

UTILIZANDO A EXTENSOMETRIA PARA ANÁLISE MODAL

Cicero Junior Rodrigues Lustosa (IC) e Fábio Raia (Orientador)

Apoio: PIVIC Mackenzie

Resumo

A vibração é um fenômeno extremamente importante no contexto de uma construção civil, mecânica, elétrica, etc. Visando conhecer os limites de vibração que a estrutura tem, surgiram equipamentos que realizam a medição de frequências de vibração e equipamentos que excitam estruturas, fazendo-as vibrar em frequências distintas. Esse trabalho tem o objetivo de estudar um dos equipamentos que induz frequência em estruturas, que é o martelo de impacto. Atualmente ele é muito caro, e visando atacar esse problema nesse estudo foi idealizado o objetivo de projetar e construir um novo martelo utilizando forma construtiva diferente. Enquanto o martelo de impacto convencional é construído com sensor piezoelétrico, o martelo desse projeto utilizará uma ponte de Wheatstone que fará a mesma função de mensurar a intensidade de impacto no momento do teste. O objetivo principal é dar o primeiro passo para a criação de alternativas para os ensaios de vibração que sejam mais baratas, popularizando esse tipo de experimento. Os testes para a validação desse novo martelo foram realizados em uma estrutura tipo viga engastada e os resultados comparados com os valores obtidos em testes semelhantes com um martelo comercial da PCB. O martelo cumpriu uma de suas etapas, que era apresentar funcionamento. Entretanto, a outra não obteve êxito, que foi a apresentação de dados semelhantes ao martelo comercial da PCB. Enfim, sabemos que é possível esse funcionamento eletrônico, porém a forma construtiva deve receber alterações.

Palavras-chave: Vibração, Martelo, Impacto.

Abstract

Vibration is an extremely important phenomenon in the context of a construction, civil, mechanical, electrical, etc. In order to know the limits vibration of the structure has emerged equipments which measuring vibration frequencies and equipment which excite structures, making them vibrate at different frequencies. This work aims to study one of the equipment that induces frequency structures, which is the impact hammer. Currently it is very expensive, and in order to tackle this problem in this study was designed in order to design and build a new hammer using different constructively. While the conventional impact hammer is constructed with piezoelectric sensor, the hammer of this project will use a Wheatstone bridge that will do the same function of measuring the impact strength at test time. The main objective is to take the first step towards the creation of alternatives to the vibration tests that are cheaper, popularizing this type of experiment. The tests for validation of this new hammer were

performed on a cantilever beam type structure, and the results compared with the values obtained from similar tests with a commercial PCB hammer. The hammer has fulfilled one of its stages, which was present operation. However, the other was unsuccessful, which was to present similar data as commercial PCB hammer. Anyway, we know that it is possible that electronic operation, but the constructive may to receive changes.

Keywords: Vibration, Hammer, Impact.

Introdução

Durante séculos os efeitos produzidos pela vibração têm encantado o ser humano e provocado sua curiosidade. A música, por exemplo, que é, inclusive, dita como uma linguagem universal é resultado de perturbações sonoras provenientes de vibração que se inicia nas cordas (violão, harpa, violino, etc), superfícies de instrumentos (tambor, bumbo, etc) ou pela geometria de alguns deles (saxofone, trompete, etc), se propagando pelo ar e finalmente transmitida ao pavilhão auditivo (Rao, 2008).

Essas vibrações provocam deformações em tais instrumentos ou estruturas que recebem o nome de nodos de vibrar. A análise desse fenômeno recebe o nome de análise modal. Esse aspecto é estudado na forma teórica e prática (experimental), para esse último é necessário à excitação da estrutura, que é feita com martelo de impacto.

Para realizar testes de vibração é necessário que haja um estímulo para que a vibração se inicie (Inman, 2001). Os dois sistemas mais comumente usados para excitar uma estrutura e gerar vibração em teste modal são o shaker (eletromagnético ou hidráulico) e o martelo de impacto.



Foto 1 - Shaker do tipo eletrodinâmico (Bruel & Kjaer, 2014)

Recentemente o martelo de impacto tem se tornado o mais popular dispositivo de excitação de vibração. Entretanto, esse dispositivo é composto por diversos itens eletrônico que elevam muito seu valor no mercado, restringindo o acesso a todas as empresas.

Com intuito de construir um equipamento que exerça função semelhante e que seja economicamente viável esse trabalho foi suscitado visando investigar, avaliar e construir uma alternativa para a realização de testes de vibração em estruturas.

É importante salientar que, diversos testes em estruturas cujas dimensões são robustas e possui valores econômicos de construção elevados costumam ser realizado, inclusive o teste de vibração.

