedades mecânicas do Isopor®. O equipamento é controlado pela plataforma Arduino® que realiza o controle do ensaio e a aquisição de dados via sensores, fornecendo os parâmetros necessários para realizar a caracterização do material. O ensaio de flexão do material em estudo é destrutivo, sendo monitorados os valores da carga aplicada por um resistor sensível à força e à deflexão por um transdutor de posição encoder.

**Palavras-chave:** flexão, ensaio destrutivo, Arduino.

## CONSTRUCTION AND VALIDATION OF A PROTOTYPE FOR BENDING STUDY BY ARDUÍNO® PLATFORM

**Abstract:** This work presents a proposal to build a device prototype for bending test for low-strength materials, being a study of characterizing the mechanical properties of Isopor®. The equipment controlled by Arduino® platform that performs control of the test and acquiring data via sensors, providing the parameters needed to perform the characterization of the material. The bending test of the material under study is destructive being monitored load values applied by a sensitive resistor to force and deflection by an encoder transducer position..

**Keywords:** bending, destructive testing, Arduino platform.

### 1. INTRODUÇÃO

Em uma adequada análise de um material a fim de determinar sua aplicação e utilização, se faz necessário que as suas propriedades físicas sejam conhecidas, para isso é importante estabelecer um conjunto de metodologias experimentais que forneçam tais propriedades. No caso de estruturas submetidas a esforço mecânico em seu uso diário, são utilizados os chamados ensaio destrutivos e não destrutivos (LECHETA & CONTO, 2012).

Os ensaios não destrutivos (Nondestructive Testing - NDT) são utilizados para avaliar e detectar falhas no material de forma que, na realização do ensaio o corpo de prova não sofra nenhuma avaria ou marca, possibilitando caracterizar trincas, inclusão de material em cordão de solda ou variações estruturais que resultem na perda de resistência mecânica ou falha. No caso dos ensaios destrutivos (Destructive Physical Analysis - DPA), os mais utilizados para a caracterização dos materiais, a partir de sua destruição parcial ou total é possível compreender as características mais básicas da estrutura e assim determinar o esforço suportado pelo material. Ao contrário do ensaio não destrutivo, esse tipo de ensaio leva a inutilização do corpo de prova mesmo que seja com pequenos danos em sua estrutura física (CALLISTER, 2007; OLIVEIRA & JUNIOR, 2007; NASA, 2015).

A análise de um material pelo método NDT pode ocorrer de diferentes formas, sendo as mais comuns: a ressonância magnética, onde são usados campos magnéticos e ondas de rádio para formar imagens da estrutura; o teste radiográfico, no qual feixes de raio-x são utilizados para determinar, por exemplo, as diferenças de densidade do material; e o ultrassom, que baseia-se na propagação de ondas sonoras no objeto do material analisado. Como exemplos de DPA's podem ser citados os testes: tração e compressão, onde é aplicado uma força na direção longitudinal do corpo de prova; flexão, na qual o corpo é submetido a uma

força no sentido transversal até que este atinja o regime plástico ocorrendo um dobramento; dureza, que na mecânica consiste na resistência a penetração; fadiga, onde pretende-se encontrar falhas em materiais devido à repetição de esforços muito inferiores às tensões suportadas; e fluência, quando um corpo está sob ação de uma tensão constante, porém trabalhando em temperatura superior a do ambiente (ZOLIN, 2010).

Apesar de serem utilizados com certa frequência em muitos estudos, os DPA's possuem, na maioria das vezes, grande custo operacional de aquisição dos materiais e equipamentos de medida utilizados. Sendo assim, estabelecer um sistema simples e com custo reduzido é de fundamental importância para utilização de testes destrutivos na indústria e em instituições de ensino superior que muitas vezes não dispõem de grandes recursos para esse fim.

## 2. MATERIAIS E MÉTODOS

O Poliestireno Expandido (EPS), conhecido no Brasil por Isopor®, marca registrada pela Knauf Isopor Ltda, foi criado em 1949 no laboratório da empresa alemã BASF. Ele se caracteriza por ser um material plástico proveniente da polimerização do estireno em água (NORONHA, 2014).

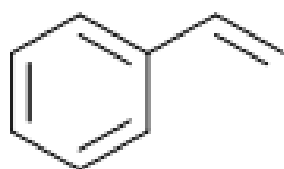


Figura 1 – Representação química do estireno.

