

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

**ANDRÉ GUIMARÃES OLIVEIRA**

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE  
UMA PLATAFORMA DE FORÇA EXTENSOMÉTRICA  
MULTIAXIAL**

Porto Alegre  
2011

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

**DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE  
UMA PLATAFORMA DE FORÇA EXTENSOMÉTRICA  
MULTIAXIAL**

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

2011

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

ANDRÉ GUIMARÃES OLIVEIRA

## **DESENVOLVIMENTO E ESTUDO DE UMA PLATAFORMA DE FORÇA EXTENSOMÉTRICA MULTIAXIAL**

Este projeto foi julgado adequado para fazer jus aos créditos da Disciplina de “Projeto de Diplomação”, do Departamento de Engenharia Elétrica e aprovado em sua forma final pelo Orientador e pela Banca Examinadora.

Orientador: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Alexandre Balbinot, UFRGS

Doutor pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Banca Examinadora:

Prof. MSc. Ramon Carlos Poisl, UFRGS

Mestre pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Prof. MSc. Tiarajú Vasconcellos Wagner, UFRGS

Mestre pela UFRGS – Porto Alegre, Brasil

Porto Alegre, dezembro de 2011

## **DEDICATÓRIA**

Dedico esse trabalho a meus avós, pelo grande incentivo e a minha namorada pelo apoio.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a UFRGS, pela disponibilização do conhecimento.

Aos professores Ramon Carlos Poisl e Tiarajú Vasconcellos Wagner por disponibilizarem seu tempo para avaliar meu trabalho.

Ao meu orientador, o professor Alexandre Balbinot, pelas sugestões e por mostrar enorme interesse no andamento e na qualidade do trabalho.

## RESUMO

Este trabalho tem por objetivo desenvolver um sistema onde é possível medir as forças envolvidas em uma plataforma de força tridimensional. A plataforma é formada por duas chapas de formato quadrado de 50cm de lado, unidas por quatro células de carga instrumentada com extensômetros e com duas pontes completas de Wheatstone para cada uma das células de carga e foi projetada para suportar uma força de zero a 1000N no eixo z (vertical).

O sistema foi simulado mecanicamente em SolidWorks™, através de estudos estáticos e dinâmicos. Foi realizado ensaio dinâmico experimental, trazendo os modos de vibração nas seguintes frequências: 158Hz, 200Hz, 201Hz, 265Hz e 323Hz. Oito canais de condicionamento foram desenvolvidos, incluindo fonte de alimentação, amplificação e filtragem. A aquisição de dados foi realizada através do software LabView™ utilizando uma placa de aquisição de dados USB 6008 da National Instruments.

Os resultados encontrados no eixo z apresentaram uma linearidade de apenas 0,49%, revelando um bom funcionamento do sistema em geral. As deformações encontradas experimentalmente na célula de carga foram comparadas com o modelo simulado trazendo uma diferença de 5,8%. No modelo matemático ocorreu uma diferença de 305,8% referente à simulação, devido ao modelo utilizado ser aproximado e não possuir o mesmo formato da célula de carga utilizada.

O software desenvolvido em LabView que faz as leituras das informações da plataforma traz informações como o COP (centro de pressão), a força nos três eixos, e a contribuição de cada célula de carga no eixo z, permitindo uma leitura intuitiva e interessante dos dados para as áreas da saúde. Paralelamente a força no eixo z, há um gráfico exibindo a massa aplicada na plataforma de força.

**Palavras-chaves: Plataforma de força multiaxial, extensometria, análise de marcha humana.**

## ABSTRACT

This work aims to develop a system where you can measure the forces involved in a three-dimensional force platform. The platform consists of two square-shaped plates of 50cm from the side, joined by four load cells instrumented with strain gauges and two full Wheatstone bridges for each of the load cells and is designed to withstand a force of 1000N to zero in z-axis.

The system was mechanically simulated in SolidWorks™ through static and dynamic studies. Experimental dynamic testing was performed, bringing the vibration modes in the following frequencies: 158Hz, 200Hz, 201Hz, 265Hz and 323Hz. Eight channels of conditioning were developed, including power supply, amplification and filtering. Data acquisition was performed using the LabView™ software using a data acquisition board from National Instruments USB 6008.

The results of the z-axis showed a nonlinearity of just 0.49%, showing a well-functioning system in general. The deformations found experimentally in the load cell were compared with the simulated model bringing a difference of 5.8%. In the mathematical model, a difference of 305.8% relative to the simulation, because the model used is approximate and does not have the same format of the used load cell.

The software developed in LabView that makes reading the information platform provides information such as the COP (center of pressure), the strength in all three axes, and the contribution of each load cell in the z-axis, allowing an intuitive and interesting reading of the data for areas of health. In parallel to the z-axis force, there is a graph showing the mass applied to the force platform.

**Keywords: Multiaxial force platform, gage, human gait analysis.**

## SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	9
LISTA DE TABELAS .....	11
1. INTRODUÇÃO .....	13
2. CONTEXTO TEÓRICO: UMA INTRODUÇÃO .....	15
2.1 Plataforma de força .....	16
2.2 Célula de carga .....	21
2.3 Extensometria .....	23
2.4 Condicionamento de sinais .....	31
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL .....	35
3.1 Breve descrição mecânica da plataforma de força .....	36
3.2 Descrição do procedimento de simulação.....	39
3.3 Cadeia de medida proposta .....	44
3.4 Condicionamento e aquisição de dados .....	45
3.5 Procedimentos de calibração e de ensaios .....	50
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	58
4.1 Simulações .....	59
4.2 Calibração .....	68
4.3 Condicionamento de sinais e aquisição de dados.....	77
4.4 Ensaios com a plataforma.....	80
4.5 Comparação do modelo matemático aproximado, simulação e ensaio experimental de uma célula de carga em anel .....	83
5. CONCLUSÕES .....	88
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	89
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	90
APÊNDICE .....	93

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1: Diagrama de controle postural. ....	16
Figura 2.2: Variação do COP de um indivíduo em pé – escala em cm. ....	18
Figura 2.3: Exemplo de plataforma com sensores distribuídos. ....	19
Figura 2.4: Convenção dos eixos das forças de reação do solo em 3D. ....	20
Figura 2.5: Célula de carga comercial. ....	21
Figura 2.6: Típica cadeia de medida de transdução. ....	22
Figura 2.7: Deformação ( $\Delta l$ ) em tração de uma estrutura qualquer. ....	24
Figura 2.8: Cisalhamento. ....	25
Figura 2.9: Deformação de Poisson por tração. ....	26
Figura 2.10: Deformação de Poisson por tração (a) e compressão (b). ....	26
Figura 2.11: Limite elástico - Lei de Hooke. ....	28
Figura 2.12: Exemplo de um extensômetro do tipo folha. ....	30
Figura 2.13: Extensômetro de metal do tipo folha. ....	30
Figura 2.14: Ponte de Wheatstone. ....	31
Figura 2.15: Ponte de Wheatstone completa. ....	33
Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema. ....	35
Figura 3.2: Disposição das células de carga na plataforma de força e suas dimensões. ....	37
Figura 3.3: Disposição dos extensômetros (em vermelho) na célula de carga e as duas pontes de Wheatstone configuradas. ....	38
Figura 3.4: Dimensões do extensômetro. ....	39
Figura 3.5: Dimensões da célula de carga, em milímetros. ....	40
Figura 3.6: Mancais de sustentação. ....	40
Figura 3.7: Esboço da célula de carga com seus mancais de sustentação. ....	41
Figura 3.8: Vista isométrica da plataforma de força. ....	41
Figura 3.9: Vista frontal da plataforma de força. ....	42
Figura 3.10: Indicação da aplicação de força e do engaste. ....	43
Figura 3.11: Cadeia de medida. ....	45
Figura 3.12: Fonte de tensão constante. ....	46
Figura 3.13: Ajuste de zero. ....	47
Figura 3.14: Estágios de ganho. ....	48
Figura 3.15: Primeiros testes da placa de condicionamento de sinais em bancada. ....	48
Figura 3.16: Filtro desenvolvido no FilterPro 2.0 – Texas Instruments. ....	49
Figura 3.17: Realização do ensaio dinâmico. ....	51
Figura 3.18: Diagrama em blocos desenvolvido no LabView. ....	52
Figura 3.19: Interface homem máquina deste trabalho. ....	54
Figura 3.20: Calibração estática dos eixos x e y. ....	55
Figura 3.21: Características do acelerômetro usado no ensaio dinâmico. ....	56
Figura 3.22: Acelerômetro colado na superfície da plataforma. ....	57
Figura 3.23: Condicionamento do acelerômetro utilizado. ....	57
Figura 4.1: Deformação estática – escala em $\epsilon$ . ....	59
Figura 4.2: Deslocamento estático – escala em milímetros. ....	60

Figura 4.3: Tensões estáticas – escala em $N/m^2$ .	60
Figura 4.4: Tensões estáticas – Escala em $N/m^2$ .	61
Figura 4.5: Forma modal 1 – 183,20Hz.	63
Figura 4.6: Forma modal 2 – 205,55Hz.	64
Figura 4.7: Forma modal 3 – 205,89Hz.	65
Figura 4.8: Forma modal 4 – 314,36Hz.	66
Figura 4.9: Forma modal 5 – 348,99Hz.	67
Figura 4.10: Gráfico do ensaio com pesos padrão no centro da plataforma de força.	69
Figura 4.11: Calibração com pesos padrão no centro da plataforma.	70
Figura 4.12: Calibração com pesos padrão na extremidade da plataforma.	70
Figura 4.13: Ensaio com pesos padrão na célula de carga um.	71
Figura 4.14: Ensaio com pesos padrão na célula de carga dois.	72
Figura 4.15: Ensaio com pesos padrão na célula de carga três.	73
Figura 4.16: Ensaio com pesos padrão na célula de carga quatro.	74
Figura 4.17: Diferença de tensão medida na soma das quatro células com a célula em que foi aplicado o peso padrão.	75
Figura 4.18: Representação gráfica da calibração estática nos eixos x e y.	77
Figura 4.19: Resultado da análise de FFT.	79
Figura 4.20: Ensaio dinâmico em função no tempo, em verde o eixo z, considerado na análise.	79
Figura 4.21: Ensaio com voluntário.	81
Figura 4.22: Posicionamento no eixo y.	82
Figura 4.23: Posicionamento no eixo x.	82
Figura 4.24: Leitura dos resultados durante ensaio.	83
Figura 4.25: Dimensões de uma célula de carga em anel típica.	83
Figura 4.26: Deslocamento de $5,7\mu m$ no topo do anel.	85
Figura 4.27: Deformação em torno de $48,6\mu m/m$ no local do extensômetro.	86

## LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Características dos extensômetros utilizados. ....	39
Tabela 3.2: Propriedades mecânicas do aço inox AISI304. ....	42
Tabela 3.3: Propriedades mecânicas do aço carbono ABNT1020. ....	42
Tabela 3.4: Propriedades mecânicas do alumínio naval 5052F.....	43
Tabela 3.5: Dados da referência de tensão. ....	46
Tabela 4.1: Modos de vibração.....	61
Tabela 4.2: Ensaio com pesos padrão no centro da plataforma de força.....	68
Tabela 4.3: Ensaio com pesos padrão sobre a célula de carga um. ....	71
Tabela 4.4: Ensaio com pesos padrão sobre a célula de carga dois.....	72
Tabela 4.5: Ensaio com pesos padrão sobre a célula de carga três. ....	73
Tabela 4.6: Ensaio com pesos padrão sobre a célula de carga quatro. ....	74
Tabela 4.7: Calibração xy .....	76
Tabela 4.8: Comparação dos modos de vibração simulados e experimentais.....	79
Tabela 4.9: Comparação do modelos matemático com a simulação e os dados experimentais.....	86

## LISTA DE ABREVIATURAS

3D: Três dimensões

COP: Centro de pressão

F<sub>x</sub>: Força no eixo X

F<sub>y</sub>: Força no eixo Y

F<sub>z</sub>: Força no eixo Z

GF: *Gage Factor* (Fator gage)

MEMS: *Micro-Electro-Mechanical Systems*

SG: *Strain gage*

## 1. INTRODUÇÃO

Simples atividades diárias fazem uso do correto equilíbrio e da orientação corporal para manutenção da postura correta. Ao andar, correr, deitar e até mesmo parar em pé, o sistema muscular está a todo o momento corrigindo esforços para manter o equilíbrio. Caso o indivíduo permaneça parado em pé, ocorrem oscilações que permitem que forças musculares controlem o centro de gravidade do corpo humano. O arranjo das angulações relativas de todas as articulações envolvidas no equilíbrio pode ser chamado de postura (Zatsiorsky, 1998).

O termo postura ereta estática é imprecisamente utilizado devido a esta oscilação e deveria ser chamada de postura ereta semi-estática. Nessa posição, as respostas musculares buscam o equilíbrio e mantêm o centro de gravidade do corpo dentro do limite formado pela base dos pés, dessa forma, tornando possível a análise postural do centro de gravidade atual através de uma plataforma de forças (Duarte & Freitas, 2010).

A marcha humana é um fenômeno complexo e normalmente não descrito analiticamente em função do grande número de variáveis a serem estudadas. Dessa forma, a análise, através da reação do solo, da pisada, simplifica o processo de estudo e torna possível a aquisição de dados para a caracterização da marcha.

Este trabalho apresenta o desenvolvimento e simulações de uma plataforma de forças, de formato quadrado e acoplada a quatro células de carga fabricadas em aço inox AISI304 (ABNT NBR5601, 1981) dispostas sobre uma base rígida de aço carbono ABNT1020 (NBR NM87, 2000).

Os dados são obtidos de extensômetros colados nas células de carga e devidamente condicionados de forma a tratar corretamente os dados. Para facilitar a sua interpretação, foi desenvolvida uma ferramenta de análise com a aquisição e exibição de dados utilizando o software LabView™. A plataforma de força, junto com as células de carga são analisadas através de simulações pelo sistema de desenvolvimento SolidWorks™, com ensaios estáticos sob aplicação de forças e simulações dinâmicas para efeito da resposta em frequência.

É importante salientar que a plataforma de forças tem papel importante no diagnóstico de patologias em desvios posturais e assimetrias na estrutura óssea. Com o auxílio de câmeras, através do estudo da imagem com tratamentos por software, e de dados obtidos em plataformas de força, é possível visualizar e determinar tais problemas (Soares *et al.*, 2008 ).

## 2. CONTEXTO TEÓRICO: UMA INTRODUÇÃO

A plataforma de força é um dispositivo que permite o estudo das forças aplicadas em sua superfície, durante a realização de marchas, análise postural, entre outros, com a finalidade de caracterizar as forças envolvidas nestes fenômenos biomecânicos (Urquiza *et al.*, 2007).

A análise de dados obtidos da plataforma de forças pode trazer uma série de contribuições, como por exemplo, a avaliação e correção de postura (Duarte & Freitas, 2010), o estudo da marcha humana (Barela & Duarte, 2011), o desenvolvimento de calçados e a otimização em esportes de alto desempenho (Amadio *et al.*, 2005). Portanto, o dimensionamento específico da plataforma, seus transdutores e o método de aquisição de dados deve ser desenvolvido de forma a ser compatível com os corpos em análise.

Para obter a correta aquisição dos dados, é importante que a plataforma de força seja desenvolvida de forma a responder fielmente aos estímulos mecânicos, através dos transdutores denominados de célula de carga. Para este projeto, é fundamental que alguns conceitos de instrumentação sejam estudados e corretamente utilizados na construção e elaboração da plataforma de força juntamente com as células de carga e seu adequado condicionamento.

É importante ressaltar, que no caso do estudo de células de carga no regime elástico, os extensômetros elétricos de filme de metal, que possuem alta precisão de medida, baixo custo, excelente linearidade, excelente resposta dinâmica e fácil instalação, são uma boa opção para a análise experimental de deformações (Omega, 2011).

## 2.1 Plataforma de força

Mesmo parecendo uma tarefa simples, o controle da postura envolve vários sistemas sensoriais, como o somatossensorial, visual e vestibular para manter o corpo em equilíbrio em situações instáveis. As condições ambientais e as informações sensoriais interferem diretamente neste controle (Urquiza, 2005). Na Figura 2.1 é exibido um diagrama de blocos que apresenta os principais sistemas envolvidos durante o controle postural.

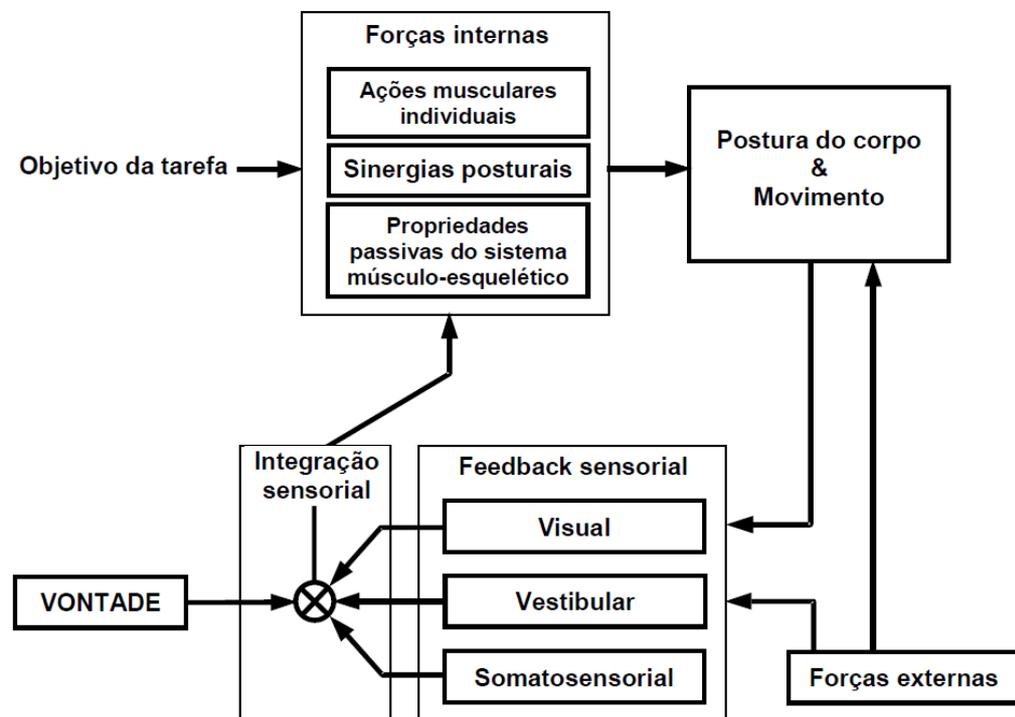


Figura 2.1: Diagrama de controle postural.

Fonte: Duarte, 2000.

Alterações posturais podem ser decorrentes da falta de informação preventiva, aumentando a cada ano. Os problemas posturais e as decorrentes síndromes dolorosas variam de acordo com o modo de vida de cada indivíduo e dependem também da conscientização corporal. Claramente uma pessoa que levanta muito peso tem probabilidade maior de ter problemas. Porém, em trabalhos leves, a maneira com que se executa o movimento, a

permanência da postura e até a repetição de movimentos pode trazer transtornos a saúde (Verderi, 2002).

Na posição em pé (semi-estática), a oscilação causada pelo sistema que gerencia o equilíbrio pode ser estudada através de uma plataforma de força. Além dessa oscilação, uma plataforma de força é capaz de medir esforços de reação ao solo, vibrações e forças resultantes. Dessa forma, é possível realizar leituras importantes para a interpretação da pisada, da análise postural, a caracterização de vibrações e a distribuição de forças de forma confiável.

A medida e o registro da contínua oscilação do corpo humano é chamada de estabilometria ou estabilografia, onde os dados obtidos através do uso de plataformas de força são chamados de COP (Centro de Pressão). O COP é um ponto (mostrado na Figura 2.2) de aplicação da resultante das forças verticais que atuam na superfície de apoio e representa um resultado coletivo do sistema de controle postural e da força da gravidade (Uhler, 2008).

Porém, apesar da correta análise de dados, e da correta interpretação das informações obtidas, não é possível obter dados distribuídos sobre a superfície, apenas a resultante, mostrada na Figura 2.2. Para tal, é necessário outro tipo de sensor, como por exemplo, uma matriz sensível à força aplicada (Giacomozzi & Macellari, 1997), conforme o esboço de sistema apresentado na Figura 2.3.

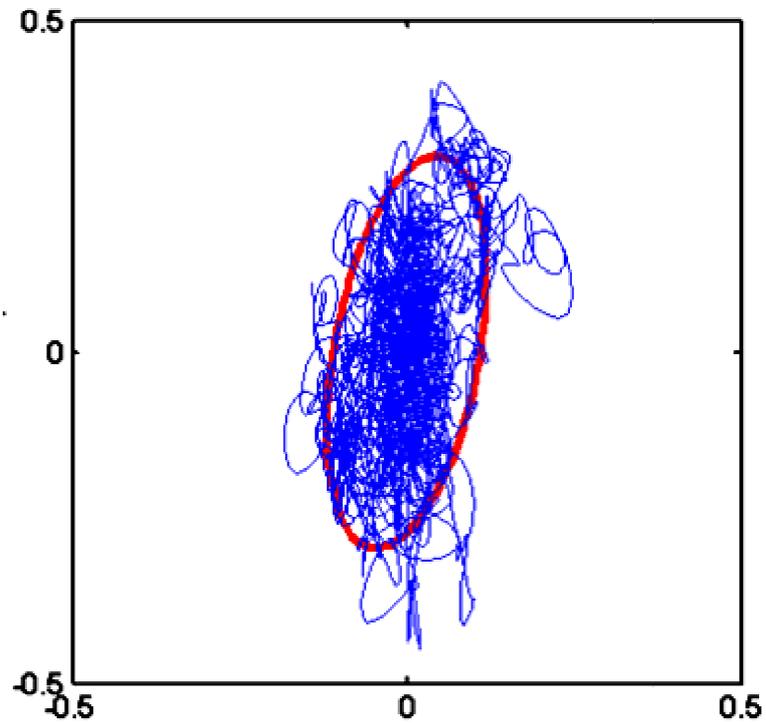


Figura 2.2: Variação do COP de um indivíduo em pé – escala em cm.