Com um instrumento que possa ser adquirido com valores populares, é esperado que a realização de ensaios de vibração também em estruturas menos onerosas seja possível. Esse é mais um procedimento que vai garantir maior segurança a construções que atualmente desprezam essa análise por ser idealizadas e edificadas por empresas ou pessoas físicas que, mesmo que tenham conhecimento da importância do fenômeno de vibração, não o realizam porque consideram um investimento demasiadamente alto.

Com a ajuda do martelo de impacto é possível obter de forma prática os efeitos causados pela vibração em qualquer parte da estrutura, induzindo um sinal através do impacto, coletando o resultado com acelerômetros e comparando através de software apropriado a resposta obtida. Esse tipo de ensaio é utilizado para validar simulações numéricas em estruturas.

A figura 2 mostra o aspecto de um martelo de uso geral com respectivas pontas, pois elas podem ser trocadas de acordo com o tipo de estrutura analisada.



Foto 2 - Martelo de impacto de uso geral. (Emerson, 2004)

É esperado, com a conclusão dessa pesquisa, que seja construído um instrumento que possa excitar a estrutura da mesma forma que um martelo que se encontra no mercado atualmente. Ele é construído com uma massa de forma cilíndrica, munido de cabo para a realização de impacto, na outra extremidade existe um transdutor de força de impacto. Esse transdutor é ligado aos equipamentos de análise.

Referencial teórico

Medição de vibração por análise modal

O teste de vibração por análise modal consiste em utilizar um hardware (acelerômetros analisadores) que coleta as informações provenientes da estrutura, construindo o aspecto modal ou de deformações nas frequências críticas.

A figura 3 reproduz de forma esquemática o hardware usado para realização do teste modal.



Figura 1 - Disposição de um teste de análise modal (measurement-testing.com, 2014)

A resposta em frequência de um martelo de uso geral é dada pelos gráficos 4 e 5. Esperam-se resultados semelhantes a esses com o experimento que está sendo proposto.

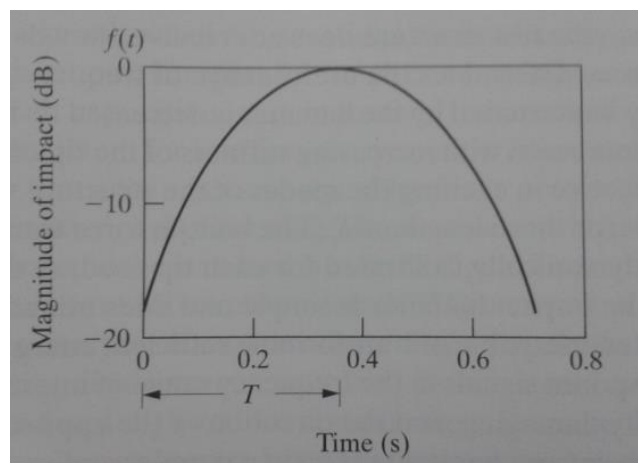


Figura 2 - Tempo de impacto do martelo (Inman, 2001)

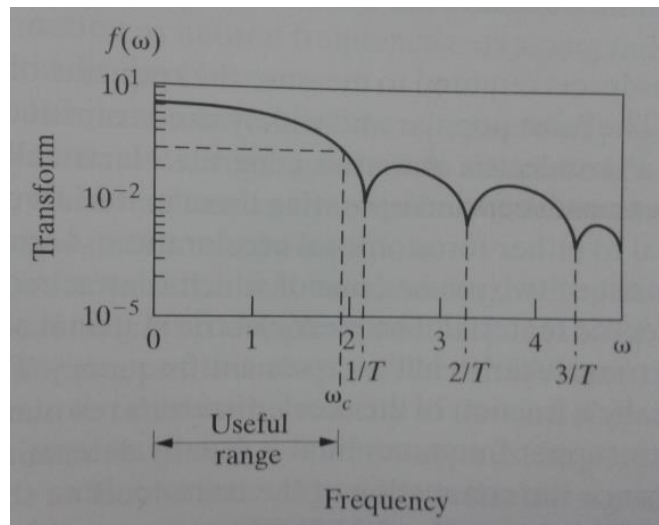


Figura 3 - Tempo de impacto do martelo (Inman, 2001)

Extensômetro

Extensômetro é um dispositivo utilizado para medir deformações em materiais em ensaios próprios (Tomazini, 2005), esses equipamentos possuem dimensão de base (l_0) em relação ao comprimento que irá ser deslocado (Δl).

