MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE IMPACTO PORTÁTIL COM PLATAFORMA LIVRE ARDUINO

por

Kelvin Schaun Brose

Monografia apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Engenheiro Mecânico.

Porto Alegre, Dezembro de 2017

Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Escola de Engenharia
Departamento de Engenharia Mecânica

EQUIPAMENTO DE MEDIÇÃO DE IMPACTO PORTÁTIL
COM PLATAFORMA LIVRE ARDUINO

por

Kelvin Schaun Brose

ESTA MONOGRAFIA FOI JULGADA ADEQUADA COMO PARTE DOS REQUISITOS PARA A OBTENÇÃO DO TÍTULO DE
ENGENHEIRO MECÂNICO
APROVADA EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA

Profa. Thammy Cristina Hayashi
Coordenador do Curso de Engenharia Mecânica

Área de Concentração: **Mecânica dos Sólidos**

Orientador: Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Comissão de Avaliação:

Prof. Dr. Ignacio Iturrioz

Prof. Dr. Juan Pablo Raggio Quintas

Prof. Dr. Felipe Tempel Stumpf

Porto Alegre, 18, dezembro e 2017.

AGRADECIMENTOS

Agradeço aos meus pais por terem me guiado pelo caminho correto, e por ter moldado minha individualidade e bom senso da forma mais correta e singular possível.

Aos meus irmãos que me mostraram cada um de seus caminhos e me deram forças e exemplos para trilhar o meu.

A todos os meus professores que me orientaram na minha jornada pelo conhecimento.

Ao Carlos Alberto Kern Thomas, por me auxiliar na maior parte do meu trabalho e Rodrigo Rodrigues de Barro por me ajudar durante os ensaios, a ambos por me cederem seu tempo e o espaço do GMAp para parte da confecção e ensaios necessários.

Ao meu professor orientador Pablo que me apoiou neste trabalho e seus avisos que me deram uma impulsão para fazer-lo.

BROSE, K. S. “**Equipamento de medição de impacto portátil com plataforma livre arduino”**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

RESUMO

Todo atleta, em sua modalidade esportiva, deseja conhecer seu desempenho e seu desenvolvimento e isto não é diferente para o praticante de artes marciais. Mesmo um movimento simples, como o soco, contém muitos componentes que podem afetar seu resultado final: o giro do quadril, o movimento corporal, a impulsão do pé com o chão. O equipamento projetado, neste trabalho, facilitará a qualquer praticante fazer uma análise de seu impacto, podendo comparar os resultados de cada golpe e, até mesmo, comparar técnicas diferentes. A validação do equipamento foi realizada através do estudo do impacto, a calibração do equipamento foi feita com ensaios utilizando uma máquina de tração, os resultados das medições foram comparadas com equipamentos de treinos. A instrumentação foi baseada na plataforma aberta Arduino que possibilitou a medição de deformações com a utilização de extensômetros de forma simples, portátil e independente. O trabalho indica a estrutura do sistema, seus componentes e suas características, bem como a incerteza associada. Conclui-se que o equipamento atendeu os requisitos mínimos para seu objetivo inicial, que pretende monitorar força de golpes aplicados, permitindo o praticante de fazer análises de seus movimentos.

PALAVRAS-CHAVE: Impacto, Arduino, Equipamento, Extensômetros

BROSE, K. S. “**Portable impact measuring equipment with arduino open source”**. 2017. 15 folhas. Monografia (Trabalho de Conclusão do Curso em Engenharia Mecânica) – Departamento de Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2017.

ABSTRACT

Every athlete in their modality wants to know their performance and development, and this is not different from the martial artist. Even a simple movement like a punch contains many elements who can affect the outcome: hip rotation, body movement, foot impulse on the floor. This equipment designed in this work will facilitate any practitioner to make an analysis of his impact, being able to compare the results of each blow, and even to compare different techniques. The validation of the components was executed through the study of impact, the calibration of the equipment was done whit tests using a tension testing machine, the results of the measurements were compared with training equipment. The instrumentation was based on the Arduino open platform which enabled the measurement of deformations with the use of extensometers in a simple, portable and independent way. The work shows the system structure, its components and their characteristics, as well as the associated uncertainty. It is concluded that the equipment met the minimum requirements for its initial objective, which aims to monitor force applied blows, allowing the practitioner to make analyzes of their movements.

KEYWORDS: Impact, Arduino, Equipment, Extensometers

LISTA DE FIGURAS

Figura 4.1 – Fator de amplificação 2
Figura 4.2 – (a) Ponte de Wheatstone simples e (b) Balanço paralelo diferencial 4
Figura 4.3 – Saída amplificador operacional 5
Figura 5.1 – Aceleração do impacto do soco 6
Figura 5.2 – Frequência da célula de carga 7
Figura 5.3 – Domínio na frequência da célula de carga 7
Figura 6.1 – Foto lateral do equipamento 8
Figura 6.2 – Célula de carga 8
Figura 6.3 – Circuito elétrico do equipamento 9
Figura 6.4 – Curva de calibração do equipamento 10
Figura 6.5 – *Makiwara* de parede 11
Figura 7.1 – Equipamento em repouso, leve deflexão e contato entre placas 12
Figura 7.2 – Gráficos impacto com leve deflexão e contato entre placas 12
Figura A1 – Ensaio do equipamento na máquina de tração em Newtons 17
Figura A2 – Ensaio do equipamento com *makiwara* de parede para contato das primeiras placas de madeira 18
Figura A3 – Gráfico dos ensaios no equipamento com os 4 atletas respectivamente 18
Figura A4 – Analise de impulso dos atletas 3 e 4 19

LISTA DE TABELAS

Tabela 6.2 – Ensaio de compressão sobre *makiwara* 11
Tabela 7.1 – Dados obtidos com equipamento.....13
Tabela A1 – Especificações técnicas Arduino UNO. 16
Tabela A2 – Características da célula de carga.....16
Tabela A3 – Dados da calibração.....17

ÍNDICE

Pág.

RESUMO iv
ABSTRACT v
LISTA DE FIGURAS vi
LISTA DE TABELAS vii
ÍNDICE viii
1. INTRODUÇÃO 1
1.1 Motivação 1
2. OBJETIVOS 1
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 1
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 2
4.1 Fator de amplificação 2
4.2 Impacto 3
4.3 Impulso 3
4.4 Transdutores Elásticos 3
4.4.1 Extensômetros de Resistência Elétrica 3
4.4.2 Ponte de Wheatstone 4
4.5 Amplificação Eletrônica 4
5. INSTRUMENTRAÇÃO 5
5.1 Caracterização do impacto 5
5.2 Frequência natural da célula de carga 6
6. EQUIPAMENTO 8
6.1 Micro controlador Arduino 8
6.2 Células de carga 8
6.3 Amplificador AD620 9
6.4 Circuito empregado 9
6.5 Calibração 10
6.6 Aferição do equipamento de treino 11
7. MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS 12
7.1 Equipamento em uso 13
8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS 14
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 15
ANEXOS 16
APÊNDICES 17

1. INTRODUÇÃO

O impacto é o encontro de dois corpos num intervalo muito pequeno de tempo em que há transferência de energia entre os mesmos, sendo estas energias relativamente grandes. Este fenômeno ocorre, por exemplo, quando um lutador de artes marciais realiza um soco sobre um oponente.

Para as medições das forças obtidas resultante do impacto aplicado foi empregada a plataforma aberta Arduino [Nussey, 2013], que processará os sinais obtidos pelos extensômetros de resistência elétrica, que se encontram nas células de carga.

Os resultados finais foram comparados com trabalhos sobre força de impacto produzida por socos. Há muitos trabalhos referentes ao mesmo assunto, mas eles se diferenciam na forma de aplicação, no método utilizado e na modalidade esportiva. A comparação principal é com o trabalho que é referente à análise de impacto e risco de lesões no segmento superior devido ao golpe aplicado [Souza, 2002].

Para a construção de um equipamento são necessários a verificação de todos seus componentes. Se os mesmos são qualificados para obterem os dados necessários, nas margens escolhidas, com a precisão estipulada e garantir repetitividades em seus resultados. Para isso a validação dos instrumentos se torna necessária.

1.1 Motivação

Avaliações voltadas para rendimento esportivo possuem um custo elevado, necessitando de uma aparelhagem específica, sofisticada e complexa.

Um dos focos no treinamento de artes marciais é a aplicação das técnicas. Muitos praticantes não têm uma quantificação clara de sua força na aplicação desses golpes. A força de aplicação de um golpe é um dos pontos mais importantes no resultado final de uma luta. Um equipamento de medição de impacto permitirá ao praticante uma estimativa da força de seu golpe.