O processo de produção das placas de EPS é constituído por três etapas básicas: a pré expansão, onde ocorre o aquecimento da matéria prima em vapor de água em temperatura que varia de 80° C a 100° C e que transforma a matéria prima em pérolas de plástico e ar. Quando há a estabilização, o material pré expandido é colocado para esfriar e secar para que obtenha maior elasticidade mecânica e capacidade de expansão. Em seguida é feita a moldagem. Nessa fase, o material pré-expandido é colocado em moldes que recebem uma nova etapa de vapor d'água que permite que os grânulos expandidos se unam no formato do molde em que foi colocado (DOS SANTOS, 2008; EME, 2016).



Figura 2 - Estágios de construção (NH, 2014).

O material em questão possui como características básicas: a leveza, visto que é composto de 98% de ar; a baixa absorção de água; boa resistência a alterações dimensionais provocadas por condições ambientais adversas; bom isolamento térmico e acústico. Essas características fazem com que o material possua aplicação em várias áreas, incluindo a construção civil, no processo de revestimento de paredes e tetos; e na produção de embalagens, pois quando comparado com os demais materiais utilizados no mercado ele possui desempenho semelhante e com menor custo (COSTA, 2007; CASTRO et al., 2011; OLIVEIRA, 2013).

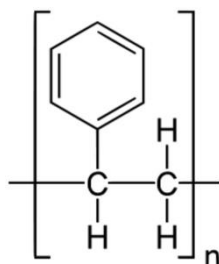


Figura 3 - Estrutura química do EPS (ICF/PIF, 2014).

São fabricados diferentes tipos de EPS cujas propriedades básicas variam de um tipo para outro. São chamados de tipo: I, II, III, IV, V, VI, VII. No presente estudo, considera-se como propriedades mais importantes: densidade, módulo de Young e tensão por compressão com deformação de 10% (Tabela 1). Devido as suas características, existem muitos estudos para diversas outras aplicações, como, por exemplo, estudos de flexão, deformação e compressão, necessários para caracterizar o material utilizado (ASSIS, 2008; NETO, 2008; ALMEIDA, 2011). No caso específico dos ensaios de flexão (Figura 4), realizado aplicando-se uma força no centro de um corpo de prova apoiado nas extremidades, determina-se a flexão máxima do material analisado e assim o módulo de elasticidade do mesmo (MV, 2016).

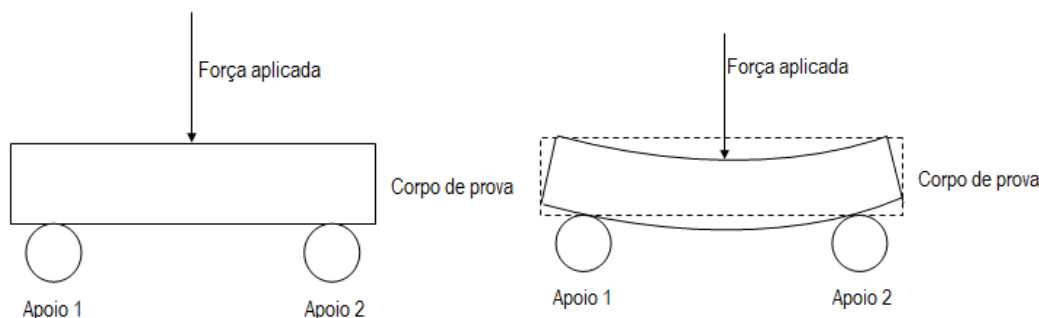


Figura 4 - Esquema do ensaio de flexão.

A medida da flexão do material pode ser obtida diretamente pela utilização de uma equipamento denominado extensômetro ou indiretamente com o auxílio da expressão (RUCHERT, 2016):

$$v = \frac{Fl^3}{4Ewh^3} \tag{1}$$

sendo flexa ou flexão (mm), a carga ou força aplicada aplicada (N), a distância entre os apoios (mm), o módulo de Young ( $N/m^2$ ), a largura do corpo de prova (mm) e a espessura do corpo de prova (mm).

