

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

PABLO LEONARDELLI

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE
PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL DE PEQUENO PORTE
COM SISTEMA *DATALOGGER***

Porto Alegre

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE
PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL DE PEQUENO PORTE
COM SISTEMA *DATALOGGER***

Projeto de diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para graduação em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: Prof. Dr. Alexandre Balbinot

Porto Alegre

2013

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

**DESENVOLVIMENTO DE UM PROTÓTIPO DE
PLATAFORMA DE FORÇA MÓVEL DE PEQUENO PORTE
COM SISTEMA *DATALOGGER***

Projeto de diplomação apresentado ao
Departamento de Engenharia Elétrica da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos
requisitos para graduação em Engenharia Elétrica

ORIENTADOR: _____

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS

Doutor pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto
Alegre, Brasil

Banca examinadora:

Prof. MSc. Tiarajú Vasconcellos Wagner, UFRGS

Mestre pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Porto Alegre, Brasil

Eng. Rômulo Sehnem, UFRGS

Graduado pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul– Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre

2013

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais, por todo apoio e conselhos dados que foram fundamentais durante toda graduação, e principalmente durante o trabalho. Dedico também ao meu irmão e meus amigos por todo incentivo. Sou eternamente grato por tudo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao professor Dr. Alexandre Balbinot pelo empenho dispendido na orientação deste trabalho.

Ao professor MSc. Tiarajú Vasconcellos Wagner e à Rômulo Sehnem por aceitarem o convite para banca examinadora e disporem de tempo para leitura e avaliação do trabalho.

Aos colegas do LAMECC pela ajuda e apoio e principalmente à Eder Dorneles pelo apoio e compreensão.

Ao CNPq pelos recursos disponibilizados pelo projeto de nº 454308/2012-4, que contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço finalmente à Universidade Federal do Rio Grande do Sul e aos professores por me disponibilizar um conhecimento e aprendizado de qualidade.

RESUMO

Este trabalho consiste no projeto e desenvolvimento de uma plataforma de força móvel com quatro células de carga engastada em sapato masculino para medir a força de reação do solo durante a marcha humana com aquisição de dados via microcontrolador e armazenamento dos mesmos via cartão do tipo SD. O projeto da célula de carga é baseado em uma estrutura de viga duplamente engastada para suportar até 100kg. Para o projeto e desenvolvimento da plataforma foi utilizada uma configuração de ponte de Wheatstone para célula de carga com dois extensômetros, um ativo e outro passivo, de $(350 \pm 0,5)\Omega$. Projetou-se um condicionador de sinais composto por um amplificador diferencial de ganho 671,7 V/V e por um filtro Butterworth de quarta ordem de frequência com corte em 5Hz e um ganho de 10 V/V. A incerteza referente ao ganho calculado é de 8% e da sensibilidade das células é de 1,25%. Primeiramente, realizou-se simulações estáticas e dinâmicas das células de carga via software *SolidWorks 2011*. Depois destas simulações as mesmas foram usinadas e sensorizadas com extensômetros. Com as células prontas, realizaram-se ensaios de calibração estática e dinâmica com aquisição de dados via software *LabVIEW 2011* e os módulos *NI-9205* e *NI-9234*, além de um ensaio de deformação com aquisição via módulo *NI-9237*, todos da empresa *National Instruments*. Por fim verificou-se o desempenho da plataforma de força com ensaios de marcha humana, com um indivíduo que pesa aproximadamente 73kg. Como resultado das simulações estáticas verificou-se que as células de carga suportam uma carga de até 360kgF no domínio elástico. A deformação para uma carga de 80kg, na área onde os extensômetros foram colados, apresentou um resultado simulado de $297 \mu m/m$, muito próximo do encontrado experimentalmente, que foi de $311 \mu m/m$. Os ensaios de calibração estática apresentaram um erro de linearidade abaixo dos 7% para todas as oito células de carga. Por fim, os ensaios de marcha humana apresentaram as típicas curvas do tipo “M” referenciadas na literatura.

Palavras-chave: Marcha Humana, Plataforma de Força, *Datalogger*, Célula de Carga, Biomecânica, Instrumentação.

ABSTRACT

This work consists of the design and development of a mobile force platform with four load cells imbedded in men's shoe to measure the ground reaction forces during human gait with DAQ microcontroller and store them via SD card type. The design of the load cell is based on a doubly clamped beam structure to support up to 100kg. For the design and development of the platform it was used a Wheatstone bridge configuration for load cell with two Strain-Gages, one active and one passive, of $(350 \pm 0,5)\Omega$. The designed signal conditioner comprising a differential amplifier gain 671.7 V/V and a fourth order Butterworth filter with cutoff frequency at 5 Hz and a gain of 10 V/V. The uncertainty calculated referring to gain is 8 % and to sensitivity of cells is 1.25%. Initially, were performed static and dynamic simulations of the load cells via SolidWorks 2011. After these simulations, the load cells were built and sensorised with Strain-Gages. With the load cells ready, were performed static and dynamic calibration tests with data acquisition modules NI-9205 and NI-9237, and a deformation test with the acquisition module NI-9237, all these modules are from National Instruments company. Finally, it was verified the performance of the force platform with human gait tests with an individual who weighs about 73kg. As a result of simulations it was found that static load cells to support a load, in the elastic region, of 360kgF. The deformation at a load of 80kg, in the area where the strain gages were glued presented a simulated result of 297 $\mu\text{m}/\text{m}$, very close to found experimentally of 311 $\mu\text{m}/\text{m}$. The static calibration tests showed a linearity error below 7 % for all eight load cells. Finally, tests on human gait presented the typical curves " M " type, referenced in the literature.

Keywords: Human Gait, Force Plataform, Datalogger, Load Cells, Biomechanical, Instrumentation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Definição de tensão normal.	16
Figura 2. Deformação de uma barra em uma direção.	17
Figura 3. Curva genérica tensão-deformação.....	18
Figura 4. Esboço do efeito Poisson em três dimensões.....	18
Figura 6. Exemplo genérico de um extensômetro do tipo folha.	20
Figura 7. Configuração de uma Ponte de Wheatstone.	21
Figura 8. Exemplo de configuração de uma célula de carga com um extensômetro ativo e sua correspondente ponte de Wheatstone.	24
Figura 9. Exemplo configuração de uma célula de carga de meia ponte com 2 extensômetros ativos e a correspondente ponte de Wheatstone.....	25
Figura 10. Exemplo de uma célula de carga configurada com quatro extensômetros ativos e sua correspondente ponte de Wheatstone.....	25
Figura 11. Evolução da força vertical durante uma corrida.	27
Figura12. Plataforma de força desenvolvida.....	28
Figura 13. Parte dos resultados obtidos por Piffer.	28
Figura 14. Plataforma de força desenvolvida.....	29
Figura 15. Diagrama de blocos do projeto proposto.	30
Figura 16. Modelo virtual da célula de carga proposta.	31
Figura 17. Dimensões da célula projetada com escala em [mm].	31
Figura 18. Célula de carga usinada.	32
Figura 19. Simulação de deformação da célula de carga.	32
Figura 20. Célula de carga com os extensômetros colados.....	33
Figura 21. Diagrama de blocos do condicionador.....	33
Figura 22. Circuito de alimentação do condicionador.	34
Figura 23. Circuito de tensão de referência.....	35
Figura 24. Circuito de ajuste de zero da ponte.	36
Figura 25. Circuito do primeiro estágio de ganho.....	38
Figura 26. Esquemático do filtro projetado.....	39
Figura 27. Resposta em frequência do filtro projetado.	40
Figura 28. Esquemático do filtro no <i>Proteus</i>	41
Figura 29. Resposta em frequência do sistema.	42
Figura 30. Placa de desenvolvimento <i>Arduino Nano</i>	43

Figura 31. Fluxograma utilizado.	44
Figura 32. Cadeia de Medidas desconsiderando-se os níveis de ruído.	45
Figura 33. Plataforma de força com as células engastadas.	46
Figura 34. Plataforma vista de um outro ângulo.	46
Figura 35. Placa de condicionamento	47
Figura 36. Sistema de condicionamento, aquisição de sinais e armazenamento de dados:	47
Figura 37. Estrutura utilizada e adaptada para realização dos ensaios:	48
Figura 38. Acelerômetro utilizado.	49
Figura 39. Simulação de deslocamento.	52
Figura 40. Simulação de tensão mecânica.	52
Figura 41. Simulação de deformação.	53
Figura 42. Primeiro modo de vibração.	54
Figura 43. Segundo modo de vibração.	54
Figura 44. Terceiro modo de vibração.	54
Figura 45. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 01.	56
Figura 46. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 02.	56
Figura 47. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 03.	57
Figura 48. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 04.	58
Figura 49. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 05.	58
Figura 50. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 05.	59
Figura 51. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 07.	60
Figura 52. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 08.	60
Figura 53. Ensaio de deformação.	62
Figura 54. Curva de tendência linear.	62
Figura 55. Resposta ao impacto	63
Figura 56. Densidade de potência do ensaio dinâmico.	64
Figura 57. Ensaio com a plataforma de força.	68
Figura 58. Segundo ensaio com as plataformas.	69
Figura 60. Plataformas de força durante os ensaios de marcha.	70
Figura 61. Plataformas de força durante os ensaios de marcha.	70
Figura 62. Ensaio de marcha humana subindo escadas.	72
Figura 63. Relação tempo <i>versus</i> tamanho de arquivo gerado.	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Valores típicos de extensômetros.	21
Tabela 2. Principais características do <i>CI REF02</i>	35
Tabela 3. Principais características e aplicações do <i>CI OPA037GP</i>	36
Tabela 4. Principais especificações do <i>CI INA126</i>	37
Tabela 5. Especificações do filtro projetado.	40
Tabela 6. Principais especificações do <i>Arduino Nano</i>	43
Tabela 7. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 01.	55
Tabela 8. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 02.	56
Tabela 9. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 02.	56
Tabela 10. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 04.	57
Tabela 11. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 05.	58
Tabela 12. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 06.	59
Tabela 13. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 07.	59
Tabela 14. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 08.	60
Tabela 15. Erros de linearidade das oito células de carga.	61
Tabela 16. Funções de transferência adquiridas.	63

LISTA DE ABREVIATURAS

Cartão SD – *Secure Digital Card*.

Conversor A/D – Conversor analógico digital.

Comunicação SPI – Interface serial periférica.

Portas I/O – Portas de entrada e saída.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	14
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	15
2.1. Célula de Carga e Extensimetria	15
2.1.1. Fundamentos Teóricos	15
2.1.2. Extensômetros	19
2.2. Ponte de Wheatstone	21
2.3. Introdução à Marcha Humana	26
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL.....	30
3.1. Projeto das células de carga	30
3.2. Projeto do circuito de condicionamento de sinal	33
3.3. Projeto da aquisição e armazenamento de dados	43
3.4. Cadeia de medidas.....	45
3.5. Montagem do sistema.....	45
3.7. Procedimentos utilizados para determinar as funções de transferência	48
3.8. Calibração dinâmica.....	49
3.9. Ensaio de Deformação	49
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	51
4.1. Simulações	51
4.1.1. <i>Simulação estática</i>	51
4.1.2. <i>Simulação dinâmica</i>	53
4.2. Levantamento das funções transferência e teste de linearidade (ensaios preliminares)	55
4.3. Ensaio de deformação	61
4.4. Calibração estática.....	62
4.5. Calibração Dinâmica	63
4.6. Análise de Incertezas.....	64

<i>4.6.1. Análise de Incertezas referentes ao ganho</i>	64
<i>4.6.2. Análise de Incertezas referente à tensão na ponte de Wheatstone</i>	65
<i>4.6.3. Análise de Incertezas referentes à sensibilidade da célula de carga</i>	66
4.7. Desempenho da plataforma de força	67
4.8. Diferencial do Sistema	71
4.9. Autonomia do Sistema	73
5. CONCLUSÕES	75
6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS	76
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEXOS	78
Anexo I – Código utilizado para programar o microcontrolador Arduino	78
Anexo II – Layout das placas de condicionamento e aquisição de sinal.	79
Anexo III – Circuito de condicionamento completo	80

1. INTRODUÇÃO

A locomoção bípede, ou marcha, é uma tarefa funcional que exige interações complexas e coordenação entre muitas das principais articulações do corpo, especialmente dos membros inferiores (ANN BARR & SHERRY BACKUS, 2003). A análise biomecânica do movimento humano tem se tornado uma importante ferramenta para a pesquisa e para o gerenciamento das condições ortopédicas e neurológicas. Tem havido um crescente interesse em realizar a análise do movimento em tempo real para promover um *feedback* instantâneo tanto para o paciente, quanto para o terapeuta (J. VAN DEN BOGERT *et al.*, 2013).

O estudo da marcha humana pode ser feito através da análise da força de reação do solo durante o ato de caminhar, para tal, faz-se uso de uma plataforma de força. Esta plataforma de força pode ser tanto uma superfície disposta de sensores a qual o indivíduo fica parado ou caminha sobre, chamada de plataforma de força fixa, ou pode ser uma plataforma de força móvel, onde um calçado é adaptado com uma ou mais células de carga para coletar dados de força durante a caminhada. Para contribuir nesta área e com diversos outros projetos do Laboratório IEE, este projeto tem como objetivo o desenvolvimento e a validação de uma plataforma de força móvel de porte reduzido para ser engastada em um calçado masculino, para coletar dados de força de reação do solo durante a marcha humana e armazená-los através de um sistema *Datalogger* com um cartão do tipo *SD*, para análise posterior. Este sistema apresenta uma inovação por proporcionar uma grande mobilidade nos ensaios, como os dados serão gravados em um cartão tipo *SD*, os ensaios de marcha humana podem ser estendidos para os mais variados ambientes.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Com o objetivo de uma melhor compreensão do presente trabalho, neste capítulo faz-se uma breve discussão e revisão de conceitos fundamentais sobre assuntos os quais serão abordados e que necessitam de um conhecimento prévio. Esta revisão e discussão de conceitos englobam células de carga, extensimetria, ponte de Wheatstone e uma pequena introdução sobre aspectos importantes referentes à marcha humana.

2.1. Célula de Carga e Extensimetria

O fenômeno da deformação elástica (devida a solicitações de tração, compressão, flexão torção, etc) é largamente explorado no desenvolvimento de dispositivos para medição de diversas grandezas (força, pressão, etc). Os dispositivos desenvolvidos especificadamente utilizados para a medição de forças que integram um elemento elástico (também chamado de elemento mola) ao qual está associado um sensor são chamados de células de carga (BALBINOT, 2013).

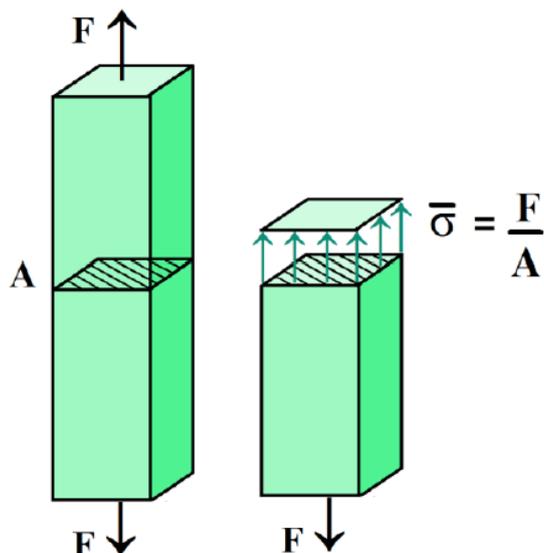
2.1.1. Fundamentos Teóricos

Sabe-se que um determinado corpo (uma barra cilíndrica, por exemplo), que sofre uma solicitação mecânica axial (F), normal a seu eixo longitudinal e possui uma área transversal (A), vide Figura 1, apresenta uma tensão mecânica (σ) que pode ser calculada dividindo-se a força ou solicitação mecânica aplicada, pela área da secção transversal do objeto, como mostra a Equação (1). Este cálculo pressupõe que a tensão é constante em toda a secção transversal:

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (1)$$

onde F representa a força ou carga aplicada [N]; A é a área transversal à força aplicada [m^2] e σ a tensão mecânica [N/m^2].

Figura 1: Definição de tensão normal.



Fonte: Adaptado por SEHNEM, 2013 de BEER& JHONSON, 2009.

Em 1678, Robert Hooke em experimentos com molas concluiu que as tensões mecânicas e as deformações específicas de um determinado material são proporcionais, enquanto não se ultrapassar o limite elástico, ou seja, observou uma relação linear entre tensão e deformação dentro do limite elástico de um material (SÉRGIO GOMES, 1980). Para uma dada mola a relação linear é dada pela Equação (2):

$$F = k \cdot x \quad (2)$$

onde F é a força dada em $[N]$, k é a constante elástica dada em $[N/m]$ e x a distância em $[m]$.

Matematicamente, a Lei de Hooke ainda pode ser expressa pela Equação (3):

$$\sigma = E\varepsilon \quad (3)$$

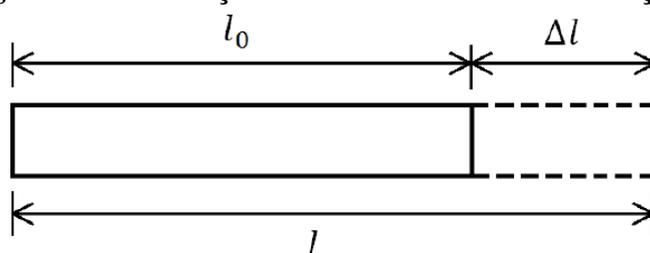
onde σ é a tensão mecânica em $[N/m^2]$; E é o módulo de Young ou módulo de elasticidade do material em $[N/m^2]$ e ε representa a deformação percentual do material [%].

Considerando uma barra de um determinado material de comprimento inicial l_0 , como o esboço da Figura 2, e deformação $\delta = l - l_0 = \Delta l$, a deformação percentual (ε) de um determinado material, em uma direção, é dada matematicamente dividindo-se δ por l_0 como mostra a Equação (4):

$$\varepsilon = \frac{\delta}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0} = \frac{l - l_0}{l_0} \quad (4)$$

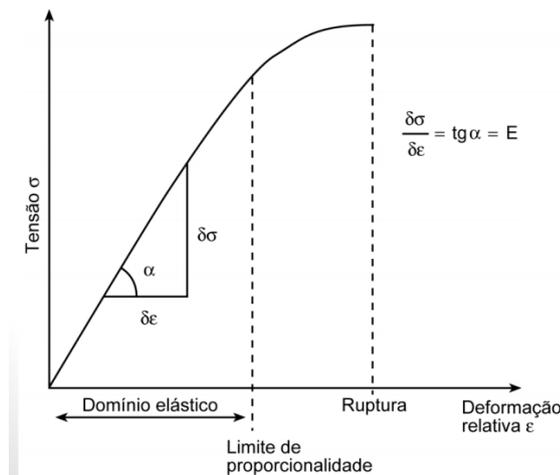
onde ε é a deformação percentual em [%], δ a deformação do material em [m], l_0 o comprimento inicial da barra em [m], l o comprimento final da barra em [m] e Δl a diferença de comprimento inicial e final da barra em [m].

Figura 2. Deformação de uma barra em uma direção.



Fonte: Adaptado por SEHNEM,2013 de HJELMSTAD, 2005.

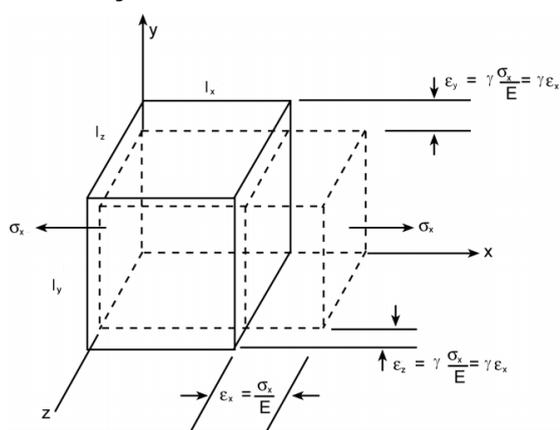
Segundo (BALBINOT& BRUSAMARELLO, 2007), para deslocamentos pequenos e para grande maioria dos materiais verifica-se a lei de Hooke. A relação entre a tensão mecânica e a deformação percentual é dada pelo diagrama de tensão-deformação convencional (ver Figura 3), este diagrama difere de material para material e é muito importante na engenharia, pois permite obter dados referentes à resistência à tração ou compressão sem considerar o tamanho ou formato físico deste material, isto é, a sua geometria.