2. OBJETIVOS

Desenvolver um equipamento que meça o impacto de um soco. Este equipamento deverá ser portátil, ou seja, pequeno suficiente que permita seu transporte e que permita a sua instalação em distintos locais e posições, tornando sua utilização prática. Ele deverá ser funcional, seu uso deve ser simples e não necessitar de equipamentos complementares para seu uso. Seu custo final de materiais e fabricação deverá ser baixo.

Para este trabalho, a análise do equipamento será realizada avaliando o impacto de um soco, e será comparado aos valores de trabalhos anteriores referentes a impactos oriundos da mesma técnica.

A plataforma aberta Arduino [Nussey, 2013] possui uma ampla variedade de aplicações, neste caso, permitirá a aquisição de dados vindas da alteração de resistência dos extensômetros de resistência elétrica devido à deformação das células de cargas. Também será verificada sua adequabilidade na velocidade de aquisição e processamento de dados.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Souza, 2002, procurou avaliar e quantificar o pico de impacto e força gerada no segmento superior em atletas praticantes de artes marciais. Foram utilizados acelerômetros piezoeléctricos para medir os picos de aceleração na região do punho e escapulas. E mediu a força gerada pelo soco no equipamento de treino, chamado *makiwara*, através da utilização de extensômetros de resistência elétrica colados diretamente nele.

Há outro estudo relacionado à medição da força de socos [Gulledge, Dapena, 2007], este comparando a força do soco aplicado de duas formas diferentes, soco direto e o soco invertido, para a medição do soco usou uma placa de força, normalmente utilizada para

medições de forças relacionada a caminhada. E a análise da velocidade através de marcadores nos braços.

Outro autor [Girodet *et ali*, 2005] realizou uma análise cinemática e dinâmica do soco de caratê. Para a análise do movimento foi utilizada uma câmera de alta velocidade e para a medição da força de impacto utilizou um sensor de força uniaxial, com uma taxa de aquisição de dados de 1k Hz. Além da análise da força, também foi analisado o impulso aplicado.

Trabalhos mais antigos já realizaram estudos sobre técnicas de soco. Como a exemplificação desta técnica como uma colisão mecânica [Walker, 1975]. A análise física da técnica de quebramento em questão da energia associada [Blum , 1977]. Também a análise da interação com alvo envolvendo técnicas de caratê [Wilk et ali, 1983].

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1 Fator de amplificação

Quando a frequência de excitação é igual à frequência natural do sistema ocorre o fenômeno de ressonância. Este fenômeno é a subsequente ampliação do fenômeno de absorção de energia vibratória [Wasserman, 1990]. Isto somente poderá ser regulado pela quantidade de amortecimento encontrada no sistema envolvido, se não a amplitude de vibração aumentará ilimitadamente [Seto, 1964].

A equação 4.1 mostra a resposta do sistema em relação da razão de frequências.

$$M = \frac{1}{\sqrt{(1-(\omega/\omega_n)^2)^2+(2\zeta\omega/\omega_n)^2}} \tag{4.1}$$

Onde M é o fator de amplificação, (ω/ω_n) é a razão de frequências, onde ω é a frequência aplicada, ω_n é a frequência natural da estrutura, e ζ é o fator de amortecimento.

A figura 4.1 mostra a representação gráfica da equação 4.1 para vários valores de razão de amortecimento. O fator de amplificação, eixo vertical, nada mais é que a resposta da frequência do sistema.

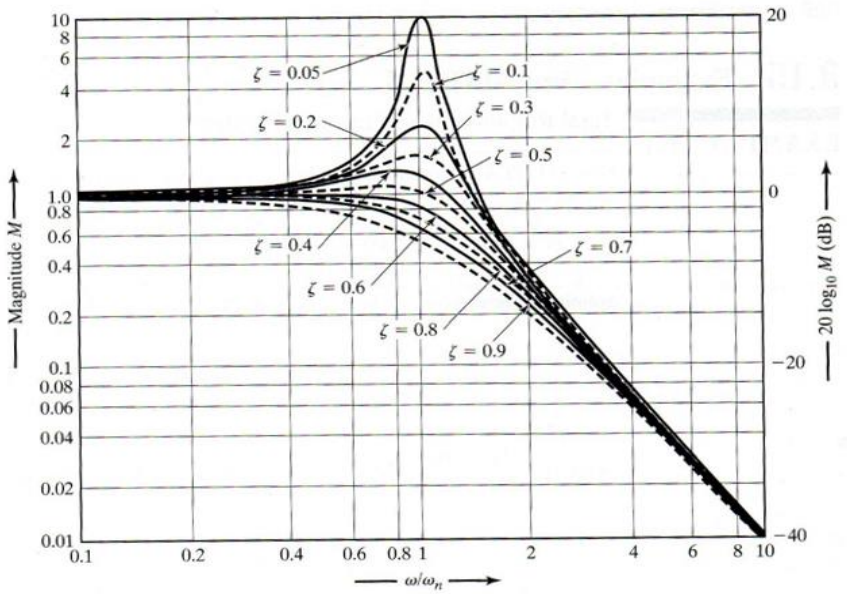

Figura 4.1 – Fator de amplificação

O fator de amplificação é a medida da resposta do sistema à frequência aplicada. Normalmente, se quer que a relação com a frequência seja constante, ou seja, se deseja que o sistema seja insensitivo a mudanças da frequência aplicada. A figura 4.1 mostra que a taxa de amplificação é razoavelmente constante até certo ponto para certas razões de amortecimento

(ζ). Se o sistema for usado para medir forças dinâmicas em geral, preferencialmente se deve definir o amortecimento e uma frequência limite [Beckwith et ali, 2006].

Para determinar a faixa de utilização da célula de carga para carregamentos dinâmicos de curta duração é necessário conhecer sua frequência natural. Sua frequência natural permite definir a faixa de frequência de utilização da célula de carga. Como norma geral, pode-se admitir a faixa de utilização da célula de carga estendendo-se até 40% da frequência natural [Doz, 1990].

4.2 Impacto

Segundo diversos autores [Goldsmith,1960; Nigg et al.,1995], força de impacto é o termo, que vem da Mecânica Clássica do Impacto, usado para definir a força devida a colisão de dois objetos com pequena duração de tempo. São forças que atingem seu máximo valor próximo dos 50ms após o choque entre os dois corpos [Nigg et al.1995]. Durante o impacto a maior intensidade da força de impacto é denominado pico de impacto [apud Nigg et al.,1995].

4.3 Impulso

A definição de impulso é a variação de quantidade de movimento linear envolvendo dois corpos em uma colisão. É possível obtê-la pela a integração da força sobre o tempo de aplicação, ou seja:

$$I_{t1,t2} = \int_{t1}^{t2} F(t)\, dt \tag{4.2}$$

Onde $I_{t1,t2}$ é o impulso no intervalo de tempo t1 e t2 e $F(t)$é a força aplicada no tempo

4.4 Transdutores Elásticos

Muitos sistemas transdutores de força fazem o uso de elementos mecanicamente elásticos ou combinação de elementos. A aplicação de carregamento do elemento resulta em uma deflexão analógica, normalmente, linear. A deformação pode ser observada diretamente e utilizada para medir a força ou carregamento, ou é utilizado um segundo transdutor para converter o deslocamento em outra forma de sinal, normalmente, elétrico [Beckwith et ali, 2006].

4.4.1 Extensômetros de Resistência Elétrica

Estes sensores variam sua resistência elétrica linearmente com a deformação aplicada sobre eles, quando colados sobre uma superfície de um componente receberão a mesma deformação. A estrutura dos extensômetros de resistência elétrica é composta de uma finíssima camada de material condutor (grade) sobre um composto isolante. Quando o comprimento da grade é mecanicamente deformado causa um aumento ou diminuição do mesmo resultando na alteração da resistência. A mudança de resistência é proporcional à deformação sofrida pela superfície onde estão colados os extensômetros. A equação básica que vincula a variação da resistência do extensômetros com a deformação é expressa pela equação 4.3.

$$\varepsilon = \frac{\Delta R/_R}{F} \tag{4.3}$$

Onde ε é a deformação no sentido principal do extensômetros de resistência elétrica, ΔR é a variação da resistência, R é a resistência do extensômetros de resistência elétrica e F é o fator de calibração, que depende do material utilizado do extensômetros de resistência elétrica.