Apesar desse tipo de ensaio ser utilizado corriqueiramente pelos profissionais de engenharia, a aplicação de uma metodologia didática nos laboratórios voltados para esses cursos depende essencialmente de um custo financeiro elevado. Uma vez que os aparelhos utilizados para esse fim fiquem danificados, a dificuldade de manutenção, devido à burocracia existente, pode comprometer a atividade e assim a formação dos alunos. Dentro dessa perspectiva, se faz necessário que existam propostas que aliem a capacidade de medida adequada nos ensaios destrutivos e o custo reduzido dos equipamentos envolvidos. No caso específico do ensaio de flexão, uma forma que permita a determinação dos parâmetros principais com base nas premissas já mencionadas e que mostre a importância da automatização dos processos de medida.

A presente proposta de sistema de medição se divide basicamente em quatro partes: duas mecânicas: a primeira que executa a força e outra relacionada aos apoios necessários para a colocação do corpo de prova; e duas eletrônicas, sendo uma delas responsável pela automatização do sistema e a outra relacionada a obtenção do dado de interesse. No caso dos apoios, necessários para o estudo de flexão, estes foram construídos com hastes de metal, que foram fixados paralelamente em uma placa de fibra de madeira de média densidade (MDF) (Figura 5).

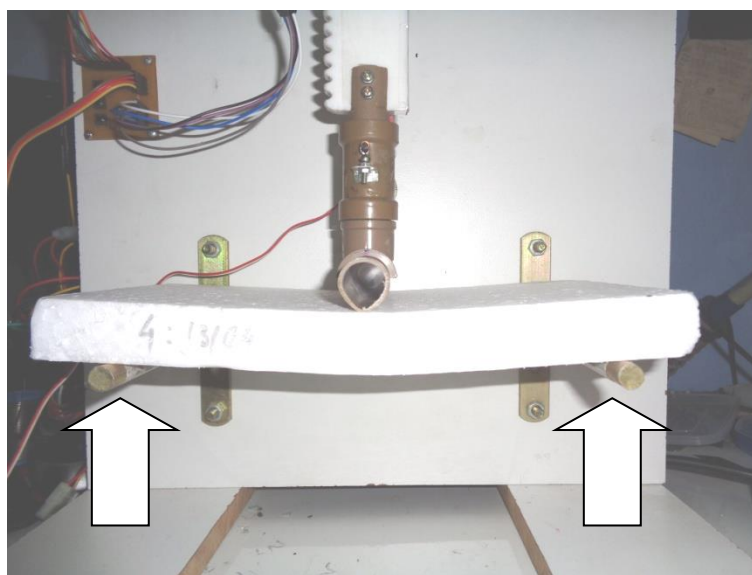


Figura 5 – Posição dos apoios, indicados pelas setas, que sustentam a placa para ensaio.

O elemento que realizará a força aplicada sobre o corpo de prova foi projetado para funcionar com um controle automatizado de vidro elétrico veicular Mabuchi®, que possui custo médio de R\$ 50,00 (aproximadamente US\$ 10,00). Ao controle foi acoplada uma cremalheira de PTFE de nome comercial Teflon®, com dimensões 30 cm × 4,0 cm.



Figura 4 - Equipamento para ensaios de flexão.

Após a construção do sistema mecânico o passo seguintes foi desenvolver um sistema eletrônico para aplicação da força, que fosse de fácil implementação e com custo relativamente baixo em relação aos dispositivos existentes no mercado. Dentro dessa perspectiva o sistema foi desenvolvido a partir de plataforma de prototipagem eletrônica de hardware livre, em placa única, conhecida comercialmente como Arduino®.

A placa Arduino® possui um microprocessador com 8 bits, uma memória de 32 KB, além de um conjunto de portas de entrada e saída de dados que permitem que ela seja utilizada em diversas funções, desde uso didático simples até o controle de máquinas (ALMEIDA, 2010; CAVALCANTE et al, 2011; BARROS, 2012). Essa placa tem o papel fundamental de monitorar a força aplicada pela cunha sobre a placa a ser flexionada. Esse procedimento é realizado pela implementação de uma rotina em linguagem baseada C++. Essa rotina permite realizar o controle eletrônico do motor, e por sua vez da cremalheira, permitindo ligar/desligar, estabilizar ou colocar em movimento de forma mais precisa o sistema. Apesar de todo controle possível permitido pelo Arduino® é necessário, devido ao movimento em dois sentidos da cremalheira, acoplar ao motor de corrente contínua um circuito eletrônico denominado Ponte H que permite controlar o sentido da corrente. A velocidade do motor é controlada pelo próprio microcontrolador.