Fonte: Wiczorek, 2003.

Por este motivo, são utilizadas câmeras, lasers, acelerômetros ou outras formas para caracterizar a posição do corpo em estudo. Segundo Côrrea & Balbinot (2011), a utilização de acelerômetros MEMS (*Micro-Electro-Mechanical Systems*) para a determinação do ângulo das articulações é possível, complementando a caracterização de sistemas com plataforma de força. Esses sensores podem ser utilizados em diversos segmentos, pois possuem custo baixo e tamanho pequeno, viabilizando sua utilização fora de laboratórios.

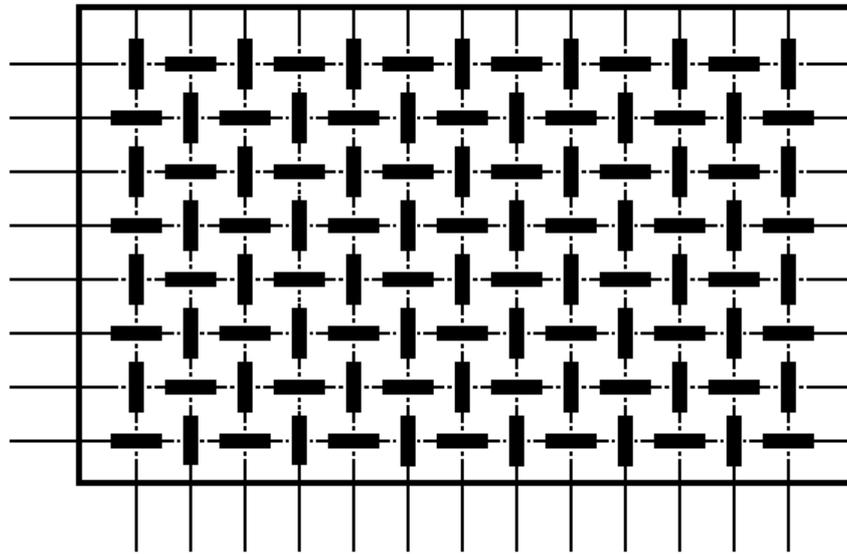


Figura 2.3: Exemplo de plataforma com sensores distribuídos.

De posse da informação sobre a angulação dos sensores e das forças determinadas pela plataforma de força, os dados são cruzados e as informações resultantes proporcionam uma caracterização mais completa do comportamento em análise (Soares *et al.*, 2008). Alternativamente, no alcance da plataforma de forças, estuda-se a resultante da força aplicada, que pode ser determinada pela correta calibração da plataforma.

Há diversos tipos de plataformas de força, e uma grande variedade de sensores utilizados (tipicamente as mais utilizadas são as extensométricas e as piezoelétricas). A parte mecânica da plataforma pode contar com diversas configurações, podendo ser semi-estática ou dinâmica (no caso de sistemas massa-mola para o estudo de vibrações).

Segundo Cavallo *et al.* (2008), através da combinação paralela de um acelerômetro e um sensor ótico, as vibrações provenientes de roedores podem ser adquiridas de forma satisfatória considerando a comparação dos sinais obtidos, desde que tomados cuidados com variáveis não controláveis, como o desgaste, parâmetros internos dos sensores e a

temperatura. Para uma perfeita aquisição de dados, neste caso, deve-se efetuar nova calibração a cada uso do equipamento.

No contexto da marcha humana, que se mostra um fenômeno complexo devido a suas diversas iterações, acaba por se desenvolver uma multiplicidade de comportamentos e variantes. Padrões para cada variável têm sido tomadas como referência pela comunidade científica, separando as classes referentes a essa grande variedade de características, como velocidade da caminhada, sexo, idade, etc. Dessa forma, torna-se difícil encontrar um padrão para a população em geral e uma análise, através de um banco de dados de caminhadas, é de grande importância para a caracterização de diversos tipos de marcha em seus determinados segmentos. A análise do indivíduo em conjunto com a base de dados criada, possibilita a avaliação da disfunção de marcha, desvios posturais e até o desenvolvimento de próteses (Chung, 2000).

Através da plataforma de força, estudada neste trabalho, é possível criar este banco de dados, modelando as reações do solo à marcha humana, considerando as três dimensões apresentadas na Figura 2.4. Cabe observar que o eixo  $F_y$  indica o sentido do deslocamento sobre a plataforma.

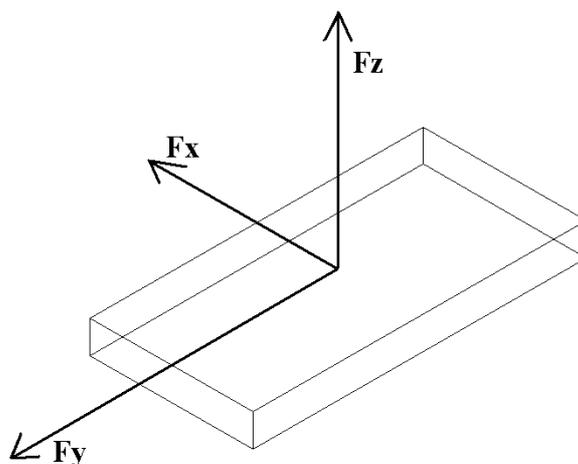


Figura 2.4: Convenção dos eixos das forças de reação do solo em 3D.

## 2.2 Célula de carga

Considerando-se a gama de sensores e transdutores para pesquisas, aplicações automotivas e industriais, as células de carga mostram-se como um dos mais importantes transdutores. Basicamente, uma célula de carga mede deformações que são ocasionadas por diversos tipos de forças (Johnson, 1997). Para exemplificar, a Figura 2.5: Célula de carga comercial para uso à tração e compressão.

As principais razões da utilização de células de carga estão relacionadas à sua alta fidelidade de resposta, custo baixo, dimensões reduzidas (mesmo para aplicações de grandes cargas) e por permitirem medições dinâmicas. Como exemplo, podem ser usadas para medir pressão, peso, aceleração e torque. A célula de carga funciona como uma mola, já que proverá a requerida resistência e a força restauradora (Beck, 1983).



Figura 2.5: Célula de carga comercial.

Fonte: <http://www.com-ten.com/force-sensors-load-cell.html>.

Na medição de forças, integram um elemento elástico (chamado de elemento mola) ao qual está associado um sensor/transdutor. Tipicamente nas células de carga em que o elemento elástico sofre pequenas deformações, o sensor normalmente utilizado é o extensômetro. Quando o elemento elástico sofre uma grande deformação recorre-se, normalmente, a um sensor/transdutor de deslocamento (indutivo, capacitivo ou resistivo) que permite obter um sinal que traduz a deformação produzida pela carga aplicada (Balbinot, 2011).

Células de carga são normalmente classificadas conforme o tipo de configuração de seu elemento elástico. Entre as mais importantes estão a célula de carga tipo coluna, célula de carga do tipo viga engastada e a célula de carga do tipo anel (Balbinot, 2011). A célula de carga do tipo anel, configuração da célula de carga utilizada neste trabalho, além de possuir formato de anel, possui uma geometria a fim de isolar esforços no plano horizontal, permitindo uma análise tridimensional quando em um conjunto de células de carga. A Figura 2.6 ilustra uma típica cadeia de medida de transdução para células de carga.

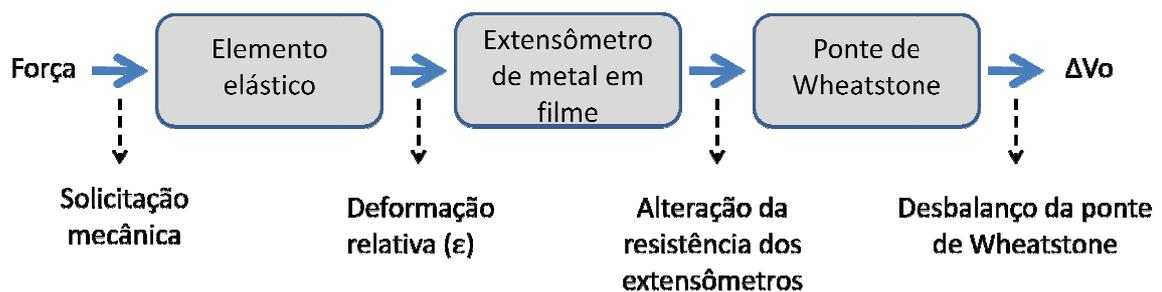


Figura 2.6: Típica cadeia de medida de transdução.

Fonte: Balbinot, 2011.

### 2.3 Extensometria

Atualmente, existem diversos tipos de sensores para uso de acordo com o sinal de saída desejado e a forma de medir a deformação disponível. No entanto, devido a sua alta precisão e baixo custo, os extensômetros são largamente utilizados em projetos de células de carga. Dependendo da aplicação, os extensômetros podem ser de metal ou semi-condutores. Extensômetros semicondutores são muito pequenos e possuem grande *fator gage*, muito maior que os de metal, e por esse motivo, estão presentes em células de carga muito pequenas (Hernandez, 2006).

Nos extensômetros de metal em filme, o parâmetro alterado pelas características mecânicas é sua resistência, pois quando uma força é aplicada a um objeto, ocorre uma deformação ( $\epsilon$ ). A pressão ( $p$ ) pode ser calculada através da Equação (2.1) onde se divide a força ( $F$ ) aplicada pela área ( $A$ ):

$$p = \frac{F}{A} \quad (2.1)$$

O termo *Strain* é definido como a quantidade de deformação por unidade de comprimento de um objeto (Figura 2.7). O *Strain* ( $\epsilon$ ) é determinado dividindo-se a deformação total do comprimento original ( $\Delta l$ ) pelo comprimento original do objeto ( $l_0$ ) como segue na Equação 2.2 (Vasconcellos, 2005):

$$Strain (\epsilon) = \frac{\Delta l}{l_0} \quad (2.2)$$

Como os valores típicos para essa deformação são menores que 0,005 m/m, são frequentemente indicados em micro-strain ( $\mu\epsilon$ ). A Figura 2.7 ilustra a variação no comprimento considerando uma força de tração.

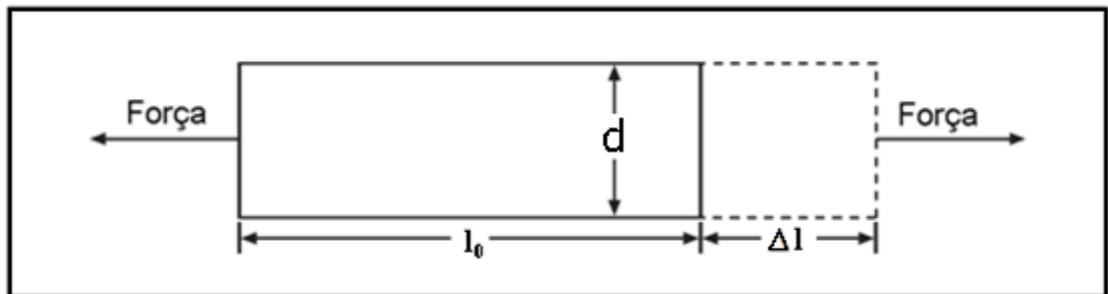


Figura 2.7: Deformação ( $\Delta l$ ) em tração de uma estrutura qualquer.

Fonte: Adaptado de Omega, 2011.

As relações que descrevem o comportamento do extensômetro são dadas pela Equação (2.3):

$$GF = \frac{\Delta R/R}{\Delta l/l_0} = \frac{\Delta R/R}{\epsilon} \quad (2.3)$$

onde GF representa o fator gage;  $\Delta R$  a variação da resistência em função da deformação do condutor;  $R$  a resistência inicial;  $\Delta l$  a variação do comprimento;  $l_0$  representa o comprimento inicial e  $\epsilon$  representa a deformação por unidade de comprimento.

Um extensômetro ideal alteraria sua resistência apenas devido a deformações da superfície no qual o sensor está colado ou cimentado. Porém, em aplicações reais, a temperatura, propriedades do material, a cola usada para aderir o extensômetro e a estabilidade do metal causam variações não desejadas na sua resistência. Devido à maioria dos metais não possuírem as mesmas propriedades em todas as direções, o conhecimento da deformação axial não é suficiente para uma análise completa. Cisalhamento, torção e a

deformação de Poisson também necessitariam de estudo. Cada uma delas faria necessário um arranjo de extensômetros diferente (Omega, 2011).

A tensão de cisalhamento provém de forças de direções semelhantes, porém em sentidos opostos, ocasionando em uma deformação. Imagine uma força vertical agindo no canto direito de um objeto preso em sua extremidade esquerda, forçando a tornar-se trapezoidal (Figura 2.8). A deformação que esta força vertical está causando pode ser expressa como variação angular entre o eixo horizontal  $x$  e a nova posição. A deformação de cisalhamento é a tangente deste ângulo.

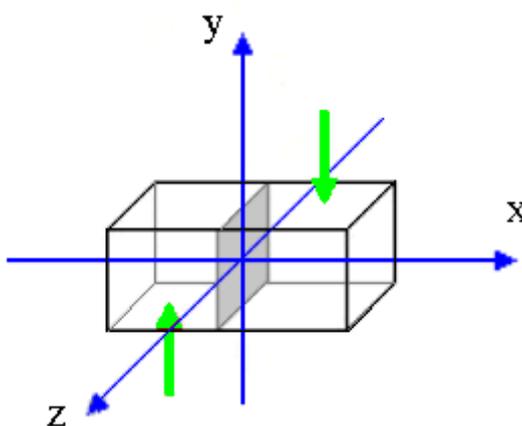


Figura 2.8: Cisalhamento.

Fonte: adaptado de

[http://www.fec.unicamp.br/~fam/novaes/public\\_html/iniciacao/teoria/solicita](http://www.fec.unicamp.br/~fam/novaes/public_html/iniciacao/teoria/solicita).

A deformação de Poisson (Equação 2.6) expressa a diminuição da seção e o alongamento que ocorre em uma barra tensionada (Figura 2.9) e é definida como a razão negativa da deformação transversal (Equação 2.4), ocasionada pela diminuição do diâmetro da barra com a deformação na direção longitudinal (Equação 2.5).

No caso da tração, com o aumento do comprimento, e a diminuição da seção transversal (Figura 2.10(a)), a resistência elétrica de um fio aumenta. Os registros de

microdeformação também permitem a caracterização qualitativa das forças aplicadas. Forças de compressão recebem como prefixo o sinal negativo, e forças de tração, recebem como prefixo o sinal positivo (Kojima, 2008).

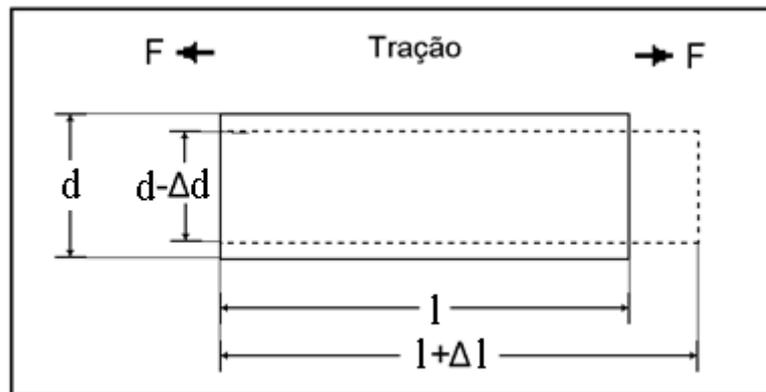


Figura 2.9: Deformação de Poisson por tração.

Na Figura 2.9, (F) representa a força de tração, (d) e ( $\Delta d$ ) o diâmetro original e sua variação e (l) e ( $\Delta l$ ) o comprimento original e sua variação, respectivamente.

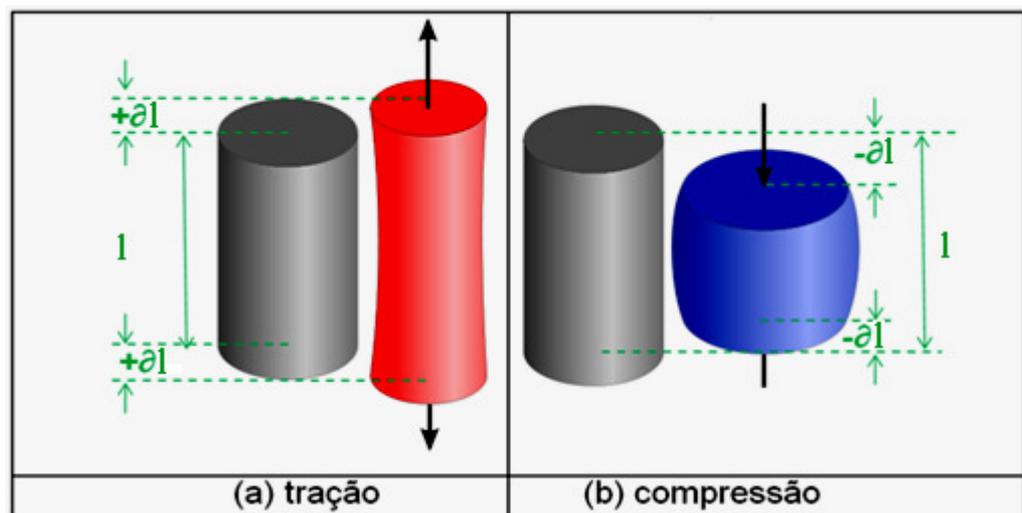


Figura 2.10: Deformação de Poisson por tração (a) e compressão (b).

Fonte: Ceoni, 2010.

A Figura 2.10(a) e 2.10(b) representam tridimensionalmente a deformação por tração e compressão, respectivamente.

A diminuição do diâmetro da barra é a razão da variação do diâmetro pelo diâmetro inicial e é dada pela seguinte expressão:

$$\text{Deformação transversal } (\epsilon_t) = \Delta d / d \quad (2.4)$$

A deformação longitudinal ( $\epsilon_L$ ) é a razão entre a variação do comprimento e o comprimento inicial:

$$\text{Deformação longitudinal } (\epsilon_L) = \Delta l / l \quad (2.5)$$

O coeficiente de Poisson (Equação 2.6) pode ser determinado através da divisão da deformação transversal pela deformação longitudinal, e é representada pela Equação (2.6):

$$\text{Coef. de Poisson } (\nu) = \frac{\Delta d / d}{\Delta l / l} = \frac{\epsilon_t}{\epsilon_L} \quad (2.6)$$

A deformação por flexão é obtida determinando-se a relação entre a força e a quantidade de flexão resultante. Não encontrados frequentemente, os esforços de torção são calculados dividindo-se o *stress* de torção pelos módulos de elasticidade (Omega, 2011).

Para obter a tensão normalmente utiliza-se um método indireto, através da medição da deformação. A deformação, e mesmo deformações muito pequenas, são medidas com o uso

de extensômetros (strain gages). A tensão mecânica pode ser calculada usando-se a Lei de Hooke adaptada a metais, ( $\sigma = E \cdot \varepsilon$ ), onde  $\sigma$  é a tensão mecânica (em Pascal),  $\varepsilon$  a deformação específica (adimensional) e E o módulo de elasticidade ou módulo de Young.

Na Lei de Hooke a constante de proporcionalidade entre a tensão e a deformação é o módulo de elasticidade (E). Assim, a Lei de Hooke estabelece uma relação linear entre a tensão mecânica e a deformação, linearidade que não se mantém a medida que a deformação atinge altos valores (Figura 2.11). Em um diagrama tensão-deformação típico, a Lei de Hooke só é válida na região elástica, na qual o carregamento mecânico é reversível. Acima do limite elástico, o material começa a se comportar irreversivelmente na região denominada de deformação plástica, onde a Lei de Hooke não mais se aplica (França, 2007).

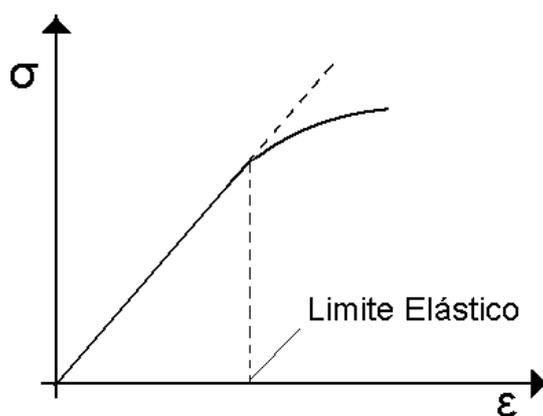


Figura 2.11: Limite elástico - Lei de Hooke.