4.4.2 Ponte de Wheatstone

Pontes resistivas é o método mais comum de conexão de transdutores passivos para sistemas de medições. Vários transdutores podem ser utilizados, mas os mais tipicamente utilizados são os extensômetros de resistência elétrica, termômetros resistivos ou termoresistores. A ponte de Wheatstone tem vários tipos de configurações, mas a mais usada consiste em quatro resistores com uma fonte de corrente e um voltímetro, figura 4.2a. Circuitos em pontes permite uma alta precisão na medição de resistência. Estas medições são obtidas tanto por balancear a ponte, fazendo ajustes conhecidos dos elementos dos braços até que valores da voltagem medida sejam zero, ou para determinar a magnitude do desbalanceamento medido. Para manter o balanceamento da ponte de Wheatstone, a relação das resistências de qualquer dos dois braços adjacentes precisa ser a mesma relação dos dois outros braços. Quando se utiliza sensores com baixa mudança de resistência, no caso de extensômetros de resistência elétrica, normalmente se utiliza balanço em paralelo, como na figura 4.2b [Beckwith et ali, 2006].

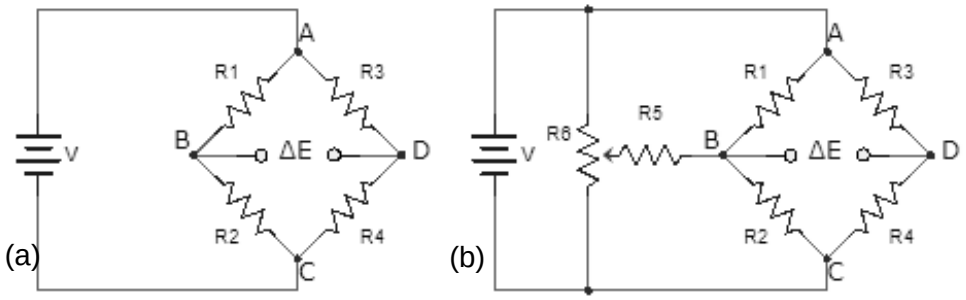

Figura 4.2 – (a) Ponte de Wheatstone simples e (b) Balanço paralelo diferencial

A ponte de Wheatstone é alimentada com uma diferença de potencial V entre os pontos A e C conforme a Figura 4.2(a), a diferença de potencial é dividida entre os dois braços contendo as duas resistências R1, R2 e R3, R4. A equação da diferença de potencial entre os pontos B e D é dada a seguir, que relaciona a equação de equilíbrio dos dois braços da ponte.

$$E = \mathrm{V}\left(\frac{R_2R_3 - R_4R_1}{(R_1+R_2)(R_3+R_4)}\right) \tag{4.4}$$

Onde E é a diferença de tensão, V é a tensão aplicada no sistema e R onde i=1,2,3,4 são as resistências de cada braço da ponte.

Assume-se que para pequenas deformações, onde ΔRi/Ri<<1, geram-se erros desprezíveis, inferiores a 0,5%. Utilizando esta hipótese na equação 4.4 chega-se:

$$\frac{\Delta E}{V} = \frac{k}{4}(\varepsilon_1 - \varepsilon_2 + \varepsilon_3 - \varepsilon_4) \tag{4.5}$$

Onde ΔE é a medida do desbalanceamento elétrico na ponte de Wheatstone, e εi onde i=1,2,3,4 é a deformação sofrida por cada extensômetros de resistência elétrica da ponte.

4.5 Amplificação Eletrônica

A relação da saída para entrada num sinal eletrônico condicionado é referida como ganho. Denomina-se razão de amplificação quando a saída for maior que a unidade de entrada, ou atenuação se o oposto. Estes valores podem ser definidos em termos de voltagem, corrente ou potência.

Algumas formas de amplificação são quase sempre usadas em circuitos para medições mecânicas. Na maioria dos casos em que transdutores mecânico ou elétrico são usados, o

sinal enviado para entrada analógica é em volts. Normalmente o nível disponível de voltagem no transdutor é muito pequeno, por isso a amplificação é usada para aumentar o nível da voltagem para que a análise possa ser realizada.

O amplificador operacional aceita duas entradas e devolve a diferença de voltagem aplicada na entrada, a voltagem de saída é o produto do ganho do amplificador. O sinal de saída é limitada pela alimentação do sistema, conforme as diferenças de voltagem aumentam, se a diferença fica muito grande a saída satura próximo de um destes valores e se a voltagem continuar aumentando o valor se manterá constante. Contudo, como o amplificador operacional não é ideal, existe uma pequena queda de tensão no estágio final dele e a saída não chega até os valores de tensões de alimentação. Deste modo, dependendo da fabricação e da resistência da carga, amplificadores alimentados com uma tensão de +/-5V sofrerão saturação dos seus sinais aproximadamente em +/-3,8V [Beckwith et ali, 2006].

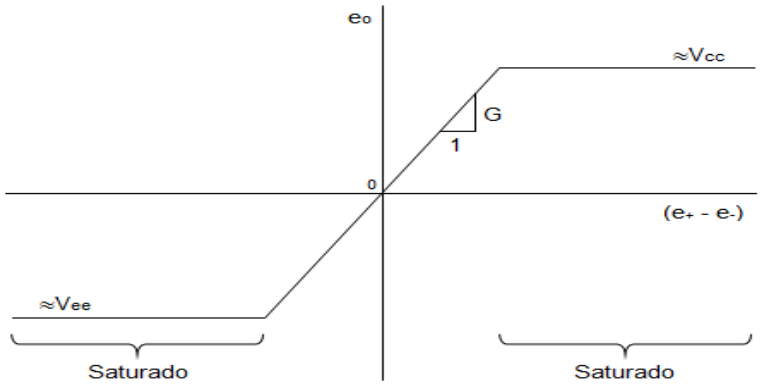

Figura 4.3 – Saída amplificador operacional

5. INSTRUMENTRAÇÃO

Primeiramente foi caracterizado o impacto a ser realizado no equipamento. A análise do impacto foi realizada utilizando o acelerômetro Brüel & Kjaer 4338, e com a utilização de um osciloscópio se obteve a caracterização do movimento de um soco. É necessária a análise da frequência natural da célula de carga, para que a mesma não afete os resultados se a frequência do impacto se aproximar da frequência natural das células. A calibração das células de cargas foi realizada de forma direta com a utilização de uma máquina de tração (EMIC DL-2000) com célula de carga de capacidade de 5 kN (EMIC CCE5KN).

5.1 Caracterização do impacto

Para a caracterização do impacto foram feitos socos em uma superfície emborrachada. Para determinar as características do impacto proveniente deste golpe foi utilizado o acelerômetro Brüel & Kjaer 4338 no punho. Com a utilização do osciloscópio é possível analisar o sinal obtido da aceleração no punho, como mostra a figura 5.1.

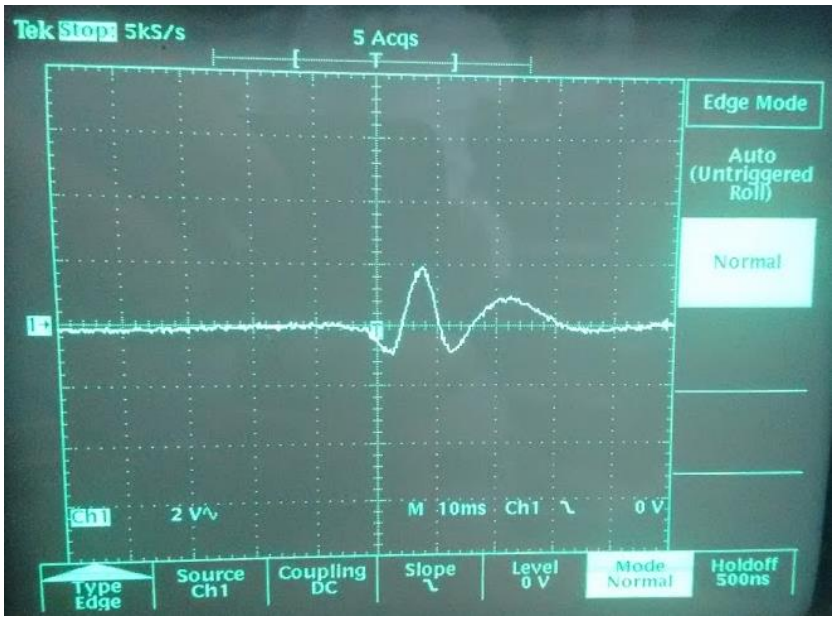

Figura 5.1 – Aceleração do impacto do soco

O gráfico do osciloscópio ilustra que a duração de impacto é de mais ou menos 10 ms. O resultado obtido no osciloscópio com o acelerômetro é semelhante ao encontrado em outros trabalhos que cita que a duração do choque impulsivo tem uma duração da ordem de 10 ms [Nakayama, 1966]. E que a faixa da frequência característica destes movimentos varia de 0,5 até 2 Hz [Souza, V. A., 2002].