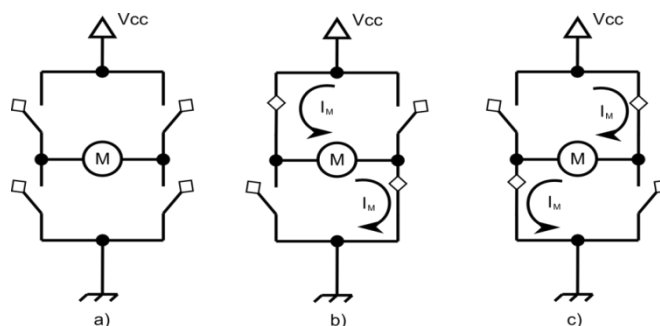


Figura 5 - Esquema de funcionamento da Ponte H (AEXC, 20015).

Como a atividade necessita que exista uma leitura da força que está sendo aplicada no corpo a ser analisado, na base do cutelo na região de aplicação da carga foi posto um resistor sensível à força, que funciona como medidor de força e que apresenta uma leitura em escala logarítmica relacionando resistência e força ( $F = F(R)$ ).

O ultimo sistema de controle necessário para o estudo de flexão do material a ser analisado consiste num leitor de posição, que foi considerado utilizando-se um transdutor de posição (encoder). Esse dispositivo consiste em um par emissor/receptor infravermelho que consegue perceber o movimento de uma roda com perfurações igualmente espaçadas (SOUZA, 2012). O encoder é acoplado ao motor por uma engrenagem de relação 1:1 fazendo assim a leitura da deflexão que é igual ao avanço do motor.

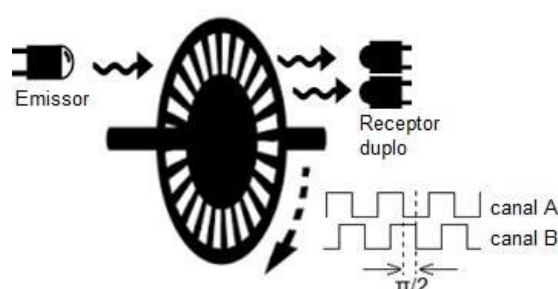


Figura 5 – Representação de operação do encoder utilizado para controlar o funcionamento da prensa.

As leituras realizadas pelo medidor de força e do controlador de posição são enviadas, em todo instante, para a placa Arduíno® que registra a força e a posição da placa do material até o instante de quebra.

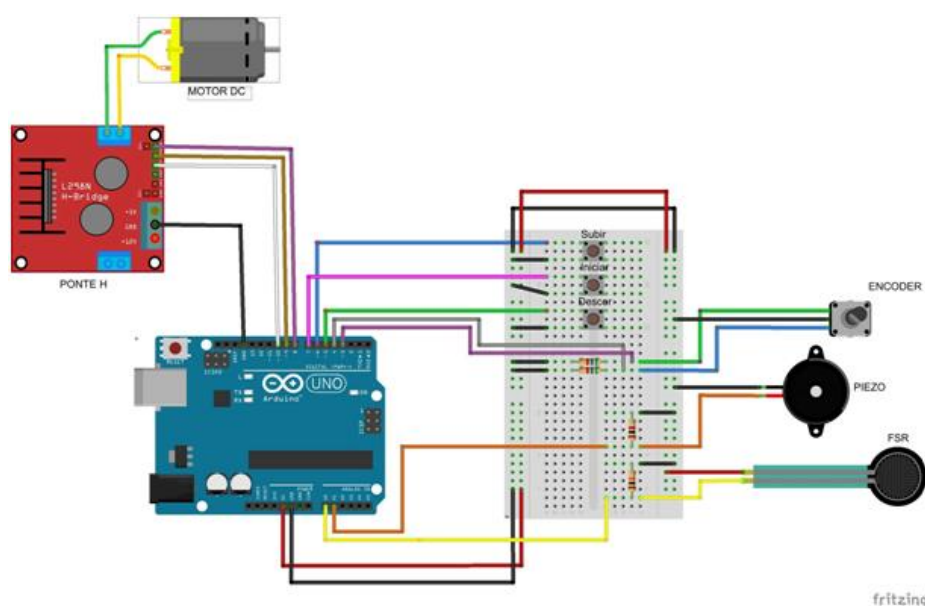


Figura 6 – Esquema de operação.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A primeira parte do trabalho consistiu em determinar a curva de calibração para a força em função da resistência, para isso sobre o sensor são colocadas massas de 100 g à 1,0 kg, variando em intervalos de 50 g. Para esses valores foi obtida a curva apresentada no gráfico apresentado na Figura 7, que mostra uma variação da resistência medida pelo sensor em função da força aplicada sobre ele que, no caso, esta relacionada à massa utilizada na calibração.