Figura 3. Curva genérica tensão-deformação.

Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007).

Vale lembrar que uma deformação ocorre também nos eixos transversais à aplicação da carga, conforme esboço da Figura 4. Além disso, ela é provocada somente pela força axial ou longitudinal, ou seja, nenhuma força ou tensão atua em uma direção lateral para deformá-la (HIBBELER, 2004). Para materiais isotrópicos, ou seja, suas propriedades mecânicas são as mesmas em todas as direções, a relação entre a deformação longitudinal e transversal é dada pela Equação (5) chamada de coeficiente de Poisson.

$$\gamma = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_x} = -\frac{\varepsilon_z}{\varepsilon_x} \quad (5)$$

Figura 4. Esboço do efeito Poisson em três dimensões.

Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007).

O coeficiente de Poisson é adimensional e, para maioria dos sólidos não porosos, tem valor de 1/3 ou 1/4 (HIBBELER, 2004). O sinal negativo se dá ao fato de que um

deslocamento de tração longitudinal tem como resultado um deslocamento de compressão lateral ou transversal e vice-versa.

2.1.2. Extensômetros

Extensômetros, ou também chamados *Strain-Gages*, são sensores baseados na variação da resistência elétrica de um condutor ou semicondutor quando submetido a um estresse mecânico. Lord Kelvin reportou este efeito em 1856 e C.S. Smith estudou seu efeito em silício e germânio em 1954 (ARENLY & WEBSTER, 2001).

Kelvin observou que um fio de ferro ou cobre submetido a um estresse mecânico na região elástica do material, apresentava uma relação entre a variação percentual de resistência elétrica com a variação de deformação mecânica percentual e era constante, como mostra a Equação (6):

$$K = \frac{\Delta R/R_0}{\Delta l/l_0} \quad (6)$$

onde K é uma constante, ΔR é a variação de resistência elétrica em Ohms [Ω], R_0 é a resistência elétrica inicial em Ohms [Ω], Δl é a variação de comprimento do fio em metros [m] e l_0 é o comprimento inicial do fio em metros [m].

Posteriormente esta constante K foi chamada de Fator Gage, um importante dado referente à sensibilidade do extensômetro. A Figura 5 exemplifica o diagrama de transdução de um extensômetro de resistência elétrica, onde uma variação no comprimento de um material elástico, devido a uma solicitação mecânica, acarreta em uma variação de resistência elétrica.

Figura 5. Diagrama de transdução de um extensômetro.



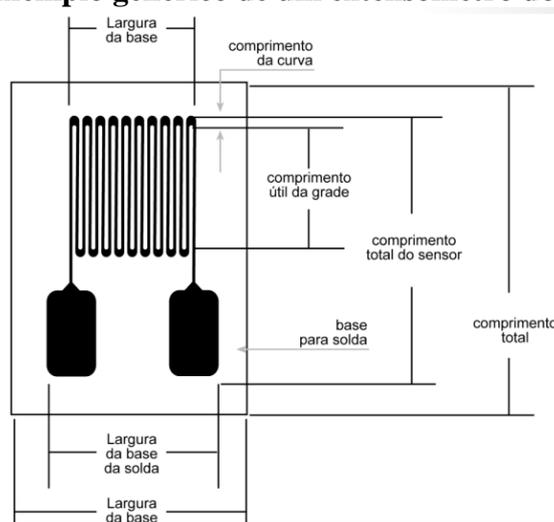
Para pequenas variações, a resistência elétrica de um fio metálico pode ser dada pela Equação (7):

$$R = R_0 + \Delta R = R_0 \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0} \right) \cong R_0(1 + K\varepsilon) = R_0(1 + x) \quad (7)$$

onde R_0 é a resistência elétrica inicial (sem a aplicação do estresse mecânico) em ohms [Ω], R é a resistência elétrica do fio em ohms [Ω], K é o Fator Gage e $x = K\varepsilon$.

Extensômetros de resistência elétrica do tipo folha, como mostra a Figura 6, são formados por dois elementos: a base e a grade. Tipicamente, a base é uma lâmina de epóxi ou de poliamida de grande elasticidade que tem três funções básicas: servir de base para a grade; possibilitar a cimentação do sensor à superfície elástica e isolar eletricamente a grade da superfície em que será fixado o extensômetro. A grade geralmente é formada por uma liga metálica que serve como elemento resistivo (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007).

Figura 6. Exemplo genérico de um extensômetro do tipo folha.



Fonte: (BALBINOT & BRUSAMARELLO, 2007).

A Tabela 1 ilustra alguma das características típicas de extensômetros de resistência elétrica de metal e extensômetros semicondutores.

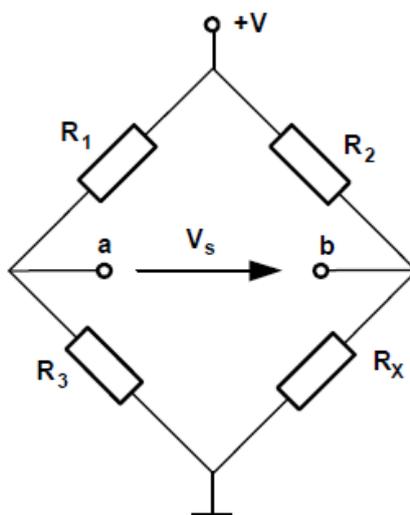
Tabela 1. Valores típicos de extensômetros.

Parâmetro	Metal	Semicondutor
Faixa de medida	0,1 $\mu\epsilon$ a 50 $\mu\epsilon$	0,001 $\mu\epsilon$ a 3000 $\mu\epsilon$
Fator Gage	1,8 a 4,5	40 a 200
Resistência nominal (Ohms)	120,250,350,600...,5000	1000 a 5000
Incerteza da resistência elétrica	0,1% a 0,35%	1% a 2%
Comprimento ativo da grade (mm)	0,4 a 150	1 a 5

Fonte: Adaptado de ARENY & WEBSTER, 2001.

2.2. Ponte de Wheatstone

Como as deformações dos Strain-Gages são muito pequenas, na ordem de micro Strain ($\mu\epsilon = \mu m/m$), a variação de resistência elétrica do extensômetro também será muito pequena. Para medir essas pequenas variações de resistência elétrica usa-se a configuração de Ponte de Wheatstone, que consiste em alimentar com uma determinada tensão elétrica dois “braços” de resistores e medir a diferença de tensão elétrica entre eles. A Figura 7 mostra uma configuração de Ponte de Wheatstone, alimentada por uma tensão elétrica

Figura 7. Configuração de uma Ponte de Wheatstone.

Fonte: (GARCÍA *et al.*, 2008).

O valor de tensão elétrica na saída da ponte (V_S) é dada pela Equação (8).

$$V_S = V_b - V_a = V \cdot \frac{R_X}{R_X + R_2} - V \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} = V \cdot \left(\frac{R_X}{R_X + R_2} - \frac{R_3}{R_1 + R_3} \right) \quad (8)$$

onde V_S é a tensão elétrica em [V] da saída da ponte; V_b e V_a são as tensões elétricas em [V] dos pontos “b” e “a” respectivamente; V é a tensão elétrica em [V] de alimentação da ponte; R_X , R_2 , R_1 e R_3 são dadas em [Ω].

Em um caso particular em que a resistência desconhecida seja um sensor resistivo que muda sua magnitude linearmente com alguma variável física (temperatura, força, pressão, etc) o valor da resistência pode ser expressa em função desta variável mediante uma expressão como mostra a Equação (9) (GARCÍA *et al.*, 2008):

$$R_X = R_0 + \Delta R = R_0 \cdot \left(1 + \frac{\Delta R}{R_0}\right) \quad (9)$$

onde R_X é a resistência em [Ω]; R_0 é a resistência inicial em [Ω]; ΔR é a variação de resistência elétrica em [Ω].

Para tornar mais compactas as Equações (8) e (9), considera-se que $\Delta R/R_0 = \delta_0$. Assim, substituindo a Equação (9) na Equação (8) tem-se a seguinte expressão:

$$V_S = V_b - V_a = V \cdot \frac{R_0 \cdot (1 + \delta_0)}{R_0 \cdot (1 + \delta_0) + R_2} - V \cdot \frac{R_3}{R_1 + R_3} \quad (10)$$

onde V_S é a tensão elétrica em [V] da saída da ponte; V_b e V_a são tensões elétricas em [V] dos pontos “b” e “a” respectivamente; V é a tensão elétrica em [V] de alimentação da ponte; R_2 , R_1 e R_3 são dadas em [Ω]; R_0 é a resistência inicial em [Ω] e δ_0 em [Ω/Ω].

Na maioria das aplicações de pontes com sensores resistivos, é desejável que a tensão elétrica de saída da ponte seja nula quando a resistência do sensor é igual a R_0 , ou seja, $\delta_0 = 0$. Para esta condição, tem-se que:

$$\frac{R_0}{R_2 + R_0} = \frac{R_3}{R_3 + R_1} \quad (11)$$

É habitual que $R_3 = R_0$ e também $R_1 = R_2 = rR_0$ onde r é uma constante de proporcionalidade, chamada de razão característica das resistências, também chamada de razão característica da ponte, e normalmente é maior que uma unidade (GARCÍA *et al.*, 2008)

Assim se pode reformular a Equação (10):

$$V_S = V \cdot \frac{r \cdot \delta_0}{(r+1)(r+1+\delta_0)} \quad (12)$$

onde V_S é a tensão elétrica da saída da ponte em [V]; V é a tensão de alimentação da ponte em [V]; r é a razão característica da ponte em [Ω/Ω] e δ_0 em [Ω/Ω].

Como se pode observar na Equação (12), a dependência de tensão de saída da ponte com a variação normalizada de R_0 e com a resistência desconhecida não é linear. Porém ao considerar-se que $(r+1) \gg \delta_0$, então a Equação (12) pode ser aproximada pelo seguinte modelo linear determinada pela Equação (13):

$$V_{SL} = V \cdot \frac{r \cdot \delta_0}{(r+1)^2} \quad (13)$$

onde V_{SL} é a tensão elétrica linearizada de saída da ponte em [V]; δ_0 em [Ω/Ω]; r em [Ω/Ω].

Tipicamente podem-se obter três tipos de configuração para a ponte: um quarto de ponte, com um extensômetro; meia ponte, com dois extensômetros; e configuração de ponte completa, onde os quatro resistores da ponte são extensômetros. Para um caso onde os quatro resistores sofrem variação tem-se que a variação de tensão entre o ponto A e B é dada por:

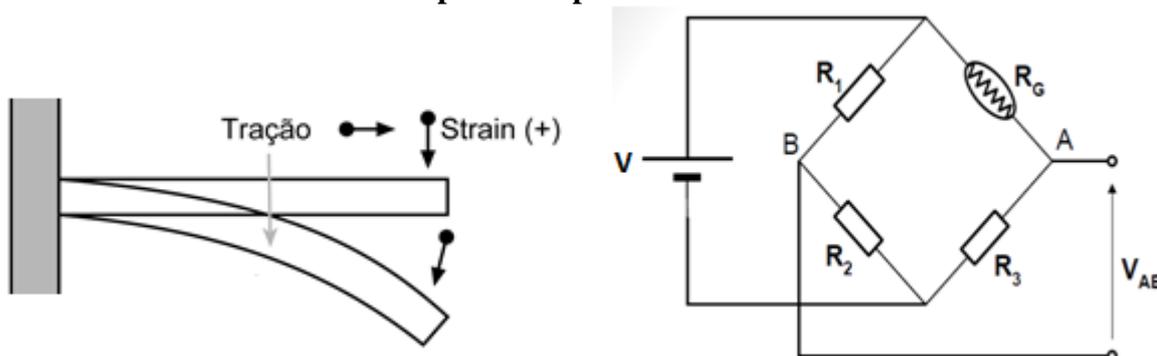
$$\Delta V_S = V \cdot \frac{r}{(r+1)^2} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right] \quad (14)$$

sendo ΔV_S a variação de tensão elétrica na saída da ponte em [V]; r em [Ω/Ω]; ΔR_1 , ΔR_2 , ΔR_3 e ΔR_4 as variações de resistência elétrica em [Ω] de R_1 , R_2 , R_3 e R_4 respectivamente; R_1 , R_2 , R_3 e R_4 em [Ω].

Deste caso genérico existem quatro possibilidades de configuração: a primeira com um extensômetro ativo; a segunda com um extensômetro ativo e outro passivo; a terceira com dois extensômetros ativos e a quarta com quatro extensômetros ativos (ponte completa).

Para um quarto de ponte, como mostra a Figura 8, considerando os resistores iguais, a variação de tensão elétrica na saída da ponte ΔV_{AB} é dada pela Equação (15):

Figura 8. Exemplo de configuração de uma célula de carga com um extensômetro ativo e sua correspondente ponte de Wheatstone.



Fonte: (BALBINOT, 2013).

$$\Delta V_{AB} = V \cdot \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - 0 + 0 - 0 \right] = V \cdot \frac{\Delta R}{4R} \quad (15)$$

sendo ΔV_{AB} e V em [V]; ΔR e R em [Ω].

Como:

$$\frac{\Delta R}{R} = K\varepsilon ; \Delta V_{AB} = \frac{K\varepsilon V}{4} \quad (16)$$

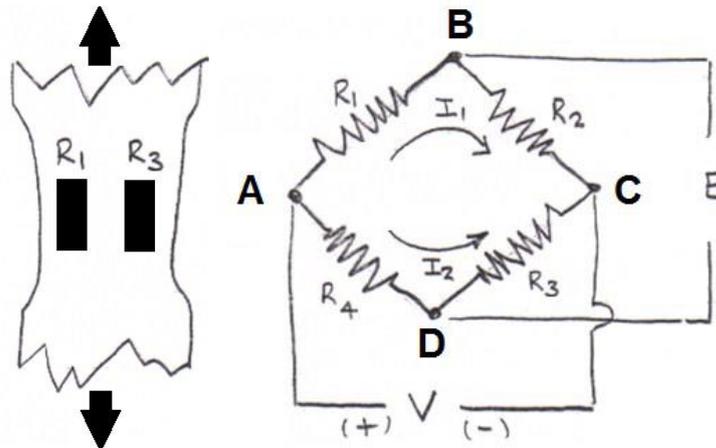
sendo K o fator Gage e ε é a deformação percentual [%].

A sensibilidade da célula de carga ($S_{célula}$) é dada por:

$$S_{célula} = \frac{\Delta V_{AB}}{\varepsilon} = \frac{K \cdot V}{4} \quad (17)$$

Para meia ponte, ou seja, dois extensômetros ativos como mostra a Figura 9, a variação de tensão elétrica de saída da ponte ΔV_{AB} é dada pela Equação (18):

Figura 9. Exemplo configuração de uma célula de carga de meia ponte com 2 extensômetros ativos e a correspondente ponte de Wheatstone.



Fonte: (BALBINOT, 2013).

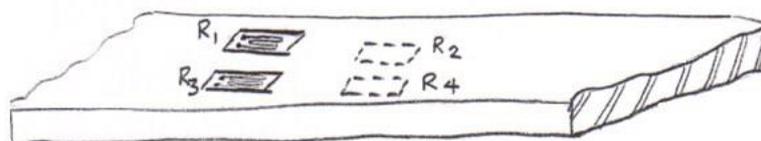
$$\Delta V_{AB} = V \cdot \frac{1}{4} \left[\frac{\Delta R_1}{R_1} - 0 + \frac{\Delta R_3}{R_3} - 0 \right] = V \cdot \frac{2 \cdot \Delta R}{4R} = V \cdot \frac{K\varepsilon}{2} \quad (18)$$

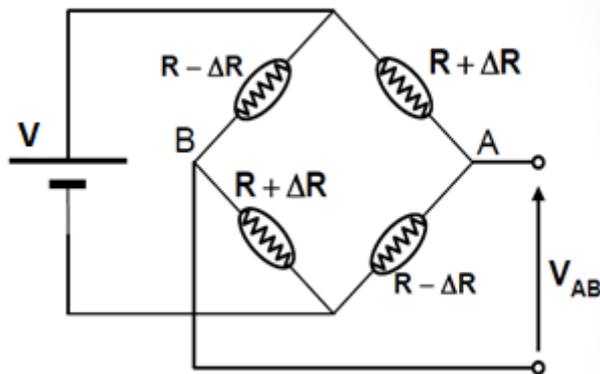
A sensibilidade da célula de carga ($S_{célula}$) é dada por:

$$S_{célula} = \frac{\Delta V_{AB}}{\varepsilon} = \frac{K \cdot V}{2} \quad (19)$$

Para o caso de ponte completa, ou seja, uma configuração com quatro extensômetros ativos (dois fixados na parte de cima e dois fixados na parte de baixo de uma barra, por exemplo), como mostra a Figura 10, tem-se que a variação de tensão da saída da ponte ΔV_{AB} é dada pela Equação (20):

Figura 10. Exemplo de uma célula de carga configurada com quatro extensômetros ativos e sua correspondente ponte de Wheatstone.





Fonte: (BALBINOT, 2013)

$$\Delta V_{AB} = V \cdot \frac{4 \cdot \Delta R}{4R} = V \cdot K \varepsilon \quad (20)$$

A sensibilidade da célula de carga ($S_{Célula}$) é dada pela Equação (21):

$$S_{Célula} = \frac{\Delta V_{AB}}{\varepsilon} = K \cdot V \quad (21)$$

2.3. Introdução à Marcha Humana

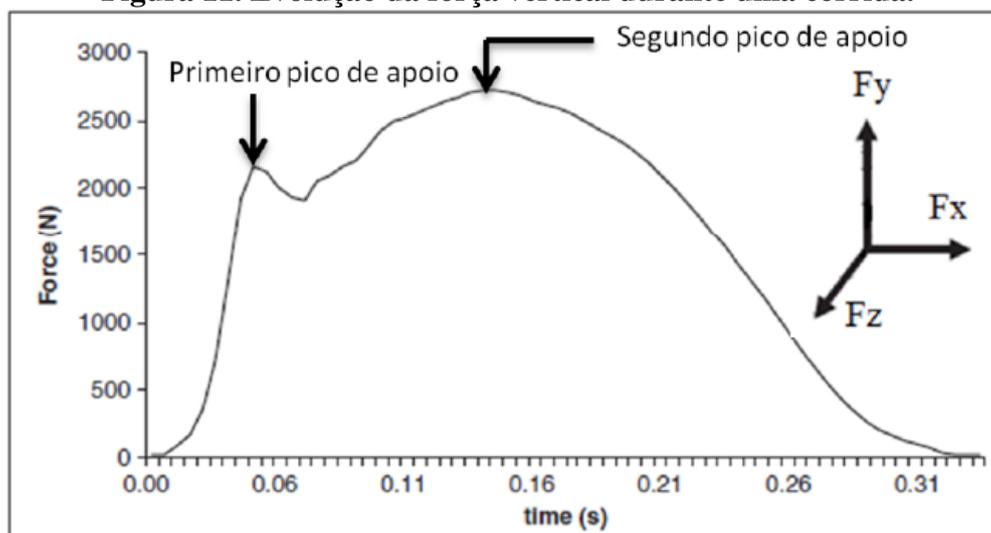
Caminhar é a ação pela qual o corpo se move de um local para outro. Todo movimento voluntário é alcançado através de movimentos coordenados dos segmentos do corpo. Este complexo processo envolve o cérebro, a coluna vertebral, os nervos periféricos, músculos, ossos e articulações, sendo um método de locomoção altamente eficiente em termos energéticos (WHITTLE, 2007).