5.2 Frequência natural da célula de carga

Para realizar a medição da frequência natural, pode-se utilizar um *shaker* eletrodinâmico ou um martelo de impacto. Para o primeiro caso não foi possível realizar a análise devido a célula de carga ser muito pequena. Então para a análise da frequência natural utilizou-se o método "*bump test*".

"*Bump Test*" é um método simples para análise da resposta modal estrutural de uma máquina ou estrutura. Quando impactada o elemento irá vibrar em uma ampla faixa de frequências. Quando estas frequências coincidem com a frequência natural do elemento, as condições de ressonância se atenderão resultando em uma vibração maior que as outras frequências presentes.

Conhecer a frequência natural da célula de carga é importante pois se formos medir frequências muito acima da capacidade da célula perderemos resolução no sinal e os valores não serão mais confiáveis. Os valores obtidos estão ilustrados na figura 5.2.

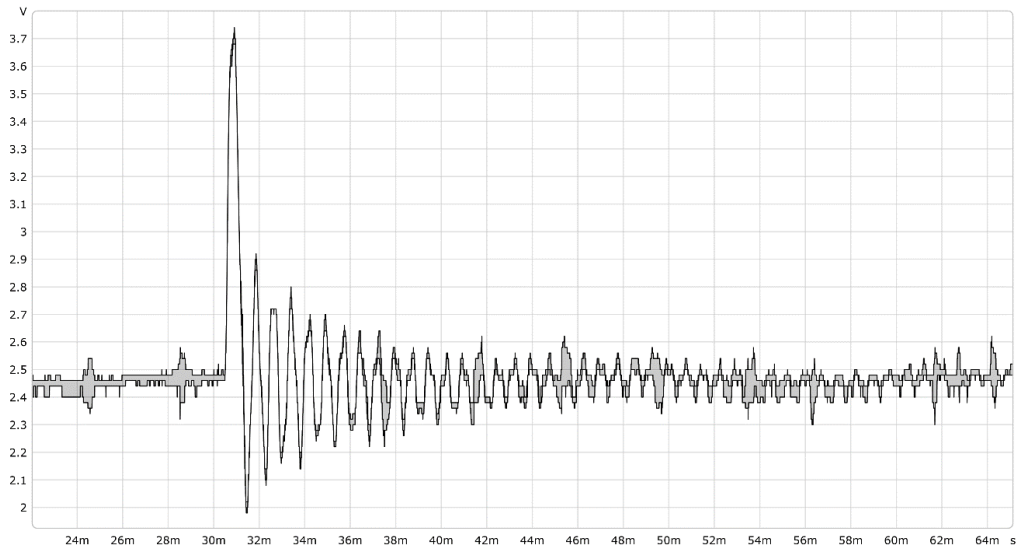

Figura 5.2 – Frequência da célula de carga

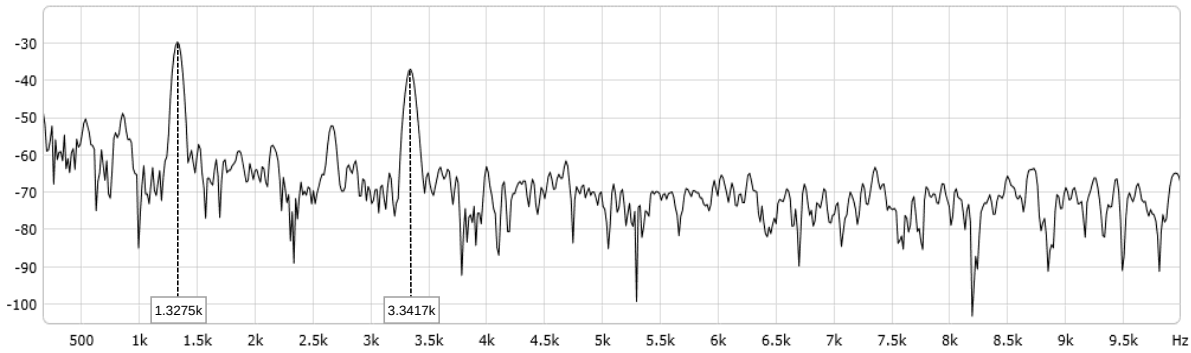

Figura 5.3 – Domínio na frequência da célula de carga

A frequência natural é facilmente calculada através da análise do período da vibração (T) e através da equação 5.1 podemos calcular a frequência natural, f_n.

$$f_n = \frac{1}{T} = \frac{n}{t_{m+n} - t_m} \tag{5.1}$$

Onde f_n é a frequência natural, T é o período, t_m é o tempo da onda (m) selecionada e t_{m+n} é o tempo da enésima onda após a onda selecionada.

O segundo pico possui os valores de 2,92 V e 31,864 ms e o quarto pico possui 2,8 V e 33,392 ms, uma diferença de 0,764 ms entre os dois. O segundo vale possui os valores de 2,08 V e 32,296 ms e o terceiro vale possui 2,16 V e 32,968 ms, uma diferença de 0,75 ms entre os dois. Aproximadamente uma frequência natural de 1.300 Hz, muito semelhante aos valores referentes ao domínio frequência, conforme mostrado na figura 5.3. Com a caracterização do impacto feito anteriormente notou-se que a frequência do impacto é muito menor que a frequência natural da célula de carga, suas medidas se encontram no alcance linear da célula de carga, então, não existe a preocupação de o sistema entrar em ressonância resultando no erro das medições.

Pode-se assegurar que o transdutor não terá erros consideráveis nem a necessidade de correção posterior de dados em função das excitações até uma frequência de 520 Hz, ou seja, aproximadamente 40% da primeira frequência natural, valor citado como referência para aplicação de cargas dinâmicas em células de carga [Doz et al., 1990]

6. EQUIPAMENTO

As células de cargas foram montadas sobre uma placa de alumínio para que o equipamento seja mais resistente e as medições não serem afetadas. As células foram fixadas sobre a superfície de alumínio através de parafusos facilitando sua substituição e montagem. Sobre as células de carga foi colocada outra chapa de alumínio. Está por sua vez terá seu eixo normal livre para que o deslocamento da placa permita as deformações das células de carga. Sobre esta chapa tem uma placa de borracha para o amortecimento do impacto. A borracha protegerá a mão do praticante que aplicará os socos sobre o equipamento. A figura 6.1 mostra o equipamento montado.

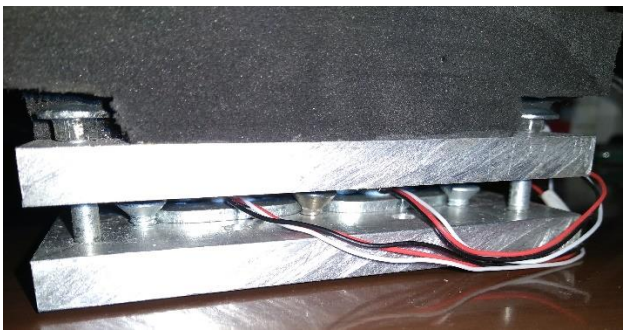

Figura 6.1 – Foto lateral do equipamento

6.1 Micro controlador Arduino

Arduino é uma plataforma eletrônica aberta, com o intuito de possuir um *hardware* e *software* de fácil utilização. Sua linguagem de programação é semelhante a C/C++. Ele pode ser ligado a uma fonte externa funcionando como um micro controlador com suporte à entrada e saída de dados ou pode ser conectada diretamente ao computador.

O Arduino utilizado para este projeto foi o Arduino UNO, sua especificação técnica está em anexo na tabela A1, ele utiliza o microprocessador ATmega328P de 16 MHz, conversor de 12 bits para entradas de 0-5 V [Nussey, 2013]. O Arduino contém 14 pinos digitais de entrada/saída que se podem converter seis deles como saídas PWM, 6 entradas analógicas, conexão USB, conector de entrada de energia de 7 a 12 V e um botão de reinício.

As seis entradas analógicas, rotuladas de A0 até A5, cada uma delas oferecem 10 bits de resolução, ou seja, possui 1024 valores diferentes. Por padrão é medido de 0 V (aterrado) até 5 V.

6.2 Células de carga

As células de carga utilizadas são semelhantes as utilizadas em balanças convencionais, figura 6.2, elas são pequenas leves e baratas e possuem um limite de carga de 50 kg. As células de carga foram adquiridas pela internet e são de fabricação chinesa, suas características, fornecidas pelo vendedor, estão na tabela A2 nos anexos. Com uma configuração de quatro células em paralelo, aumentamos este limite para 200 kg. Cada célula de carga possui um par de extensômetros de resistência elétrica já configurada em meia ponte.