Fonte: França, (2007).

Na Figura 2.11, ( $\sigma$ ) representa a tensão aplicada e ( $\varepsilon$ ) a deformação resultante. Observe que após o limite elástico (de escoamento) não há mais linearidade e a peça é permanentemente danificada, não retornando a sua dimensão original (deformação plástica).

É importante ressaltar que através da alteração das dimensões do condutor do extensômetro, ocorre variação da resistência, já que a resistência é função do comprimento e área do mesmo. A Equação (2.7) apresenta essa relação:

$$R = \frac{\rho l}{A} \quad (2.7)$$

onde  $\rho$  é a resistividade do condutor,  $l$  é o comprimento do condutor e  $A$  é a área de seção transversal do condutor.

Para a escolha de um extensômetro, não se deve considerar apenas as características de deformação do sensor, mas também outras propriedades, como por exemplo, a estabilidade e a sensibilidade à temperatura. Infelizmente, a maioria dos materiais é sensível a variações de temperatura e tendem a modificar sua resistência com o tempo. A temperatura além de gerar uma alteração na resistividade do material, também dilata o corpo (Malerba *et al.*, 2008).

Cada tipo de material para extensômetros possuem determinadas características, como fator gage (GF), resistência (R), coeficiente de temperatura e estabilidade. Materiais típicos são Constantan (liga cobre-níquel), Nicromo (liga níquel-cromo), ligas de platina, isoelástica (liga níquel-ferro), lâminas ou materiais semicondutores, sendo os mais comuns, ligas cobre-níquel e níquel-cromo (Omega, 2011).

Um extensômetro (Figura 2.12) ideal deve apresentar tamanho pequeno e massa reduzida para não causar influências na medida. Preferencialmente com baixo custo, deve ser facilmente colado e ser altamente sensível à deformação, mas insensível ao ambiente ou variações de temperatura (Beck, 1983).

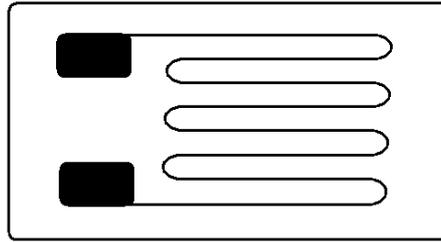


Figura 2.12: Exemplo de um extensômetro do tipo folha.

Os extensômetros de metal em folha (Figuras 2.12 e 2.13) são os mais usados, são relativamente baratos e podem apresentar uma incerteza de medida da ordem de  $\pm 0,10\%$ . Há uma boa variedade de tamanhos e são afetados significativamente apenas pelas mudanças de temperatura, fazendo necessária a devida compensação térmica. Podem ser utilizados tanto para medir sistemas estáticos, quanto sistemas dinâmicos.

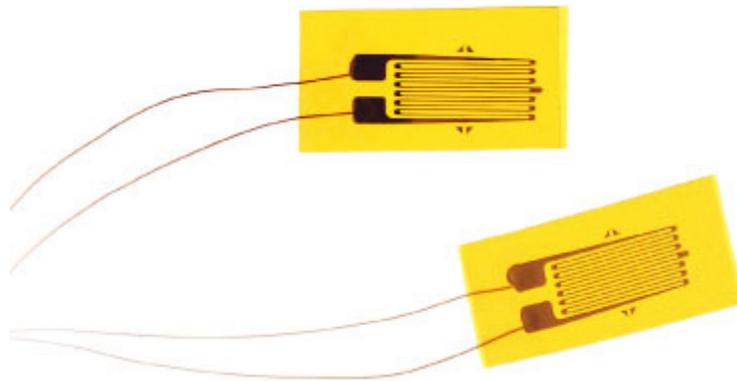


Figura 2.13: Extensômetro de metal do tipo folha.

Fonte: Omega, 2011.

Na colagem de extensômetros, é importante que o extensômetro sofra a mesma deformação que a superfície (elemento mola) em análise. Um material adesivo inserido entre o sensor e a superfície, torna a colagem sensível à degradação da cola, influência de

temperatura e histereses. Por esses motivos, devem-se utilizar colas ou resinas específicas para o uso de extensômetros.

A extensometria é utilizada em uma grande variedade de condições ambientais. Pode medir deformações desde turbinas, operando em uma altíssima temperatura até aplicações em criogenia, com temperaturas da ordem de  $-269^{\circ}\text{C}$ . A resistência dos elementos metálicos em folha varia de  $120\Omega$  a  $5000\Omega$ , com um tamanho de 0,008 a 4 polegadas, disponíveis comercialmente (Omega, 2011).

As três principais considerações ao escolher um extensômetro são: temperatura de operação, a natureza da deformação a ser medida e os requisitos quanto à estabilidade.

#### 2.4 Condicionamento de sinais

Para efetuar a medida de um extensômetro, este deve estar conectado a um circuito elétrico que seja capaz de medir pequenas variações na resistência elétrica correspondente à deformação mecânica. Normalmente, o uso de uma ponte de Wheatstone (Figura 2.14) é fundamental.

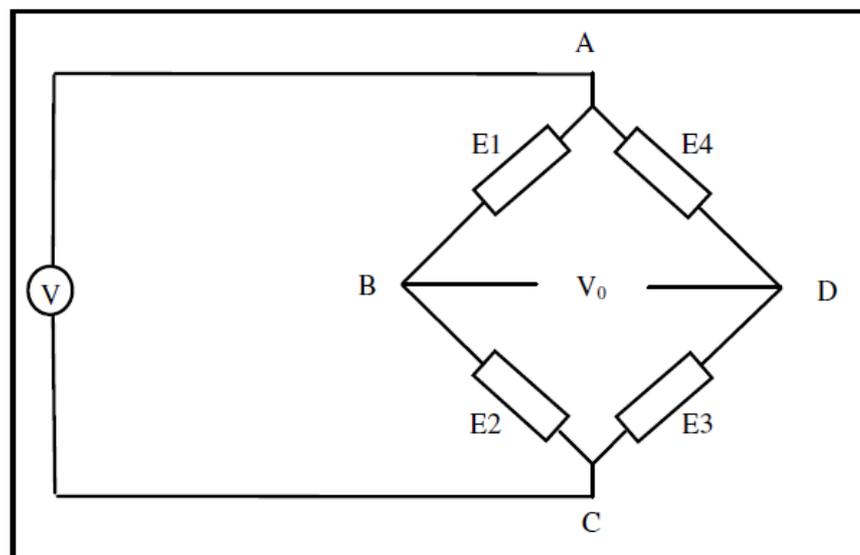


Figura 2.14: Ponte de Wheatstone.

Fonte: Reis *et al.*, 2006.

Na ponte da Figura 2.14, se os resistores E1, E2, E3 e E4 são iguais (representando resistores), e a tensão  $V$  é aplicada entre os pontos A e C, então a saída entre os pontos B e D mostrará uma diferença de potencial nula. Porém, se E4 altera-se para um valor não igual a E1, E2 e E3, a ponte se torna desbalanceada, e uma tensão irá se estabelecer nos terminais de saída (Reis *et al.*, 2006).

Na prática, pode-se ter de um a quatro sensores ativos presentes na ponte, dependendo da aplicação e necessidade de sensibilidade ou compensação térmica. A tensão de saída  $V_o$  (Equação 2.8) é equivalente à diferença entre a queda de tensão entre E1 e E4 e pode ser escrito como:

$$V_o = V_{CD} - V_{CB} \quad (2.8)$$

Quando a ponte é montada de forma que E4 seja o único extensômetro ativo, ou seja  $R_g$ , uma alteração em seu valor resultará em uma tensão de saída na ponte. O fator *gage* (GF), a deformação medida  $\epsilon$  relacionada a  $\Delta R_g/R_g$  é dada na Equação 2.9:

$$\epsilon = \frac{\Delta R_g/R_g}{GF} \quad (2.9)$$

O número de extensômetros ativos que estariam substituindo resistores na ponte de Wheatstone depende da aplicação. Por exemplo, pode ser interessante conectar extensômetros em lados opostos de uma barra, um em compressão e outro em tração. Este arranjo proporciona o dobro de sensibilidade do sistema para a mesma deformação. Em uma ponte completa com quatro extensômetros ativos, dois em compressão e dois em tração, temos uma sensibilidade quatro vezes maior que a situação com apenas um elemento ativo. A Figura 2.15 ilustra a situação em que dois extensômetros são submetidos à tração ( $R+\Delta R$ ) e dois são

submetidos à compressão ( $R-\Delta R$ ). Esta mesma Figura 2.15 também ilustra uma técnica para balanceamento da ponte. Através do trimpot  $R_2$ , é forçada uma quantidade ajustável de corrente através do resistor  $R_1$  que aumenta ou diminui a correspondente tensão até a nulidade da ponte, resultando em um ajuste de zero através de  $R_2$  (Franco, 2002).

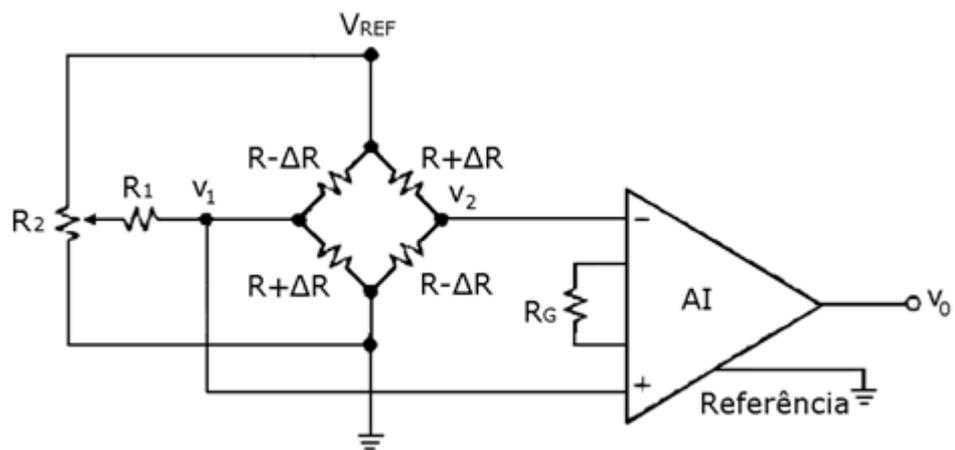


Figura 2.15: Ponte de Wheatstone completa.

Fonte: Franco, 2002.

Na Figura 2.15, AI representa um amplificador de instrumentação, onde  $R_G$  é o resistor que ajusta seu ganho (A). As tensões  $v_1$  e  $v_2$ , que aplicadas diferencialmente no amplificador, são a saída da Ponte de Wheatstone a ser amplificada. Nessa configuração, a saída do sistema  $v_o$  (Equação 2.12) é a diferença de  $v_1$  e  $v_2$  amplificada. O valor de  $v_1$  é demonstrado na Equação 2.10 e  $v_2$  na Equação 2.11.

$$v_1 = V_{REF} \frac{R+\Delta R}{R+\Delta R+R-\Delta R} = V_{REF} \frac{R+\Delta R}{2R} \quad (2.10)$$

$$v_2 = V_{REF} \frac{R-\Delta R}{2R} \quad (2.11)$$

e  $v_1 - v_2 = V_{REF} \frac{\Delta R}{R}$  de forma que:

$$v_o = A \frac{\Delta R}{R} V_{REF} \quad (2.12)$$

onde (A) é o ganho do amplificador de instrumentação (AI) definido pelo resistor ( $R_G$ ) e  $V_{REF}$  é a tensão de alimentação da Ponte de Wheatstone.

Para evitar problemas na medida, e incidência de interferências provenientes da oscilação da entrada de energia da fonte do sistema, é recomendável o desenvolvimento de uma fonte constante onde a ponte de Wheatstone é alimentada ( $V_{REF}$  da Figura 2.15). Dessa forma, qualquer perturbação na entrada de tensão é filtrada pelo correto dimensionamento da fonte e sua filtragem.

### 3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Este capítulo trata da metodologia experimental elaborada para o desenvolvimento deste trabalho. A descrição mecânica da plataforma se encontra na Seção 3.1. Os processos de simulação (Seção 3.2) através do software SolidWorks™ são tomados como premissa para a correta colagem dos extensômetros, pois o projeto mecânico da plataforma de força não é o objetivo principal deste trabalho. A cadeia de medida busca mostrar de forma clara cada uma das etapas do processo de tratamento da informação, desde a aplicação da força até a exibição no *software* e situa-se na Seção 3.3. O condicionamento dos extensômetros é tratado juntamente com a aquisição na Seção 3.4. Os procedimentos de calibração e ensaio são abordados na Seção 3.5.

Para facilitar a compreensão deste trabalho, a Figura 3.1 apresenta o diagrama de blocos que representa o sistema, desde a aplicação de uma força nas células de carga até a exibição em software através da aquisição de dados.

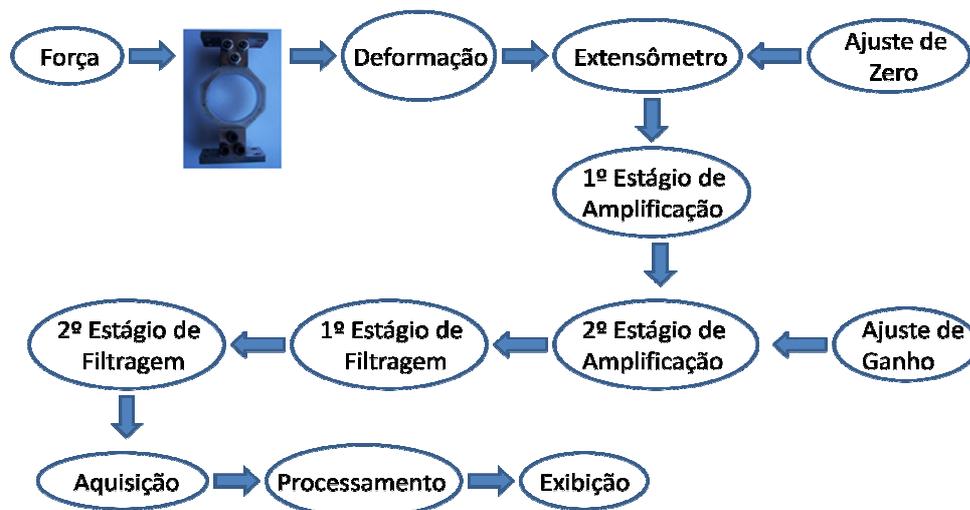


Figura 3.1: Diagrama de blocos do sistema.

### 3.1 Breve descrição mecânica da plataforma de força

A plataforma de força foi desenvolvida de forma a suportar um adulto humano, seja em pé ou em marcha. Contando com uma medida de um quadrado de 50cm de lado, torna possível a medida dos esforços  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Ao determinar os esforços a serem medidos, é necessária a definição de um sistema de coordenadas para referência (convenção), descrita na Figura 2.4, ou seja:

- eixo horizontal  $x$  perpendicular ao movimento com origem no centro da plataforma;
- eixo horizontal  $y$  paralelo ao movimento e no sentido do movimento com origem no centro da plataforma;
- eixo vertical  $z$  na direção perpendicular a direção do movimento, e paralelo a força da gravidade, com origem no centro da plataforma.

Para indicar as forças aplicadas, foram utilizadas quatro células de carga cujo projeto é baseado nos trabalhos de Bagesteiro & Tamagna, (1995) e também utilizadas por Urquiza, (2005), para permitir medidas tridimensionais nesta plataforma de força. É possível determinar que a deformação nas células de carga é indicada de forma linear para a força aplicada em cada conjunto da plataforma de forças. A plataforma é constituída de duas placas de metal, unidas pelas quatro células de carga, dispostas como na Figura 3.2.

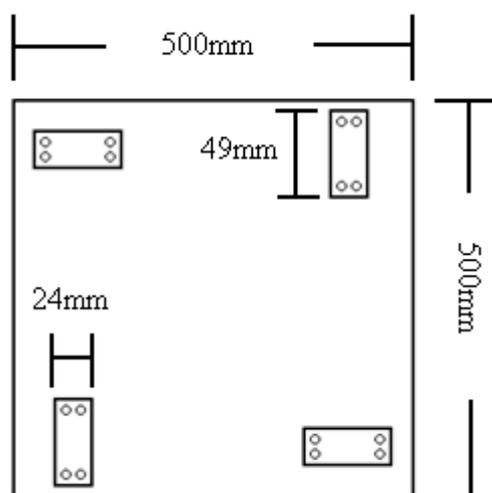


Figura 3.2: Disposição das células de carga na plataforma de força e suas dimensões.

A disposição das células de carga tem por objetivo isolar forças, dessa forma o efeito tridimensional pode ser medido somando-se as contribuições de cada célula de carga. A superfície superior transmite o esforço sobre ela aplicado às células de carga, enquanto a superfície inferior atua como base de sustentação requerida pelos demais componentes da plataforma, além de permitir a fixação das células de carga, sendo considerada neste trabalho, como uma base rígida.

Os materiais utilizados buscam otimizar sua função. Devido à necessidade de uma base rígida e principalmente em função de custos, foi adotada uma chapa de aço carbono liga ABNT1020 (NBR NM87, 2000). Porém a chapa superior deve ser mais mole, para transferir as forças aplicadas em sua superfície, e para isso o material utilizado foi o alumínio naval liga 5052F. Tanto as células de carga, como os mancais de sustentação foram produzidos com o mesmo material, uma liga de aço inox AISI304 (ABNT NBR5601, 1981). Cada célula de carga possui oito extensômetros distribuídos em dois conjuntos que formam duas pontes de Wheatstone completas, conforme apresentado na Figura 3.3.

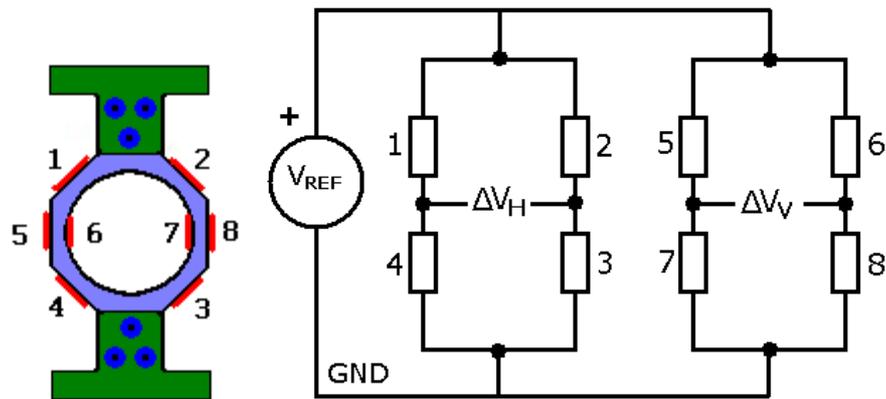


Figura 3.3: Disposição dos extensômetros (em vermelho) na célula de carga e as duas pontes de Wheatstone configuradas.

Os valores de saída de cada Ponte de Wheatstone,  $\Delta V_H$  e  $\Delta V_V$  representam a tensão de saída horizontal e vertical respectivamente.

Os extensômetros utilizados foram comprados da empresa Excel Sensores, Fator *Gage* 2,13 com resistência de  $350\Omega$ . A Figura 3.4 mostra a caracterização das dimensões determinada pelo fabricante e informa, juntamente com a Tabela 3.1, as medidas dos extensômetros utilizados.

Os extensômetros utilizados são do modelo PA-06-125AA-350-L, com fios de cobre soldados nos terminais e auto-compensação de temperatura para aço. Para colagem dos sensores, a superfície foi levemente lixada e limpa com álcool isopropílico para remoção de impurezas e possíveis gorduras depositadas na superfície. O adesivo utilizado na colagem dos extensômetros foi uma cola com base de cianoacrilato.

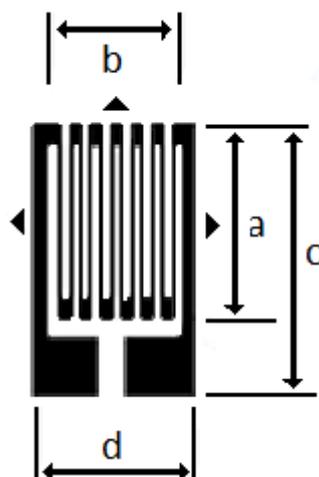


Figura 3.4: Dimensões do extensômetro.

Fonte: Excel, 2011.

Tabela 3.1: Características dos extensômetros utilizados.

	Material da Base e do Filme	Modelo PA
	Compensação de Temperatura	06 - para aço
	Tamanho e Forma da Grelha	125AA
	Resistência (Ohms)	350
	Opção	L - com fios de cobre soldados nos terminais
Dimensões	A – comprimento da grelha	3,18 mm ou 0,125"
	B - largura da grelha	3,18 mm ou 0,125"
	C - comprimento total	6,35 mm ou 0,250"
	D - largura total	3,18 mm ou 0,125"

Fonte: Excel, 2011.

### 3.2 Descrição do procedimento de simulação

Para análise no *software* SolidWorks™, a plataforma foi desenhada de acordo com as suas dimensões e propriedades. Além da forma, os materiais utilizados na construção da célula de carga são considerados, e dados relativos a módulo elástico, Coeficiente de Poisson, módulo de cisalhamento, resistência à tração, resistência a compressão e limite de escoamento são obtidos do banco de dados de materiais presente no simulador.