Com relação ao comprimento inicial do extensômetro e seu comprimento deslocado obtemos a deformação específica, como apresentado na equação a seguir:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (1)$$

Onde: ε : Deformação específica

Δl : Comprimento deslocado

l_0 : Comprimento inicial do extensômetro

Essa deformação específica calculada pelo equipamento em questão possibilita a obtenção da tensão existente na peça, na direção determinada pelo posicionamento do mesmo, aliada a informação do módulo de elasticidade que deve ser conhecido. A fórmula para obtenção da tensão de deformação é a seguinte:

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \quad (2)$$

Onde: σ : Tensão de deformação

E: módulo de elasticidade

ϵ : deformação específica

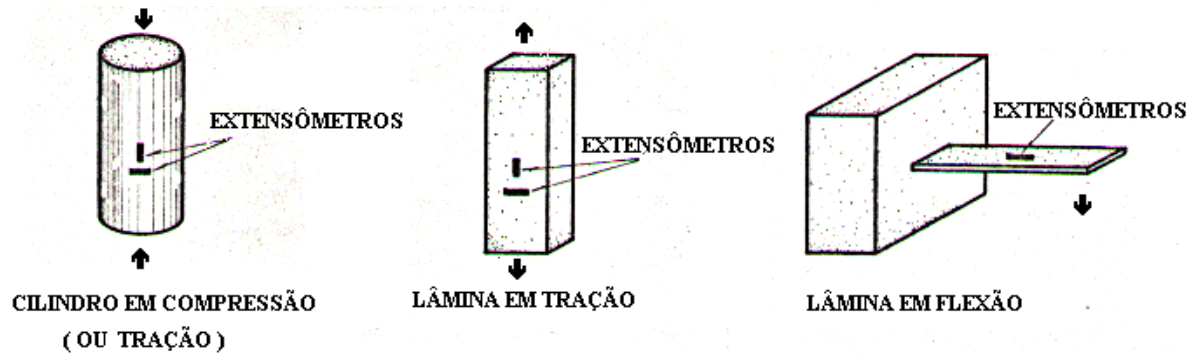


Figura 4 - Fixação de extensômetro (Euler, 1980a)

Existem diversos tipos de extensômetros, próprios para uso em ambientes físicos distintos, eles podem ser classificados em: mecânicos, óticos, elétricos, pneumáticos, etc.

As características que determinam o extensômetro ideal para utilizar em ensaios de tensão mecânica são: Facilidade de instalação, precisão, sensibilidade, alcance, pequenas dimensões, pouco peso, permitir leitura local ou à distância, baixo custo e, dentro de certos limites, respondem a uma faixa de vibração. Essa característica será explorada para medir a deformação do corpo do martelo, cujo resultado será usado para calcular a força de excitação sobre a estrutura.

Esses fatores indicam que esse dispositivo pode ser utilizado para o propósito do presente trabalho.

Extensômetro de resistência elétrica

Esse é o tipo mais usado de extensômetro. Ele é construído de arame ou fio metálico ligado a uma base isolante a qual é colada na peça em que se deseja medir a deformação.

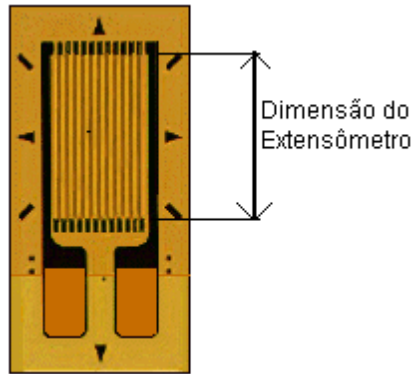


Figura 5 - Extensômetro de resistência elétrica (Euler, 1980)

O funcionamento desse equipamento é baseado na variação da resistência elétrica, quando o material sobre teste apresentar uma deformação. De acordo com Tomazini (2005), esse fenômeno foi observado por pesquisadores na década de 1950. A relação entre deformação e variação da resistência elétrica é dada pela equação:

$$\frac{\Delta R}{R} = K \cdot \varepsilon \quad (3)$$

Onde: R: Resistência elétrica do extensômetro

ΔR : Variação da resistência elétrica

ε : deformação específica da peça

K: fator do extensômetro

Essa equação é obtida da seguinte maneira:

Considerando um fio colado a uma peça, como demonstra a figura 8.