Figura 6.2 – Célula de carga

6.3 Amplificador AD620

Para amplificar o sinal oriundo das células de carga foi utilizado o circuito integrado AD620, por possuir uma taxa de aquisição de dados elevada. Seu ganho é ajustável por um resistor colocado externamente e pode variar de 1 a 10.000 ohms, ele pode ser alimentado por uma carga de 2.3 V até 18 V, é um circuito integrado de oito pernas tornando mais fácil trabalhar com ele, e necessita uma corrente baixa pois ele trabalha com 1.3 mA.

6.4 Circuito empregado

O circuito completo do equipamento contém os seguintes componentes: quatro células de carga com extensômetros de 1.000 ohms, amplificador de sinal AD620, capacitor bipolar de 47µf 63 V, potenciômetro de 10k ohms, um resistor de 220k ohms e um resistor de 220 ohms. A função do capacitor é reduzir o ruído do sistema, o potenciômetro conectado ao sistema tem a função de ajustar a curva dos valores obtidos na ponte de Wheatstone, e o resistor foi escolhido a partir do cálculo de ganho desejado para utilizar a amplitude de sinal em toda capacidade de carga das células foi feito o seguinte cálculo disponibilizado no *datasheet* do AD620:

$$R_G = \frac{49.4k\Omega}{G-1} \tag{6.1}$$

Onde Rg é a resistência utilizada em conjunto com o amplificador conectado nas pernas 1 e 5, e G é o ganho desejado. Como o arduino UNO permite uma resolução de 1024 unidades, o ganho será calculado pela resolução permitida pela entrada analógica do Arduino. O amplificador reduzirá esta resolução por suas características, permitindo trabalhar em uma margem de 700 unidades. Para utilizarmos toda a resolução possível deve ser possível medir 2000 N em 700 unidades, com um cálculo simples, para utilizarmos toda a resolução disponível, obtemos que cada unidade analógica do Arduino deve representar cerca de 2,85 N, no minimo. Após testes com o amplificador escolheu-se utilizar um resistor de 220 ohms, resultando num ganho de 225,5, que gera 3,07 N de resolução no equipamento permitindo medir um pouco acima dos 2000 N desejados.

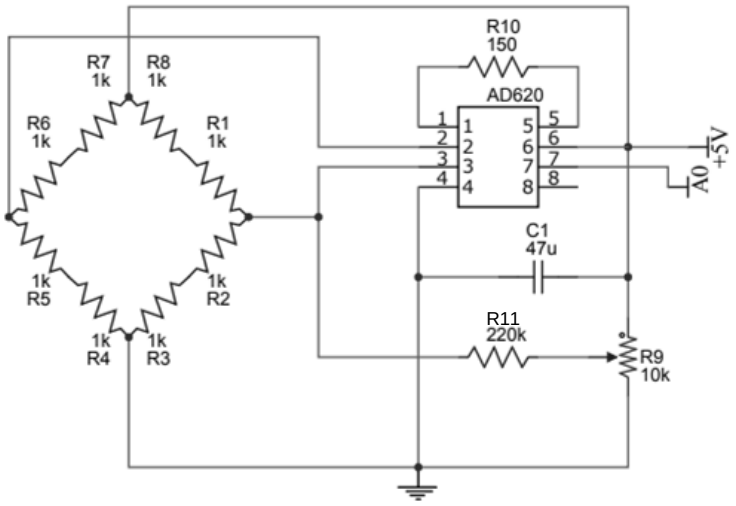

Figura 6.3 – Circuito elétrico do equipamento

A utilização do balanço paralelo diferencial, referente a figura 4.2(b), está representado pelas resistências R11 e R9, na figura 6.3, este potenciômetro com a resistência permite o deslocamento dos valores obtidos pelo Arduino, permitindo o ajuste do gráfico do valor inicial sem alterar os dados obtidos e calibrados. O potenciômetro deslocará o gráfico no eixo vertical e a resistência R11 muda a sensibilidade de seu ajuste. Através do potenciômetro

representado pelo R9, é forçada uma quantidade ajustável de corrente através do resistor R11 que aumenta ou diminui a tensão correspondente até a ponte seja zerada, resultando um ajuste zero através do potenciômetro [Franco,2002].

6.5 Calibração

A calibração foi realizada em uma máquina de tração já calibrada e configurada para que o dispositivo receba uma carga de compressão. O dispositivo foi fixado em sua parte central para ter um carregamento uniforme em todas as células de carga. Para o início dos testes se ajustou a máquina para que estivesse quase tocando o dispositivo. Ajustou seu sinal analógico, pelo potenciômetro, para começar as medidas com um valor de 150. Para as medições se comandou a máquina para realizar cargas lentamente, e parando a cada 100 N, a cada parada, mantendo carregamento fixo, se iniciou a coleta de dados por um período até conseguir pelo menos 5000 pontos. Foram registrados os pontos centrais, para que não haja erro na coleta de dados, obtendo a tabela A3 nos apêndices.

Para a calibração direta aplica-se um carregamento conhecido e registra-se o valor obtido pelas células de carga.

Foi realizada a média dos pontos adquiridos devido ao ruído gerado pelo equipamento ser elevado durante os ensaios na máquina de tração. É possível ver o ruído na figura A1 do apêndice, assume-se que seja devido a interferências eletromagnéticas geradas pela máquina de tração e ruídos causados pelo próprio equipamento. O ruído foi filtrado com a utilização de um capacitor para filtragem do sinal e para reduzir oscilação da corrente. Para reduzir a interferência magnética causada pela máquina de tração utilizou-se um revestimento de papel alumínio nos componentes eletrônicos do equipamento, funcionando como uma gaiola de Faraday. E para remover o ruído causado pelo contato com a máquina foi utilizado um aterramento na carcaça do equipamento de medição, que remove qualquer corrente descarregada sobre o equipamento projetado. Mesmo com estas prevenções nota-se que o desvio padrão é considerável, mas apenas para situações onde há um alto ruído externo como a máquina de tração, em seu uso normal o ruído é quase nulo. A calibração estática se aplica muito bem para esta célula de carga pois a frequência de interesse é muito menor que a frequência natural calculada anteriormente no item 5.2.

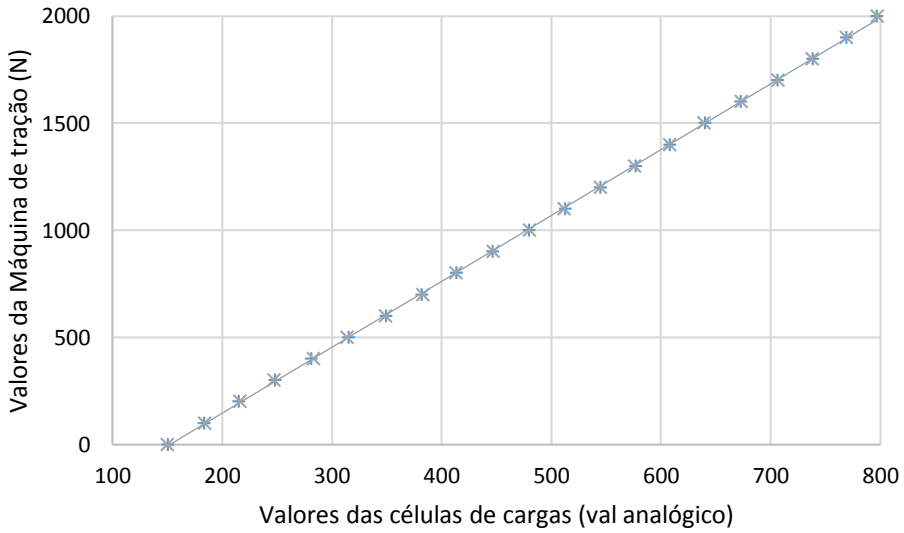

Figura 6.4 – Curva de calibração do equipamento

A equação da curva de calibração é y(x) = 3,0747x + 468,56, para um coeficiente de determinação de r^2 = 0,9999, foram utilizados 21 pontos para criar a curva de calibração, mostrada na figura 6.4.

6.6 Aferição do equipamento de treino

Para a aferição e estudo do comportamento do equipamento de treino, chamado *makiwara,* ilustrado na figura 6.5, utilizou-se uma máquina de ensaios universal. Foi medida a força aplicada no eixo normal da sua área de impacto com a deformação das placas de madeira até seu contato.



Figura 6.5 – *Makiwara* de parede

O modelo do equipamento de treino é uma versão reduzida do equipamento convencional, ele se trata de um bloco de madeira com cortes de diferentes profundidades e espessuras. Dependendo da força aplicada, ele sofrerá deformação até que uma placa de madeira encoste na próxima. No seu uso normal, as placas se deslocarão em alta velocidade devido ao impacto do soco, resultando no contato entre as placas de madeira. É possível escutar claramente o som do choque. O praticante procura consegui com que o maior número de placas batam ouvindo seus múltiplos estalos.