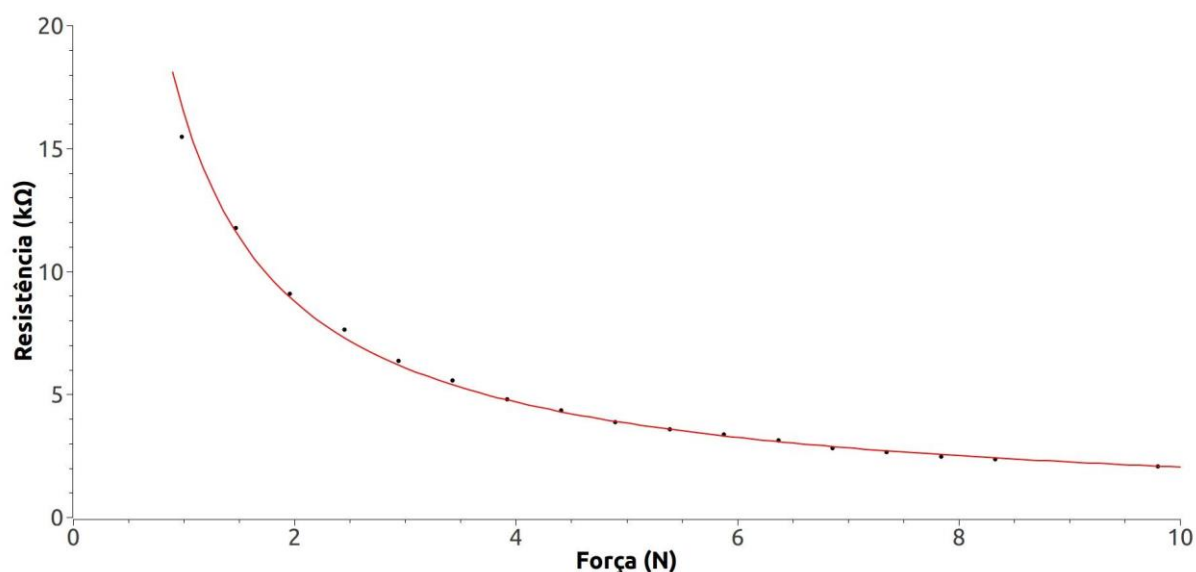


Gráfico 1 – Representação da relação da força aplicada em função da resistência.

O ajuste dessa curva, permitiu escrever a seguinte curva de calibração:

$$F(R) = 16.4378x^{-0.9057} \quad (2)$$

onde  $F(R)$  é a a força medida em newtons e  $R$  é a resistência apresentada pelo resistor devido a aplicação da força.

No passo seguintes foi realizado o ensaio de flexão das placas, utilizando-se o sistema apresentado anteriormente. Para validação do sistema proposto nesse trabalho, foram considerados os seguintes parâmetros (Tabela 1):

Tabela 1 – Parâmetros utilizados no ensaio de flexão.

Parâmetro	Valor
Distância entre os apoios	0.195 m
Largura da placa	≈ 0.140 m
Espessura da placas	≈ 0.0245 m

O teste consistiu em realizar a aplicação de carga lentamente crescente até o momento de quebra e sua respectiva leitura da deflexão em um conjunto de quatro placas, colocadas individualmente. Os valores obtidos nos testes são apresentados no gráfico da Figura 8, que mostra a tensão em função da deformação da placa.