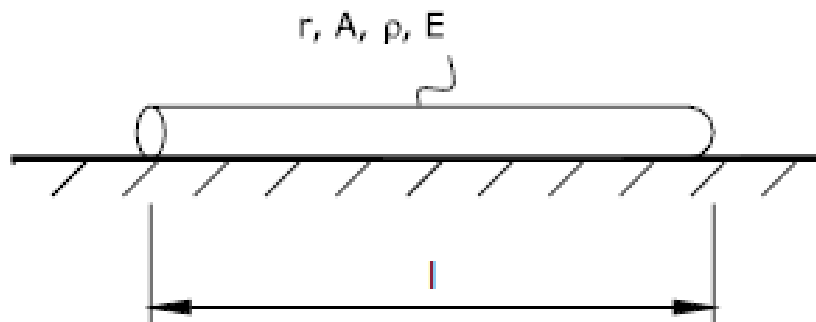


Figura 6 - Conductor colado em uma peça (Tomazini, 2005)

O extensômetro irá obter a variação da resistência elétrica no condutor, que irá sofrer deformação mecânica, e essa resistência é função do comprimento l , seção transversal A e resistividade ρ .

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (4)$$

Ao ocorrer tensão mecânica a peça se deforma, alterando assim seu comprimento, seção transversal e sua resistividade, modificando a resistência R .

$$dR = \frac{\partial R}{\partial \rho} d\rho + \frac{\partial R}{\partial l} dl + \frac{\partial R}{\partial A} dA \quad (5)$$

Divide por:

$$R = \frac{\rho l}{A}$$

Segue:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \frac{dl}{l} + \frac{dA}{A} \quad (6)$$

Deve-se lembrar que:

$$\varepsilon = \frac{dl}{l} \quad (7)$$

$$A = \pi r^2 \Rightarrow dA = 2\pi r dr \quad (8)$$

Sendo assim:

$$\frac{dA}{A} = \frac{2dr}{r} = 2\varepsilon = -2\mu\varepsilon \quad (9)$$

Logo:

$$\frac{dR}{R} = \frac{d\rho}{\rho} + \varepsilon + 2\mu\varepsilon = \frac{d\rho}{\rho} + (1+2\mu)\varepsilon \quad (10)$$

De acordo com Bridmann:

$$\frac{d\rho}{\rho} = C \frac{dV}{V} \quad (11)$$

Onde:

$$V = \pi r^2 l \quad (12)$$

$$dV = 2\pi r l dr + \pi r^2 dl \quad (13)$$

Logo:

$$\frac{dV}{V} = \frac{dl}{l} + 2 \frac{dr}{r} = \varepsilon - 2\mu\varepsilon = (1 - 2\mu)\varepsilon \quad (14)$$

Então:

$$\frac{d\rho}{\rho} = C(1 - 2\mu)\varepsilon \quad (15)$$

Voltando para a expressão dR/R , temos:

$$\frac{dR}{R} = [C(1 - 2\mu) + (1 + 2\mu)]\varepsilon \quad (16)$$

$$\frac{dR}{R} = K\varepsilon$$

Onde K é o fator do extensômetro, variando com o tipo dele, e é C uma constante do material. A equação acima é denominada como a equação básica da extensometria elétrica, Já a equação abaixo é aquela que é usada para obter a deformação de uma peça medindo-se a variação da resistência do extensômetro.

$$\varepsilon = \frac{1}{K} \frac{\Delta R}{R} \quad (17)$$

Metodologia

O primeiro passo, neste trabalho, foi justamente o planejamento do martelo de impacto, estipulando suas medidas, como deveria ser sua forma e onde poderiam ser instalados os componentes eletrônicos que farão parte de sua estrutura. Para o dimensionamento do martelo, foi utilizado o programa de desenho assistido por computador (CAD).

Nessa etapa, foi considerado o local onde os extensômetros deveriam estar

localizados, bem como uma proteção adequada, visando evitar impactos indesejados nesses equipamentos eletrônicos. Para isso foi determinado que eles fossem posicionados imediatamente após a ponta que receberá o impacto, visando que eles identifiquem instantaneamente as variações de tensão de deformação no corpo cilíndrico onde os extensômetros foram fixados.

Ainda na etapa de projeto do produto que foi utilizado no experimento, foi mister definir como o fio deveria chegar ao equipamento eletrônico, criando passagem para o mesmo e definido como posicioná-lo, além de prendê-lo. Através de esboços foi determinado o produto conforme o desenho abaixo.