Ao fixar o equipamento de treino se cuidou para que a área de impacto ficasse na posição mais perpendicular possível na máquina de ensaio. Aplicou-se a força com o deslocamento manual da garra superior da máquina de ensaios gradualmente até que as placas de madeira do *makiwara* encostassem. Este contato foi notado manualmente ao colocar um pedaço de folha entre as placas, no momento que a folha ficasse presa se anotava o valor da força da máquina de ensaios. Realizou-se este mesmo ensaio para o contato de todas as placas de madeiras múltiplas vezes obtendo a tabela 6.2.

Tabela 6.2 – Ensaio de compressão sobre *makiwara*

Número de ensaios	Contato do primeiro corte (N)	Contato do segundo corte (N)	Contato do terceiro corte (N)
1	500	3800	7300
2	520	2700	8000
3	500	3200	8000
4	670	3500	8200
5	600	-	-
6	600	-	-

A variação dos resultados se dá principalmente pelo material contido no equipamento, trata-se de um bloco de borracha, normalmente utilizado para não machucar o praticante na aplicação dos golpes.

Após análise apenas do equipamento de treino, foram realizados novos ensaios junto com o equipamento projetado para aferição de dados e para obter um comparativo para os ensaios dinâmicos na situação para medir o impacto do soco. Para este ensaio se seguiu praticamente a mesma configuração do ensaio anterior, mas com a fixação do dispositivo

projetado entre a área de impacto do equipamento de treino e a garra superior da máquina de ensaios. Como o dispositivo e o equipamento de treino estão em séries eles sofrerão as mesmas forças.

Com o ensaio dos dois equipamentos juntos foram obtidos valores de 650 N medidos na máquina de tração e 660 N nas células de carga do equipamento projetado para o contato no primeiro corte da madeira, um valor próximo ao obtido nos ensaios com somente o equipamento de treino. No apêndice a figura A2 mostra os valores obtidos nos ensaios estático da célula de carga. Não foram ensaiados os contatos seguintes pois eles ultrapassam a capacidades das células de cargas do equipamento projetado. Estes valores deverão ser os mesmos quando utilizarmos o equipamento para medir o impacto proveniente dos socos, ou qualquer outro golpe aplicável no equipamento.

7. MEDIÇÕES EXPERIMENTAIS

Para a medição dos valores de força do impacto o equipamento de treino foi fixado em sua posição normal de uso na parede, posicionando a superfície de impacto próxima a altura do peito. Após a fixação do equipamento de treino na parede, prendeu-se o dispositivo projetado em sua área de impacto utilizando três braçadeiras, conforme a figura 7.1. Após sua fixação conectou-se o Arduino diretamente ao computador, e se posicionou a câmera na posição para a filmagem lateral dos testes. Foram desferidos os golpes e realizada a aquisição de dados, cuidando que os golpes fossem realizados o mais perpendicularmente possível com a área de impacto.

Para a validação dos dados, procurou-se realizar o soco na faixa medida pelo ensaio na máquina, para confirmar se os valores obtidos no impacto são semelhantes aos valores no ensaio estático. Para a confirmação do choque entre uma placa de madeira a outra se fez uso de uma câmera fotográfica com capacidade de filmagem de 60 fps, 1 frame a cada 16 ms, além do auxílio sonoro do impacto de uma placa de madeira à outra.



Figura 7.1 – Equipamento em repouso, leve deflexão e contato entre placas

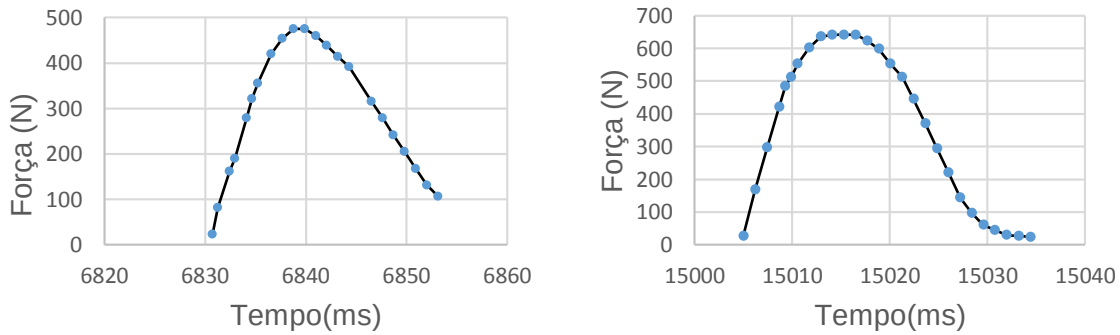

Figura 7.2 – Gráficos impacto com leve deflexão e contato entre placas

Os gráficos da figura 7.2 foram obtidos através da conexão direta do Arduino com o computador. Foi utilizado o programa “Telemetry Viewer v0.3” para a visualização gráfica dos resultados em tempo real e utilizou-se o programa do Arduino para coletar os dados para a realização dos gráficos. Nos gráficos pode-se notar que a taxa de aquisição de dados é suficiente para analisar a curva do impacto. Com uma aquisição de aproximadamente 1 ponto por ms ou 1000 pontos por segundo, ou seja, uma taxa de amostragem de aproximadamente 1000 Hz.

Conforme os testes, ao regular a força do golpe obteve-se os valores conforme a Figura 7.2. Ao compararmos as forças testadas no ensaio estático da *makiwara* de parede, foi possível comparar os valores obtidos pela célula de carga com o contato da placa analisando as imagens obtidas através da câmera, e o som coletado pela mesma. Para forças próximas de 500 N há uma aproximação das placas, mas sem o contato entre elas conforme a imagem central da figura 7.1, e para forças superiores a 600 N há o contato da placa, como mostra a terceira imagem da figura 7.1. Nessa situação nota-se o som do choque das madeiras. Observa-se que os ensaios estáticos e os ensaios dinâmicos obtiveram valores semelhantes aos valores de força para o contato da primeira placa do *makiwara* de parede.

7.1 Equipamento em uso

Com o auxílio de colegas da academia, foi realizada uma coleta de dados de praticantes de caratê. Para coleta de dados cada pessoa realizou diversos socos no equipamento. Após a análise das filmagens e dos valores obtidos, organizaram-se os valores obtidos e foi realizada a média da força de cada atleta e a dispersão dos valores, conforme mostra a tabela 7.1. Estes valores serão comparados com valores de outros trabalhos referentes ao mesmo assunto.

Tabela 7.1 – Dados obtidos com equipamento

Atletas	Força (N)	Média	Desvio Padrão	Atletas	Força (N)	Média	Desvio Padrão
1	1087	1143,4	83,05601	3	1075	1169,4	157,5652
	1139				1231		
	1059				1419		
	1274				1081		
	1158				1041		
2	896	1034	124,2236	4	1262	1213	149,9083
	1093				1035		
	1044				1253		
	933				1099		
	1204				1416		

A tabela 7.1 mostra valores obtidos do pico de impacto com a utilização do equipamento projetado. A figura A3, no apêndice, mostra o gráfico dos valores obtidos referente a um dos socos de cada praticante. Este gráfico mostra os valores da força durante o tempo de impacto. Para o cálculo do impulso do soco é necessário integrar estes valores em questão do tempo, se analisaram o impacto dos atletas 3 e 4 que obtiveram os melhores resultados. Para fazer o cálculo do impulso do soco aproximou o gráfico do soco obtido para equações potenciais que melhor se adequavam aos gráficos, com o auxílio do programa Advanced Grapher 2.2 se obtiveram equações que melhor se ajustavam à curva. Ao integrar estas equações no tempo obtivemos valores de aproximadamente 17 N.s para ambos atletas.

Se compararmos os resultados com trabalho mais recente [Gulledge e Dapena,2007], nota-se que os valores dos picos de impacto são bem próximos aos valores 1450 N deste trabalho, mas os valores de impulso de 37.7 N.s são maiores que encontrados neste trabalho.

Em um trabalho de outro autor [Girodet *et ali,* 2005], se encontraram forças maiores de 1745 N mas impulsos menores de 13,7 N.s.

Ao compararmos os valores resultantes com o trabalho realizado por Souza, 2002, nota-se certa diferença entre os valores obtidos, já que os valores encontrados por este autor variam numa faixa de 1500 N até 2200 N. Isso se deve ao fato do equipamento utilizado neste trabalho ser diferente ao *makiwara* tradicional, o *makiwara* utilizado nos trabalhos anteriores são do modelo tradicional, de forma simples, é uma tabua colocada verticalmente em relação ao chão engastada em sua parte inferior, podendo ser fixada de outras formas. Neste projeto se utilizou um *makiwara* de parede para fazer a comparação dos resultados, e o equipamento em si é relativamente pequeno ficando muito próximo da região de fixação. Isso provavelmente gerou uma diminuição dos valores obtidos pois os praticantes necessitariam de um tempo para se adaptarem ao novo equipamento.