A célula de carga foi desenhada em tamanho real e a Figura 3.5 mostra os detalhes das dimensões. Os mancais de sustentação (Figura 3.6) também foram construídos com o mesmo material da célula, o aço inox AISI304.

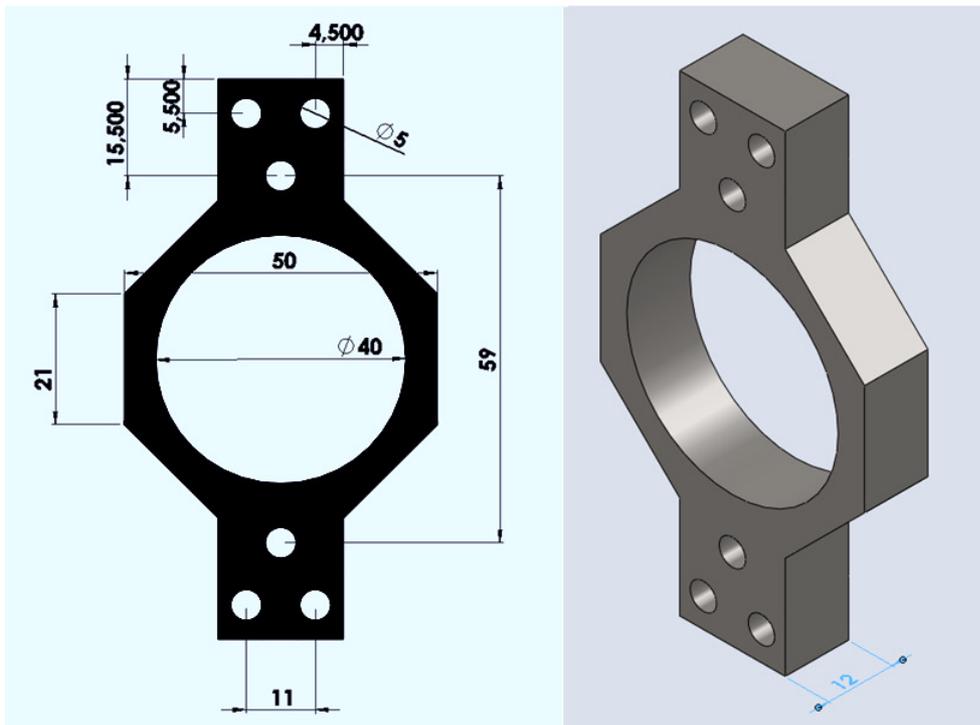


Figura 3.5: Dimensões da célula de carga, em milímetros.

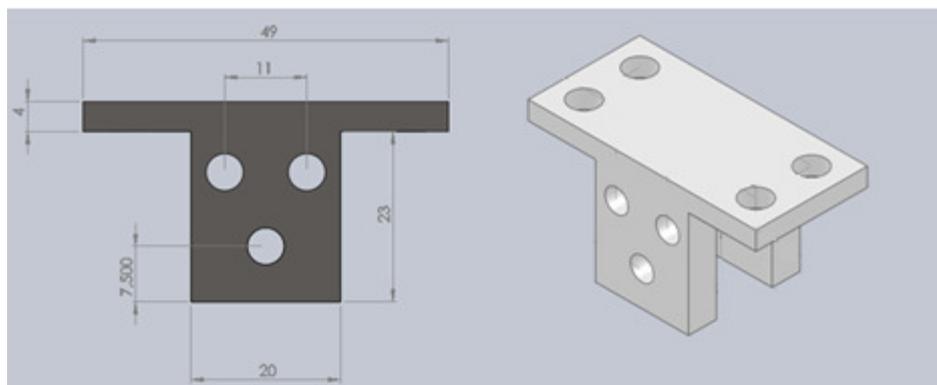


Figura 3.6: Mancais de sustentação.

Abaixo uma vista isométrica da célula de carga completa (Figura 3.7) .

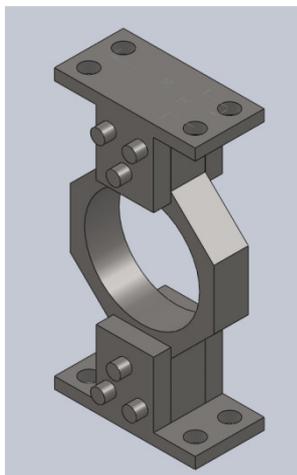


Figura 3.7: Esboço da célula de carga com seus mancais de sustentação.

A seguir, é apresentada a montagem da plataforma, utilizando as quatro células de carga mostradas anteriormente. A disposição em que as células de carga foram montadas torna possível o isolamento de forças nos eixos tridimensionais. As Figuras 3.8 e 3.9 mostram a plataforma desenhada.

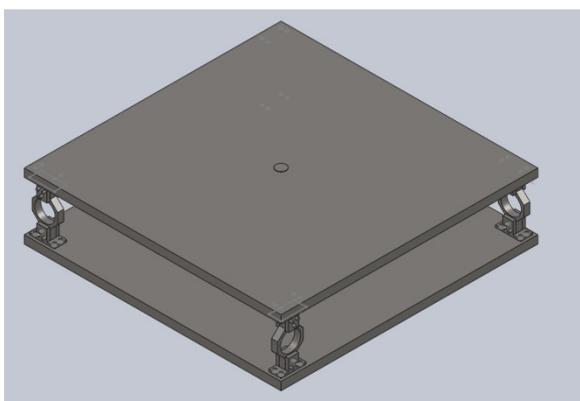


Figura 3.8: Vista isométrica da plataforma de força.



Figura 3.9: Vista frontal da plataforma de força.

Para a simulação estática, após o desenho estar pronto, deve-se aplicar o correto material em cada peça, assim torna-se possível as análises de deformação e tensões envolvidas na estrutura. Os materiais utilizados e suas propriedades mecânicas são exibidas nas Tabelas 3.2, 3.3 e 3.4.

Tabela 3.2: Propriedades mecânicas do aço inox AISI304.

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo elástico	1.9e+011	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.29	N/A
Módulo de cisalhamento	7.5e+010	N/m <sup>2</sup>
Densidade	8000	kg/m <sup>3</sup>
Resistência à tração	517017000	N/m <sup>2</sup>
Limite de escoamento	206807000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansão térmica	1.8e-005	/K
Condutividade térmica	16	W/(m·K)
Calor específico	500	J/(kg·K)

Fonte: SolidWorks™.

Tabela 3.3: Propriedades mecânicas do aço carbono ABNT1020.

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo elástico	2,00E+11	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.29	N/A
Módulo de cisalhamento	7.7e+010	N/m <sup>2</sup>
Densidade	7900	kg/m <sup>3</sup>
Resistência à tração	420507000	N/m <sup>2</sup>
Limite de escoamento	351571000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansão térmica	1.5e-005	/K
Condutividade térmica	47	W/(m·K)
Calor específico	NA	J/(kg·K)

Fonte: SolidWorks™.

Tabela 3.4: Propriedades mecânicas do alumínio naval 5052F.

Propriedade	Valor	Unidade
Módulo elástico	7,00E+10	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de Poisson	0.33	N/A
Módulo de cisalhamento	2.59e+010	N/m <sup>2</sup>
Densidade	2680	kg/m <sup>3</sup>
Resistência à tração	230000000	N/m <sup>2</sup>
Limite de escoamento	195000000	N/m <sup>2</sup>
Coefficiente de expansão térmica	2.38e-005	/K
Condutividade térmica	137	W/(m·K)
Calor específico	880	J/(kg·K)

Fonte: SolidWorks™.

A próxima etapa da simulação é a aplicação de engastes para simular a superfície em que a plataforma está apoiada. Dessa forma, toma-se como elemento estático e serve de referência para as deformações. As forças envolvidas na simulação também devem ser adicionadas de forma com que se assemelhem a situação em que a plataforma real vai ser submetida, e podem ser adicionadas como forças resultantes ou distribuídas. A Figura 3.10 mostra as forças aplicadas em vermelho na parte superior e o engaste em verde na parte inferior.

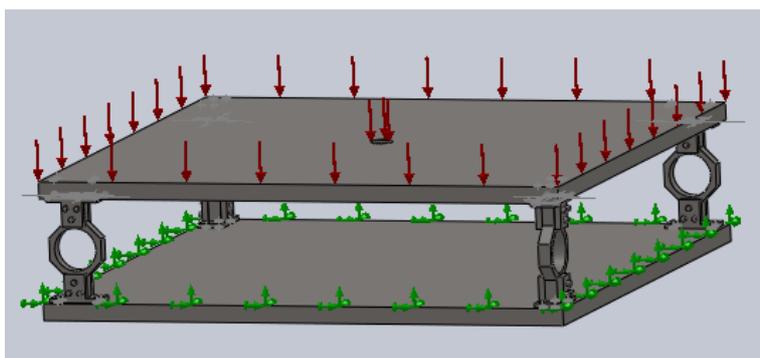


Figura 3.10: Indicação da aplicação de força e do engaste.

Para o estudo dinâmico do sistema, o *software* SolidWorks considera a estrutura e seus materiais, determinando seus modos de vibração. Após a obtenção dessas frequências, é possível determinar se o sistema irá encontrar algum caso em que possa ser submetido a uma

dessas situações, onde se tornaria instável. Uma carga com oscilações pode danificar a plataforma de força, além de poder interferir nas medidas. Dessa forma, a utilização da plataforma, deve fugir deste tipo de comportamento.

O procedimento para análise dinâmica necessita a mesma base do ensaio estático e novamente o engaste é tomado como referência. Depois de concluído o desenho, a caracterização dos materiais e o engaste, a análise no domínio da frequência é acessada através do módulo de ensaio dinâmico do *simulation*, que trará os dados de cada frequência e os correspondentes modos de vibração.

Os resultados das simulações estáticas e dinâmicas, assim como, as experimentais são apresentadas no Capítulo 4.

### **3.3 Cadeia de medida proposta**

Esta seção busca situar a cadeia de medida envolvida neste trabalho. A força aplicada sobre a plataforma de força faz com que a célula de carga sofra deformação, esta por sua vez é percebida pelo extensômetro que tem sua resistência alterada. Dessa forma, através de condicionamento adequado, é possível monitorar eletricamente a deformação através de estágios de ganho e filtragem do correspondente sinal de interesse. Para facilitar o entendimento de todas as etapas essenciais envolvidas é apresentada, na Figura 3.11, a cadeia de medição proposta neste projeto.

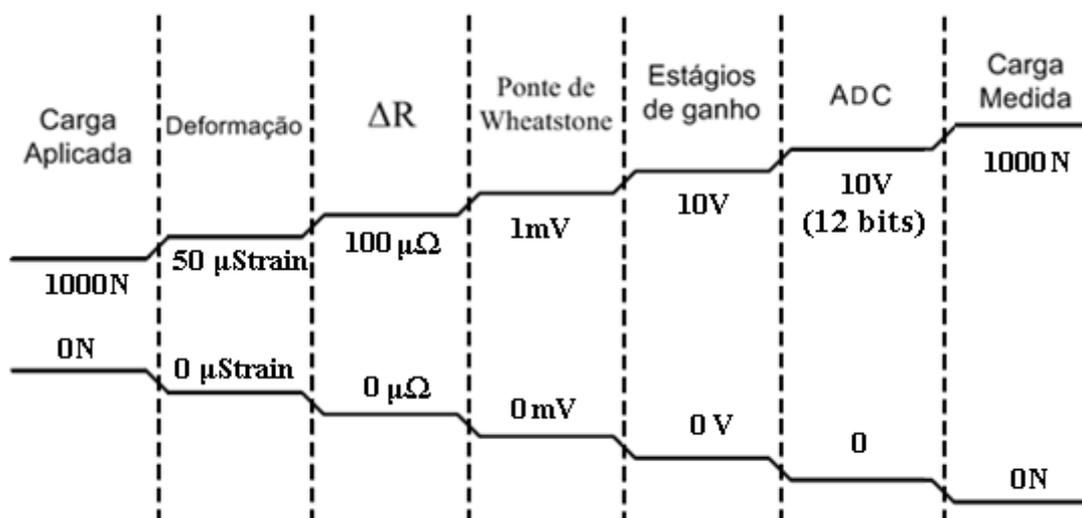


Figura 3.11: Cadeia de medição.

A carga planejada é de 101,9kg, ou seja 1000N. Esse valor é mostrado no início da cadeia de medição. Segundo cálculos do SolidWorks™, é esperado um valor de 50 $\mu\epsilon$  de deformação na célula de carga e uma variação de aproximadamente 100 $\mu\Omega$  na resistência do extensômetro. Essa variação de resistência provoca uma diferença de potencial de cerca de 1mV na Ponte de Wheatstone, que após estágios de ganho (dois com ganho 100), chega-se a um valor de até 10V, que é adquirido e representado no software a carga medida em 1000N.

### 3.4 Condicionamento e aquisição de dados

A tensão elétrica de saída do sistema é proporcional à tensão de alimentação do circuito. Dado este fato, é necessário garantir que a tensão de alimentação da ponte de Wheatstone seja estável, a fim de obter uma medida confiável e por consequência minimizar erros.

Em função disso, foi utilizado um circuito para estabilizar a tensão elétrica, ou seja, o integrado REF02 (*5 V Precision Voltage Reference/Temperature Transducer*) que possui suas

características apresentadas na Tabela 3.5, possibilitando assim uma tensão constante independente da sua alimentação (estando dentro dos seus valores de trabalho).

Tabela 3.5: Dados da referência de tensão.

Características do integrado REF02	
Output (saída)	5 V: $\pm 0.3\%$ maximum
Temperature voltage output	1,96 mV/°C
Excellent temperature stability	8,5 ppm/°C maximum
Low noise	8,5 ppm/°C maximum
Wide input voltage range	7 V to 40 V

Fonte: Texas Instruments, 1993.

Realizou-se uma configuração com um amplificador operacional e um transistor para obter uma fonte com tensão constante de referência de 5,0V com uma capacidade de corrente de 1,5A. O circuito em questão é mostrado na Figura 3.12.

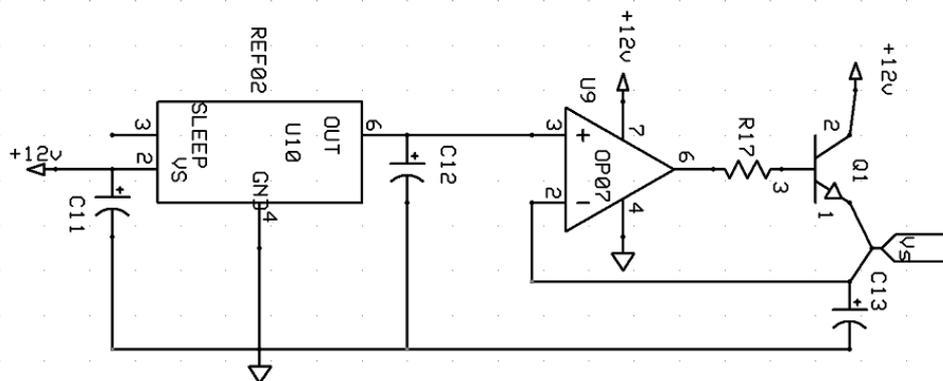


Figura 3.12: Fonte de tensão constante.

Há um potenciômetro multivoltas (P1) conectado a  $V_s$  e GND com sua terminação central ligada a um resistor em série com um dos braços da Ponte de Wheatstone (Figura 3.13). Dessa forma, é realizado um ajuste de zero, tornando a ponte balanceada no caso de não haver carga aplicada a plataforma, assim a saída diferencial de tensão na ponte (representada na Figura pelos pinos 6 e 7) é nula. Cada Ponte de Wheatstone conta com um ajuste desses. A resistência de R34 deve ser de valor considerável a fim de não causar perda de linearidade na ponte, nesse caso foi usado um resistor de  $100k\Omega$ .

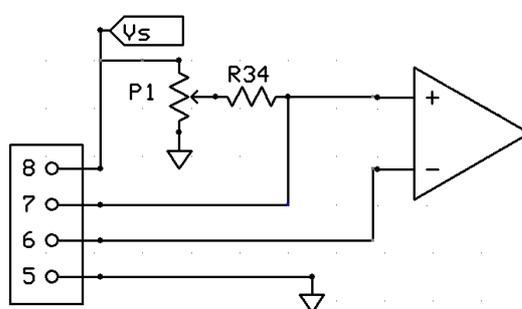


Figura 3.13: Ajuste de zero.

De posse de uma boa fonte de tensão constante para alimentação, o próximo passo é o desenvolvimento da amplificação do sinal proveniente da Ponte de Wheatstone. O uso de amplificadores de instrumentação é interessante visto que o circuito opera de modo diferencial, e deve possuir baixa emissão de ruídos. O circuito integrado INA126 foi o escolhido.

Levando em consideração a resposta em frequência do amplificador relacionada a seu ganho, é possível notar a limitação quanto ao seu uso frente a ganhos elevados, e por esse motivo, foram escolhidos dois estágios de amplificação, que possuem como resultado a multiplicação de seus ganhos, tornando o sistema mais robusto. Os estágios de ganho são apresentados na Figura 3.14.

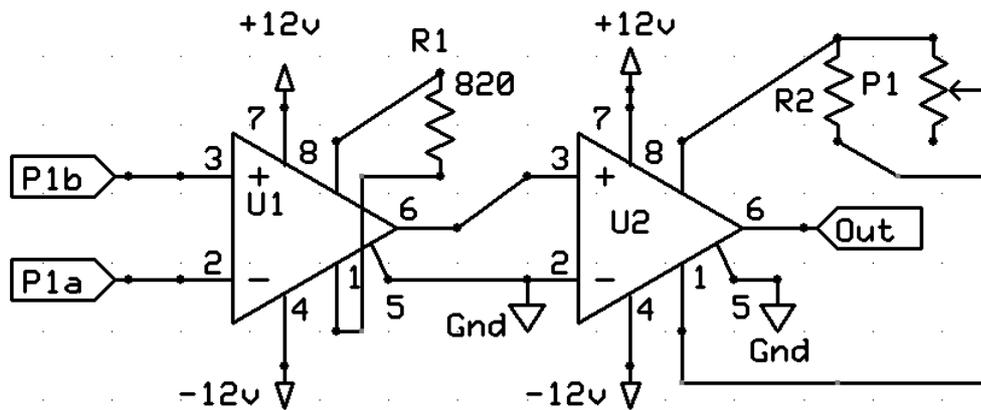


Figura 3.14: Estágios de ganho.

Na Figura 3.14, P1b e P1a representam  $V_o$  da Ponte de Wheatstone, e Out representa a saída amplificada a ser filtrada. Uma foto com os primeiros testes é apresentada na Figura 3.15. Cabe observar que no Apêndice encontra-se o esquemático completo do sistema de condicionamento.

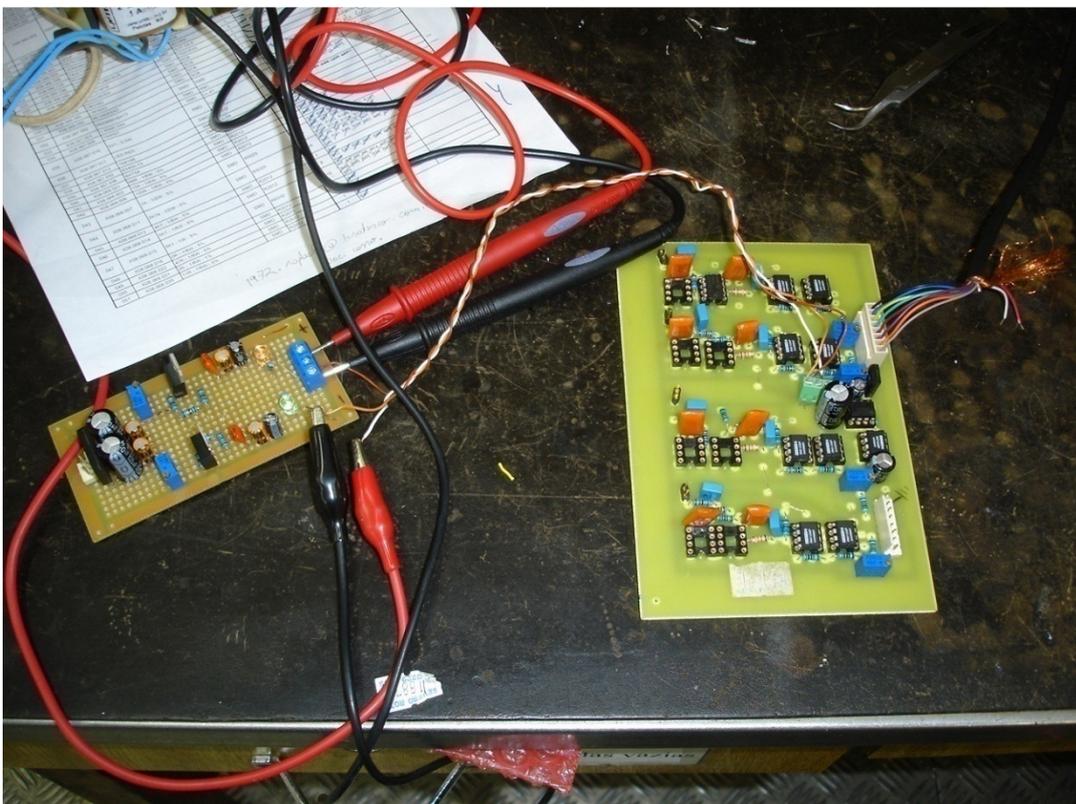


Figura 3.15: Primeiros testes da placa de condicionamento de sinais em bancada.