A marcha humana é caracterizada por uma sequência de múltiplos movimentos rápidos e complexos, o que dificulta a observação clínica, a identificação de alteração de fenômenos e o grau de afastamento da normalidade. Isto levou estudiosos do assunto a desenvolver recursos de registros e de análise de movimento cada vez mais precisos. O estudo da marcha humana tem fundamental relevância no estudo de patologias que envolvem o sistema locomotor. No ato de caminhar ou correr há um padrão básico caracterizado pelo deslocamento rítmico das partes do corpo que mantém o indivíduo em constante movimento (FERNANDES, 2012).

Uma das formas de se analisar a marcha humana é através de uma plataforma de força. A plataforma de força tem por objetivo mensurar a força de reação do solo a um indivíduo

que esteja estático ou caminhando. Existem dois tipos de plataforma de força móvel, há aquelas que ficam estáticas com relação ao solo e o indivíduo caminha sobre ela, chamada de plataforma de força fixa, e há aquela que é adaptada a um calçado, chamada de plataforma de força móvel. Ao medir-se a força de reação do solo enquanto o indivíduo caminha ou corre, obtém-se uma curva típica do tipo “M” como pode ser observada na Figura 11.

Figura 11. Evolução da força vertical durante uma corrida.

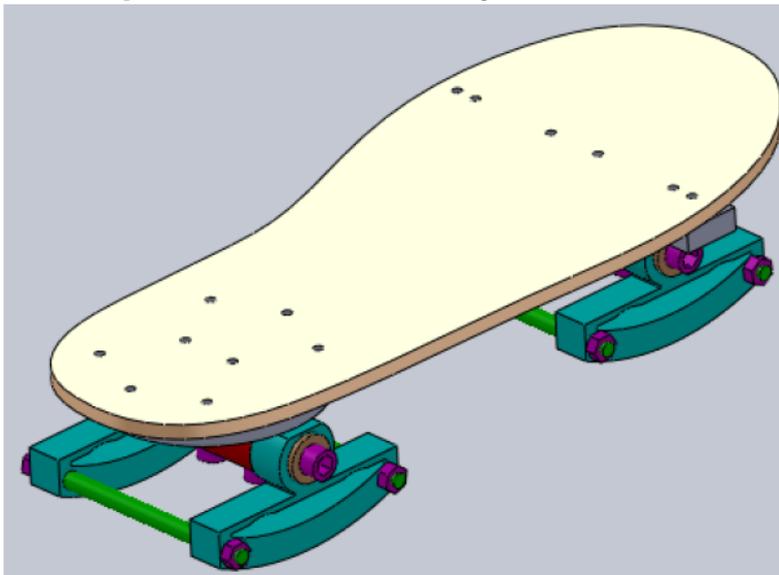


Fonte: PAYTON, 2008.

(PIFFER & BALBINOT, 2011) propôs e desenvolveu uma plataforma de força engastada em um calçado masculino utilizando oito células de carga com sensores extensométricos de resistência elétrica, o objetivo foi desenvolver um equipamento de baixo custo que pudesse ser usado no estudo da marcha humana. O protótipo desenvolvido pode ser visualizado na Figura 12. Como resultado, foi possível detectar a curva do tipo “M” que revela o primeiro e o segundo pico de contato do pé com o solo durante a marcha ou corrida, como mostra a Figura 13.

Já (SEHNEM *et al.*, 2013), também propôs e desenvolveu uma plataforma de força para ser engastada em sapato masculino. Uma das diferenças fundamentais, entre os trabalhos, é o fato das dimensões das células de carga serem reduzidas, o que fez com que se projetasse novamente as células de carga. Assim como, no primeiro trabalho, conseguiu-se detectar a curva do tipo “M” durante os ensaios. A Figura 14 apresenta a plataforma desenvolvida.

Figura12. Plataforma de força desenvolvida.



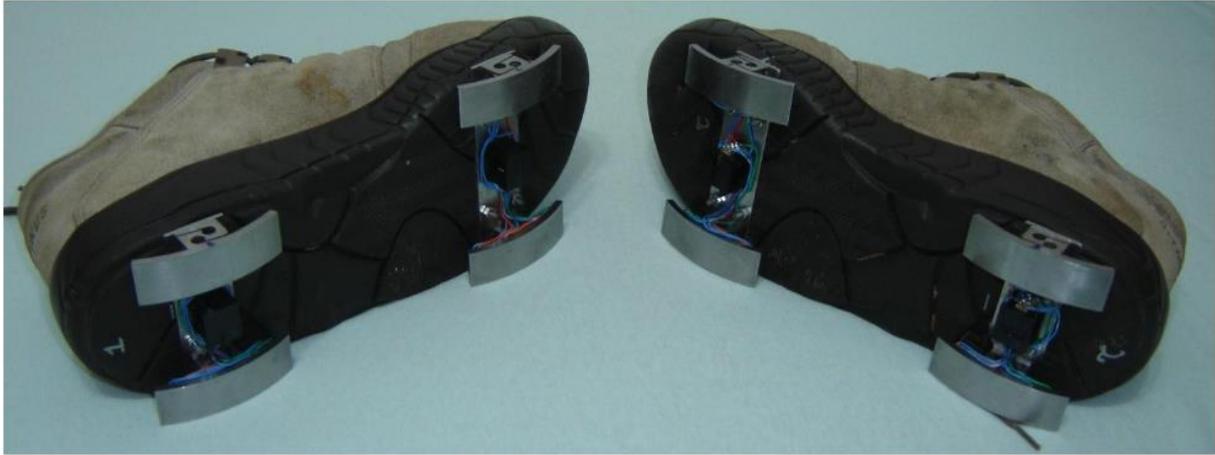
Fonte: (PIFFER & BALBINOT, 2011).

Figura 13. Parte dos resultados obtidos por Piffer.



Fonte: (PIFFER, 2010).

Figura 14. Plataforma de força desenvolvida.

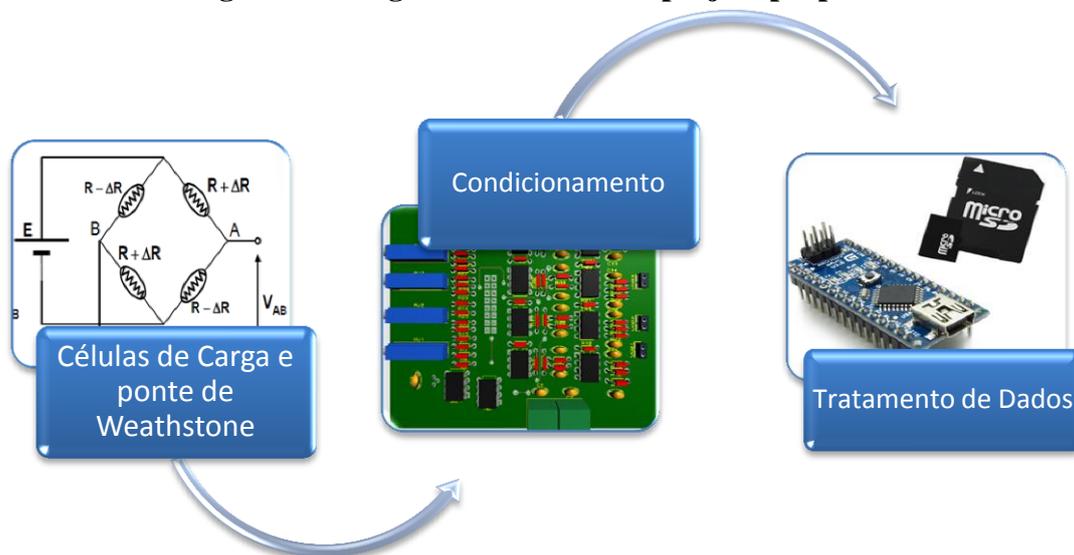


Fonte: (SEHNEM *et al.*, 2013).

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo é apresentada uma descrição detalhada das diversas etapas que consistem o desenvolvimento desta plataforma de força de pequeno porte. O diagrama de blocos do projeto é apresentado na Figura 15 e pode ser dividido em três etapas principais. Na primeira a variação de comprimento do material que compõe a célula de carga resulta em uma variação de resistência elétrica dos *Strain-Gages* fixados a ela, esta variação de resistência resulta em uma variação na tensão elétrica de saída da ponte de Wheatstone. Como esta variação de tensão é na ordem de mV, necessita-se de um sistema de condicionamento que amplifique esta variação de tensão elétrica e também filtre os ruídos que possam existir no sistema. Este processo de condicionamento consiste na segunda etapa principal deste projeto. Já a terceira etapa é a aquisição de dados de tensão elétrica (de saída do condicionador) e tempo através de um microcontrolador, para um armazenamento dos mesmos em um cartão do tipo SD.

Figura 15. Diagrama de blocos do projeto proposto.



3.1. Projeto das células de carga

As células de carga do presente projeto foram desenvolvidas com recursos do projeto de pesquisa “Popularização da Instrumentação Eletromecânica com Aplicações na Área da Análise da Marcha Humana”, nº 454308/2012-4 (Chamada CNPq/VALE S.A Nº 05/2012

FORMA ENGENHARIA), sob coordenação do Prof. Dr. Alexandre Balbinot. Foram desenhadas no software *SolidWorks 2011*. O modelo virtual da célula de carga pode ser visualizado na Figura 16 e suas dimensões em milímetros podem ser vistas na Figura 17. A célula foi projetada em aço inox X30Cr13. Após a etapa de projeto, a célula de carga foi usinada em uma máquina de eletro-erosão. O resultado pode ser observado na Figura 18.

Figura 16. Modelo virtual da célula de carga proposta.

CONFIDENCIAL

Fonte: (PROJETO CNPq, nº 454308/2012-4.).

Figura 17. Dimensões da célula projetada com escala em [mm].

CONFIDENCIAL

Fonte: (PROJETO CNPq, nº 454308/2012-4.).

Figura 18. Célula de carga usinada.

CONFIDENCIAL

Fonte: (PROJETO CNPq, nº 454308/2012-4.).

Foi escolhida uma configuração de Ponte de Wheatstone com um extensômetro ativo e outro passivo. Assim, em cada célula de carga foram cimentados dois extensômetros na região que sofre maior deformação na célula de carga. Esta região foi encontrada fruto de simulações no mesmo software onde as células foram projetadas e pode ser visualizada na Figura 19. Os extensômetros foram adquiridos da empresa *Excel Sensors- Itauba, São Paulo* modelo *PA-09-060AB350-L*. Possuem uma resistência de $(350 \pm 0,5)\Omega$, e um Fator Gage de 2,18, infelizmente a empresa não fornece a incerteza quanto ao fator Gage. Quanto as dimensões os extensômetros possuem um espaço de grade de 1,5 mm de comprimento por 1,3mm de largura, no total. Contando com a base e os terminais, os extensômetros possuem 6mm de comprimento e 5mm de largura. Além disso, são extensômetros auto-compensados para aço inox, mesmo material das células de carga.

Figura 19. Simulação de deformação da célula de carga.

CONFIDENCIAL

Fonte: (PROJETO CNPq, nº 454308/2012-4.).

A colagem dos extensômetros foi feita com cola à base de cianocrilato, e após isto soldados fios aos seus terminais. O resultado pode ser visto na Figura 20.

Figura 20. Célula de carga com os extensômetros colados.



3.2. Projeto do circuito de condicionamento de sinal

O condicionamento de sinal deste projeto possui três estágios como mostra o diagrama de blocos da Figura 21. O primeiro estágio é a geração de uma tensão de referência para alimentar o circuito da ponte de Wheatstone. Já o segundo estágio consiste na amplificação da tensão de saída da ponte, através de um amplificador diferencial de instrumentação. Por último tem-se o estágio de filtro anti-aliasing passa baixas de frequência com corte em 5Hz para eliminar ruídos provenientes de frequências maiores que a faixa desejada.

Figura 21. Diagrama de blocos do condicionador.



O circuito de condicionamento foi projetado no software de projetos e simulação de circuitos *Proteus 8.0* da *LabcenterElectronics*, para melhor visualização ele foi dividido em cinco blocos que serão detalhados a seguir:

- Circuito de alimentação;
- Circuito gerador de tensão de referência;
- Circuito de ajuste de zero e complemento de ponte;
- 1º Estágio de amplificação com ganho diferencial;

- Filtro anti-aliasing e 2º estágio de ganho.

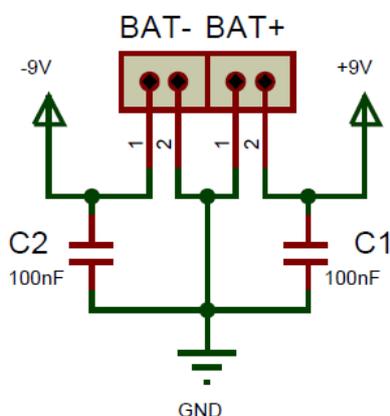
O circuito completo pode ser visualizado no ANEXO III, ao final do trabalho.

3.2.1 Circuito de alimentação

A alimentação do circuito de condicionamento é constituída por duas baterias alcalinas de 9V ligadas em série, como pode ser visto na Figura 22, para gerar uma alimentação simétrica de +9V e -9V. A alimentação simétrica se faz necessária em função dos amplificadores operacionais usados no presente projeto. As baterias foram escolhidas no lugar de pilhas por serem mais práticas e já possuírem uma tensão de 9V, mas com o objetivo principal de tornar flexível o uso do sistema projetado.

Este tipo de alimentação com baterias torna mais útil e prático o projeto. Além do circuito não necessitar de uma fonte ligada à tomada. As baterias eliminam o ruído proveniente da rede elétrica. Para reduzir ainda mais ruídos que possam ser originados da alimentação, colocou-se dois capacitores no valor de 100nF em paralelo com cada uma das tensões de alimentação das baterias.

Figura 22. Circuito de alimentação do condicionador.



3.2.2 Circuito de tensão de referência

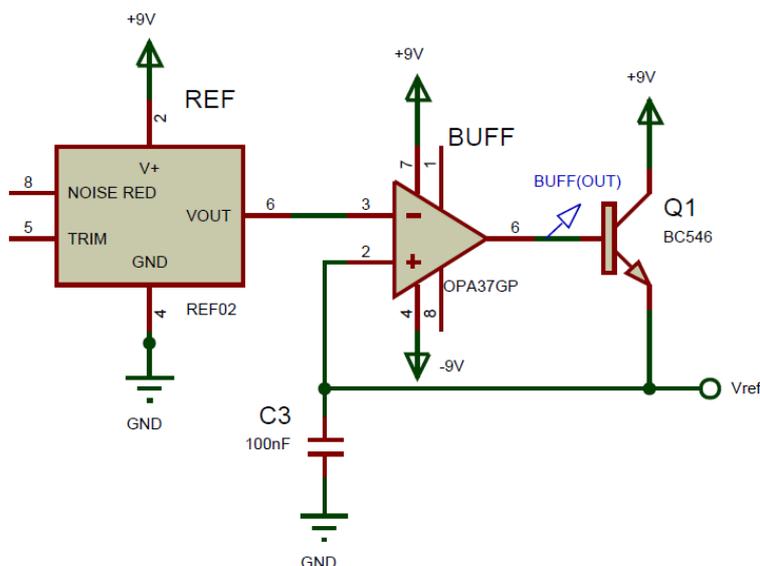
Como a saída da ponte de Wheatstone é proporcional a tensão de alimentação da mesma, necessita-se que a tensão de alimentação da ponte seja constante e estável. Para tal, fez-se uso do circuito integrado de referência de tensão de precisão de $+5V \pm 0.2\%$ da *Texas Instruments REF02*. A Tabela 2 ilustra as principais características deste circuito integrado.

Tabela 2. Principais características do *CI REF02*.

Tensão de saída:	+5 Volts \pm 0.2%
Excelente estabilidade frente à temperatura:	10 ppm/°C máx
Baixo ruído:	10 μ Vppmáx (0,1Hz até 10Hz)
Baixa corrente de alimentação:	1,4 mA máx
Ampla faixa de alimentação:	8V a 40V
Corrente máxima de saída:	10mA

Fonte: (*Datasheet REF02; Texas Instruments, 2013*).

Segundo o fabricante, este circuito integrado fornece uma corrente máxima em sua saída de 10mA. Para que não fosse necessário utilizar um *CI* para alimentar cada ponte, usou-se uma topologia com um amplificador operacional funcionando como comparador e um transistor como *driver* de corrente, como pode ser observado na Figura 23.

Figura 23. Circuito de tensão de referência

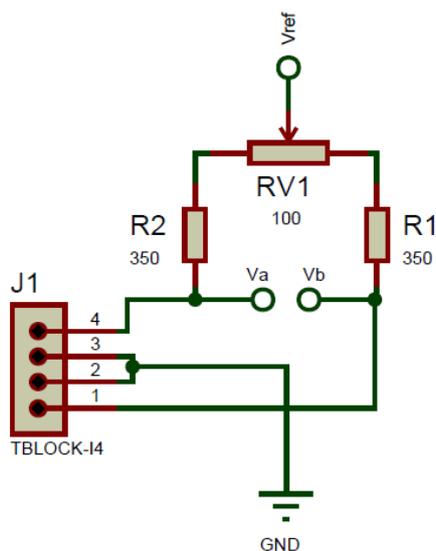
A tensão elétrica da saída do *CI REF02* (tensão de referência) é comparada com a tensão no emissor do transistor (tensão de saída do circuito) através do amplificador operacional modelo *OPA37GP* também da *Texas Instruments*. A tensão de saída do amplificador comparador é ligada a base do transistor de junção bipolar do tipo NPN modelo *BC546*. A Tabela 3 apresenta as principais características do amplificador operacional usado neste circuito.

Tabela 3. Principais características e aplicações do CI OPA037GP.

Tensão de Alimentação:	
Tensão	$\pm 22\text{V}$
Ruído:	4,5 nV/√Hz
Offset:	100 μV máx
Drift:	0,4 $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$
Rejeição de modo comum CMMR:	100 dBmín
Rejeição de ruído de alimentação:	94 dBmín

3.2.3 Circuito de ajuste de zero da ponte

Devido às imperfeições e não idealidades dos *Strain Gages* usados e dos componentes que completam a Ponte de Wheatstone, os valores de resistência variam de um componente para o outro, ou seja, em um projeto adequado as incertezas dos componentes não podem ser desconsideradas. Assim, a tensão de saída da ponte necessita de um ajuste de *offset*, ou seja, um ajuste de zero para que quando não haja carga na célula de carga a saída da ponte seja nula. O circuito de ajuste de zero conta com um potenciômetro ligado em série com os dois braços da ponte de Wheatstone como mostra a Figura 24. No topo de cada braço foi colocado um resistor, (R1 e R2 na Figura 24) no valor de $350\ \Omega \pm 1\%$ para completar a ponte. O extensômetro ativo é ligado entre os terminais 4 e 3 de J1 e o extensômetro passivo ligado entre os terminais 2 e 1.

Figura 24. Circuito de ajuste de zero da ponte.

A corrente que passa por cada braço da ponte quando não há carga é:

$$I = \frac{5}{750} = 6,7mA \quad (22)$$

Este valor está dentro da faixa aceitável, considerando que os extensômetros tipicamente podem suportar uma corrente de até 25mA em superfícies boa condutoras de calor.

A variação de tensão elétrica de saída da ponte é dada por:

$$\Delta V_{AB} = V \cdot \frac{\Delta R}{4R} = \frac{K \cdot \varepsilon \cdot V}{4} \quad (23)$$

$$\Delta V_{AB} = \frac{(2,18) \cdot \varepsilon \cdot (5)}{4} = 2,275 \cdot \varepsilon \quad (24)$$

A sensibilidade da célula de carga é:

$$S_{célula} = \frac{K \cdot V}{4} = \frac{(2,18) \cdot (5)}{4} = 2,275 \quad (25)$$

Assim, variando-se o potenciômetro RV1 da Figura 24, varia-se a quantidade de resistência em série com cada braço da ponte tornando possível ajustar a tensão de saída da ponte de Wheatstone para o valor zero quando não há carga aplicada sobre a célula de carga.