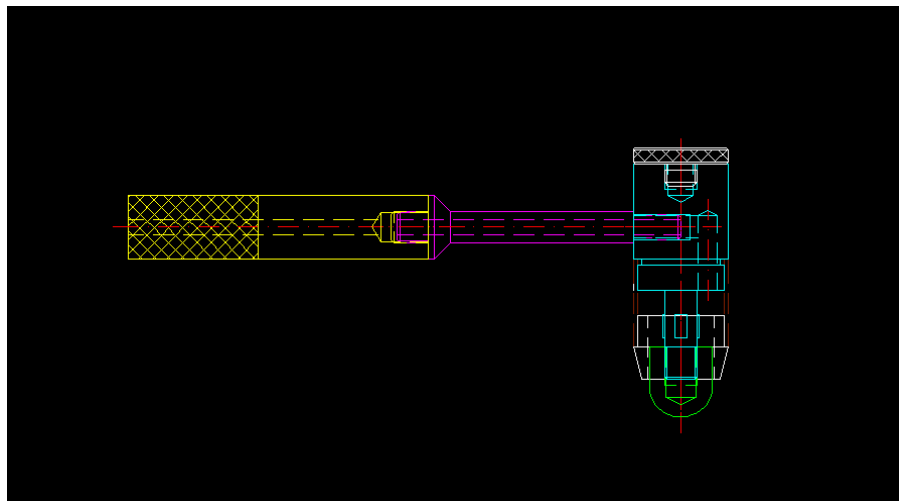


Figura 7 - Projeto de martelo de impacto (O autor, 2016)



Figura 8 – Martelo de impacto em perspectiva. (O autor, 2016)

Com o esboço do produto já concluído, a próxima etapa que foi trabalhada no processo de planejamento foi o dimensionamento de cada peça que faz parte do martelo. A definição das medidas também foi feita no programa de computador AutoCad. Nele, foram gerados os desenhos de fabricação, utilizados na etapa de construção do produto, bem como os ajustes necessários.

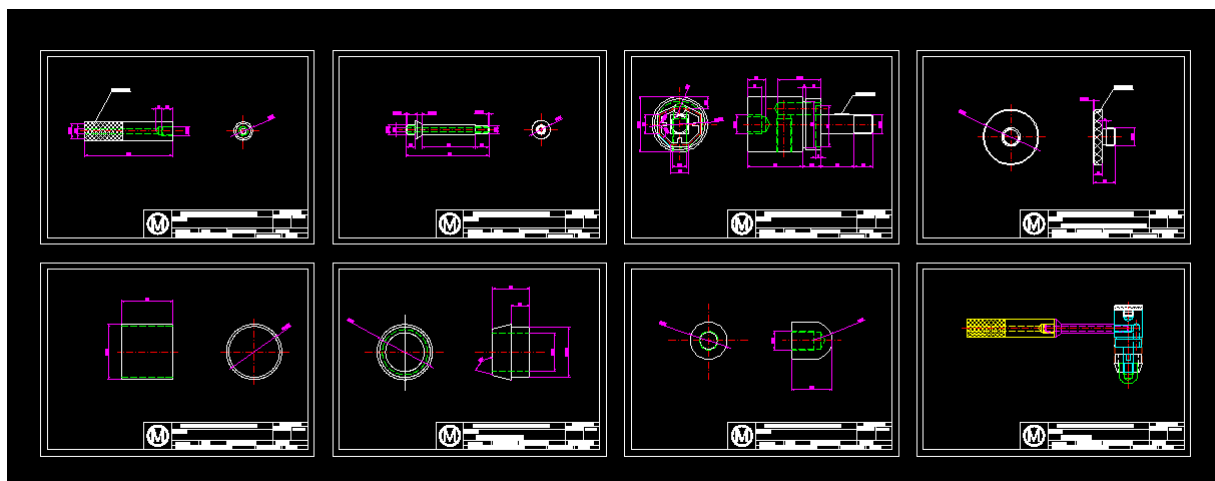


Figura 9 – Desenhos de fabricação com devidas dimensões. (O autor, 2016)

Com os desenhos de fabricação prontos, foi dado início ao processo de fabricação das peças. Para essa etapa do projeto foi utilizado o laboratório da própria universidade, onde foram usinados cada um dos componentes que faz parte do martelo. Foi usado o torno mecânico para a confecção do cabo e cabeça do martelo. Também foi necessário o uso da fresadora universal para dar forma, na cabeça, ao local onde foram instalados os quatro extensômetros. Além disso, também foram feitos, na fresadora, canais na cabeça do martelo, utilizados para passar os fios que atravessam o cabo e a cabeça até os extensômetros.



Foto 3 - Usinagem de canais para passagem de fios. (O autor, 2016)

Com as peças já construídas, o próximo passo foi justamente a montagem da parte

eletrônica do produto, que se refere à fixação de quatro extensômetros em volta da cabeça do martelo e sua ligação entre eles e com os fios ligam a ponte de Wheatstone ao sistema de aquisição de dados.