A filtragem conta com dois estágios de 12db/oitava. A frequência do filtro deve ser determinada de acordo com o fenômeno a ser medido, que nesse caso, possui uma faixa de frequência baixa. Após a filtragem dos dois estágios, o sinal é adquirido por uma placa de aquisição de dados DAQ USB 6008 a uma taxa de 1000 amostras por segundo e resolução de 12 bits (10V). Após a aquisição, os dados obtidos são processados e exibidos pelo LabView.

O circuito de filtragem foi calculado através do software FilterPro 2.0 (Texas Instruments) exibido na Figura 3.16, compondo dois estágios de filtragem Butterworth passa baixas de 2 pólos (12dB/oitava) por estágio. Um cabo blindado foi utilizado para ligação dos extensômetros a fim de minimizar ruídos.

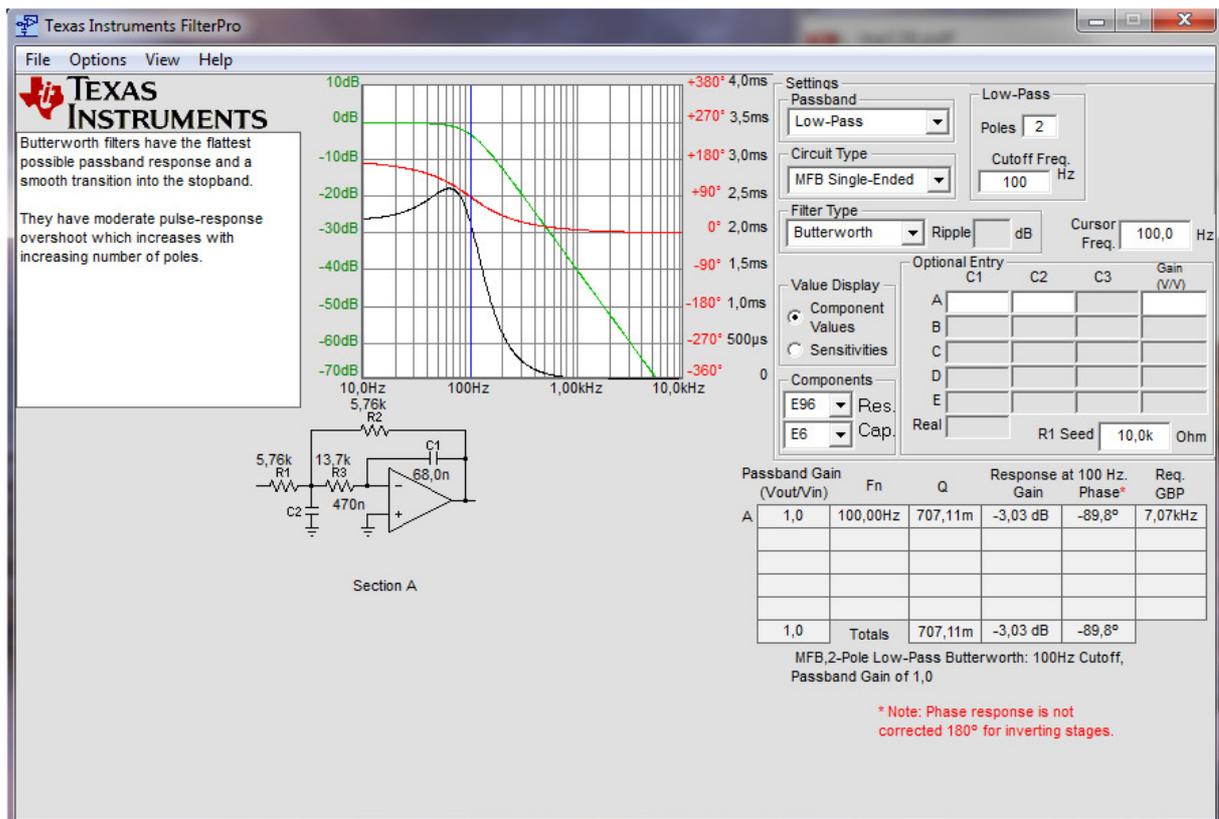


Figura 3.16: Filtro desenvolvido no FilterPro 2.0 – Texas Instruments.

Foram utilizados oito canais de entrada da placa DAQ, pois são quatro canais verticais e quatro canais horizontais. Cabe observar que além do filtro projetado na placa de

condicionamento, foi implementado um filtro passa baixas Butterworth de ordem 3 no software desenvolvido, logo após a aquisição dos dados.

Em seguida, cada canal é tratado separadamente por um ganho ajustável e pelas operações matemáticas necessárias para a exibição das informações. Além do valor, gráficos representando o local da força resultante do eixo z (o centro de pressão) e da força em xy são exibidos. Também são apresentados três gráficos em relação ao tempo, a força resultante em x, y e z. Mais detalhes podem ser encontrados no diagrama em blocos representado na Figura 3.18 e na exibição do resultado do *software* na Figura 3.19.

### **3.5 Procedimentos de calibração e de ensaios**

A calibração estática do eixo z foi realizada através da aplicação de diversos pesos padrões disponibilizados no Laboratório de Instrumentação (zero a 73 kg). O ensaio dinâmico (Figura 3.17) foi realizado através do método chamado de impacto, na plataforma de força, com um martelo de borracha. No momento do impacto os dados obtidos são adquiridos e analisados no domínio frequência através da FFT (*Fast Fourier Transform*) demonstrando as ressonâncias da peça.

O sistema proposto conta com oito pontes completas de Wheatstone. São quatro para analisar o eixo z de coordenadas, duas para o eixo y e duas para o eixo x (Figura 2.4). Dessa forma, o ajuste de ganho de cada ponte em conjunto com seu ajuste de zero através dos potenciômetros propostos, formam o sistema de condicionamento. O sinal de saída de cada uma das oito pontes é adquirido e tratado digitalmente.



Figura 3.17: Realização do ensaio dinâmico.

A Figura 3.18 apresenta o diagrama de blocos do sistema desenvolvido no LabView™, onde os dados são adquiridos através do *DAQ Assistant*. Logo em seguida, cada canal é tratado separadamente. O sinal proveniente de cada canal passa por um ganho regulável e em seguida são realizadas operações matemáticas de adição e subtração, dessa forma, as componentes de cada célula de carga são combinadas para resultar em uma resultante, seja no eixo vertical  $z$  ou nos horizontais  $x$  e  $y$ .

Para a obtenção da força aplicada no eixo  $z$ , as quatro componentes que possuem ajuste individual de ganho, são somadas em um bloco somador. A massa é calculada pela simples multiplicação de um valor fixo (aceleração da gravidade). Após essas operações matemáticas, os dados são exibidos graficamente na interface da Figura 3.19.

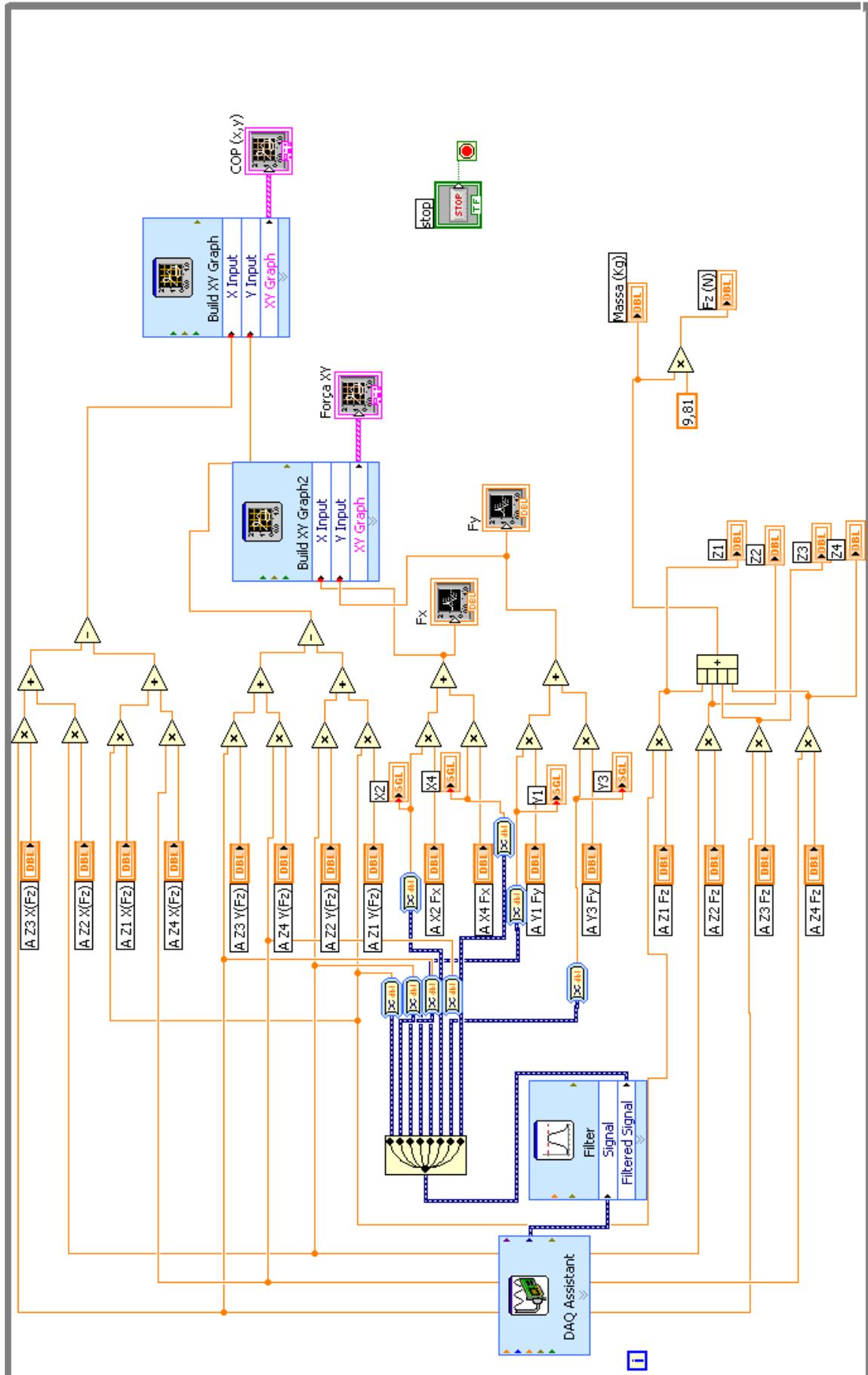


Figura 3.18: Diagrama em blocos desenvolvido no LabView.

A calibração estática foi realizada adicionando-se pesos padrões na superfície da plataforma. Após o correto ajuste de zero, o ganho foi ajustado de forma que todas as células de carga tenham contribuição igual na formação da resultante de forças. Além do ajuste vertical (eixo z), as pontes referentes aos eixos horizontais devem observar o mesmo requisito, onde a contribuição de cada Ponte de Wheatstone deve contribuir da mesma forma e intensidade para efeitos tanto no eixo x quanto no eixo y.

Os dados devem ser cruzados com as simulações estáticas executadas no SolidWorks™ para verificação de coerência, tanto nas tensões, quanto na deformação apresentada, não só no conjunto, como em cada extensômetro para verificar a correta colagem e seu funcionamento. Os valores de tensão provenientes de cada uma das quatro células de carga, após amplificação e filtragem, foram anotados. O software desenvolvido em LabView busca equalizar as contribuições de cada uma das Pontes de Wheatstone existentes na plataforma de força através de uma multiplicação ajustável em cada canal, exibindo a interface gráfica exibida na Figura 3.19.

Após esse ajuste, é exibido através dos valores obtidos das células de carga, uma resultante de força, onde a soma e a diferença dos eixos determina o centro de pressão (COP) através das componentes no eixo z.

O eixo z foi calibrado com os pesos padrões de zero a 73kg com pesos sobre a plataforma de força, já a calibração dos eixos x e y foi realizada através de uma roldana montada no Laboratório de Instrumentação (Figura 3.20) disposta para isolar a força aplicada na superfície da plataforma de forças no eixo de interesse. Foram adicionados pesos padrão (0,2kg a 12kg) de forma com que proporcionassem uma força diretamente no eixo em questão e os valores encontrados foram anotados.

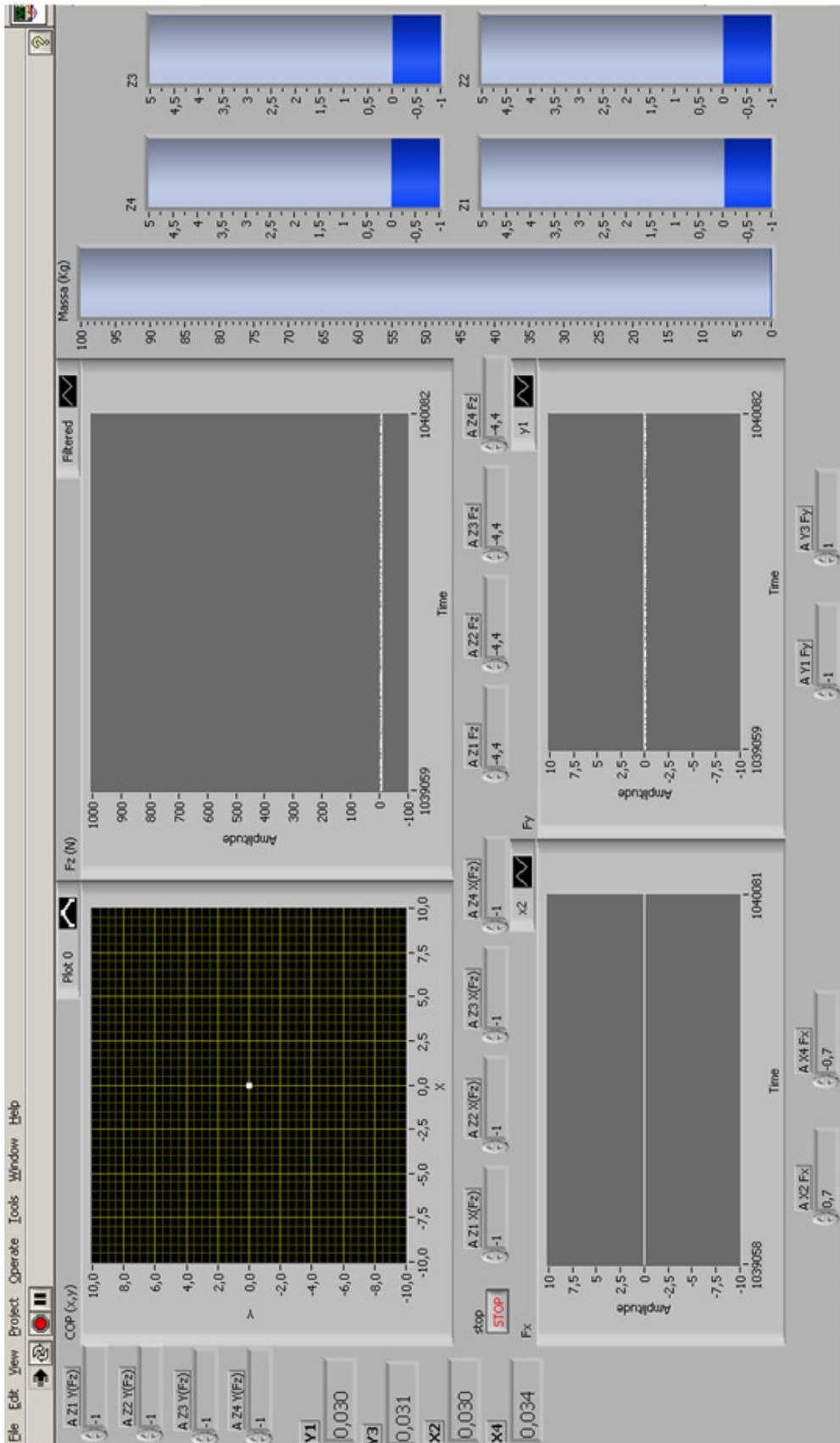


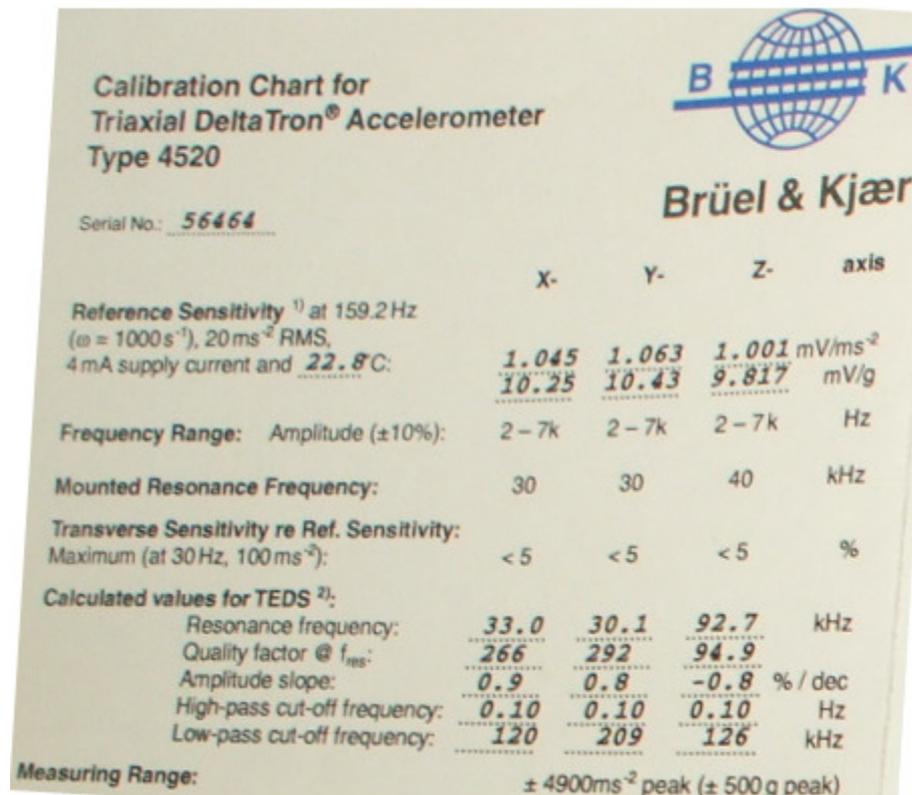
Figura 3.19: Interface homem máquina deste trabalho.



Figura 3.20: Calibração estática dos eixos x e y.

Os resultados da calibração estática e os valores obtidos nos ensaios encontram-se no Capítulo 4. Em relação ao eixo z, além de ensaios com pesos padrões aplicados no centro da plataforma, foram realizados também ensaios com os pesos padrões distribuídos sobre a plataforma de força de forma com que ficassem concentrados sobre cada célula de carga (nas extremidades da plataforma). Através desse ensaio, é possível verificar a forma com que cada célula de carga se comporta de acordo com o posicionamento da carga, isolando na componente z apenas os esforços aos quais está submetida.

O ensaio dinâmico busca validar as simulações e garantir experimentalmente que os modos de vibração não estão dentro da faixa de uso desta plataforma. Com a plataforma de forças em funcionamento e corretamente calibrada deve-se efetuar uma pancada na parte superior da plataforma de forças e realizar uma aquisição de dados durante a vibração da mesma. A curva obtida no amortecimento da vibração foi analisada no LabView via FFT (*Fast Fourier Transform*) para verificação das frequências dos modos de vibração. Para execução desse ensaio, foi utilizado o acelerômetro comercial triaxial DeltaTron, tipo 4520 (Bruel & Kjaer) apresentado na Figura 3.22 com suas principais características exibidas na Figura 3.21. Em conjunto com o acelerômetro, o condicionamento NI SCXI-1000 exibido na Figura 3.23 foi utilizado. Após esse ensaio, contando com a correta calibração da plataforma, podem-se extrair os resultados expostos no Capítulo 4.



	X-	Y-	Z-	axis
<b>Reference Sensitivity</b> <sup>1)</sup> at 159.2 Hz ( $\omega = 1000 \text{ s}^{-1}$ ), $20 \text{ ms}^{-2}$ RMS, 4 mA supply current and <u>22.8</u> °C:	<u>1.045</u> <u>10.25</u>	<u>1.063</u> <u>10.43</u>	<u>1.001</u> <u>9.817</u>	mV/ms <sup>-2</sup> mV/g
<b>Frequency Range:</b> Amplitude ( $\pm 10\%$ ):	2 – 7k	2 – 7k	2 – 7k	Hz
<b>Mounted Resonance Frequency:</b>	30	30	40	kHz
<b>Transverse Sensitivity re Ref. Sensitivity:</b> Maximum (at 30 Hz, $100 \text{ ms}^{-2}$ ):	< 5	< 5	< 5	%
<b>Calculated values for TEDS</b> <sup>2)</sup> :				
Resonance frequency:	<u>33.0</u>	<u>30.1</u>	<u>92.7</u>	kHz
Quality factor @ $f_{\text{res}}$ :	<u>266</u>	<u>292</u>	<u>94.9</u>	
Amplitude slope:	<u>0.9</u>	<u>0.8</u>	<u>-0.8</u>	% / dec
High-pass cut-off frequency:	<u>0.10</u>	<u>0.10</u>	<u>0.10</u>	Hz
Low-pass cut-off frequency:	<u>120</u>	<u>209</u>	<u>126</u>	kHz
<b>Measuring Range:</b>	$\pm 4900 \text{ ms}^{-2}$ peak ( $\pm 500 \text{ g}$ peak)			

Figura 3.21: Características do acelerômetro usado no ensaio dinâmico.