3.2.4 Circuito do 1º estágio de amplificação

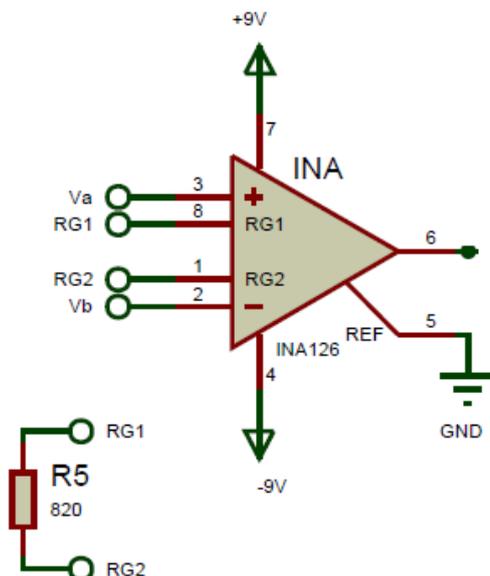
Para circuito de primeiro estágio de amplificação, que pode ser visualizado na Figura 25, utilizou-se um amplificador operacional modelo *INA126* da *Texas Instruments*. Este amplificador possui uma topologia diferencial e é comumente usado em aplicações na área de instrumentação. As principais características retiradas do *datasheet* do fabricante deste componente podem ser visualizadas na Tabela 4.

Tabela 4. Principais especificações do *CIINA126*.

Alimentação:	± 1,35 até ±18 Volts
Tensão de entrada de sinal:	(V-)-0,7 até (V+)+0,7
Corrente de entrada de sinal:	10 mA
Temperatura de operação:	-55°C até +125°C
Ganho:	5 à 10k V/V
Erro máximo de ganho:	0,2 %
Ruído:	35nV/√Hz

Fonte: (Datasheet INA126; Texas Instruments, 2013).

Figura 25. Circuito do primeiro estágio de ganho.



A saída do amplificador é dada pela Equação 26:

$$V_{oINA} = (V_{IN}^+ - V_{IN}^-) \cdot G \quad (26)$$

onde V_{oINA} é a tensão de saída em Volts do amplificador (pino 6), V_{IN}^+ é a tensão em Volts da entrada diferencial positiva (pino 3), V_{IN}^- é a tensão em Volts da entrada diferencial negativa (pino 2) e G é o ganho em V/V do amplificador. A equação de ganho do amplificador (vide Equação 27) é dada por:

$$G = 5 + \frac{80k\Omega}{R_G} \quad (27)$$

onde R_G é a resistência em Ohms de ajuste de ganho que deve ser conectada entre os pinos 1 e 8 do amplificador.

Assim, no circuito de primeiro estágio de ganho as tensões de saída da ponte V_a e V_b são conectadas nas entradas do amplificador operacional (pinos 3 e 2 respectivamente) e escolheu-se um resistor $R_G = 120\Omega$ o que faz com que o ganho G_1 neste primeiro estágio seja:

$$G_1 = 5 + \frac{80.000\Omega}{120\Omega} = 671,67 \frac{V}{V} \quad (28)$$

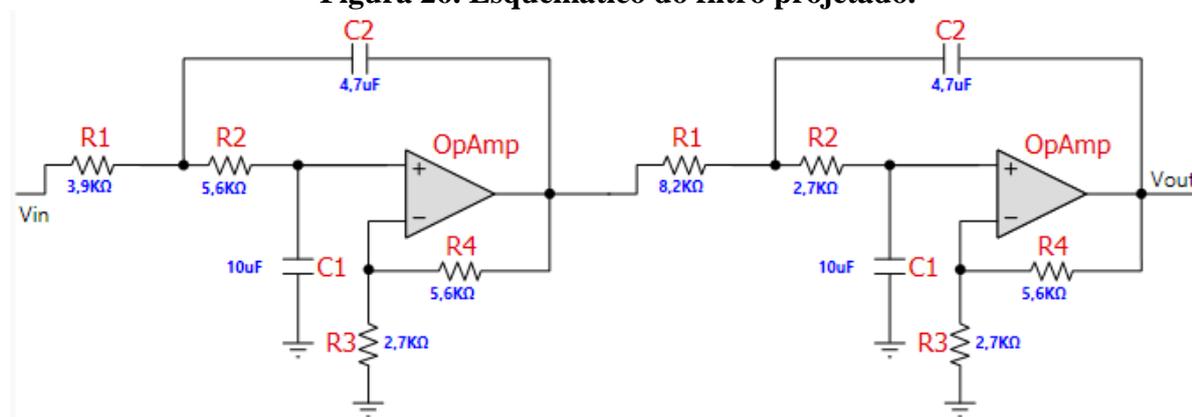
Para completar o circuito, o pino de referência de tensão para o amplificador operacional (pino 5) foi conectado ao terra, ou seja, a tensão de referência é 0V.

3.2.5 Filtro anti-aliasing

A fim de eliminar ruídos provenientes de frequências que diferem da faixa a qual se quer trabalhar, no caso da marcha humana esta faixa fica em torno de 0 a 5 Hz, projetou-se um filtro anti-aliasing com a ajuda do software *FilterPro Desktop* versão 3.1.0.23446 da empresa *Texas Instruments*.

O filtro projetado é um *Butterworth* passa-baixas de 4ª ordem, com uma topologia *Sallen-Key* de 10V/V de ganho (aproximadamente 20 dB). As principais características deste filtro podem ser verificadas na Tabela 5. A Figura 26 mostra o esquemático do circuito do filtro projetado. Percebe-se que este modelo possui dois filtros de segunda ordem, totalizando um filtro de quarta ordem, abaixo do esquemático é possível observar as características de cada filtro separadamente. Já a Figura 27 mostra a resposta em frequência do filtro projetado.

Figura 26. Esquemático do filtro projetado.



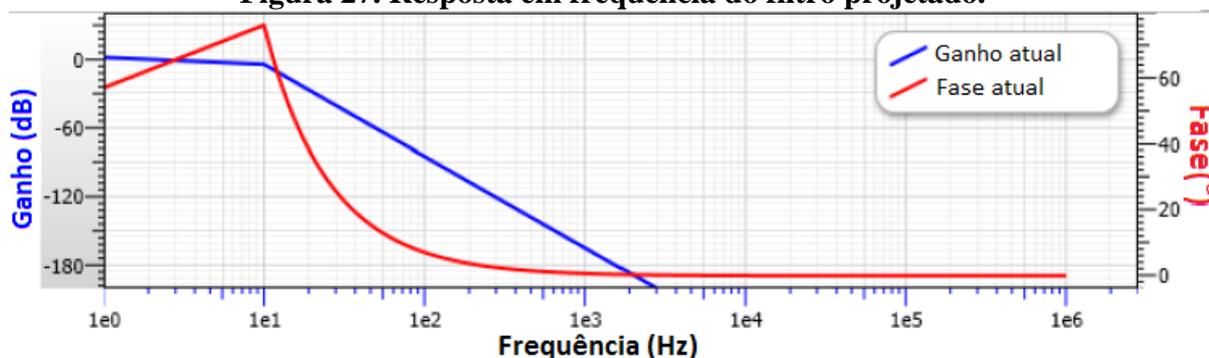
Filter Stage:	1	Filter Stage:	2
Passband Gain(Ao) :	3,162	Passband Gain(Ao) :	3,162
Cutoff Frequency (fn):	5 Hz	Cutoff Frequency (fn):	5 Hz
QualityFactor (Q):	0,54	QualityFactor (Q):	1,31
Filter Response:	Butterworth	Filter Response:	Butterworth
Circuit Topology:	SallenKey	Circuit Topology:	SallenKey
Min GBW reqd.:	853,74 Hz	Min GBW reqd.:	2,0711 kHz

Fonte: *FilterPro Desktop*.

Tabela 5. Especificações do filtro projetado.

Tipo:	Passa-Baixas
Frequência de Corte:	5 Hz
Número de Estágios:	2
Ordem:	4 ^a
Ganho:	10V/V (20dB)
Ripple:	1dB
Topologia:	Sallen-Key

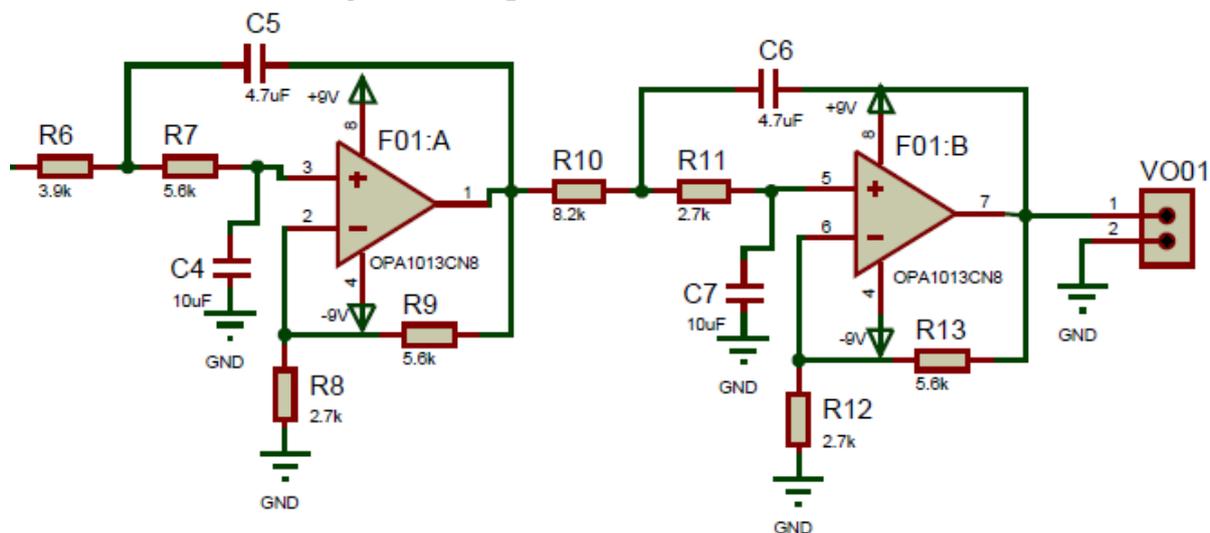
Figura 27. Resposta em frequência do filtro projetado.



Fonte: Adaptado de *FilterPro Desktop*.

O esquemático do circuito do filtro anti-aliasing projetado no software *Proteus 8.0*, o qual é o software de projeto de circuito utilizado no presente trabalho, pode ser visualizado na Figura 28. Como o filtro possui dois estágios, são necessários dois amplificadores operacionais, optou-se, então, por utilizar, no projeto, o circuito integrado *OPA1013* da empresa *Texas Instruments*. Este circuito integrado de oito pinos possui dois amplificadores operacionais de precisão. Assim, para cada filtro utilizou-se apenas um circuito integrado, o que diminuiu as dimensões do circuito final. Este circuito integrado possui uma tensão de alimentação de até $\pm 22V$.

Figura 28. Esquemático do filtro no Proteus.



O ganho deste filtro é dado pela Equação 29:

$$G_2 = \left(\frac{R_9}{R_8} + 1\right) \cdot \left(\frac{R_{13}}{R_{12}} + 1\right) = 10 V/V \quad (29)$$

A função transferência no domínio da frequência que rege o filtro é dada por:

$$H_{filtro}(s) = 10 \cdot \left(\frac{1}{C_4 C_5 R_6 R_7 s^2 + C_5 \cdot (R_6 + R_7) \cdot s + 1}\right) \cdot \left(\frac{1}{C_7 C_6 R_{10} R_{11} s^2 + C_6 \cdot (R_{10} + R_{11}) \cdot s + 1}\right) \quad (30)$$

$$H_{filtro}(s) = 10 \cdot \left(\frac{1}{1,02648 \times 10^{-03} s^2 + 0,04465 s + 1}\right) \cdot \left(\frac{1}{1,04058 \times 10^{-03} s^2 + 0,05123 \cdot s + 1}\right) \quad (31)$$

$$H_{filtro}(s) = \frac{10}{1,068 \times 10^{-06} \cdot s^4 + 9,905 \times 10^{-05} \cdot s^3 + 0,004354 \cdot s^2 + 0,09588 \cdot s + 1} \quad (32)$$

3.2.6. Função transferência do circuito de condicionamento

A função transferência do sistema de condicionamento que relaciona a variação de tensão elétrica na saída da ponte de Wheatstone com a tensão de saída do condicionamento é dada pela Equação 33:

$$V_{out} = \Delta V_{AB} \cdot G_1 \cdot G_2 \quad (33)$$

$$V_{out} = (2,275 \cdot \varepsilon) \cdot (671,67) \cdot (10) = 15280,5 \cdot \varepsilon \quad (34)$$

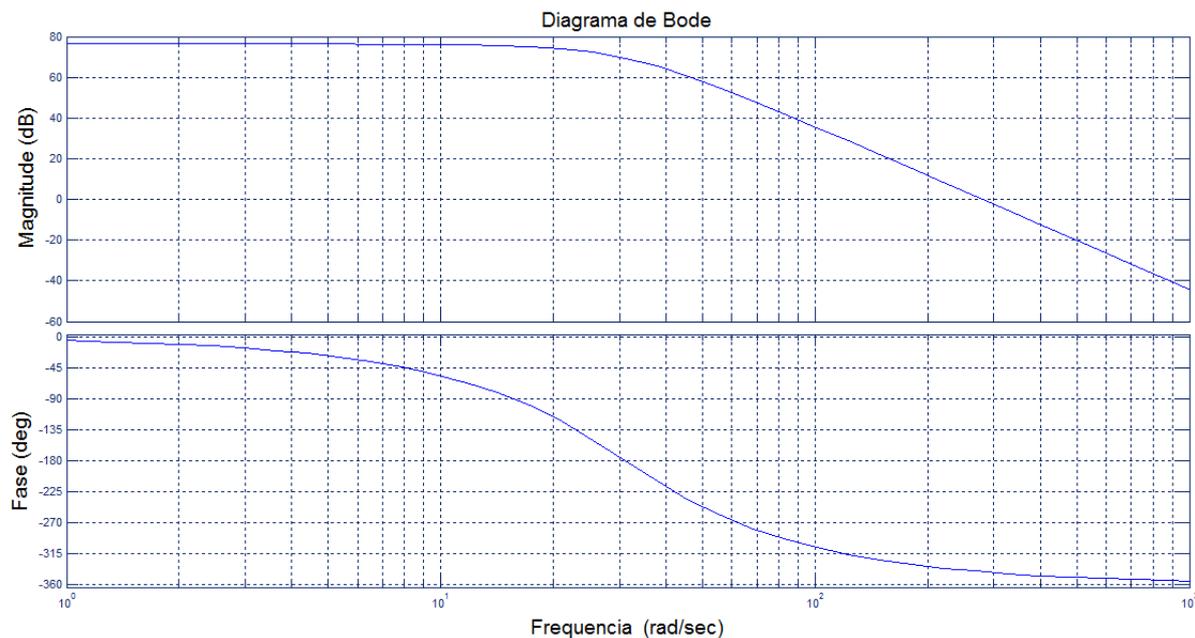
No domínio da frequência a expressão que relaciona a tensão elétrica de saída do condicionador com a tensão elétrica de saída da ponte é:

$$H_T(s) = \frac{V_{out}}{\Delta V_{AB}} = H_1(s) \cdot H_{filtro}(s) \quad (35)$$

$$H_T(s) = \frac{6716,7}{1,068 \times 10^{-06} \cdot s^4 + 9,905 \times 10^{-05} \cdot s^3 + 0,004354 \cdot s^2 + 0,09588 \cdot s + 1} \quad (36)$$

O diagrama de bode do sistema de condicionamento pode ser visualizado na Figura 29.

Figura 29. Resposta em frequência do sistema.



Como possui quatro polos reais e negativos, cada polo contribui com -90° para frequências tendendo ao infinito, portanto neste caso com quatro polos a fase para frequências muito grandes é -360° . A frequência de corte do filtro pode ser visualizada onde a curva de fase passa por -180° . Neste caso ela passa onde a frequência é de 31,4 rad/s, ou 5Hz como era de se esperar.

3.3. Projeto da aquisição e armazenamento de dados

Para interface de aquisição e armazenamento de dados optou-se por utilizar uma plataforma de desenvolvimento da empresa *Gravitech*, *Arduino Nano v.3.0* que possui um micro controlador *ATMEGA328* da empresa *Atmel*. Esta escolha justifica-se pela necessidade de aliar um conversor A/D para aquisição de dados com uma interface SPI para comunicação com o cartão SD. Além disso, o *Arduino* possui código livre e uma gama de bibliotecas disponíveis na internet, entre elas uma biblioteca de gravação de dados em cartão de memória do tipo SD. A Figura 30 ilustra a placa de desenvolvimento adquirida para este projeto. A Tabela 6 exhibe as principais características da mesma.

Figura 30. Placa de desenvolvimento *Arduino Nano*.



Fonte:(GRAVITECH, 2013).

Tabela 6. Principais especificações do *Arduino Nano*.

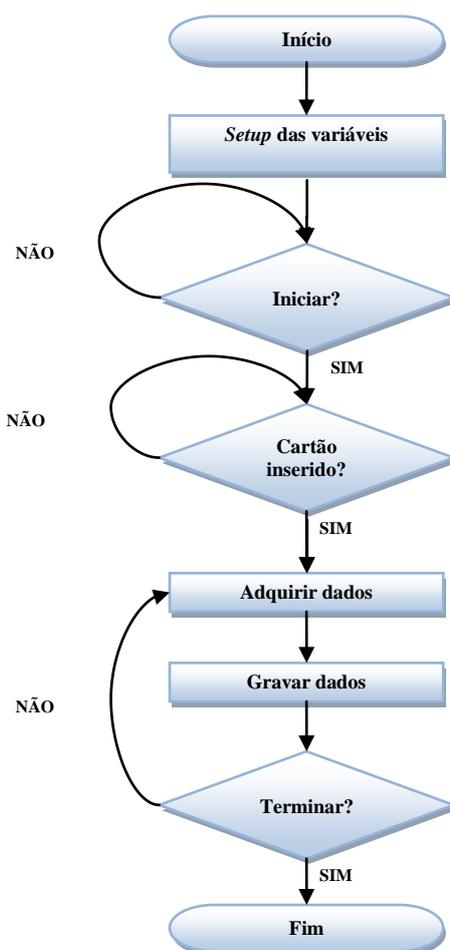
Microcontrolador:	ATMEGA328
Tensão de operação nível lógico:	5 V
Tensão de entrada (recomendada):	7-12 V
Tensão de entrada (limites):	6-20V
Portas digitais do tipo I/O:	14 (das quais 6 podem ser PWM)
Corrente DC máxima nas portas digitas:	40mA
Entradas Analógicas (A/D's):	8
Resolução dos A/D's:	10 bits
Velocidade dos A/D's:	10kHz
Memória Flash:	32KB
Velocidade do clock:	16MHz

Fonte: (GRAVITECH, 2013).

Para a parte de gravação dos dados adquiridos utilizou-se um adaptador para cartão do tipo SD compatível com a placa *Arduino Nano*. Este módulo é compatível com modelos de cartão SD formatados em FAT32 com capacidade de até 4GB de memória.

A etapa de programação e gravação do microcontrolador foi realizada no software de código livre *Arduino 1.0.5*. O fluxograma utilizado pode ser visualizado na Figura 31.

Figura 31. Fluxograma utilizado.

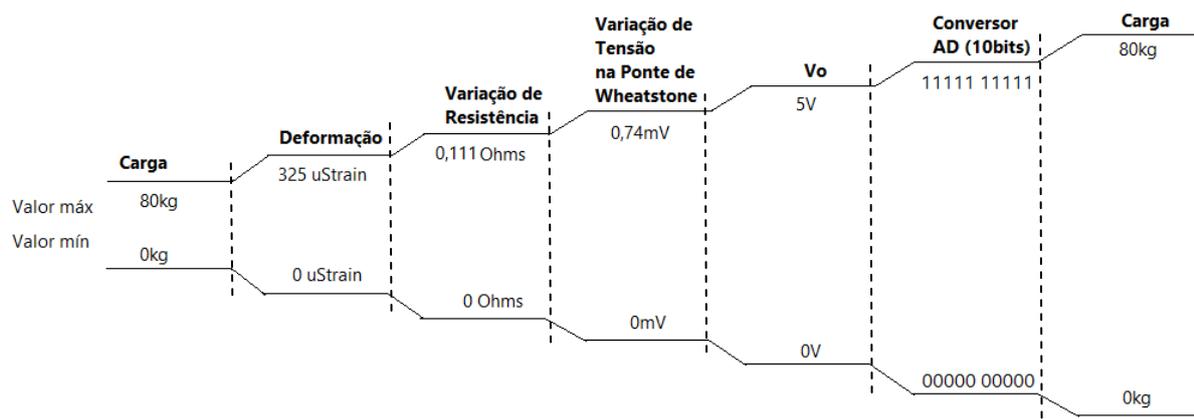


O código completo pode ser visualizado no ANEXO I, ao final do trabalho, a estrutura do código funciona da seguinte maneira: depois de iniciadas suas variáveis, o programa espera que o usuário dê o comando de início, feito isto, há uma verificação se o cartão está inserido no dispositivo, se está, começa a gravar os dados no cartão SD até que o usuário dê o comando para pausar a gravação.