E se comparados com autores mais antigos [Nigg, 1994; Nakayama, 1966; Walker 1975; Wilk et ali, 1982] sua diferença se tornariam ainda maiores, valores geralmente variam numa faixa de 2900 N até 4900 N. Com o detalhe que os atletas utilizados para o estudos são normalmente mais experientes com um tempo de pratica muito superior e muito provavelmente uma frequência de treinos muito maior.

8. CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

A proposta inicial do trabalho foi projetar um equipamento que permitisse aos atletas compararem seus socos para o desenvolvimento de suas técnicas. O produto final possui um custo baixo, todos os materiais foram adquiridos facilmente e de uma forma relativamente rápida. A velocidade do Arduino e do amplificador permitiram uma taxa adequada de aquisição de dados permitindo a análise do pico de força e também permite calcular o impulso.

Ao compararmos os resultados com o trabalho referente ao impacto e risco de lesões [Souza, 2002], notou-se certa diferença nos resultados das forças dos golpes. Mas se compararmos todos os autores que estudam este tipo de impacto notou-se uma variedade de resultados. Pois cada estudo possui suas peculiaridades, seus materiais e métodos acabam afetando os valores finais dificultando a comparação de seus resultados.

A proposta apresentada sempre pode ser aprimorada nos mais diferentes tópicos do projeto, como uma nova proposta de estrutura e desenho do equipamento permitindo uma análise mais profunda do golpe, e que permita mostrar ou remover o erro da imprecisão do golpe quando ele aplicado fora do centro do equipamento. A análise de dados pode ser mais completa, devido a proposta inicial do trabalho que foi a analise apenas do pico do impacto conforme feito na dissertação de mestrado [Souza, 2002].

Também há a possibilidade da otimização a partir do desenvolvimento dos componentes utilizados, que na sua maioria se desejou utilizar os componentes que sejam mais econômicos para o projeto. Ao alterarmos a forma de aquisição modificando o Arduino para um elemento com maior capacidade e que permita uma maior velocidade na aquisição de dados, e a utilização de uma placa de circuito impresso para reduzir ruído causado por conexões de pinos. A substituição ou desenvolvimento de células de cargas para aumentar sua capacidade e precisão tendo em conta as especificações e o valor total do produto, ou a alteração de célula de carga para sensores piezo elétricos.

Conclui-se que a proposta inicial do projeto foi alcançada pois ele atende aos requisitos mínimos e que possa auxiliar o praticante de artes marciais a acompanhar seu desenvolvimento e analisar imediatamente o resultado de seu golpe e avaliar se o movimento aplicado foi correto e compará-los com movimentos subsequentes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Analog Devices; "**AD 620 datasheet**", http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD620.pdf. Acessado em 17/11/2017.

Beckwith, T. G.; Marangoni, R. D.; Lienhard, J. H.; "**Mechanical measurements**", Person Ed., 6th Edition, 2006.

Doz, G.; Tamagna, A.; Rieira, J.D.; "**Subsidios para o projeto da célula de carga sob solicitações dinâmicas**", Porto Alegre:CPGEC- UFRGS, 21p., (Caderno de Engenharia, 41), 1990.

Farahbod, F.; "**TelemetryViewer_v0.4.jar**", http://farrellf.com/TelemetryViewer/, Acessado em 17/11/2017.

Franco, S.; "**Design with Operetional Amplifiers and Analog Integrated Circuits**", Editora McGraw-Hill, 3rd Edition, 2002.

Girodet, P.; Vaslin, P.; Dabonneville, M.; Lacouture, P; "**Two-dimensional kinematic and dynamic analysis of a karate straight punch**", Computer Methods in Biomechanics and Biomedical Engineering, pp117-118, 2005.

Gulledge, J. K.; Dapena, J.; "**A comparison of the reverse and power punches in oriental martial arts**", J. Sports Sci., pp189-196, 2008.

Nakayama, M.; "**Dynamic Karate**", Kodansha International, Tokyo, Japão, 1966.

Nigg, B.M.; Herzog, W.; "**Biomechanics of the Musculo-Skeletal System**", University of Calgary, Alberta, Canada, 1994.

Nussey, J.; "**Arduino for dummies**", For Dummies Ed., Ed.1, 2013.

Rao, S.; "**Mechanical Vibrations**", Pearson, 5ª Edição, 2010.

Seto, W.W.; "**Theory and Problems of Mechanical Vibration**", MacGraw Hill do Brasil, Rio de Janeiro, 1964.

Souza, V. A.; "**Análise de impacto e risco de lesões no segmento superior associadas a execução da técnica de gyaku tsuki sobre makiwara por praticantes de karate do estilo shotokan**", Dissertação de Mestrado, PROMEC-UFRGS, 2002.

Walker, J.D.; "**Karate strikes**", American Journal of Physics, pp845-849, 1975.

Wilk, S.R.; Feld, M.S.; MacNair, R.E.; Wilk, S.R.; "**The Physics of Karate**", American Journal of Physics, pp783-790, 1982.

ANEXOS

Tabela A1 – Especificações técnicas Arduino UNO.

Microcontroller	ATmega328P
Operating Voltage	5V
Input Voltage (recommended)	7-12V
Input Voltage (limit)	6-20V
Digital I/O Pins	14 (of which 6 provide PWM output)
PWM Digital I/O Pins	6
Analog Input Pins	6
DC Current per I/O Pin	20 mA
DC Current for 3.3V Pin	50 mA
Flash Memory	32 KB (ATmega328P) of which 0.5 KB used by bootloader
SRAM	2 KB (ATmega328P)
EEPROM	1 KB (ATmega328P)
Clock Speed	16 MHz
LED_BUILTIN	13
Length	68.6 mm
Width	53.4 mm
Weight	25 g

Tabela A2 – Características da célula de carga.

Capacidade de peso	até 50kg
Potência nominal	1,0 mV/V
Temperatura efeito sobre o produto	0,02% FS / ° C
Temperatura efeito sobre Zero	0,02% FS / ° C
Seguro de Sobrecarga	120% FS
Final de Sobrecarga	150% FS
Temperatura	20 ~ 65 ° C;
Excitação Tensão	5VDC
Tensão máxima de trabalho	8VCC
Nível de proteção	IP65
Material	Liga de alumínio
Extensão dos fios	40cm
Modo de conexão dos fios:	Vermelho: sinal Branco: negativo Preto: positivo
Dimensões (CxLxA)	34x34x8,7mm
Peso	20g