Primeiramente, o cabo elétrico foi passado pela cabeça do martelo e preso na parte superior para impedir que atrapalhasse o processo de fixação dos extensômetros. Em seguida, foi colocado o corpo de ligação, que faz parte do cabo do produto e está localizado entre o cabo de manipulação e a cabeça do martelo, sua principal função é impedir que movimentos simples ou moderados causem a ruptura da ligação eletrônica. Nele há um furo passante de 6 mm de diâmetro, onde o fio atravessa de forma justa, de modo que seja necessária força em demasia para movê-lo no interior da peça. E para completar a montagem do equipamento, foi acoplado o cabo de manipulação e realizada a limpeza em todo o equipamento, em especial na cabeça do martelo, local onde foi instalada a parte eletrônica.



Foto 4 - Montagem e limpeza do martelo de impacto. (O autor, 2016)

Em seguida, foi feita a colagem dos extensômetros. Para diminuir a incidência de erros na medição das tensões, a área superficial destinada a recebê-los foi polida e higienizada de forma minuciosa. Com isso, os extensômetros foram colados nos quatro lados usinados, na cabeça do martelo. Um a um eles foram fixados e posteriormente, foi utilizada a cola epóxi sobre cada um deles com intuito de vedá-los, visando à proteção contra partículas de poeira.

Por fim, foi feito um arranjo do tipo Ponte de Wheatstone. O extensômetro atua como uma resistência em uma ponte como essa e os quatro fios como os canais de alimentação dos sinais elétricos de entrada e saída, possibilitando maior sensibilidade ao arranjo eletrônico.

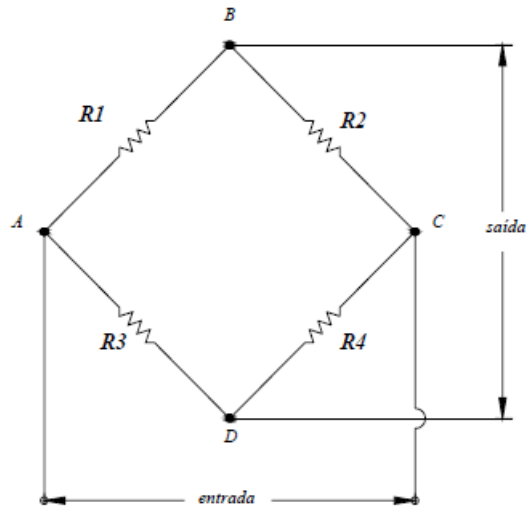


Figura 10 – Circuito em ponte de Wheatstone. (O autor, 2016)

Concluindo a parte de construção do martelo de impacto, foi confeccionada uma proteção para os equipamentos eletrônicos e uma ponta de PVC para receber os impactos que serão parte dos ensaios previstos.

A validação do experimento foi feita por meio de comparação de testes em estrutura simples, como uma barra engastada, com os equipamentos que o laboratório de vibração possui. Martelo de impacto modelo 086C01 – PCB Piezotronic, sistema de aquisição de sinais ADS2000 da Lynx tecnologia e acelerômetro PCB modelo 333B30. O software presentes no sistema de aquisição utilizados são o AqDados 7.02 e AqDAnalysis 7.



Foto 5 – Martelo de impacto modelo 086C01 – PCB Piezotronic. (O autor, 2016)



Foto 6 – Sistema de aquisição de sinais ADS2000. (O autor, 2016)

Resultados e discussões

Primeiro o teste foi realizado com o martelo de impacto 086C01, obtendo o gráfico 1 abaixo:

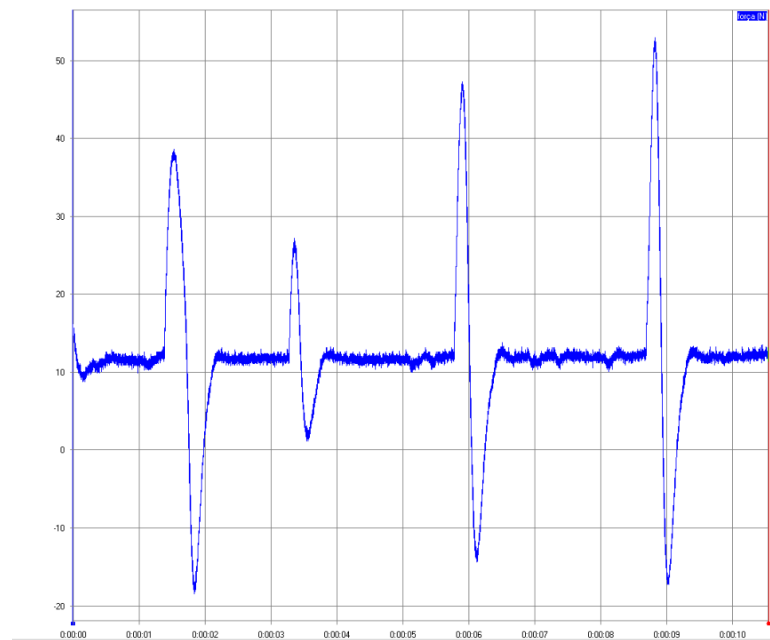


Gráfico 1 – Análise de força do martelo PCB. (O autor, 2016)

Os resultados coletados pelo sistema estão em Newtons (N) e os valores máximos e mínimos obtido no teste são:

Info/Parâmetros	Valores
	força
	(N)
Amostras	21100
Máximo	52,8986
Mínimo	-18,4292
Máx - Mín	71,3279
Média	11,66
Desvio Padrão	8,69867
Área	123,007
RMS	14,547

Tabela 1 – Tabela estatística de todos os sinais do gráfico 1. (O autor, 2016)

Nos testes de funcionamento do martelo de impacto, objeto desse estudo, foram realizados dois testes diferentes. Eles foram necessários para verificar seu funcionamento. O primeiro deles foi executado somente para caracterizar o ruído natural existente, mostrado no gráfico 2, cuja unidade é quilograma (kg).

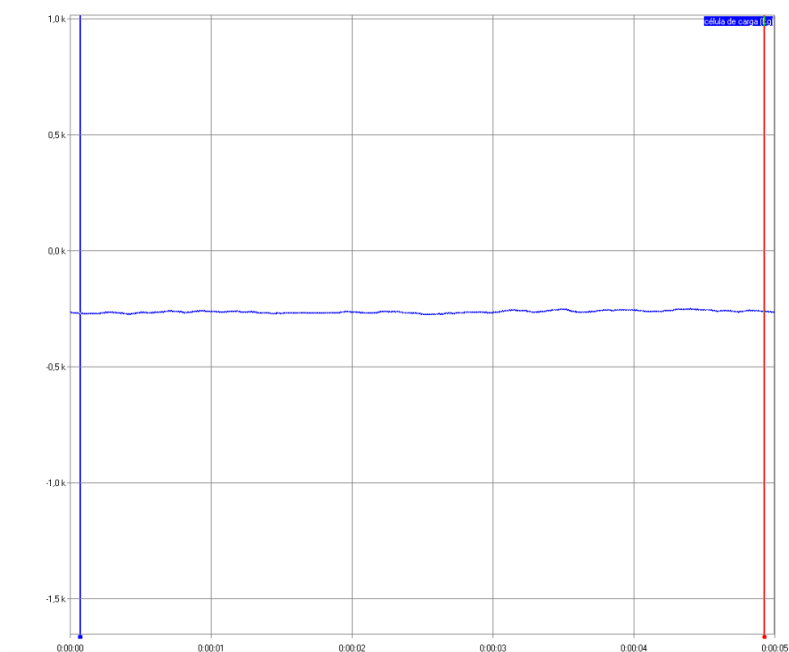


Gráfico 2 - Análise de força do martelo projetado, sem impacto. (O autor, 2016)

É bom ressaltar que, o teste teve duração de 1 minuto e os valores de ruídos permaneceram os mesmos, garantindo a confiabilidade do sistema de aquisição de dados.

O gráfico 3, também em quilogramas (kg), é obtido através de testes executados com o martelo. Nele é possível confirmar alterações acentuadas nos momentos em que há impactos do martelo com a superfície.