3.4. Cadeia de medidas

A Figura 32 apresenta a cadeia de medidas que foi proposta no trabalho. São apresentados os valores máximos e mínimos de cada etapa que compõem o projeto. Inicialmente a aplicação de uma carga mecânica de 0 a 80 kg deforma elasticamente o material de 0 a 325 μ Strain, o *Strain Gage* colado a este material têm uma variação de sua resistência elétrica entre 0 e 0,111 Ω , esta variação acarreta em uma variação de tensão elétrica na Ponte de Wheatstone de 0 a 0,74mV, esta tensão é amplificada e filtrada com um ganho total de 6716 V/V e por último o conversor analógico digital transforma esta tensão elétrica em um número de 0 a 1024 (10 bits). Os ganhos dos circuitos de condicionamento foram projetados para que não ultrapassem o valor máximo de tensão elétrica de entrada dos conversores analógicos/digitais do microcontrolador que é de 5V.

Figura 32. Cadeia de Medidas desconsiderando-se os níveis de ruído.



3.5. Montagem do sistema

Em cada sapato foram engastadas quatro células de carga como mostra as Figura 33 e 34. Cada célula foi fixada por dois parafusos por furos passantes pelo calçado e por uma pequena chapa de apoio que liga as células duas a duas.

Figura 33. Plataforma de força com as células engastadas.



Figura 34. Plataforma vista de um outro ângulo.



O layout da placa de circuitos de cada condicionador e da aquisição de dados foi desenvolvido no software *Proteus v.8.0* e podem ser visualizados no ANEXO II. A Figura 35 ilustra em detalhe a simulação em três dimensões e o resultado de uma placa de condicionamento e a Figura 36 o sistema completo já abrigado em uma caixa de metal desenvolvida levando em conta o usuário final.

Figura 35. Placa de condicionamento: (1) Circuito de tensão constante, (2) Alimentação, (3) Circuito de ajuste de zero e resistores que completam a ponte de Wheatstone, (4) Entrada para extensômetros, (5) Primeiro estágio de ganho, (6) Filtros e segundo estágio de ganho e (7) Saídas para placa Arduino.

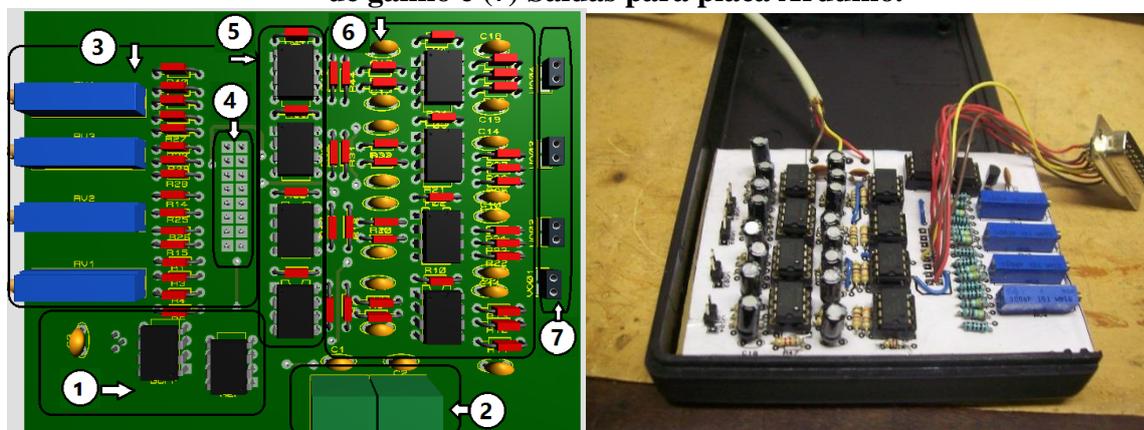
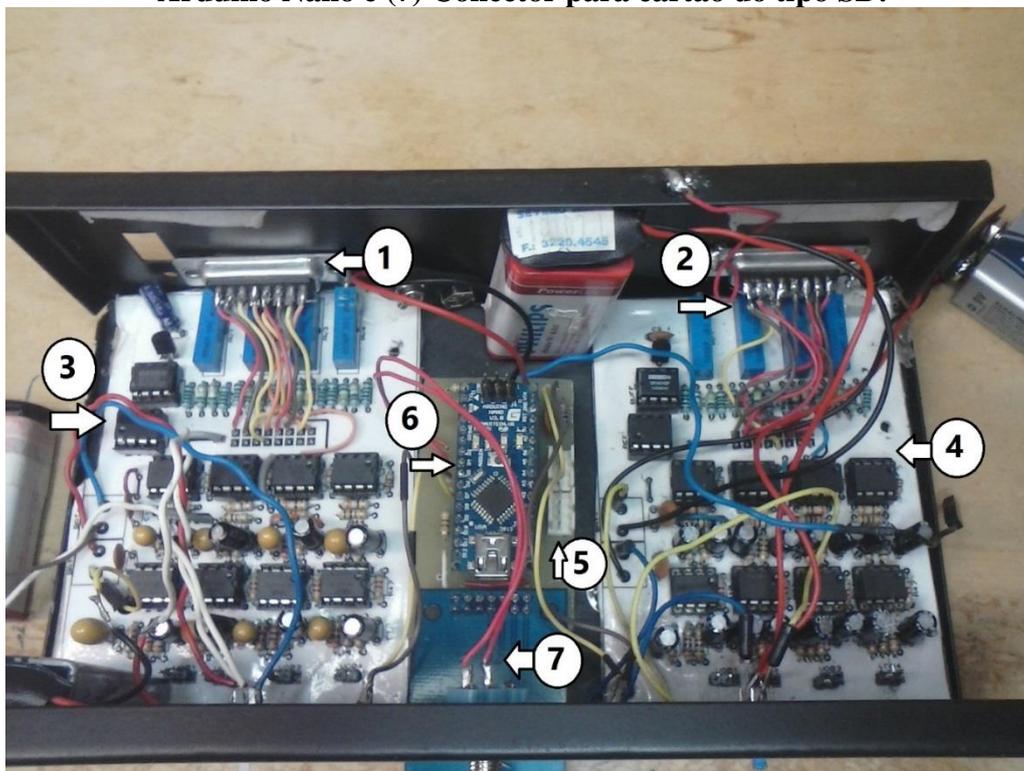


Figura 36. Sistema de condicionamento, aquisição de sinais e armazenamento de dados: (1) Conector DB15 para conexão com a plataforma I, (2) Conector DB15 para a conexão com a plataforma II, (3) Placa de condicionamento da plataforma I, (4) Placa de condicionamento da plataforma II, (5) Entradas analógicas da placa Arduino, (6) Placa Arduino Nano e (7) Conector para cartão do tipo SD.

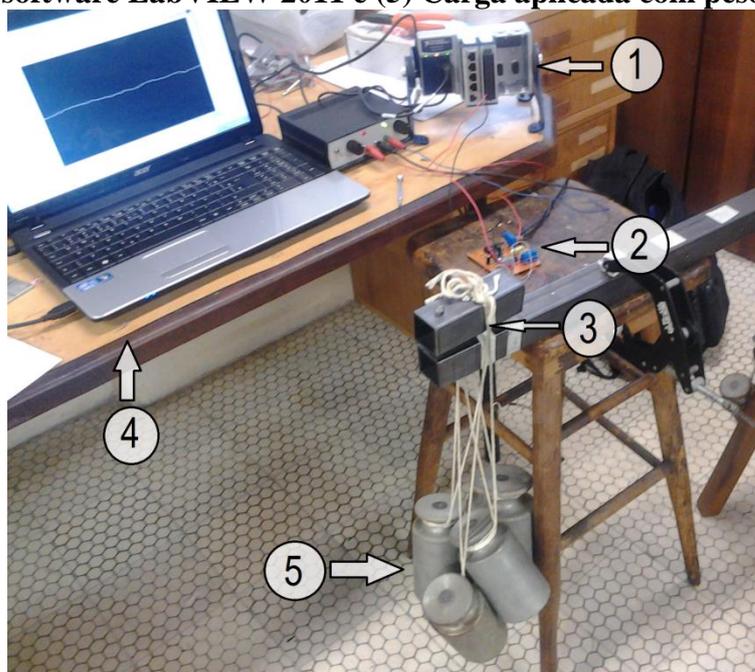


3.7. Procedimentos utilizados para determinar as funções de transferência

Para os ensaios preliminares e finais do levantamento das curvas de transferência das oito células de carga, curvas estas que relacionam a carga aplicada com a variação de tensão elétrica na saída do circuito condicionador, utilizou-se de uma estrutura que pode ser vista na Figura 37, a qual é composta por duas barras de metal sobrepostas com a célula de carga no meio delas. Um furo concêntrico nas peças foi utilizado para a inserção de um parafuso que foi usado como guia. Assim, pendurou-se com fio barbante pesos padrões um a um e mediu-se a tensão de saída do condicionador. Esta estrutura foi planejada decorrente da falta de uma máquina de ensaios devidamente calibrada, o que tornaria os ensaios mais precisos.

Para coletar os dados foi utilizada uma placa de aquisição de dados de 20 bits modelo *NI-9205* acoplada ao módulo *NI cDAQ-9174*, com conexão USB com um computador rodando o software *LabVIEW 2011*, tanto a placa de aquisição quanto o módulo e o software, pertencem à empresa *National Instruments*. O método para realização dos ensaios foi aplicar sucessivas cargas de 5 kg desde o estado de carga nula até 35 kg de carga. Este valor foi devido a limitações experimentais em função da falta de uma máquina de ensaios. Após um determinado tempo de estabilização por causa da oscilação dos pesos foi medido a tensão elétrica de saída do circuito condicionador após cada inserção de uma nova carga.

Figura 37. Estrutura utilizada e adaptada para realização dos ensaios: (1) Placa de aquisição, (2) Circuito de condicionamento, (3) Célula de carga, (4) Computador equipado com software LabVIEW 2011 e (5) Carga aplicada com pesos padrão.



3.8. Calibração dinâmica

A calibração dinâmica tem por objetivo verificar quais as frequências de ressonância da peça, no caso a célula de carga. Esta análise é muito importante para o projeto, pois o mesmo deve considerar e garantir que o sistema nunca opere nestas frequências, caso contrário estas frequências podem vir a danificar as células de carga, além de afetar as medidas, tornando-as incorretas.

Para realizar este ensaio fez-se uso de um acelerômetro modelo 4517 da empresa *Deltatron* e pode ser visualizado na Figura 38. Ele possui uma sensibilidade de 10,13 mV/g $\pm 10\%$, é capaz de medir de 1Hz a 20kHz e pode operar de -51° a 121° . Para aquisição do sinal, foi utilizado um módulo condicionador NI-9234 da empresa *Nationa Instruments* que é um módulo IEPE de 4 canais, ± 5 V de tensão de entrada, 51,2 kS/s de taxa de amostragem e resolução de 24 bits. A incerteza é de 0,48% da leitura.

Figura 38. Acelerômetro utilizado.



Fonte: Deltatron, 2013

O acelerômetro foi engastado na célula de carga e realizou-se os testes submetendo a célula de carga e o acelerômetro a um impacto com uma ferramenta metálica. Os dados foram adquiridos via LabVIEW 2011 com uma frequência de amostragem de 15kHz em um período de três segundos.

3.9. Ensaio de Deformação

O ensaio de deformação da célula de carga é importante para determinar se os dados obtidos via simulações condiz com os dados experimentais. Deste modo, é possível determinar todas as etapas da cadeia de medidas experimentalmente. Neste ensaio as cargas foram aplicadas de 5kg em 5kg até 35kg. Da mesma forma que os demais ensaios, este valor

foi devido a limitações experimentais em função da falta de uma máquina de ensaios. Para condicionamento e aquisição de dados usou-se o módulo *NI-9237* da *National Instruments* que contém quatro canais de aquisição a uma taxa máxima de 50kS/s a uma resolução de 24bits por canal e possui uma incerteza de 0,20% da leitura obtida. Este módulo contém internamente seu próprio sistema de alimentação de referência para a ponte de Wheatstone bem como um filtro passa baixas de banda igual a $0,45 \cdot f_s$, onde f_s é a frequência de aquisição do sinal.

A ponte foi montada com os extensômetros e os resistores de precisão que a completam. Um cabo RJ50 ligou a ponte ao sistema de condicionamento e os dados foram adquiridos via software LabVIEW 2011.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados provenientes das simulações tanto estáticas quanto dinâmicas das células de carga. Também são apresentados os resultados dos ensaios preliminares de levantamento da curva de transferência e o correspondente erro de linearidade das oito células de carga. Além disso, são apresentados os resultados da calibração estática e dinâmica das células de carga bem como os resultados finais dos ensaios com a plataforma de força já engastada no sapato.

4.1. Simulações

Para conhecer como a célula de carga se comporta estática e dinamicamente, é necessário realizar uma simulação virtual em algum software que contenha esta ferramenta. O software escolhido foi o mesmo com o qual foi feito o desenho da célula de carga. Usando a ferramenta *SolidWorks Simulation* foi possível fazer estudos estáticos sobre tensão, deslocamento e deformação e também estudos sobre os modos de vibração da peça.

4.1.1. Simulação estática

Os estudos de tensão, deslocamento e deformação foram feitos considerando o eixo z como o eixo de aplicação de uma força de 800N (80 kg) na face superior da peça, com um engaste na parte inferior. Seus resultados são apresentados nas Figuras 39, 40 e 41 respectivamente aos estudos de deslocamento, tensão e deformação. Percebe-se que o deslocamento da peça na área onde se encontram os extensômetros é de aproximadamente $8,0 \mu m$.

Figura 39. Simulação de deslocamento.

CONFIDENCIAL

Figura 40. Simulação de tensão mecânica.

CONFIDENCIAL

O que se pode visualizar é que a área acessível que sofre a maior tensão mecânica é a área onde os extensômetros foram cimentados. Esta tensão mecânica é de aproximadamente 61 MPa.

Figura 41. Simulação de deformação.

CONFIDENCIAL

O estudo de deformação, como já mencionado, foi essencial para determinar o local de colagem dos extensômetros, percebe-se pela Figura 41 que este local se encontra na lateral da peça. Foram analisados diversos pontos onde os extensômetros foram colocados, pontos estes mostrados na Figura 41, e calculou-se uma média. O deslocamento médio ε_z nesta região, para uma carga de 80kgF, é de aproximadamente $297\mu m/m$.

Outro dado importante extraído das simulações estáticas é o de fator de segurança, ou *FOS* que fornece a razão da tensão mecânica limite, ou de escoamento, pela tensão mecânica total na peça para uma determinada carga mecânica. Para a aplicação de uma carga de 80kg verificou-se que o *FOS* obtido através de simulação foi de 4,4. Isto significa que a peça pode sofrer uma carga mecânica de até 360kg aproximadamente e ainda se manter na região elástica de deformação.

4.1.2. Simulação dinâmica

Com a simulação dinâmica é possível realizar estudo sobre os modos de vibração da peça a fim de garantir que o sistema não opere nestas frequências que podem danificar a mesma. As Figuras 42, 43 e 44 apontam os 3 primeiros modos de vibração, obtidos através de simulação. Sabe-se que existem infinitos outros modos, porém, pela não confiabilidade da simulação para os outros modos, para efeitos de análise do presente trabalho somente os 3 primeiros serão considerados.

Figura 42. Primeiro modo de vibração.

CONFIDENCIAL

Figura 43. Segundo modo de vibração.

CONFIDENCIAL

Figura 44. Terceiro modo de vibração.

CONFIDENCIAL

Os três primeiros modos de vibração da peça são em 7904,9Hz, 12078Hz e 14746Hz respectivamente. Como a marcha humana dificilmente supera os 5Hz, ela não será prejudicial à integridade física da peça do ponto de vista dinâmico, ou seja, o sistema nunca irá operar na frequência de ressonância. Porém, é importante ressaltar que esta simulação não foi realizada considerando-se o conjunto de toda a estrutura e principalmente diferenças de engaste e de ponto de aplicação do impacto o que difere dos ensaios experimentais.

4.2. Levantamento das funções transferência e teste de linearidade (ensaios preliminares)

As Tabelas 7 a 14 apresentam os resultados provenientes dos ensaios preliminares da célula de carga de número 01 à 08 respectivamente. Nelas já estão apresentados os pontos da curva de tendência linear bem como as diferenças entre os pontos desta curva frente aos pontos do ensaio. As Figuras 45 a 52 ilustram graficamente as curvas do ensaio e de tendência linear das células 01 a 08, respectivamente, e apresentam também as equações das curvas de tendência linear.

O erro de linearidade é calculado pela Equação (37):

$$\text{Erro de linearidade (\%)} = \frac{Difm\acute{a}x}{FES} \times 100 \quad (37)$$

onde *Difm_áx* é a máxima diferença em Volts entre os pontos da curva linear obtida e os pontos experimentais adquiridos e *FES* é o fundo de escala em Volts.

Tabela 7. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 01.

Carga (Kg)	Vo(V)	Ajuste Linear (V)	Diferença (V)
0	-0,150	-0,00830	0,142
5	-0,300	-0,394	0,0943
10	-0,700	-0,780	0,0803
15	-1,15	-1,16	0,0163
20	-1,55	-1,55	0,00230
25	-1,98	-1,93	0,0417
30	-2,30	-2,32	0,0243
35	-2,75	-2,71	0,0397

Figura 45. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 01.

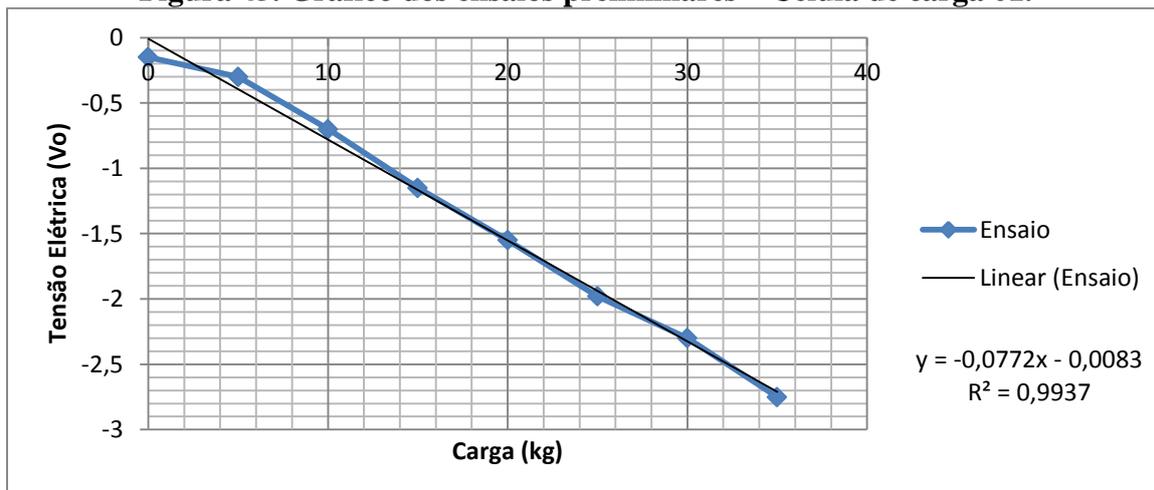


Tabela 8. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 02.