APÊNDICES

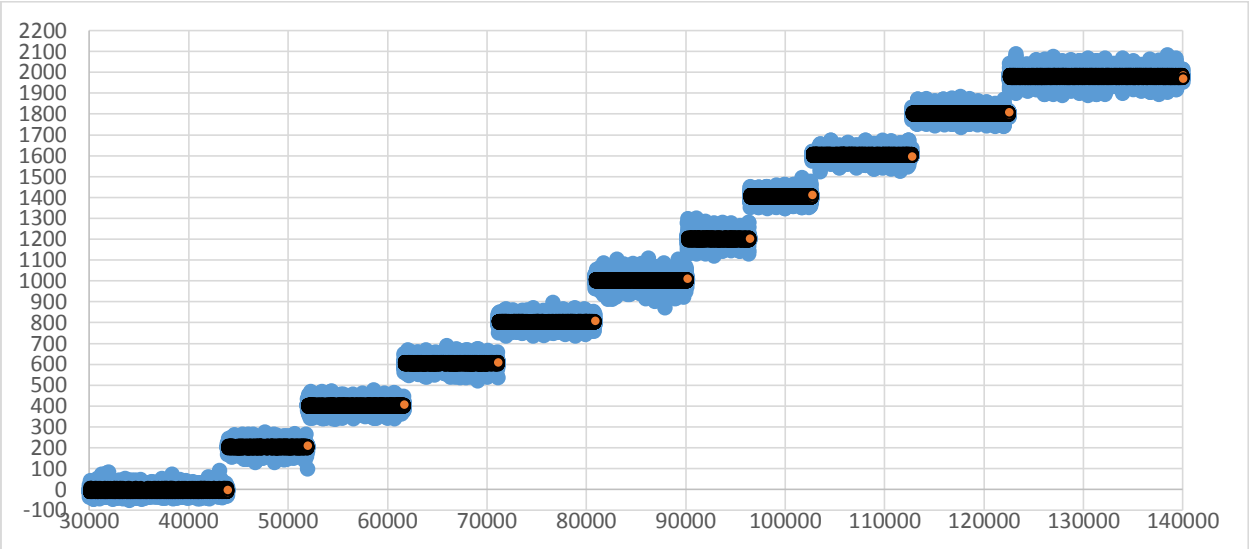

Figura A1 – Ensaio do equipamento na máquina de tração em Newtons

Tabela A3 – Dados da calibração

Valor Máquina de tração (N)	Medida inst. (analógico)	Média (1000 pontos)	Desvio padrão (1000 pontos)	Valor Máquina de tração (N)	Medida inst. (analógico)	Média (1000 pontos)	Desvio padrão (1000 pontos)
0	150	150,3	2,76	1100	512	512,5	3,69
100	184	183,7	3,58	1200	545	544,7	3,86
200	216	215,3	3,19	1300	576	576,9	3,96
300	247	248,0	2,84	1400	608	608,3	2,80
400	283	281,4	4,03	1500	639	640,0	3,73
500	314	315,3	3,58	1600	673	672,6	5,53
600	349	349,2	2,80	1700	707	706,5	6,25
700	383	382,1	2,99	1800	738	738,6	3,09
800	413	413,7	3,16	1900	769	769,1	3,03
900	447	446,8	3,49	2000	797	796,7	2,73
1000	480	479,6	3,58				

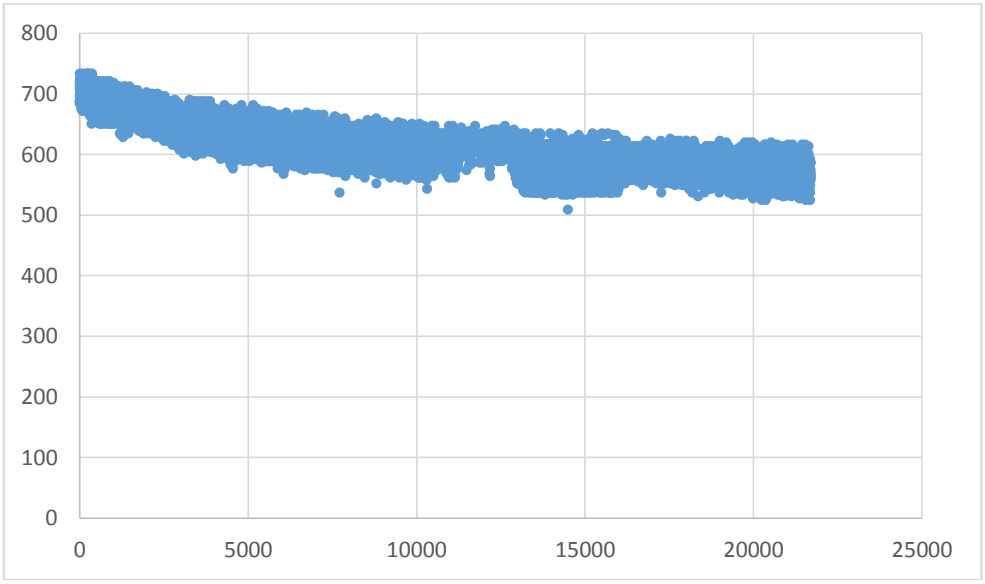

Figura A2 – Ensaio do equipamento com *makiwara* de parede para contato das primeiras placas de madeira

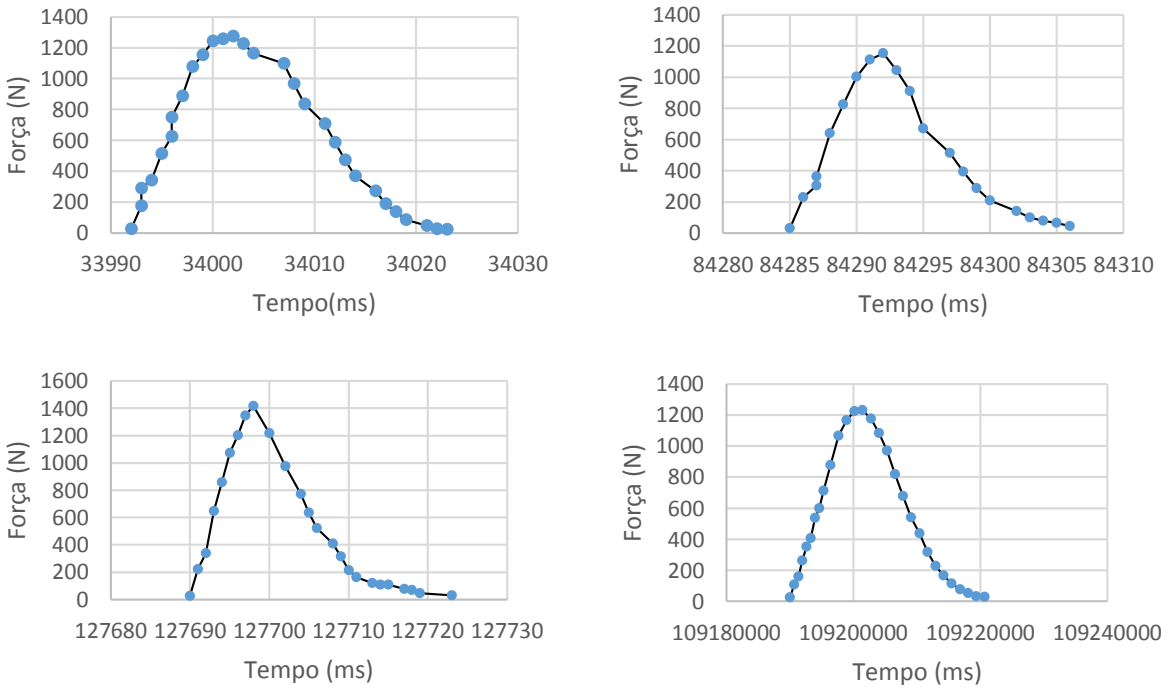

Figura A3 – Gráfico dos ensaios no equipamento com os 4 atletas respectivamente

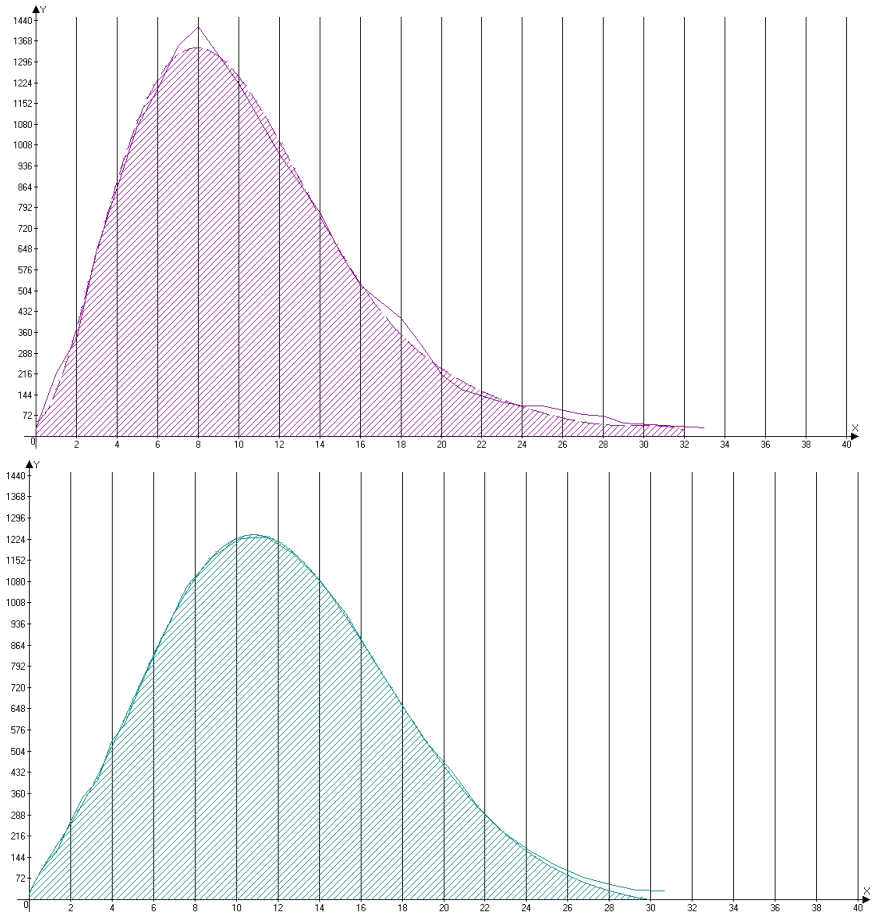

Figura A4 – Analise de impulso dos atletas 3 e 4