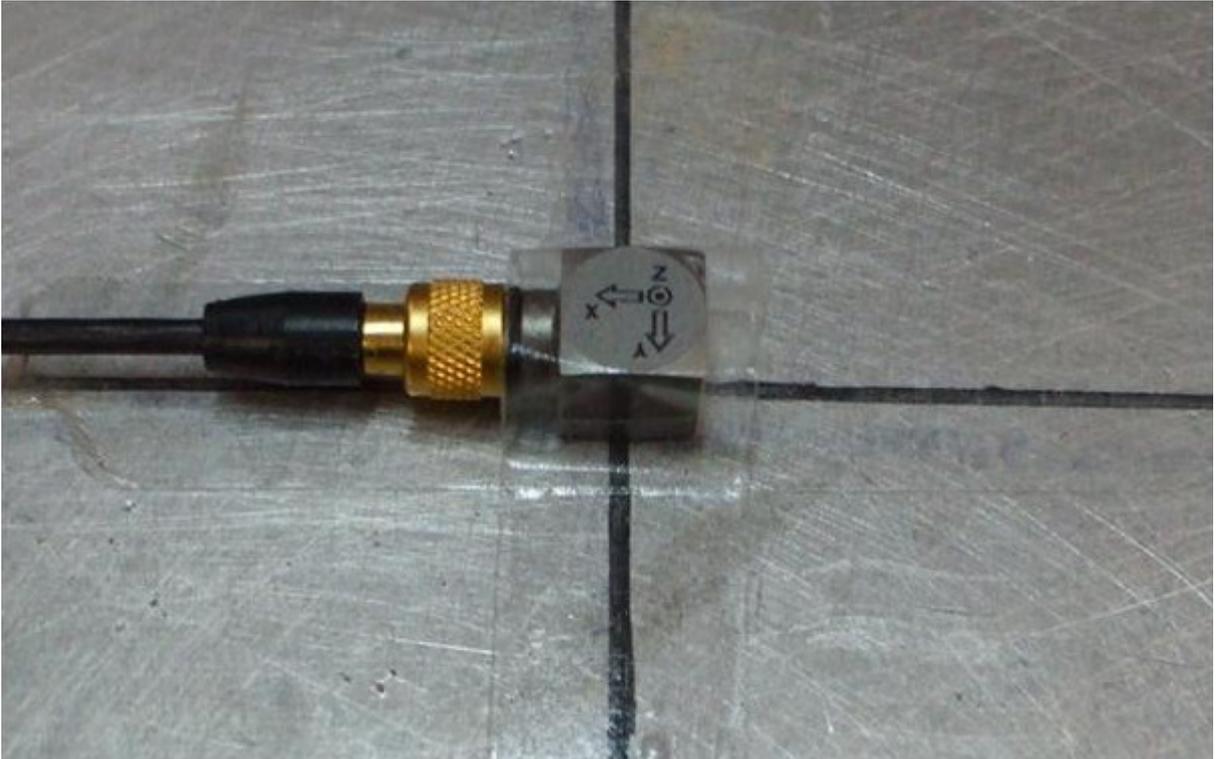


Figura 3.22: Acelerômetro colado na superfície da plataforma.



Figura 3.23: Condicionamento do acelerômetro utilizado.

#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados das simulações mecânicas, experimentais e compara com um modelo teórico aproximado de uma célula de carga em anel. Nas simulações estáticas, é possível determinar o deslocamento, as tensões mecânicas e as deformações sofridas pelos materiais em questão.

Através dessas simulações da plataforma de força no software SolidWorks™ é possível auxiliar a determinar pontos em que há deformação necessária para a colagem dos extensômetros e dessa forma determinar, não somente o local a ser colado os extensômetros, como a deformação a ser sofrida por ele, e por consequência, sua correspondente variação de resistência.

Nas simulações dinâmicas, os modos de vibração da plataforma de força podem ser determinados. Dessa forma, possuindo o conhecimento das frequências envolvidas, é possível evitar que o sistema seja submetido a elas, protegendo-o tanto das oscilações de medida quanto a possíveis danos à estrutura.

A calibração do sistema foi realizada estaticamente e apresentou uma resposta linear, tanto no ensaio com pesos no centro da plataforma, quanto com pesos sobre cada célula de carga individualmente. Os dados experimentais também são apresentados neste capítulo.

O condicionamento do sistema foi realizado de acordo com a cadeia de medida proposta no capítulo 3 (ver Figura 3.11). Devido a pequena tensão de saída das Pontes de Wheatstone, dois estágios de amplificação foram usados. Além de dois estágios somando um ganho de 10.000, foi implementado dois filtros passa baixas de 12dB/oitava em série sintonizados em aproximadamente 100Hz, resultando em 24dB/oitava de atenuação.

## 4.1 Simulações

Percebe-se analisando a Figura 4.1, a deformação estática simulada durante aplicação da carga de 1000N. Os pontos em que foram colados os extensômetros atingem uma deformação com valores da ordem de  $47\mu\epsilon$  e são representados pela cor vermelha.

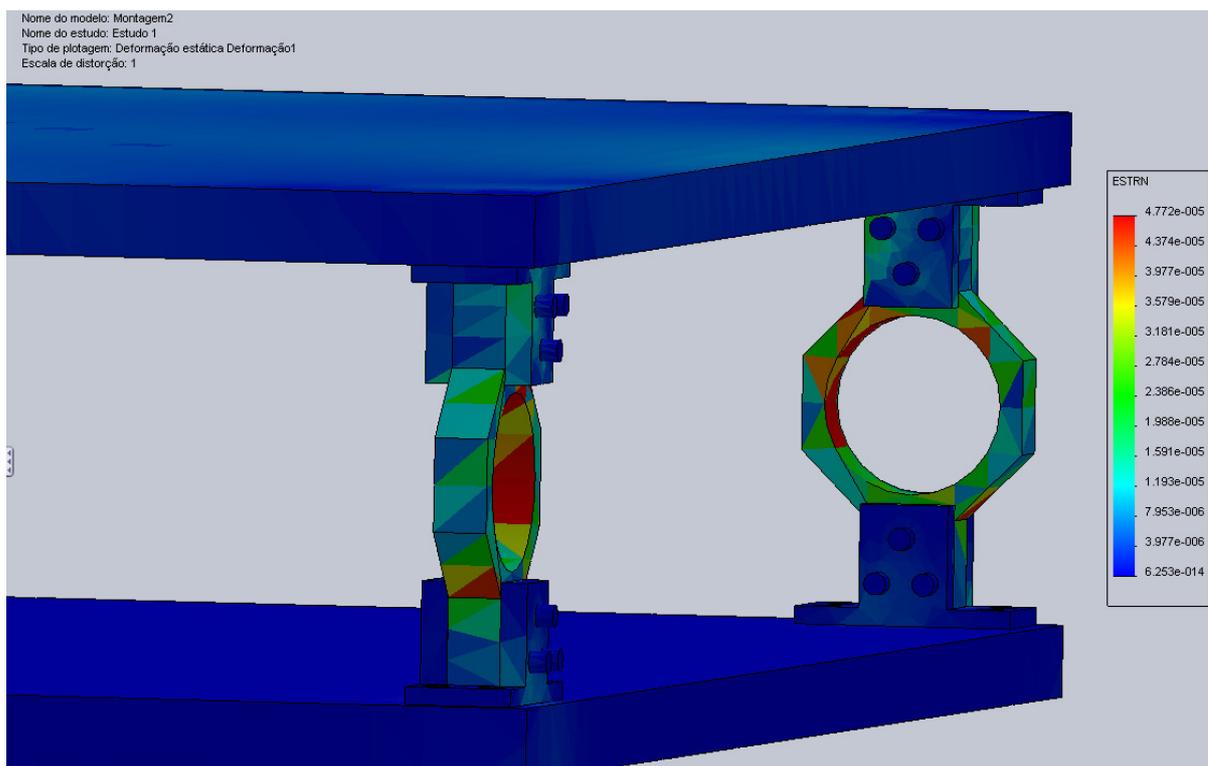


Figura 4.1: Deformação estática – escala em  $\epsilon$ .

A Figura 4.2 revela o deslocamento estático da plataforma com aplicação da carga máxima (1000N) em seu centro. É possível observar que a chapa superior tem o maior deslocamento em seu centro da ordem de  $47\mu\text{m}$  e faz com que as células de carga tenham um deslocamento da ordem de  $10\mu\text{m}$ .

As tensões estáticas são mostradas nas Figuras 4.3 e 4.4. Com esse estudo, é possível determinar os limites mecânicos da estrutura, e verificar se a tensão mecânica está dentro do limite do material. Com a carga aplicada, observa-se uma tensão máxima da ordem de 16 milhões de  $\text{N/m}^2$ , e o limite de escoamento do material da célula de carga está em torno de

200 milhões de  $N/m^2$ , proporcionando um alto coeficiente de segurança quanto a possíveis deformações plásticas.

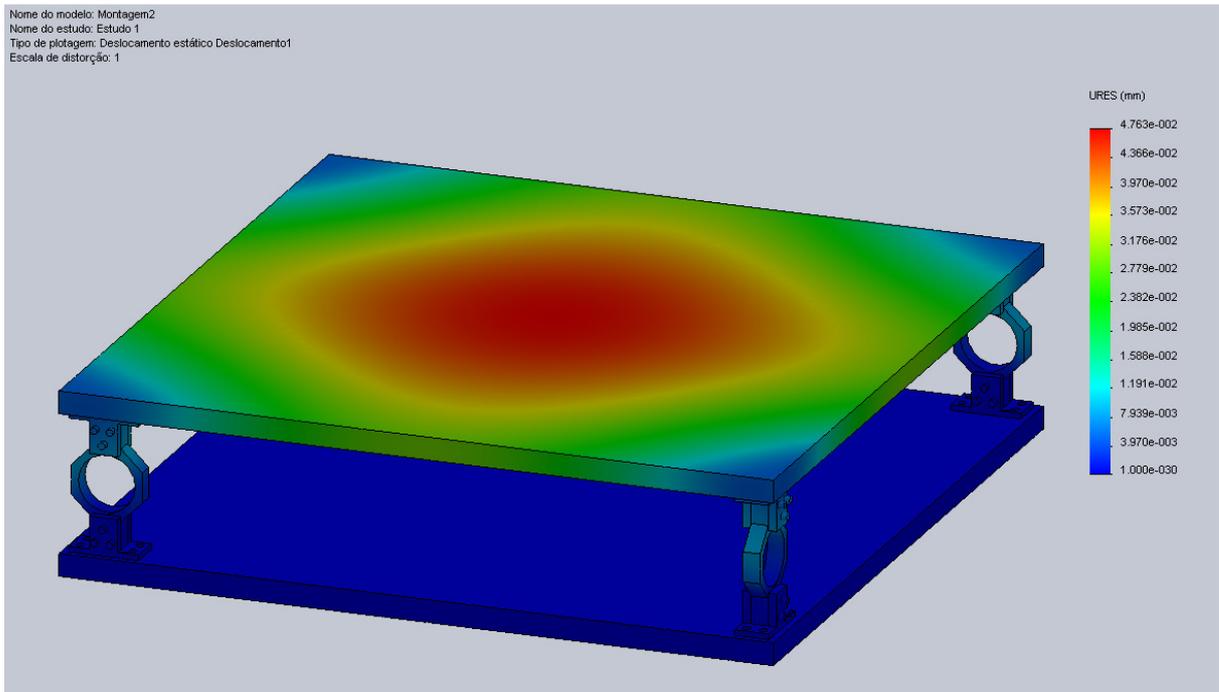


Figura 4.2: Deslocamento estático – escala em milímetros.

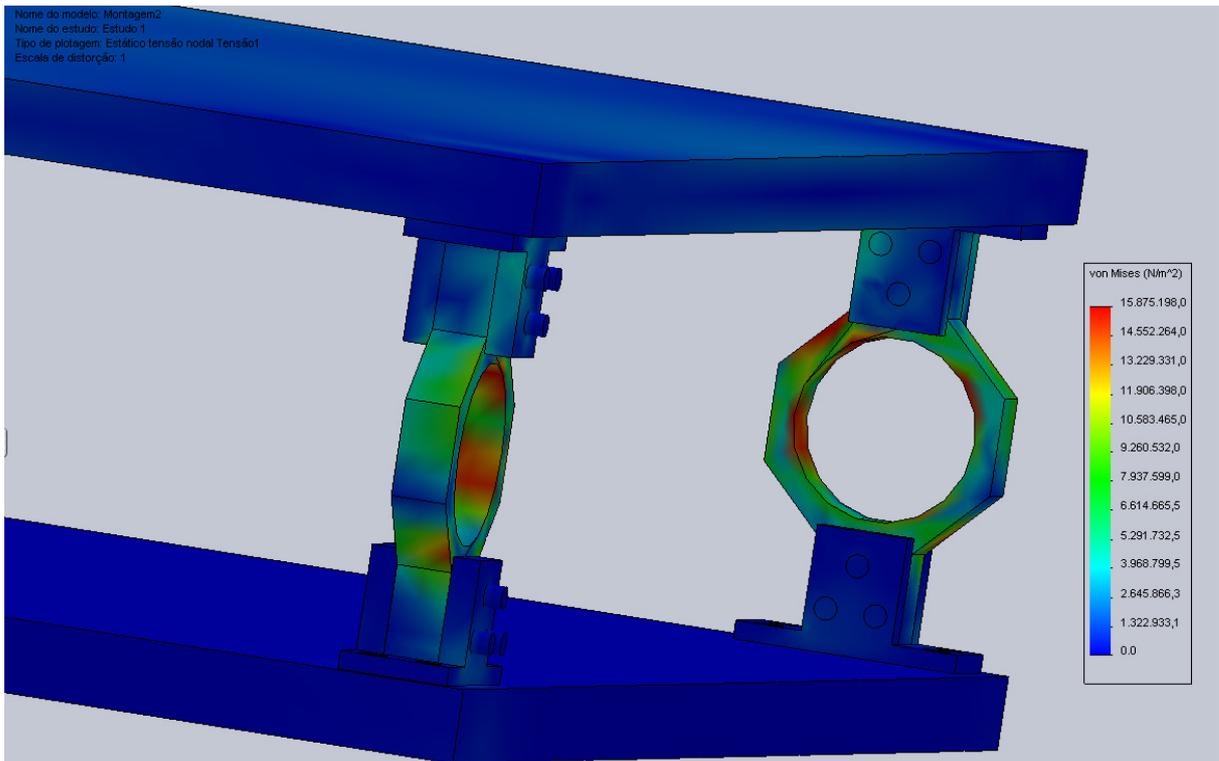


Figura 4.3: Tensões estáticas – escala em  $N/m^2$ .

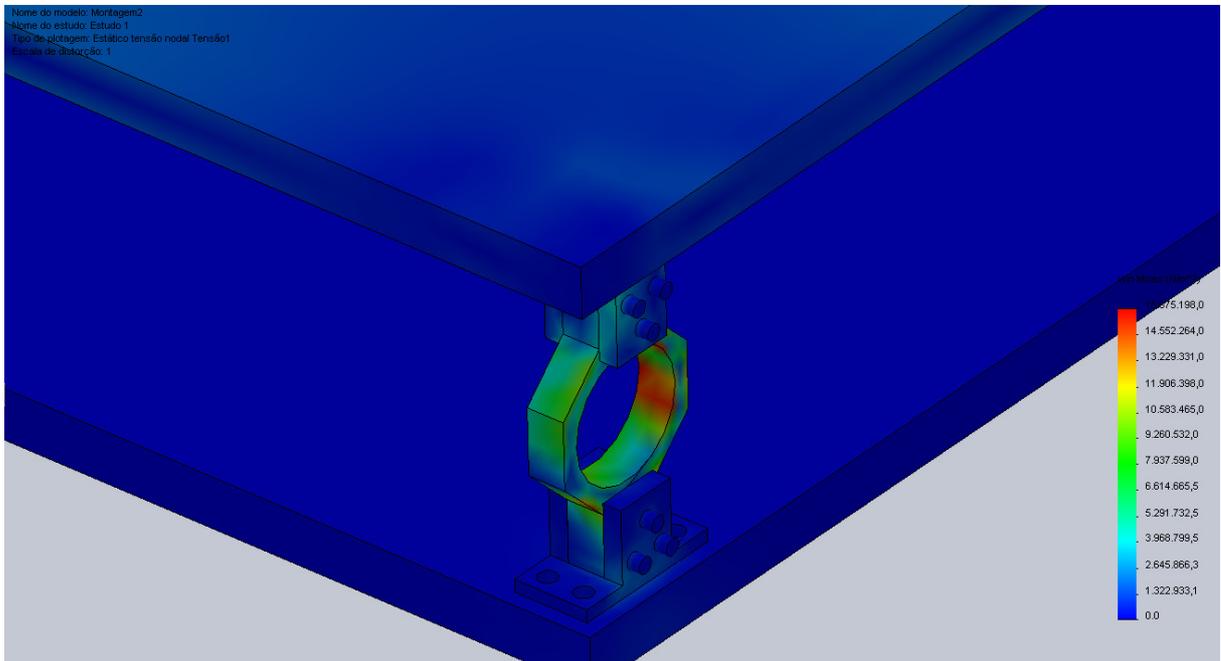


Figura 4.4: Tensões estáticas – Escala em  $\text{N/m}^2$ .

Os modos de vibração, resultados da simulação dinâmica, são apresentados na Tabela 4.1:

Tabela 4.1: Modos de vibração.

<b>Modo</b>	<b>Frequência</b>
<b>1</b>	183,2Hz
<b>2</b>	205,55Hz
<b>3</b>	205,89Hz
<b>4</b>	314,36Hz
<b>5</b>	348,99Hz

Conforme o resultado da simulação da Figura 4.5, o primeiro modo de vibração está situado em 183,20Hz, frequência mais alta que os fenômenos envolvidos no estudo desse trabalho (da ordem de unidades de Hertz). Adicionalmente, os filtros passa-baixas

implementados na placa de condicionamento de sinais estão sintonizados em 100Hz, não sendo somente para eliminação de ruídos, mas também ressonâncias provenientes dos modos de vibração. O software desenvolvido no LabView possui filtro Butterworth passa-baixas 18db/oitava sintonizado em 10Hz, pois as frequências de interesse são menores que 5Hz.

É possível observar que os mancais de sustentação (ver Figuras 4.3 e 4.4) são submetidos a tensões cerca de cinco vezes mais baixas que o anel da célula de carga. Considerando que são do mesmo material do anel, não ocorre um gargalo na aplicação da carga nominal de 1000N em relação a problemas de deformação ou escoamento nos mancais.

Os perfis das deformações provocadas pelos modos de vibração estão representados graficamente em vista isométrica e dimétrica na Figura 4.5 para uma frequência de 183,20Hz, na Figura 4.6 para uma frequência de 205,55Hz, na 4.7 para 205,89Hz, 4.8 para 314,36Hz e na Figura 4.9 para uma frequência de 348,99Hz. **É importante observar que seria importante uma análise analítica desses modos de vibração em função de possíveis erros na simulação dos modos 2, 3 e talvez 4.**

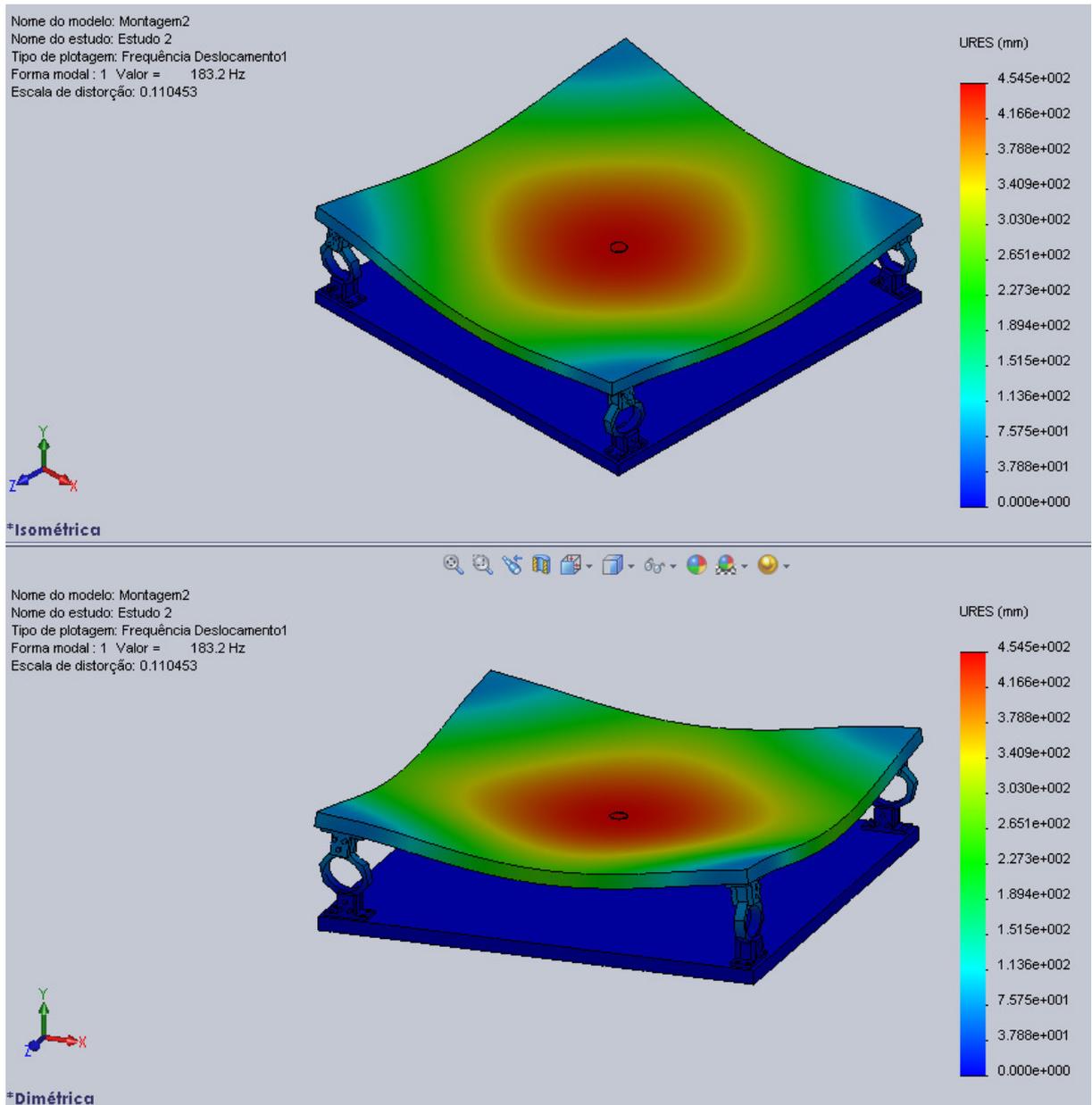


Figura 4.5: Forma modal 1 – 183,20Hz.