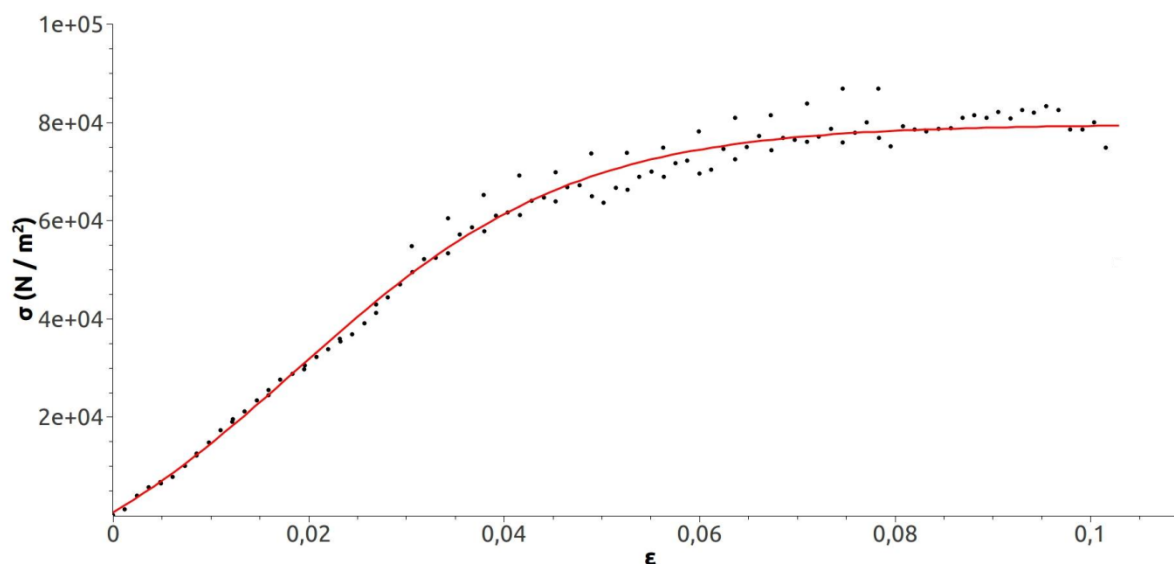


Gráfico 2 – Representação tensão ( $\sigma$ ) aplicada para a deformação ( $\epsilon$ ) medida.

A partir dos dados obtidos é possível perceber que com boa aproximação podem ser identificados dois regimes lineares intermediados por um processo de mudança que pode ser entendido como um estágio de acomodação do material. O primeiro comportamento linear, verificado no gráfico, é conhecido como regime linear e mostra que existe uma relação linear entre a carga aplicada e a deformação, já o outro, se aproxima de um regime elasto-plástico.

A curva de ajuste encontrada na análise dos pontos obtidos mostra uma função do tipo sigmoideal descrita na forma:

$$\sigma(\epsilon) = \frac{a}{1 + e^{-\lambda\epsilon}} + b \quad (3)$$

onde  $a$  é igual a  $9,98 \times 10^4$  N/m<sup>2</sup>,  $b$  vale  $2,03 \times 10^4$  N/m<sup>2</sup> e  $\lambda$  é igual a 70,4.

Linearizando a expressão (3) e realizando uma conjunto de operações matemáticas básicas, temos que a expressão pode ser reescrita como:

$$\sigma(\epsilon) = E_0 + E\epsilon \quad (4)$$

onde  $E$  representa o módulo de Young (coeficiente de elasticidade) do material e foi obtido com valor igual a  $1,76 \times 10^6$  N/m<sup>2</sup> o que está em acordo com a faixa de valores obtidos em outros trabalhos realizados com o mesmo material (RODRIGUES, 2012).

#### 4. CONCLUSÕES

A metodologia para ensaios de flexão para materiais de custo reduzido permitiu realizar



a caracterização mecânica de uma placa de Isopor® de forma satisfatória, obtendo o valor do coeficiente de elasticidade próximo aos presentes na literatura. As curvas de calibração e de tensão por deformação demonstram a viabilidade do experimento. Como todo controle e aquisição de dados é realizado na plataforma Arduino®, permite-se que o experimento possa ser totalmente reproduzido e que o usuário final consiga modificar a programação de acordo com suas necessidades, apresentando-se assim como uma boa sugestão para laboratórios de instrumentação.

## **REFERÊNCIAS**

**AEXC.** Robótica, Arduino - Aula 11 - Ponte H L298N. Disponível em: <http://goo.gl/Jbe2cD>. Acesso em: 18 ago 2015.

**ALMEIDA, G. C.** Sistema controlador de iluminação de ambientes através de interface computadorizada. Trabalho de Conclusão de Curso. Brasília: Centro Universitário de Brasília, 2010.

**ALMEIDA, J. E.** Painéis de madeira aglomerada produzidos com serragem e poliestireno expandido. Dissertação de Mestrado. Cuiabá: Universidade Federal de Mato Grosso, 2011.

**ASSIS, J. B. S.** Determinação experimental da resistência à tração na flexão em paredes construídas com blocos encaixáveis de solo-cimento. Tese de Doutorado. Belo Horizonte: Universidade Federal de Minas Gerais, 2008.