Carga (Kg)	Vo(V)	Ajuste Linear (V)	Diferença (V)
0	-0,290	-0,249	0,0404
5	-0,0250	0,00740	0,0324
10	0,275	0,264	0,0106
15	0,590	0,521	0,0686
20	0,825	0,778	0,0466
25	1,05	1,03	0,0146
30	1,27	1,29	0,0174
35	1,50	1,55	0,0494

Figura 46. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 02.



Tabela 9. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 02.

Carga (Kg)	Vo (V)	Ajuste Linear (V)	Diferença (V)
------------	--------	-------------------	---------------

0	0,110	0,170	0,0600
5	0,475	0,470	0,00500
10	0,775	0,770	0,00500
15	1,10	1,07	0,0300
20	1,45	1,37	0,0800
25	1,70	1,67	0,0300
30	1,94	1,97	0,0300
35	2,22	2,27	0,0500

Figura 47. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 03.



Tabela 10. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 04.

Carga (Kg)	Vo(V)	Ajuste Linear (V)	Diferença (V)
0	0,137	0,124	0,0135
5	0,450	0,409	0,0410
10	0,700	0,694	0,00600
15	0,925	0,979	0,0540
20	1,175	1,26	0,0890
25	1,60	1,55	0,0510
30	1,87	1,83	0,0410
35	2,12	2,12	0

Figura 48. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 04.

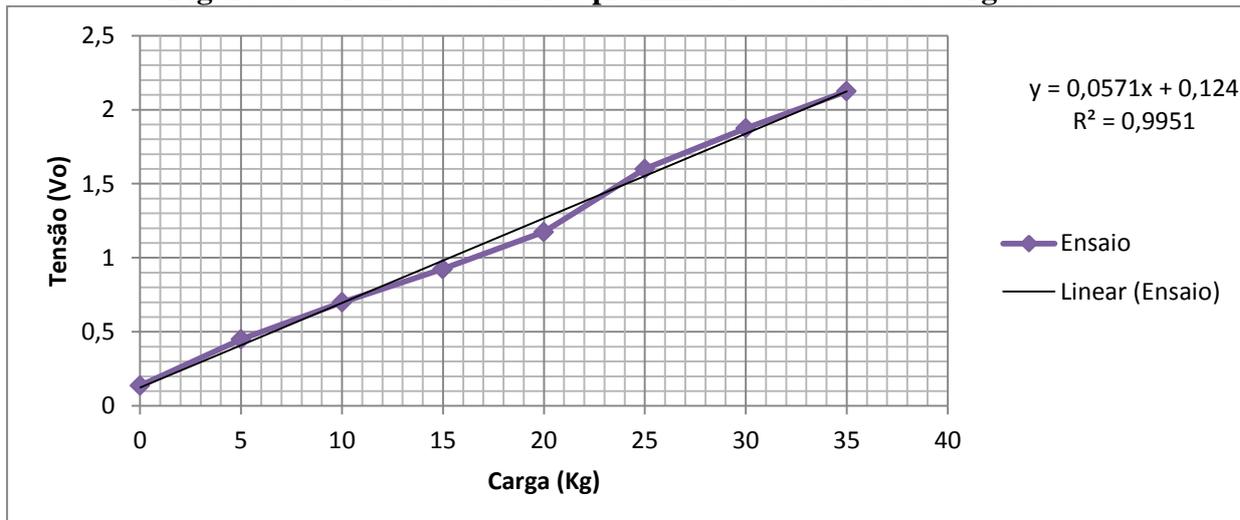


Tabela 11. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 05.

Carga (Kg)	Vo(V)	Ajuste Linear (V)	Diferença (V)
0	0,100	0,175	0,0750
5	0,375	0,415	0,0400
10	0,750	0,655	-0,0950
15	1,01	0,895	-0,120
20	1,12	1,13	0,0100
25	1,39	1,37	-0,0150
30	1,65	1,61	-0,0350
35	1,82	1,85	0,0300

Figura 49. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 05.

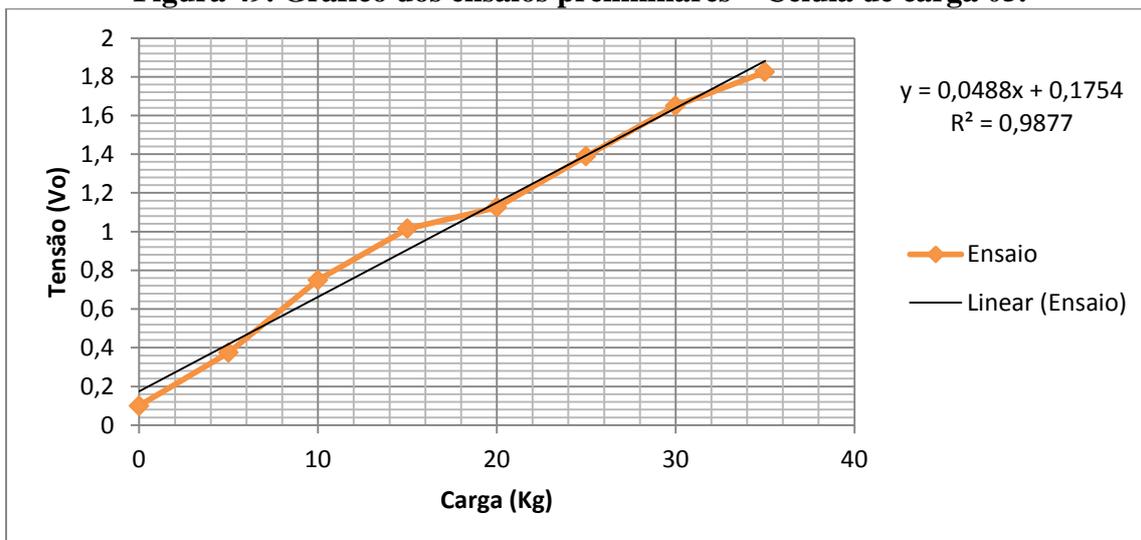


Tabela 12. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 06.

Carga (Kg)	Vo(V)	Ajuste Linear (V)	Diferença (V)
0	0,0500	0,113	0,0630
5	0,375	0,378	0,00300
10	0,730	0,643	-0,0870
15	0,925	0,908	-0,0170
20	1,20	1,18	-0,0270
25	1,46	1,44	-0,0270
30	1,72	1,70	-0,0220
35	1,95	1,97	0,0180

Figura 50. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 05.

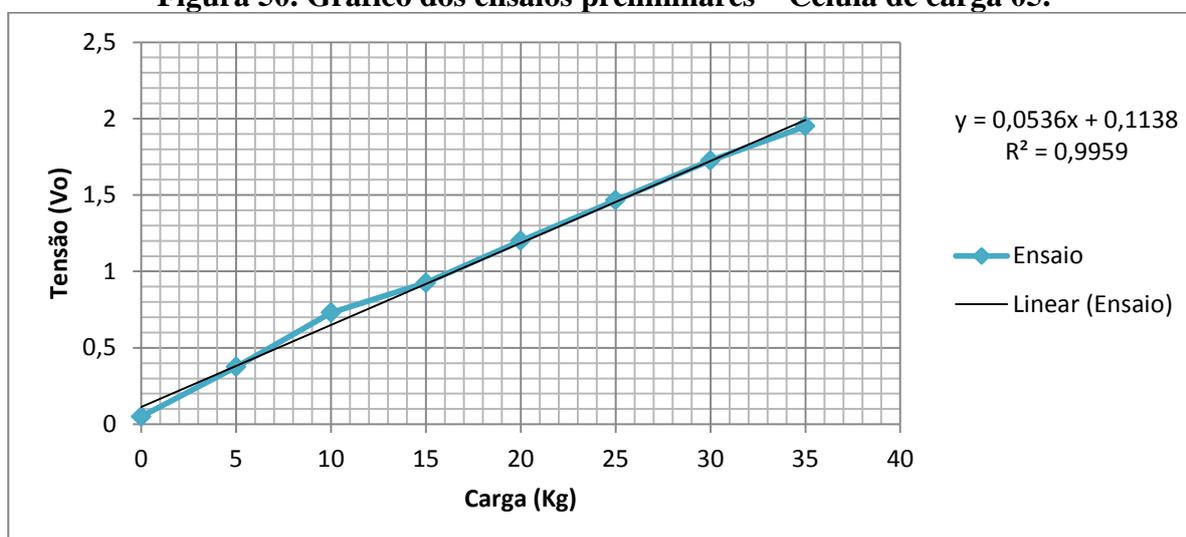


Tabela 13. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 07.

Carga (Kg)	Vo(V)	Ajuste Linear (V)	Diferença(V)
0	0,250	0,325	0,0750
5	0,650	0,600	-0,0450
10	0,925	0,880	-0,0400
15	1,17	1,16	-0,0100
20	1,47	1,44	-0,0300
25	1,72	1,72	0
30	2,05	2,00	-0,0450
35	2,25	2,28	0,0350

Figura 51. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 07.

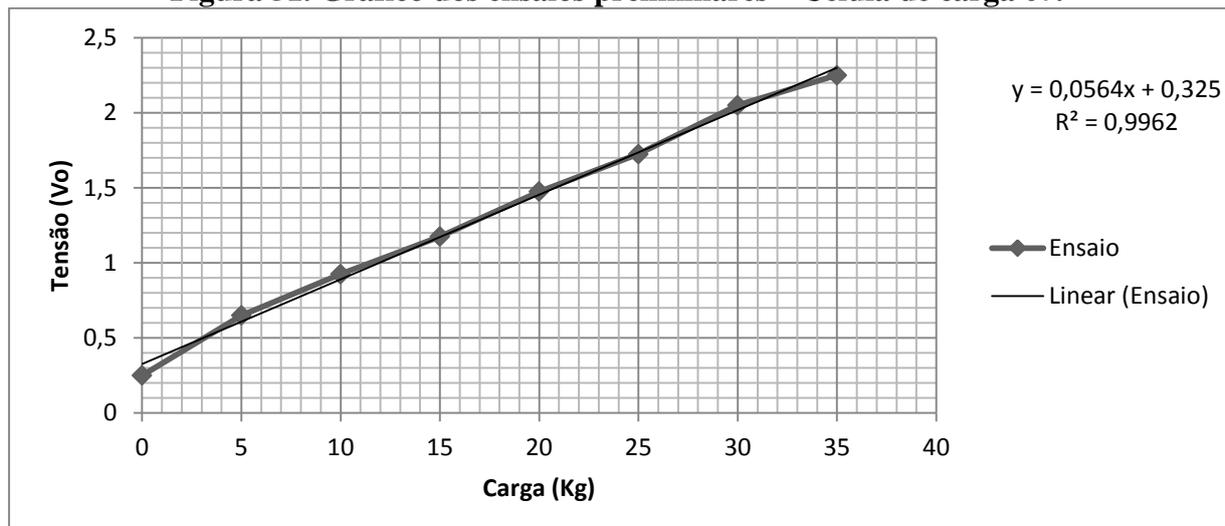
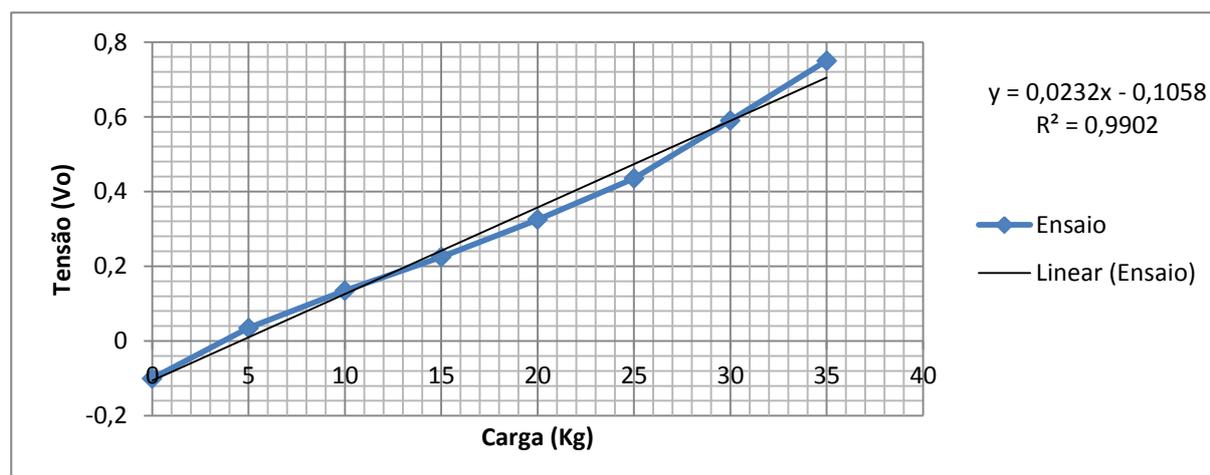


Tabela 14. Resultados dos ensaios preliminares - Célula de carga 08.

Carga (Kg)	Vo (V)	Ajuste Linear (V)	Diferença (V)
0	-0,100	-0,105	-0,00500
5	0,0350	0,0100	-0,0250
10	0,135	0,125	-0,0100
15	0,225	0,240	0,0150
20	0,325	0,355	0,0300
25	0,435	0,470	0,0350
30	0,590	0,585	-0,00500
35	0,750	0,700	-0,0500

Figura 52. Gráfico dos ensaios preliminares – Célula de carga 08.



Utilizando a Equação (37) foram determinados os erros de linearidade de cada célula de carga, cujos resultados estão na Tabela 15:

Tabela 15. Erros de linearidade das oito células de carga.

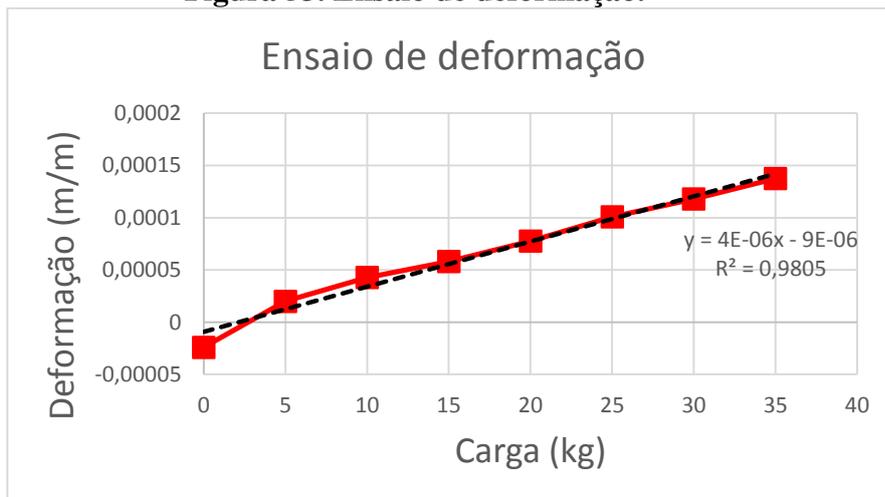
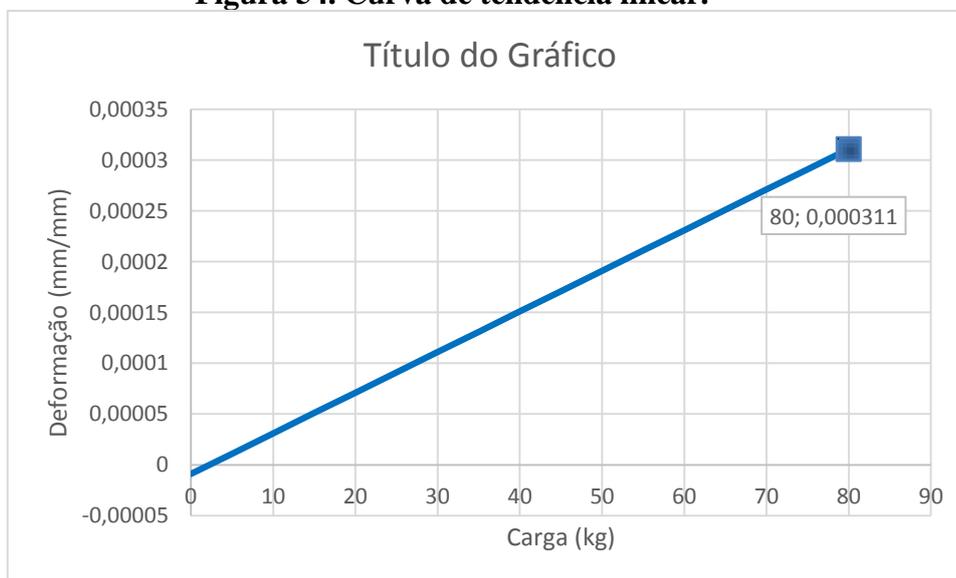
	Erro
Célula 01	5,4%
Célula 02	3,8%
Célula 03	3,8%
Célula 04	4,5%
Célula 05	6,9%
Célula 06	4,6%
Célula 07	3,8%
Célula 08	5,9%

É importante ressaltar que mesmo realizando os ensaios com uma carga mecânica máxima de 35kg, em função de dificuldades experimentais enfrentadas devido à falta de uma máquina de ensaios, assume-se que estas curvas lineares se estendam até 80kg.

Os resultados de erro de linearidade obtidos para as oito células de carga ficaram abaixo de 10%. Alguns fatores podem ser associados a estes erros de linearidade, o primeiro é a colagem dos extensômetros, nem sempre é possível uma colagem ideal com relação à orientação e local desejado na peça. O segundo fator é a não idealidade que a estrutura desenvolvida para realizar os ensaios, a distribuição dos pesos nem sempre é bem distribuída, o ideal para este tipo de ensaio é realizá-los com uma máquina adequada e devidamente calibrada. Um terceiro fator pode ser associado aos ruídos presentes no ambiente, mesmo utilizando-se de cabos com malha, foi possível observar frequências harmônicas do 60Hz que estão presentes no ambiente. Além evidentemente, das não idealidades de toda estrutura envolvida.

4.3. Ensaio de deformação

O gráfico da Figura 53 apresenta os resultados do ensaio realizado com o condicionador próprio da *National Instruments*, onde a medida do sinal de saída obtida é em deformação (m/m). Como os ensaios foram realizados com carga máxima de 35kg assumiu-se que a curva de tendência linear obtida se estende até 80kg, com isto plotou-se a curva de tendência com valores até 80kg a fim de comparar os dados obtidos com os da simulação. Esta curva pode ser visualizada na Figura 54.

Figura 53. Ensaio de deformação.**Figura 54. Curva de tendência linear.**

O que se pode perceber da Figura 53 é a comprovação da linearidade da célula de carga projetada. O erro de linearidade neste ensaio ficou em 9,28%, ainda abaixo dos 10%.

Já na Figura 54, o valor de deformação para uma carga de 80kg é de 311 μ Strain. Este valor se aproximou do valor obtido na simulação estática de 297 μ Strain com um erro de 4,5%.

4.4. Calibração estática

A Tabela 16 mostra as funções de transferência obtidas para cada uma das oito células de carga. Assim é possível relacionar a tensão elétrica de saída do sistema com a carga

aplicada, estas funções são muito importantes, pois o objetivo do trabalho é adquirir dados de força, e estas funções são usadas para converter estes dados. É importante ressaltar que como nos ensaios preliminares usou-se uma carga máxima de 35 kg, portanto assume-se a mesma curva linear para cargas até 80 kg. Ainda verificou-se qual a sensibilidade obtida para cada célula.

Tabela 16. Funções de transferência adquiridas.

Célula:	Função de transferência:	Sensibilidade:
Célula 01	$F = 16,89V + 7$	60,43mV/kgF
Célula 02	$F = 16,39V + 6,5$	60,71mV/kgF
Célula 03	$F = 12,94V + 8$	77,86mV/kgF
Célula 04	$F = 17,24V + 6,6$	59,29mV/kgF
Célula 05	$F = 14,49V + 5$	69,71mV/kgF
Célula 06	$F = 21,23V + 8,7$	46,14mV/kgF
Célula 07	$F = 15,24V + 5,5$	65,71mV/kgF
Célula 08	$F = 45,04V + 6$	34,29mV/kgF

4.5. Calibração Dinâmica

A Figura 55 demonstra graficamente os dados obtidos do ensaio de calibração dinâmica, via placa DAQ NI-9234 à uma frequência de aquisição de 15kHz e software *LabVIEW 2011*. O tempo é representado no eixo das abscissas e a aceleração em *mg* no eixo das ordenadas. Na Figura 56 é apresentada a transformada de Fourier do ensaio realizado, o objetivo foi visualizar as frequências de ressonância da célula de carga, a fim de prevenir que o sistema não opere nestas frequências.