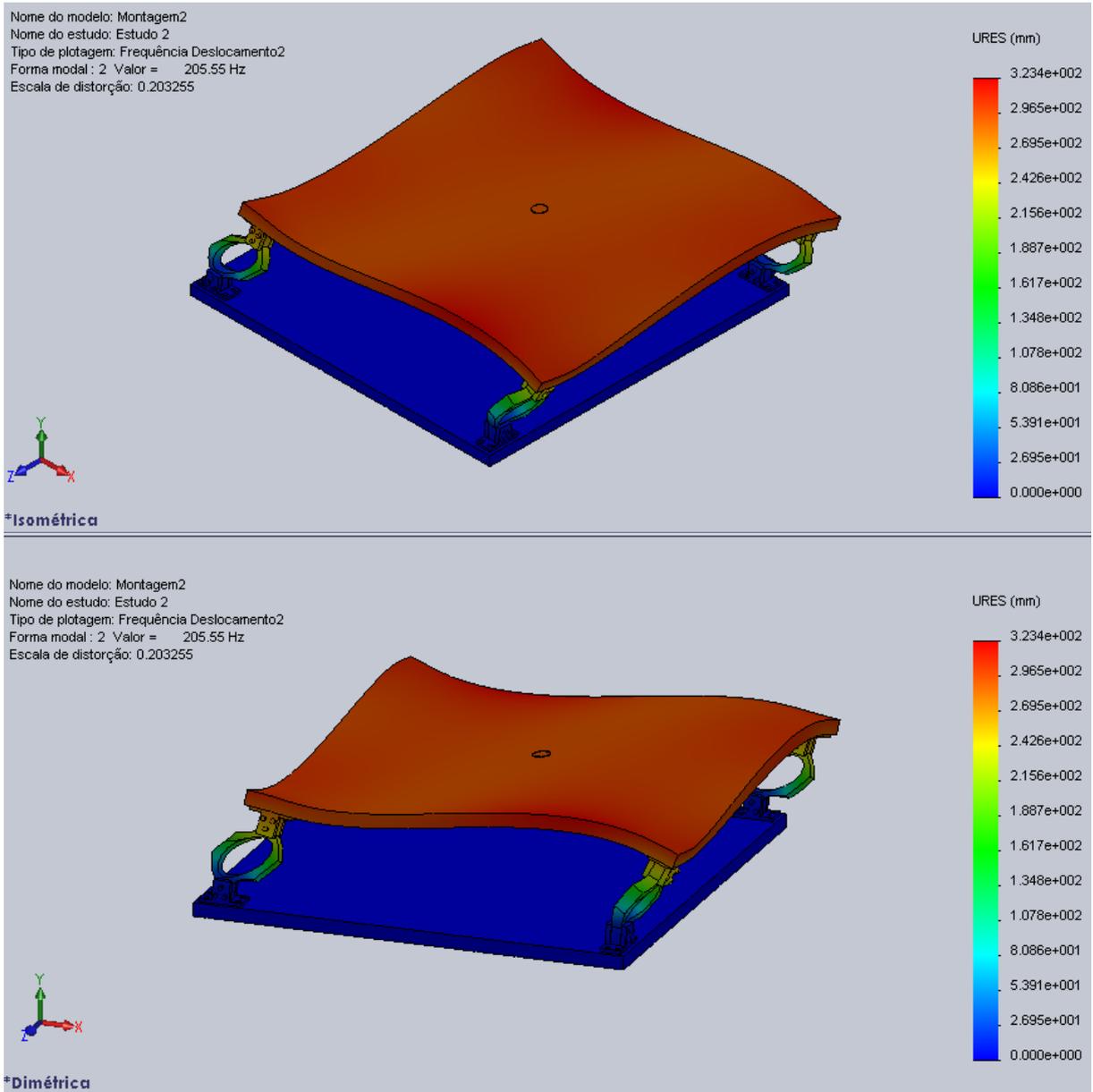


Figura 4.6: Forma modal 2 – 205,55Hz.

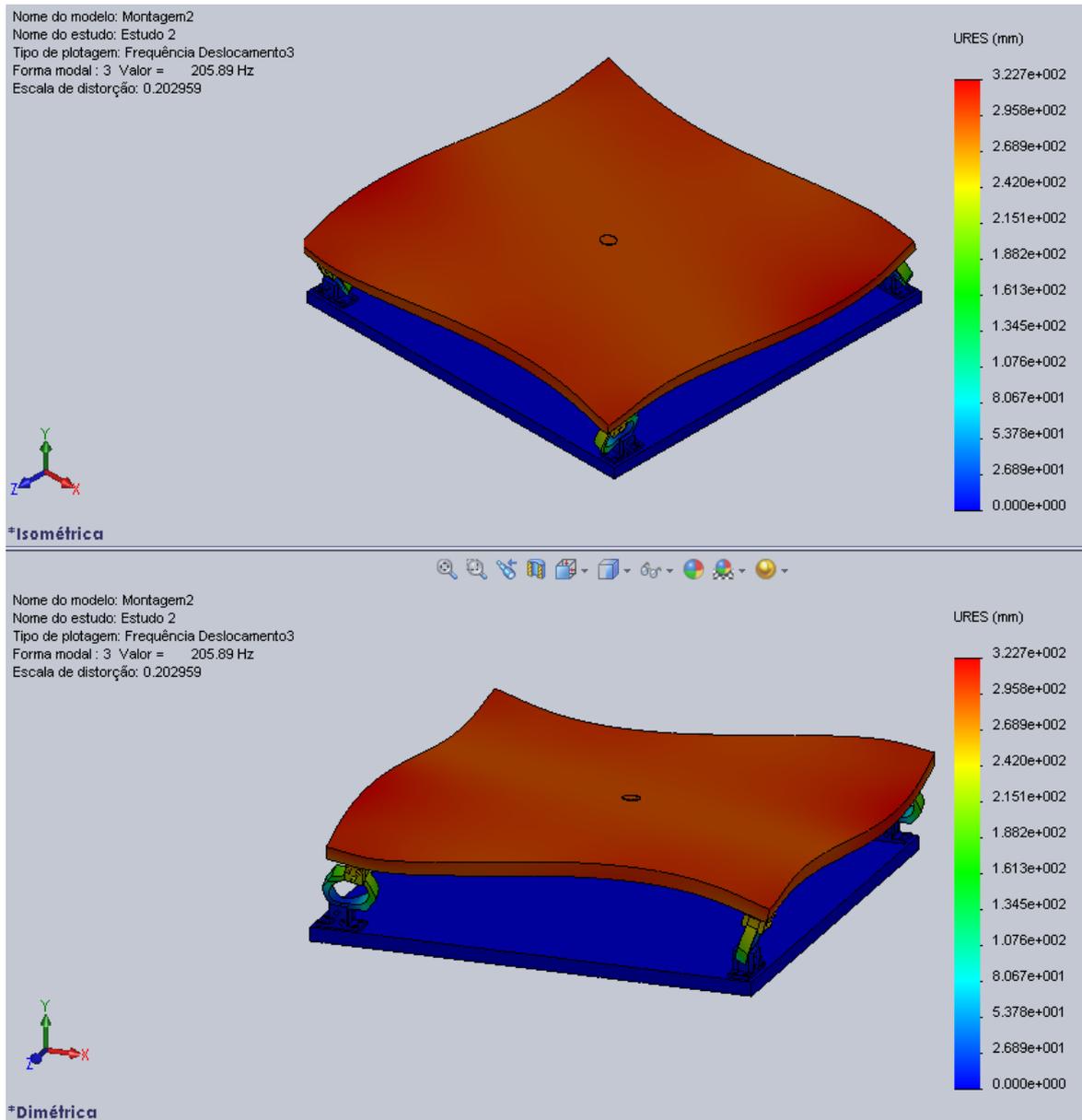


Figura 4.7: Forma modal 3 – 205,89Hz.

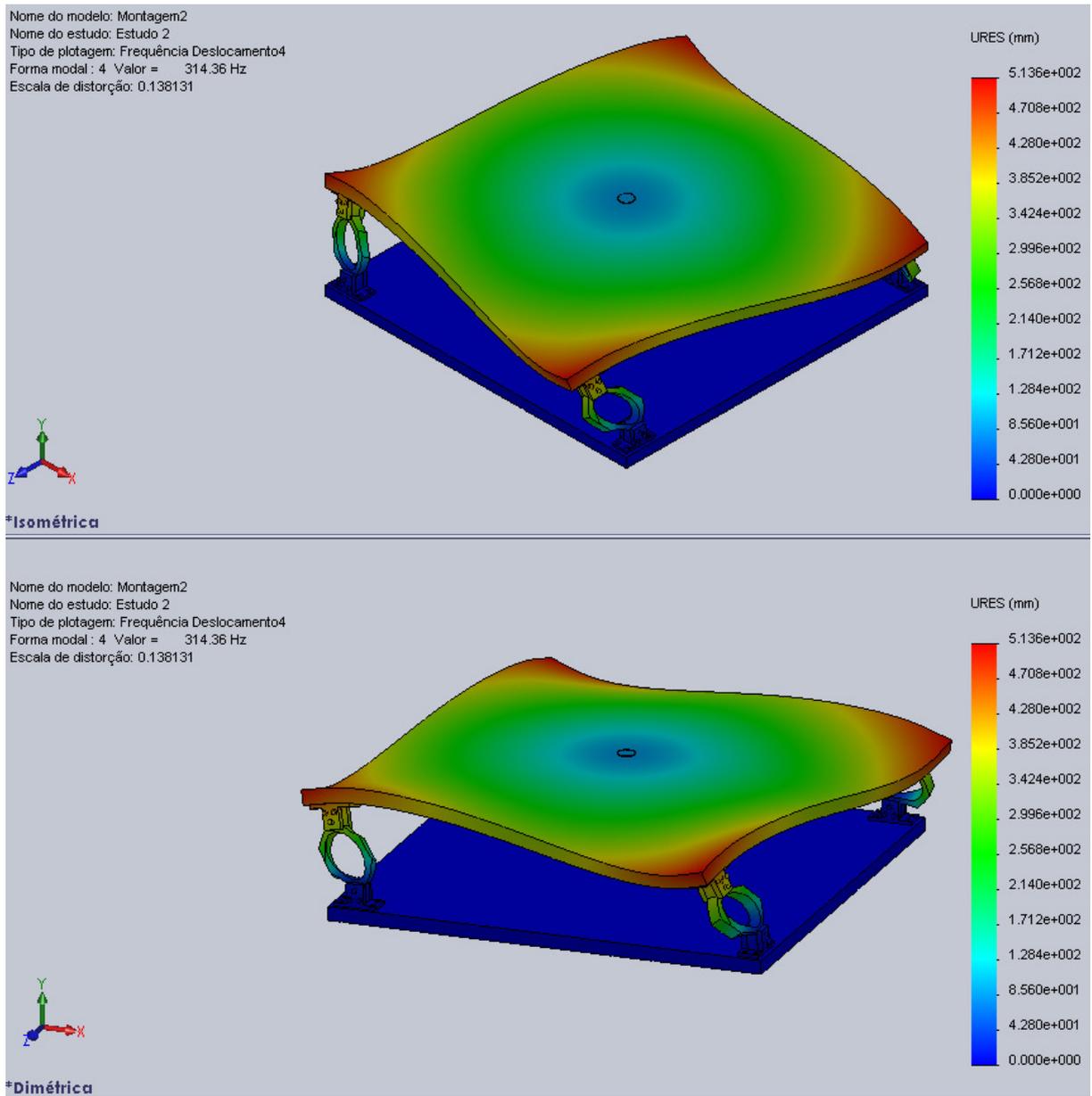


Figura 4.8: Forma modal 4 – 314,36Hz.

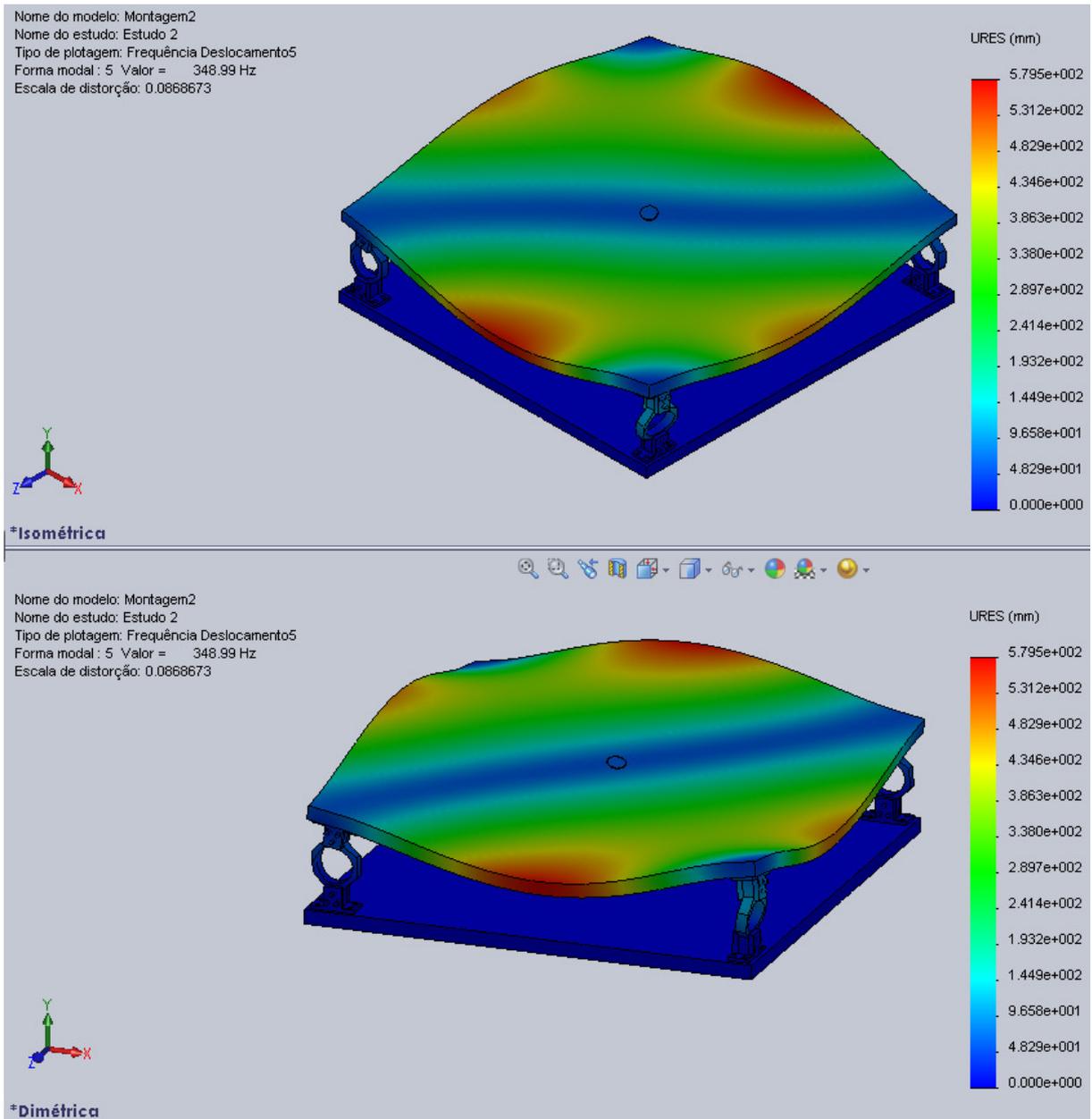


Figura 4.9: Forma modal 5 – 348,99Hz.

## 4.2 Calibração

Para efeito de calibração foram obtidos dados da plataforma após ser realizado o ajuste de zero das saídas de cada canal do sistema. Os quatro canais do eixo z (descritos como z1, z2, z3 e z4) foram medidos simultaneamente através de quatro multímetros ICEL MD2000 na escala de 20V e seus valores foram inseridos na Tabela 4.2 após a aplicação de pesos padrão no centro da plataforma de força (Figura 4.11). A média também foi calculada e foi utilizada para traçar o gráfico da Figura 4.10, que apresenta a curva experimental de calibração da plataforma no eixo z (paralelo a força da gravidade). É interessante ressaltar que o valor de  $R^2=1$ , indica a qualidade do ajuste realizado (linear), trazendo um erro de linearidade de apenas 0,49% (esta métrica indica a não linearidade).

Tabela 4.2: Ensaio com pesos padrão no centro da plataforma de força.

Calibração peso no centro						
Peso padrão (kg)	z1 (V)	z2 (V)	z3 (V)	z4 (V)	Média Aritmética	Desvio Padrão
1	-0,03	-0,05	-0,03	-0,05	-0,04	0,01
2	-0,11	-0,11	-0,08	-0,01	-0,08	0,04
3	-0,17	-0,18	-0,12	-0,21	-0,17	0,03
4	-0,21	-0,25	-0,17	-0,29	-0,23	0,05
5	-0,25	-0,32	-0,22	-0,36	-0,29	0,06
7	-0,34	-0,46	-0,31	-0,51	-0,40	0,09
10	-0,47	-0,66	-0,45	-0,72	-0,57	0,13
12	-0,56	-0,81	-0,56	-0,87	-0,70	0,16
15	-0,71	-1,01	-0,70	-1,09	-0,88	0,20
17	-0,81	-1,15	-0,80	-1,23	-1,00	0,22
20	-0,93	-1,39	-0,92	-1,43	-1,17	0,28
25	-1,17	-1,76	-1,17	-1,79	-1,47	0,34
30	-1,42	-2,09	-1,41	-2,16	-1,77	0,41
35	-1,67	-2,45	-1,64	-2,53	-2,07	0,48
40	-1,91	-2,79	-1,87	-2,89	-2,36	0,55
45	-2,15	-3,13	-2,10	-3,27	-2,66	0,62
50	-2,41	-3,45	-2,34	-3,64	-2,96	0,68
60	-2,89	-4,20	-2,89	-4,23	-3,55	0,76
70	-3,43	-4,89	-3,33	-4,95	-4,15	0,89
73	-3,59	-5,10	-3,47	-5,17	-4,33	0,92

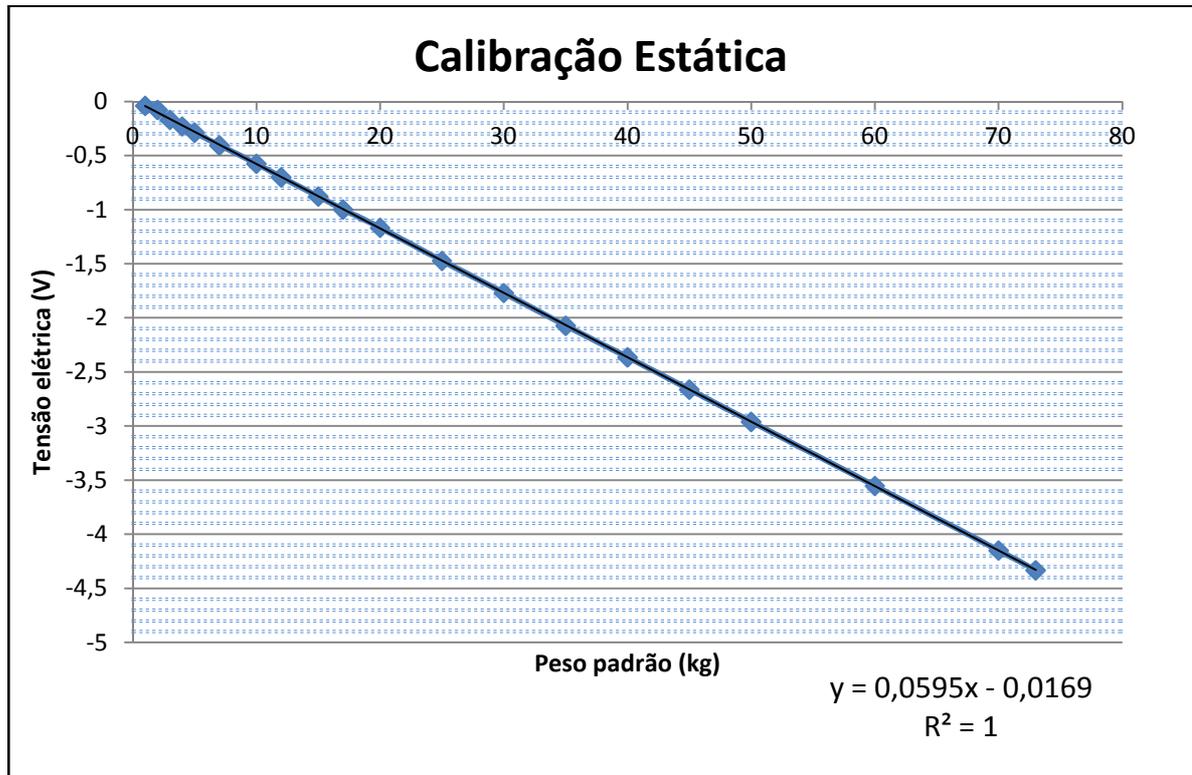


Figura 4.10: Gráfico do ensaio com pesos padrão no centro da plataforma de força.