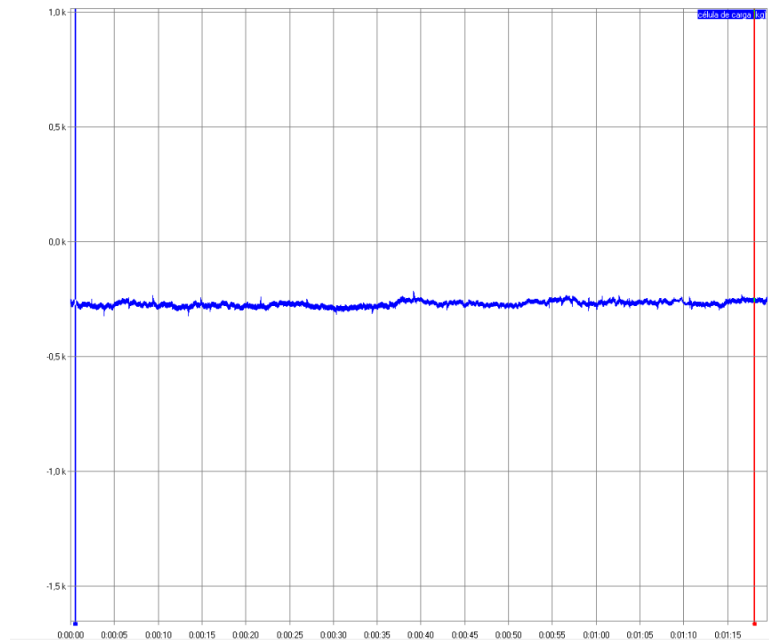


Gráfico 3 - Análise de força do martelo projetado, com impacto. (O autor, 2016)

Comparando os gráficos, é possível identificar que o martelo de fato funciona. Porém, essa condição é confirmada ao comparar as tabelas que apresentam os valores máximos e mínimos dos gráficos.

Tabela referente ao gráfico 2		Tabela referente ao gráfico 3	
Info/Parâmetros	Valores	Info/Parâmetros	Valores
	célula de carga		célula de carga
	(kg)		(kg)
Amostras	9720	Amostras	155055
Máximo	-248,661	Máximo	-215,465
Mínimo	-277,172	Mínimo	-324,42
Máx - Mín	28,5115	Máx - Mín	108,955
Média	-263,346	Média	-271,614
Desvio Padrão	5,52625	Desvio Padrão	12,1401
Área	-1279,73	Área	-21057,4
RMS	263,39	RMS	271,884

Tabela 2 – Estatísticas de todos os sinais dos gráficos 2 e 3. (O autor, 2016)

Considerações finais

O trabalho foi idealizado com o principal objetivo de reproduzir um martelo de impacto convencional, com função de excitar uma estrutura da mesma forma. Porém, ele foi projetado para ser construído de forma diferente, com materiais de custo mais baixo.

Comparando os custos entre os martelos, o convencional e o projetado, a redução no valor de aquisição desse equipamento é de aproximadamente de 9 vezes, em valores atuais, utilizando a conversão de moeda vigente.

Ao efetuar os testes de validação de funcionamento, os resultados obtidos provenientes do martelo de impacto construído infelizmente não corresponderam às expectativas, apresentando baixa sensibilidade devido à alta absorção do impacto pelos materiais que o compõem.

Foi possível concluir que um martelo de impacto munido de uma ponte de wheatstone é possível, afinal ele apresentou sinais de funcionamento no sistema de aquisição de dados. Para a realização desse tipo de projeto, com esse conceito, é fundamental que sejam suscitados novas formas de construção, com materiais diferentes, arranjos eletrônicos diferentes, etc.

Pode-se dizer que esse trabalho é o primeiro passo para avançar nesse empreendimento e em breve trazer ao mercado uma nova alternativa de produto que seja acessível a um público ainda carente dessa tecnologia.

Referências bibliográficas

Bruel & Kjaer, disponível em: <http://www.bksv.com/Products/shakers-exciters/lvs-vibration-test/shakers/medium-force/V8ElectrodynamicShaker>, acessado em 29 de outubro de 2014.

Emerson, disponível em: http://www2.emersonprocess.com/siteadmincenter/PM%20Asset%20Optimization%20Documents/ProductDataSheets/2130_ds_ImpactHammer.pdf, acessado em 21 de outubro de 2014.

Euler, B.J.; Extensometria módulo I – **Transdutores que utilizam extensômetros elétricos de resistência como elemento sensor**, 1ª ed, São Paulo, 1980a.

Euler, B.J.; Extensometria módulo II – **Transdutores que utilizam extensômetros elétricos de resistência como elemento sensor**, 1ª ed, São Paulo, 1980.

Inman, D.J.; **Engineering vibration**, 2ª ed, Prentice Hall Inc, New Jersey, 2001.

Inman, D.J.; **Vibration with control**, 3ª ed, John Wiley and Sons Ltd, west sussex, 2006.

Measurement-Testing.com: Sitemap, disponível em: <http://www.measurement-testing.com/sitemap.html>, acessado em 30 de outubro de 2014.

Rao, S.S.; **Vibrações mecânicas**, 4ª ed, Pearson prentice hall, São Paulo, 2008.

Tomazini, J.E.; Mathias, M. H. **Apostila de laboratório de resistência dos materiais – Extensometria elétrica**, 1ª ed, São Paulo 2005.

Contato: cicerojunior15@hotmail.com e fabio.raia@mackenzie.br