Figura 55. Resposta ao impacto

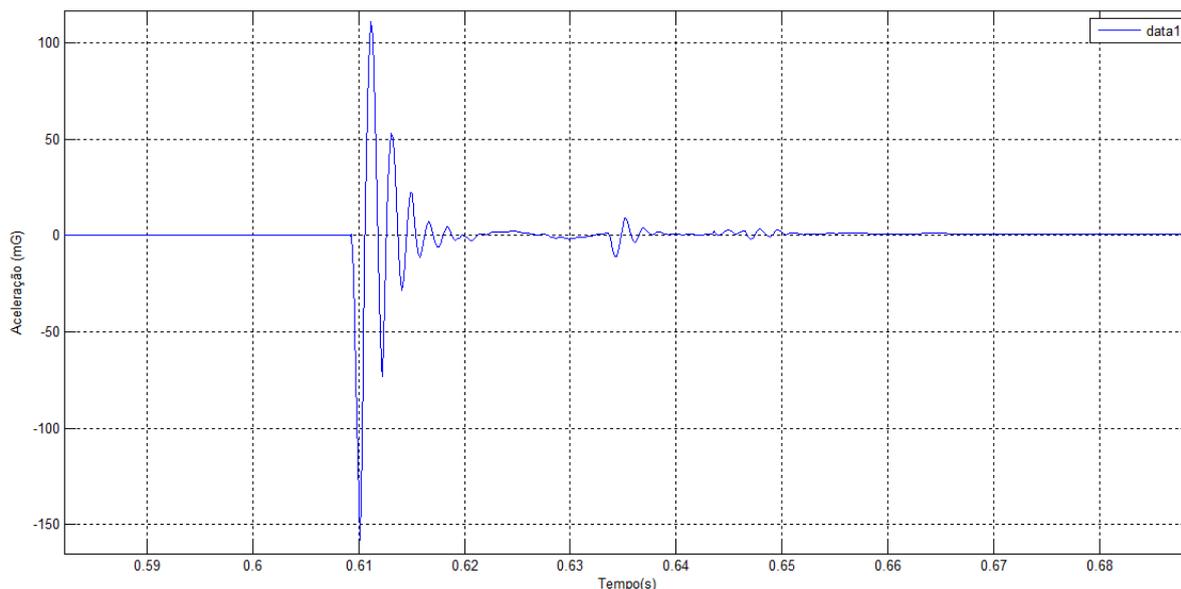
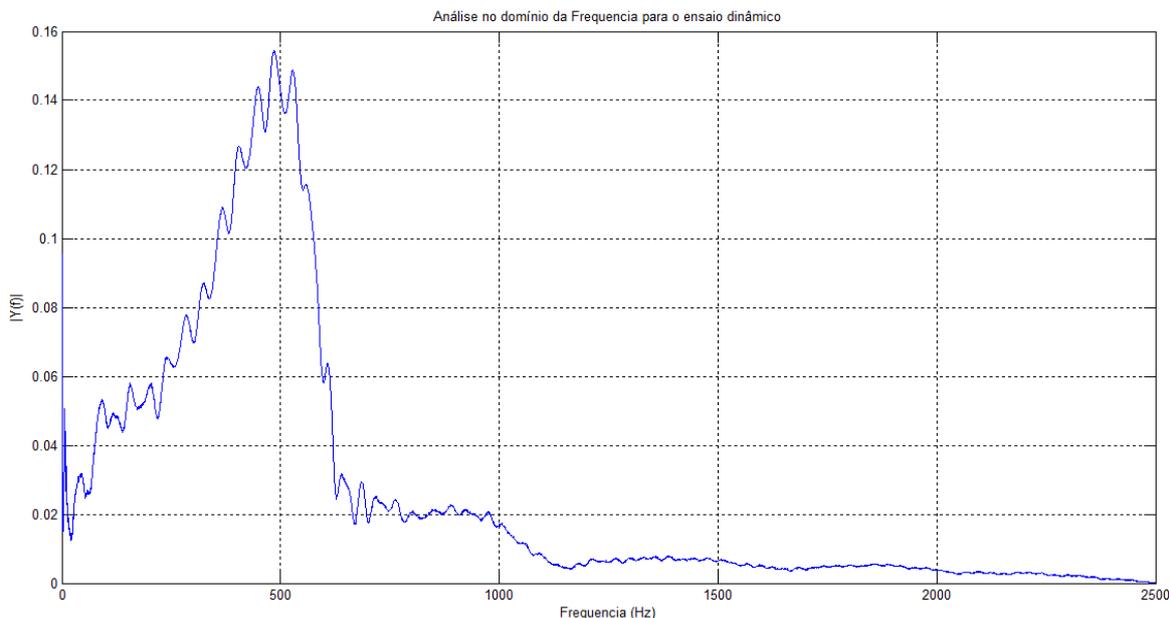


Figura 56. Transformada de Fourier do ensaio dinâmico.



O primeiro modo de vibração encontrado foi de aproximadamente 500Hz, muito diferente dos 7905Hz encontrados via simulação. Algumas considerações podem ser feitas para explicar a diferença encontrada entre os resultados de simulações e obtidos experimentalmente. Primeiramente, como a célula é de pequeno porte, o engaste para o ensaio dinâmico não pode ser feito como se imaginava. Segundo que o software *SolidWorks* realiza as simulações de modos de frequência em todas as direções. Não é possível obter uma simulação de oscilação somente no eixo normal ao engaste. De qualquer forma, experimentalmente se comprova que a célula de carga é adequada à aplicação proposta de funcionamento em frequências até 5Hz.

4.6. Análise de Incertezas

Devido a não idealidade dos componentes presentes no sistema, faz-se necessário uma análise das incertezas. A propagação de incertezas se dá ao longo de todo sistema e se reflete na saída do mesmo, ou seja, se propaga na Cadeia de Medidas.

4.6.1. Análise de Incertezas referentes ao ganho

Como mostrado anteriormente, a equação que relaciona a entrada do sistema de condicionamento (tensão de saída da ponte, ΔV_{AB}) com a saída do sistema (V_{out}) é dada por:

$$\frac{V_{out}}{\Delta V_{AB}} = G_{Total} = G_{INA} \cdot G_{FILTRO} = G_1 \cdot G_2 \quad (38)$$

$$\frac{V_{out}}{\Delta V_{AB}} = G_{Total} = \left(5 + \frac{R_{ina}}{R_g}\right) \cdot \left(\frac{R_9}{R_8} + 1\right) \cdot \left(\frac{R_{13}}{R_{12}} + 1\right) \quad (39)$$

A incerteza combinada é dada pela Equação 40:

$$\sigma_{ganho} = \sqrt{\left(\frac{\partial G_{Total}}{\partial R_{ina}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{ina}})^2 + \left(\frac{\partial G_{Total}}{\partial R_g}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_g})^2 + \left(\frac{\partial G_{Total}}{\partial R_9}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_9})^2 + \left(\frac{\partial G_{Total}}{\partial R_8}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_8})^2 + \left(\frac{\partial G_{Total}}{\partial R_{13}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{13}})^2 + \left(\frac{\partial G_{Total}}{\partial R_{12}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{12}})^2} \quad (40)$$

$$\sigma_{ganho} = \sqrt{(0,08334)^2 \cdot (0,005.80000)^2 + (55,55)^2 \cdot (0,05.120)^2 + (0,765)^2 \cdot (0,05.5600)^2 + (1,59)^2 \cdot (0,05.)^2 + (0,765)^2 \cdot (0,05)^2 + (1,59)^2 \cdot (0,05)^2} \quad (41)$$

$$\sigma_{ganho} = 544 V/V \quad (42)$$

$$G_{Total} = 6761 \pm 8\% V/V \quad (43)$$

Este valor de incerteza para o ganho deve-se principalmente ao uso de resistores com incertezas de 5%, nas duas etapas de ganho. Para uma incerteza menor seria recomendado usar resistores com incerteza menor que 1% (até para ser compatível com os sensores usados, do ponto de vista da incerteza).

4.6.2. Análise de Incertezas referente à tensão na ponte de Wheatstone

Para este caso é feita uma análise das incertezas de tensão elétrica V_A e V_B , tensões estas de saída da ponte de Wheatstone. Para a tensão V_A tem-se que:

$$V_A = \frac{V \cdot R_{xa}}{R_{xa} + R_1} \quad (44)$$

onde R_{xa} representa a resistência do extensômetro ativo em $[\Omega]$; V é a tensão de alimentação da ponte em $[Volts]$ e R_1 é a resistência que complementa o braço da ponte em $[\Omega]$.

Para um caso onde não há carga mecânica aplicada sobre a célula de carga, ou seja, no equilíbrio, a incerteza referente à tensão V_A que é igual a tensão V_B pois são usados componentes com as mesmas incertezas, é dada por:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial V_A}{\partial V}\right)^2 \cdot (\sigma_V)^2 + \left(\frac{\partial V_A}{\partial R_{xa}}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_{xa}})^2 + \left(\frac{\partial V_A}{\partial R_1}\right)^2 \cdot (\sigma_{R_1})^2} \quad (45)$$

$$\sigma = \sqrt{(0,5)^2 \cdot (0,0025)^2 + (0,00357)^2 \cdot (0,5)^2 + (0,00357)^2 \cdot (0,01350)^2} \quad (46)$$

$$\sigma = 0,0054 V \quad (47)$$

$$V_A = V_B = 2,5 \pm 0,0054V \quad (48)$$

Com esta análise é fácil perceber que o ajuste de *offset* se faz necessário para que a ponte se encontre em equilíbrio quando não há carga.

4.6.3. Análise de Incertezas referentes à sensibilidade da célula de carga

A Equação (17), para um caso onde existe somente um extensômetro ativo, é dada por:

$$S_{célula} = \frac{\Delta V_{AB}}{\varepsilon} = \frac{K \cdot V}{4} \quad (49)$$

A incerteza quanto à sensibilidade da célula de carga é dada por:

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{\partial S_{célula}}{\partial V}\right)^2 \cdot (\sigma_V)^2 + \left(\frac{\partial S_{célula}}{\partial K}\right)^2 \cdot (\sigma_K)^2} \quad (50)$$

$$\sigma = \sqrt{\left(\frac{2,18}{4}\right)^2 \cdot (0,002)^2 + \left(\frac{5}{4}\right)^2 \cdot (0,01)^2} \quad (51)$$

$$\sigma = 1,25\% \quad (52)$$

$$S_{célula} = 2,27 \pm 1,25\% \quad (53)$$

4.7. Desempenho da plataforma de força

A Figura 57 mostra os resultados obtidos durante uma caminhada de aproximadamente vinte segundos de um indivíduo de aproximadamente 73kg de peso. Foram dados doze passos, seis com cada plataforma, e adquiridos os dados de tensão referentes as quatro células de carga de cada plataforma de força. Já a Figura 58 mostra outro ensaio realizado com um total de oito passos, quatro com cada plataforma. Os dados de cada célula de carga foram aplicados à sua respectiva função transferência e o resultado foi um gráfico com dados de força (kgF) versus tempo (s). Na parte superior das figuras é apresentado o gráfico da plataforma de número I que representa o pé esquerdo, já na parte superior da mesma figura, a plataforma de número II que representa o pé direito. O somatório de força das quatro células de carga de cada plataforma é plotado na cor azul. As demais cores representam as forças individuais das quatro células de carga.

Percebe-se pelas Figuras 57, 58 que na maioria dos passos foi possível observar a característica da curva em formato “M” que representa o primeiro e segundo ponto de apoio do pé durante o contato com o solo. Em alguns deles, não foi possível observar esta característica marcante da marcha humana, devido à realização naquele instante de tempo, da dinâmica da passada realizada. Também observa-se que a força máxima na maioria das passadas está perto dos 70kg, o que é condizente com o peso aproximado do voluntário.

As Figuras 60 e 61 mostram as plataformas em uso neste ensaio.

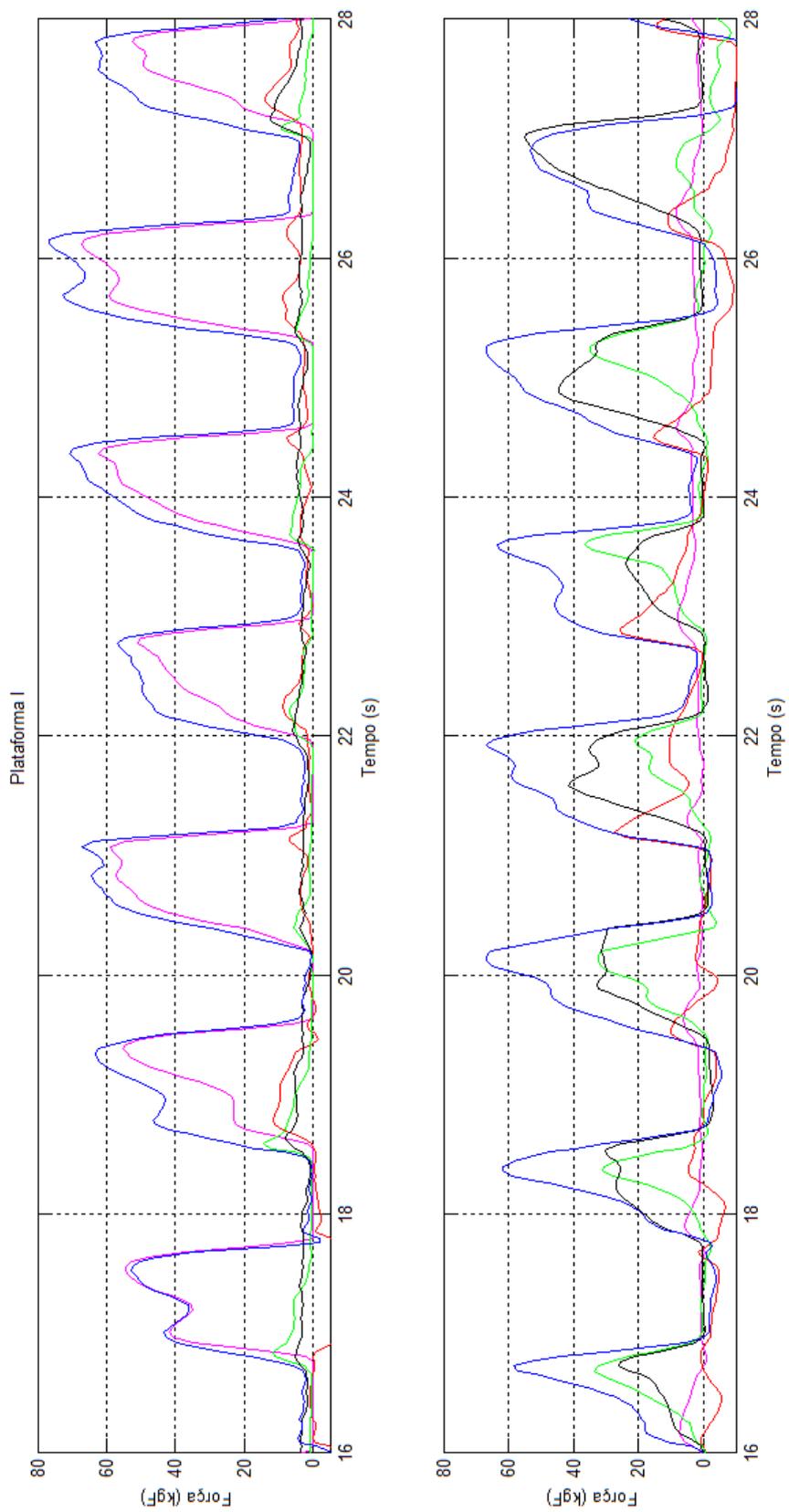
Figura 57. Ensaio com a plataforma de força.

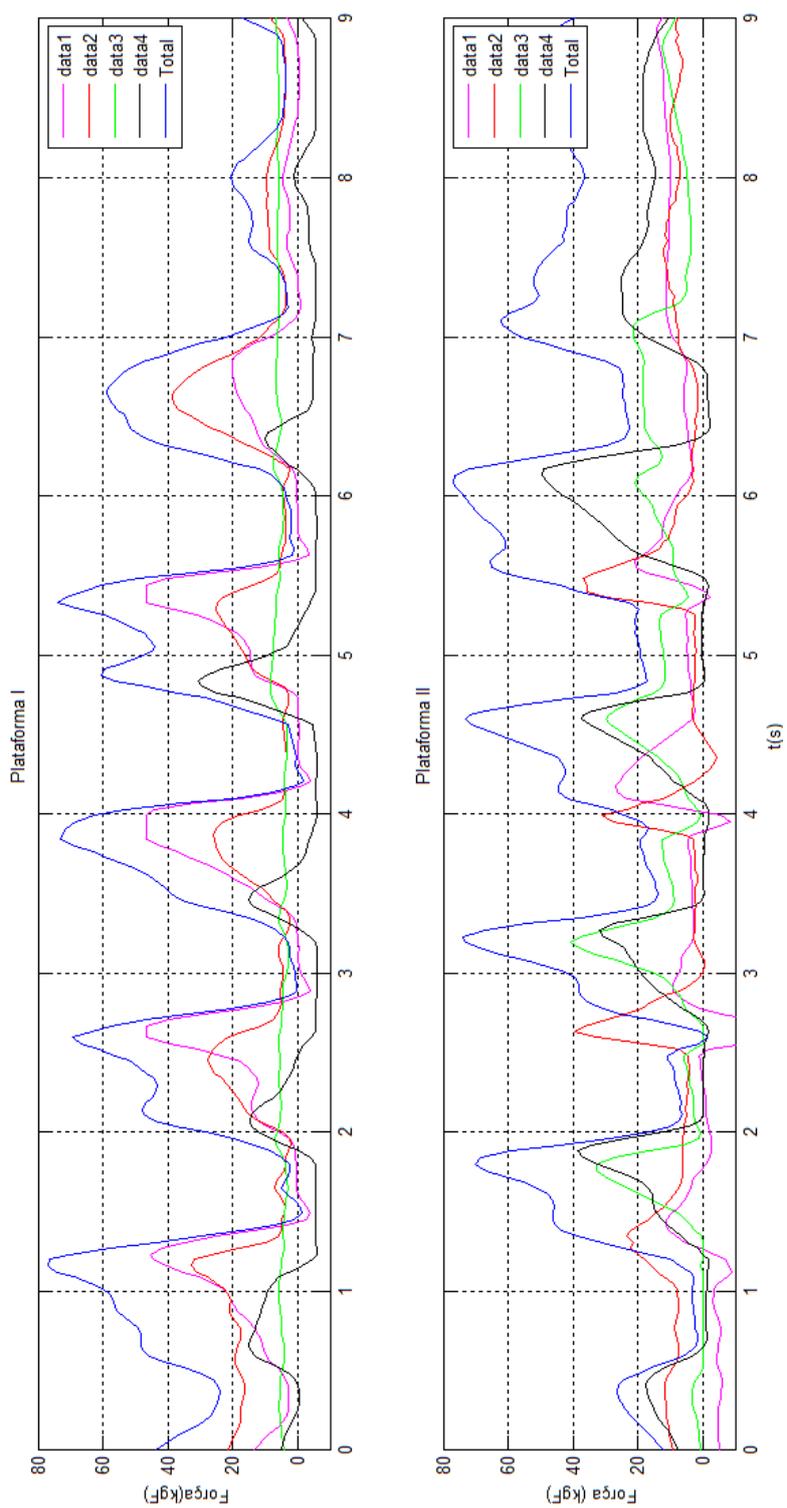
Figura 58. Segundo ensaio com as plataformas.

Figura 60. Plataformas de força durante os ensaios de marcha.