**BARROS, W. R.** Sistema de automação veicular com Arduino e Android. Trabalho de Conclusão de Curso. Engenheiro Coelho: Centro Universitário Adventista de São Paulo, 2012.

**CALLISTER JR, W.D.** Materials Science and Engineering. 7º Ed. New York: John Wiley & Sons, Inc, 2007.

**CAVALCANTE, M. A.; TAVOLARO, C. R. C.; MOLISANI, E.** Física com Arduino para iniciantes. Revista Brasileira de Ensino de Física, v. 33, n. 4, p.4503-4512, 2011.

**CASTRO, A. P. A.; STOCCO, W.; RODRIGUES, D.** Concreto leve com uso de eps. Revista Complexus – Instituto Superior De Engenharia Arquitetura E Design – Ceunsp, Salto-SP, 2011.

**COSTA, R. N. A.** Viabilidades térmica, econômica e de materiais de um sistema de aquecimento de água a baixo custo para fins residenciais. Dissertação de Mestrado. Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2007.

**DOS SANTOS, R. D.** Estudo térmico e de materiais de um compósito a base de gesso e EPS para construção de casas populares. Dissertação de Mestrado. Rio Grande do Norte: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2008.

**EME (INDUSTRIA DE EPS).** Detalhes do fornecedor. Disponível em: <http://goo.gl/UmZIDc>, Acesso em: 16 fev. 2016.

**ICF/PIF - Insulated Concrete Forms or Permanent Insulating Formwork.** Disponível em: <http://goo.gl/W35r8f>. Acesso em: 3 out 2014.

**LECHETA, A.; CONTO, D.** Estudo comparativo de ensaios destrutivos e não destrutivos para concreto. Trabalho de Conclusão de Curso. Curitiba: Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2012.

**OLIVEIRA, L. S.** Reaproveitamento de resíduos de poliestireno expandido (isopor) em compósitos cimentícios. Dissertação de Mestrado. São João Del Rei: Universidade Federal de São Joao Del-Rei, 2013.

**MABUCHI MOTOR CO.** Motor Models for Typical Applications. Disponível em: <http://goo.gl/0aElp>, Acesso em: 16 ago. 2015.

**MV - MUNDO DO VESTIBULAR.** Disponível em: <http://goo.gl/0itv9W>, Acesso em: 16 fev. 2016.

**NASA - National Aeronautics and Space Administration.** Receiving Inspection and Test Facility (RITF). Disponível em: <http://goo.gl/5T7Jc0>, Acesso em: 13 ago. 2015.

**NH - NEIL HANEKON.** Worldwide Independent Geofoam & Expanded Polystyrene (EPS) Specialist. Disponível em: <http://goo.gl/kBJSu3>, Acesso em: 3 out. 2014.

**NETO, J. O. A.** Caracterização do comportamento geotécnico do eps através de ensaios mecânicos e hidráulicos. Dissertação de Mestrado. São Carlos: Universidade de São Paulo, 2008

**NORONHA, L. L.** Elementos construtivos e de proteção térmica à base de gesso e resíduos agroindustriais. Dissertação de Mestrado. João Pessoa: Universidade Federal da Paraíba, 2014.

**OLIVEIRA, C. R.; JUNIOR, A. L. M.** Considerações sobre prova de carga em estrutura de concreto. REM: Revista Escola de Minas, Ouro Preto, 2007.

**RUCHERT, C. O. F. T.** Ensaio mecânicos dos materiais – flexão, fluência e fadiga. Disciplina de Introdução aos Ensaio Mecânicos dos Materiais. São Carlos: Universidade de São Paulo. Disponível em: <http://goo.gl/TEbyUx>, Acesso em: 17 fev. 2016.

**SOUZA, A. W. O. ; CARVALHO, E. A. N. ; FREIRE, E. O. ; MOLINA, L. ; CARVALHO FILHO, J. G. N.** Desenvolvimento de um Encoder Absoluto para a Medição da Posição e a Velocidade Angular de Motores. In: Congresso Brasileiro de Automática, 2012, Campina Grande. Congresso Brasileiro de Automática, 2012.

**ZOLIN, I.** Curso técnico em automação industrial: ensaios mecânicos e análises de falhas. 3. Ed. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria/Colégio Técnico Industrial de Santa Maria, 2010.