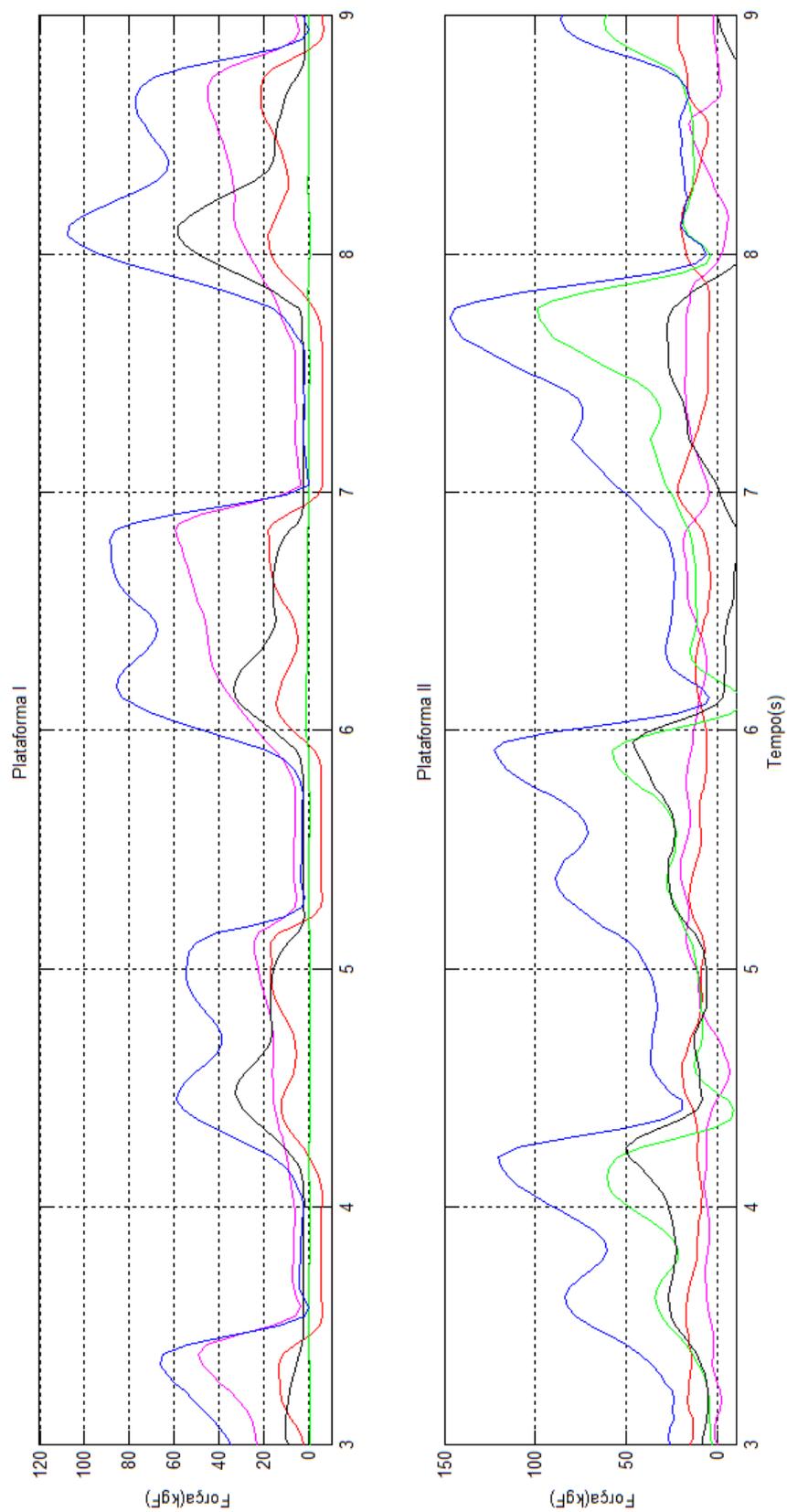
Figura 61. Plataformas de força durante os ensaios de marcha.

CONFIDENCIAL

4.8. Diferencial do Sistema

O grande diferencial deste sistema é a flexibilidade que ele apresenta pelo uso da plataforma de força móvel engastada no sapato em conjunto com o sistema de aquisição e armazenamento de dados portátil. Isto oferece uma mobilidade a qual não está presente nos outros sistemas de plataforma de força, principalmente as fixas. Sabe-se que não há no Brasil um equipamento para ensaios de marcha humana em situações como subir e descer escadas e rampas ou pedalar em uma bicicleta ergonômica, por exemplo.

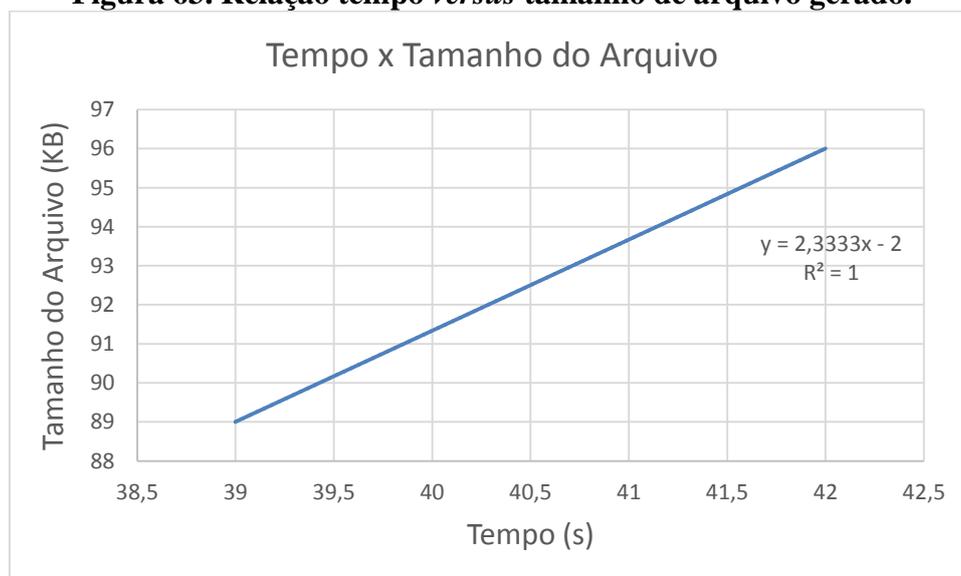
Para exemplificar um ensaio de marcha humana nestes ambientes que antes não eram possíveis, realizou-se um ensaio de subida de escadas. Neste ensaio o voluntário, que pesa aproximadamente 73kg, sobe um total de 7 degraus utilizando o sistema projetado. Do mesmo modo que nos outros ensaios, os dados de cada célula de carga foram aplicados à sua respectiva função transferência e o resultado foi um gráfico com dados de força (kgF) versus tempo (s), que pode ser visualizado na Figura 62. As típicas curvas do tipo “M” novamente foram visualizadas.

Figura 62. Ensaio de marcha humana subindo escadas.

4.9. Autonomia do Sistema

Um dos grandes diferenciais deste projeto é a autonomia e flexibilidade do sistema para realização de ensaios, pois os dados são adquiridos e armazenados via equipamento portátil. Como usou-se de um sistema do tipo *Datalogger* para armazenar os dados no cartão SD, é necessário verificar a autonomia deste sistema para que o mesmo possa funcionar sem a necessidade da troca do dispositivo de armazenamento, por um período aceitável de no mínimo uma hora de ensaio. Realizou-se um ensaio de aproximadamente 42 segundos e verificou-se que o tamanho do arquivo texto gerado foi de 39KB, já para um ensaio de 96 segundos verificou-se um tamanho de arquivo de 89KB. Com base nos dados da Figura 63 assumiu-se que esta progressão de tempo de ensaio *versus* tamanho do arquivo é linear, o que está bem próximo da realidade.

Figura 63. Relação tempo *versus* tamanho de arquivo gerado.



Assim, para uma hora de ensaio o tamanho do arquivo seria 8397,88KB ou 8,4MB. Conclui-se então que a autonomia do sistema *Datalogger* com um cartão de 1GB é de aproximadamente 110 horas de ensaio, permitindo o uso deste sistema em diversas situações experimentais que a célula de carga fixa impossibilita.

Mesmo com a autonomia de 110 horas de ensaio para o sistema *Datalogger*, se faz necessário realizar um estudo sobre a autonomia das baterias que alimentam todo o equipamento. Sabe-se que a maior parte da corrente consumida do sistema de condicionamento é proveniente da ponte de Wheatstone, que é puramente resistiva. Da Equação (22) sabe-se que a corrente consumida por cada braço da ponte é de 6,7mA. Sabe-se

que cada plataforma possui quatro pontes de Wheatstone com dois braços cada. Portanto a corrente total que é consumida por cada plataforma é de:

$$I_{total} = (6,7).2.4 = 53,6 \text{ mA} \quad (53)$$

Com o sistema ligado, mediu-se a corrente total consumida por cada placa de condicionamento e esta foi de 60 mA , próximo do calculado. Segundo o fabricante das baterias utilizadas, elas possuem uma capacidade de 450 mAh , ou seja, elas duram aproximadamente uma hora com uma carga de 450 mA conectada à elas. Assim o sistema teria autonomia de aproximadamente 7,5 horas. Porém, sabe-se que o circuito integrado *REF02* trabalha com uma alimentação mínima de 8V , ou seja, este circuito tem confiabilidade durante o tempo que a bateria dura para que a tensão elétrica fornecida por ela caia de 9V para 8V , então, estima-se que a autonomia do sistema, com confiabilidade da tensão de referência fornecida pelo circuito integrado *REF02* seja de aproximadamente 3 horas. Esta estimativa deu-se com base nas medições de tensão elétrica nas baterias durante os experimentos realizados.

5. CONCLUSÕES

Com este trabalho, pode-se verificar que as simulações via elementos finitos são importantes para conhecer como as células de carga se comportam. As simulações serviram também como base de comparação para os resultados obtidos experimentalmente. Verificou-se que a célula pode suportar uma carga de até 360kgF e ainda continuar na região elástica de deformação.

A calibração estática visou verificar a linearidade das oito células de carga e o resultado foi adequado dentro de uma margem de 7% de erro de linearidade para todas elas. Já a calibração dinâmica resultou em dados não compatíveis com a simulação, experimentalmente obteve-se uma frequência fundamental de 500Hz e para a simulação 7905Hz. Foram feitas algumas considerações para isto ter ocorrido.

Uma novidade com relação aos trabalhos anteriores foi o ensaio de deformação, que foi possível através do módulo *NI-9237* da *National Instruments*. Como resultado, para uma carga de 80kg, obteve-se uma deformação de $311\mu\text{m}/\text{m}$, 4,5% de diferença dos $297\mu\text{m}/\text{m}$ obtidos via simulação.

Os ensaios de marcha humana apresentaram resultados condizentes pois verificou-se o formato em “M” apresentado na literatura. Foi possível também realizar ensaios de subida de escada, o que é uma grande inovação e um dos maiores diferenciais deste projeto. O sistema de aquisição de dados com *Datalogger* se mostrou muito eficiente possuindo uma autonomia de 119 horas de ensaio usando um cartão de 1GB de memória, porém limitado pela autonomia da bateria que é de 3 horas aproximadamente.

6. PROPOSTAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Neste capítulo são apresentadas propostas de melhorias com base nas experiências adquiridas com este. São elas:

- Reduzir ainda mais as proporções da célula de carga, mas mantendo uma área aceitável para colagem dos extensômetros, do contrário precisar-se-á adquirir extensômetro de proporções muito menores;
- Realizar os ensaios de calibração em uma máquina de ensaios mecânicos devidamente calibrada;
- Desenvolver melhorias na interface homem-máquina com display LCD e opções de tempo de ensaio e local de gravação;
- Utilizar uma bateria igual as usadas em celulares hoje em dia, recarregável;
- Expandir o condicionamento em mais de um estágio de amplificação e de filtro;
- Utilizar resistores com incerteza menor que 1% para as etapas de ganho e filtro no condicionador, com isso se diminuirá a incerteza combinada do sistema.
- Utilizar um calçado de sola mais rígida.
- Estudar/testar o sistema em diversos ambientes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARENY, R.P.; WEBSTER, J.G. **Sensors and Signal Conditioning**. Second Edition, Jhon Wiley and Sons, Inc, 2001.

BALBINOT, A. **Notas de aula da cadeira de Instrumentação A**. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013.

BALBINOT, A.; BRUSAMARELO, V.J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas**. Segunda Edição. Editora LTC, 2007.v.2.

BARR, A.E.; BACKUS, S.I. Biomecânica da marcha. In: NORDIM, M.; FRANKEL, V.H. **Biomecânica básica do sistema musculoesquelético**. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2003. p. 379-396

BEER, F.P.; JOHNSTON, E.R.; DEWOLF, J.T.; MAZUREK, D.F. **MECHANICS OF MATERIALS**. Fifth Edition. Publicado por McGraw-Hill, 2009.

FERNANDES, J.H.M. **Semiologia Ortopédica Pericial – Módulo 06**.

http://www.ufrgs.br/semiologiaortopedica/Modulo_06.pdf

Acesso em 26/09/2013.

GARCIA, M.P; ANTÓN, J.C.A.; RODRÍGUEZ, J.C.C.; ORTEGA, G.J.G. **Instrumentación Electrónica**. 2004.

GOMES, S.C. **Resistência dos Materiais**. Quarta edição. UNISINOS, São Leopoldo, 1980.

HIBBELER, R.C. **Resistência dos Materiais**. Quinta Edição. Pearson Education do Brasil, 2004.

PIFFER, G.; BALBINOT, A. **Proposal for a mini wireless force plataforma for human gait analysis**. Sensors & Transducers, vol. 135, Issue 12, December 2011, pp. 57-69.

PAYTON, C. J.; BARTLETT, R. M. **Biomechanical Evaluation of Movement in Sport and Exercise**. First Edition, The British Association of Sport and Exercise Sciences Guidelines, 2008.

SEHNEM, R.; BALBINOT, A. **Portable system for force measurement of long-term monitoring during gait**. IWBBIO 2013. Proceedings Grands, 18-20, March,2013, pg.215-222.

WHITTLE, M. W. **Gait Analysis: an Introduction**. Fourth Edition. Editora Butterworth-Heinemann, 2007.

VAN DEN BOGERT, A.J.; GEIJTENBEEK, T.; EVEN-ZOHAR, O.; STEENBRINK, F.; HARDIN, E.C. **A real-time system for biomechanical analysis of human movement and muscle function**. Medical & Biological Engineering & Computing, October 2013, Volume 51, Issue 10, pp.1069-1077.

ANEXOS

Anexo I – Código utilizado para programar o microcontrolador Arduino

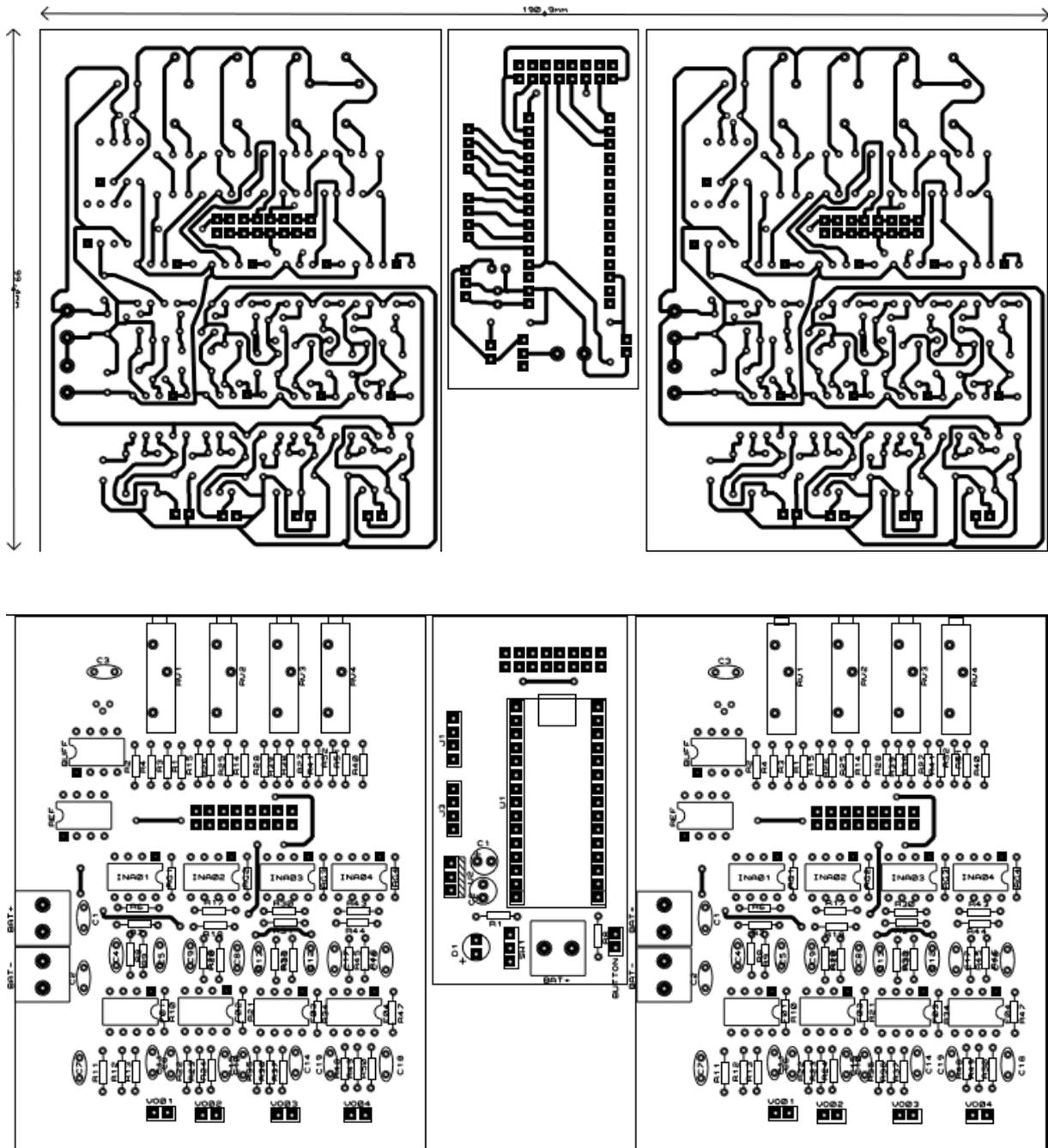
```
#include <SD.h>
const int chipSelect = 10;
const int buttonPin = 2;
int buttonState;
unsigned long tempoinicio;
unsigned long tempoagora;
int j;
const int ledgravando = 4;

void setup()
{
  Serial.begin(9600);
  pinMode(buttonPin, INPUT);
  pinMode(10, OUTPUT);
  pinMode(13, OUTPUT);
  pinMode(ledgravando, OUTPUT);
  j=0;
  digitalWrite(ledgravando,LOW);
  if (!SD.begin(chipSelect)) {
    Serial.println("Card failed, or not present");
    return;
  }
  Serial.println("Cartao Inicializado.");
  tempoinicio= millis();
  if (SD.exists("teste.txt")) {
    SD.remove("teste.txt");
    Serial.println("Arquivo removido");
  }
}

void loop()
{
  buttonState = digitalRead(buttonPin);
  if (buttonState==HIGH){
    digitalWrite(ledgravando,HIGH);
    tempoagora= (millis()/10)-tempoinicio;
    String dataString = String(tempoagora) += "\t";

    for (int analogPin = 0; analogPin < 8;
analogPin++) {
      int sensor = analogRead(analogPin);
      dataString += String(sensor);
      if (analogPin < 8) {
        dataString += "\t";
      }
    }
    File dataFile = SD.open("teste.txt", FILE_WRITE);
    if (dataFile) {
      dataFile.println(dataString);
      dataFile.close();
      Serial.println(dataString);
    }
    else {
      Serial.println("error opening datalog.txt");
    }
  }
  else {
    digitalWrite(ledgravando,LOW);
    tempoinicio = (millis()/10);
  }
}
```

Anexo II – Layout das placas de condicionamento e aquisição de sinal.



Anexo III – Circuito de condicionamento completo