Também foi realizada calibração individual de cada célula de carga no eixo z, através de um ensaio onde os pesos padrões foram aplicados diretamente em cima de cada célula de carga (nos cantos da plataforma) apresentada na Figura 4.12. Dessa forma é possível analisar e comparar o desempenho individual de cada célula de carga, e nesse caso, foi realizada a soma dos valores nas quatro células de carga para obter-se uma normalização frente ao valor encontrado na célula individual.

A Tabela 4.3 e a Figura 4.13 apresentam os dados referentes ao ensaio com o peso padrão concentrado na célula de carga um. A seguir, a Tabela 4.4 e a Figura 4.14 pertencem ao ensaio com o peso concentrado sobre a célula de carga dois, a Tabela 4.5 e a Figura 4.15 tratam-se do ensaio sobre a célula de carga três e a Tabela 4.6 e a Figura 4.16, da célula de carga quatro, respectivamente.



Figura 4.11: Calibração com pesos padrão no centro da plataforma.

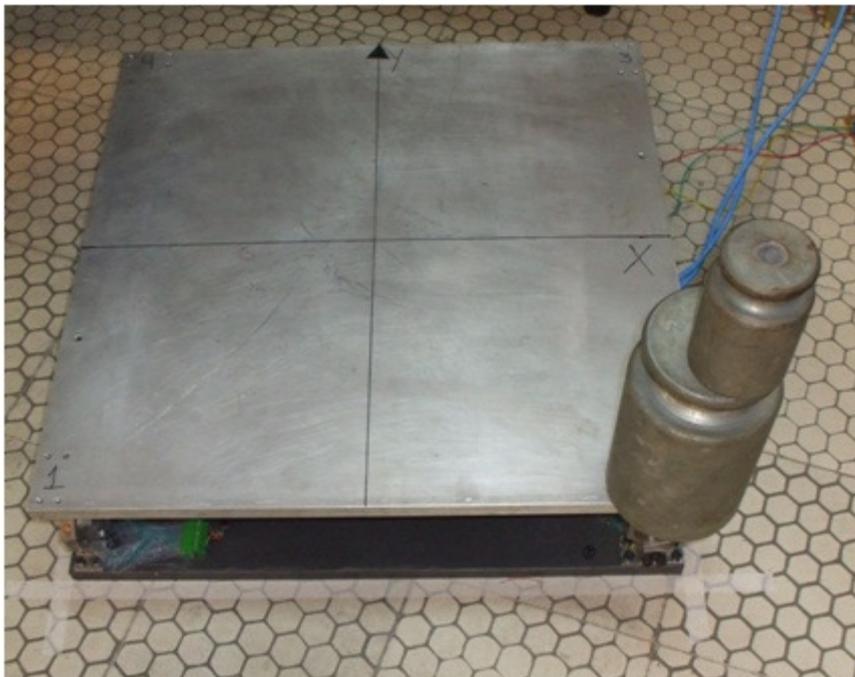


Figura 4.12: Calibração com pesos padrão na extremidade da plataforma.

Tabela 4.3: Ensaio com pesos padrão sobre a célula de carga um.

Calibração com peso em cima da célula 1					
Peso padrão (kg)	z1 (V)	z2 (V)	z3 (V)	z4 (V)	Soma
0	0,09	0,07	0,03	0,10	0,29
1	-0,11	0,06	0,04	0,08	0,07
2	-0,31	0,03	0,06	0,05	-0,17
4	-0,72	-0,02	0,09	0,01	-0,64
5	-0,92	-0,05	0,12	-0,01	-0,86
7	-1,33	-0,09	0,17	-0,04	-1,29
10	-1,94	-0,18	0,23	-0,12	-2,01
12	-2,36	-0,21	0,26	-0,15	-2,46
15	-2,99	-0,26	0,29	-0,19	-3,15
17	-3,43	-0,27	0,31	-0,21	-3,60
20	-4,05	-0,34	0,32	-0,23	-4,30
25	-5,15	-0,39	0,36	-0,26	-5,44
30	-6,23	-0,44	0,37	-0,29	-6,59

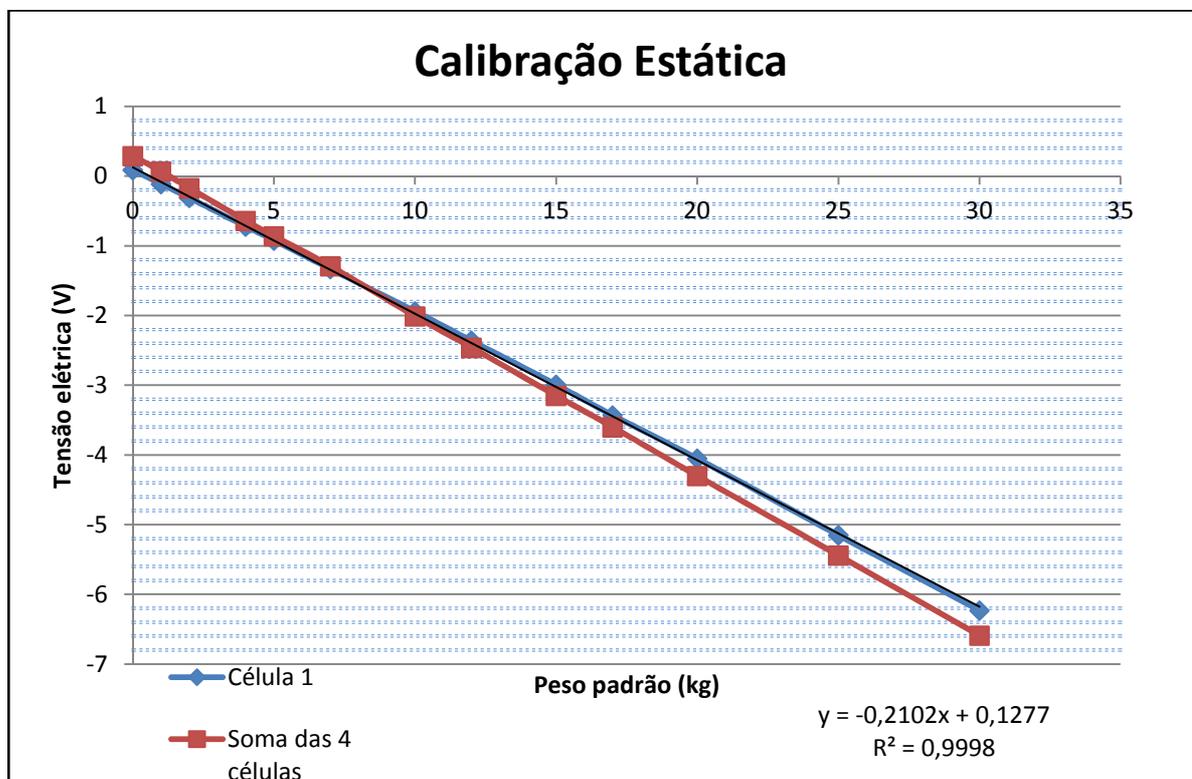


Figura 4.13: Ensaio com pesos padrão na célula de carga um.

Tabela 4.4: Ensaio com pesos padrão sobre a célula de carga dois.

Calibração peso em cima da célula 2					
Peso padrão (kg)	z1 (V)	z2 (V)	z3 (V)	z4 (V)	Soma
0	0,13	0,06	0,05	0,08	0,32
1	0,12	-0,17	0,03	0,11	0,09
2	0,11	-0,41	0,02	0,12	-0,16
4	0,10	-0,87	0,00	0,14	-0,63
5	0,10	-1,11	-0,02	0,15	-0,88
7	0,09	-1,57	-0,05	0,17	-1,36
10	0,08	-2,29	-0,06	0,19	-2,08
12	0,06	-2,76	-0,09	0,22	-2,57
15	0,05	-3,47	-0,12	0,24	-3,30
17	0,04	-3,94	-0,15	0,25	-3,80
20	0,04	-4,67	-0,17	0,29	-4,51
25	0,02	-5,85	-0,23	0,33	-5,73
30	0,01	-7,01	-0,27	0,37	-6,90

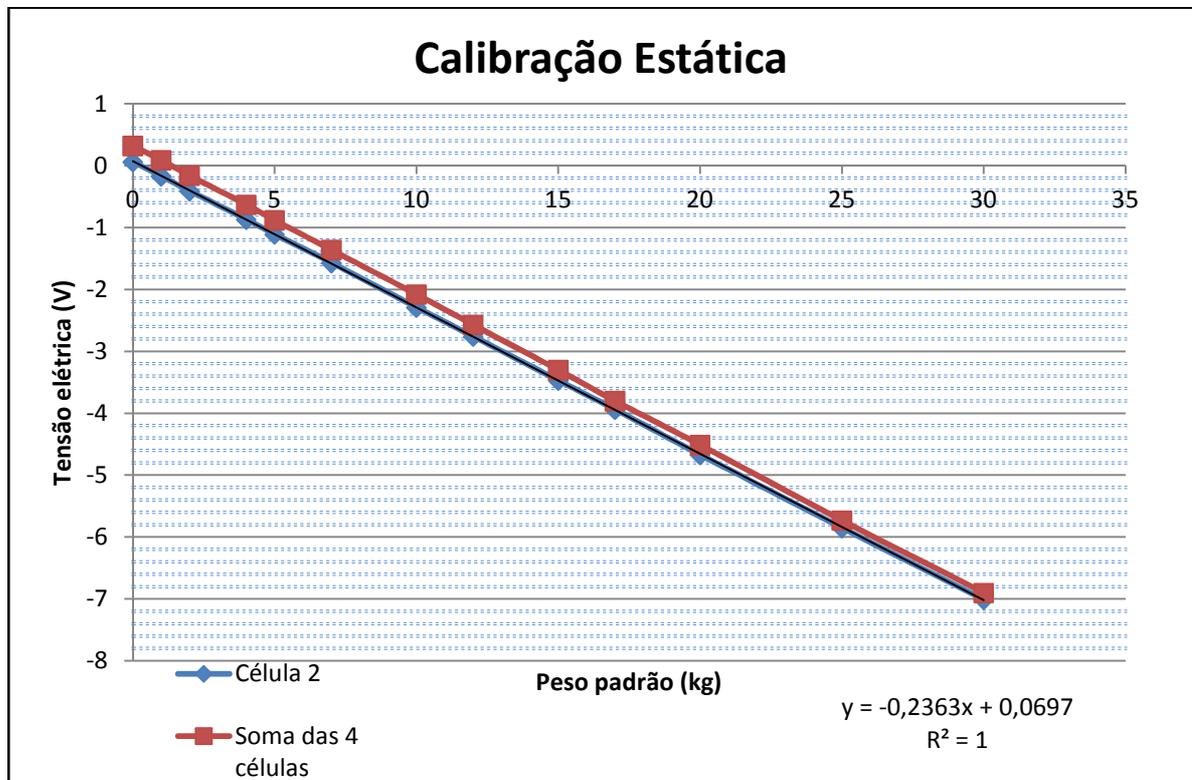


Figura 4.14: Ensaio com pesos padrão na célula de carga dois.

Tabela 4.5: Ensaio com pesos padrão sobre a célula de carga três.

Calibração com peso em cima da célula 3					
Peso padrão (kg)	z1 (V)	z2 (V)	z3 (V)	z4 (V)	Soma
0	0,10	0,08	0,05	0,13	0,36
1	0,13	0,06	-0,17	0,10	0,12
2	0,15	0,03	-0,39	0,07	-0,14
4	0,20	-0,01	-0,79	0,01	-0,59
5	0,23	-0,04	-1,02	-0,01	-0,84
7	0,27	-0,09	-1,43	-0,08	-1,33
10	0,35	-0,15	-2,09	-0,17	-2,06
12	0,39	-0,19	-2,52	-0,23	-2,55
15	0,46	-0,25	-3,15	-0,32	-3,26
17	0,49	-0,28	-3,57	-0,37	-3,73
20	0,56	-0,34	-4,26	-0,41	-4,45
25	0,60	-0,38	-5,41	-0,48	-5,67
30	0,60	-0,36	-6,61	-0,47	-6,84

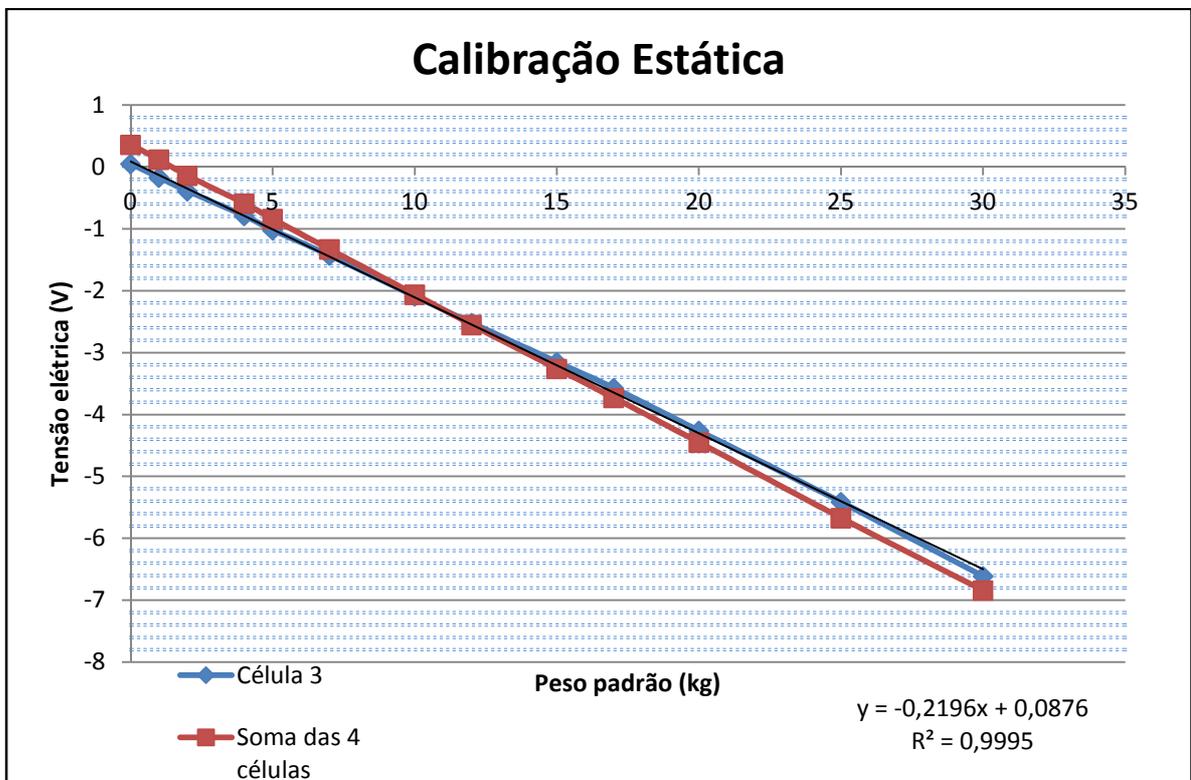


Figura 4.15: Ensaio com pesos padrão na célula de carga três.

Tabela 4.6: Ensaio com pesos padrão sobre a célula de carga quatro.

Calibração peso em cima de cada célula 4					
Peso padrão (kg)	z1 (V)	z2 (V)	z3 (V)	z4 (V)	Soma
0	0,07	0,10	0,04	0,14	0,35
1	0,07	0,10	0,03	-0,09	0,11
2	0,07	0,10	0,04	-0,35	-0,14
4	0,07	0,11	0,05	-0,84	-0,61
5	0,04	0,10	0,05	-1,05	-0,86
7	0,01	0,10	0,06	-1,49	-1,32
10	0,01	0,10	0,04	-2,19	-2,04
12	0,00	0,11	0,03	-2,65	-2,51
15	-0,02	0,11	0,05	-3,35	-3,21
17	-0,04	0,11	0,05	-3,81	-3,69
20	-0,04	0,12	0,06	-4,54	-4,40
25	-0,07	0,13	0,06	-5,69	-5,57
30	-0,09	0,14	0,06	-6,84	-6,73

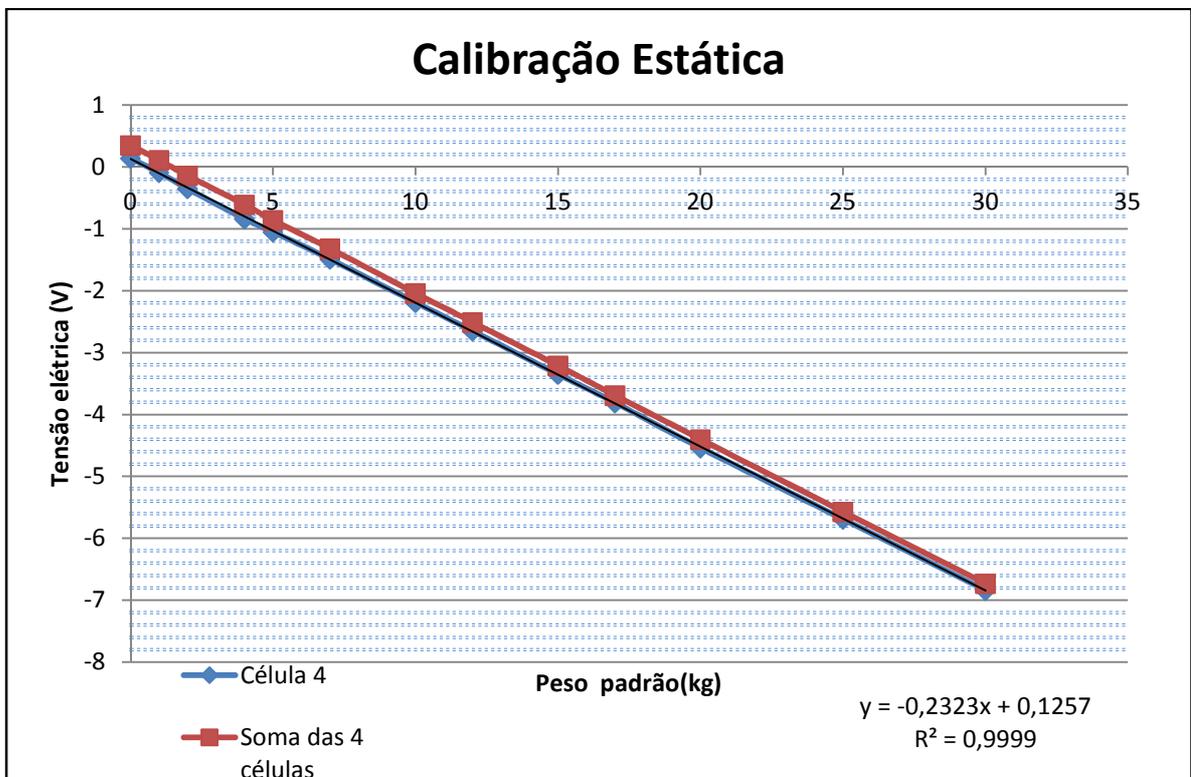


Figura 4.16: Ensaio com pesos padrão na célula de carga quatro.

O gráfico da Figura 4.17 representa a diferença entre a tensão obtida através da soma das quatro células de carga da plataforma de força com a tensão lida na célula de carga onde os pesos padrão foram aplicados. Através dessas informações é possível perceber uma tendência que essa diferença se aproxime de zero com peso aplicado nas células de carga dois e quatro, também é possível perceber que ocorre um aumento na diferença conforme o aumento de carga quando se trata das células um e três.

Com esses dados, é possível verificar que as células dois e quatro isolam de forma mais satisfatória o peso aplicado no eixo z.

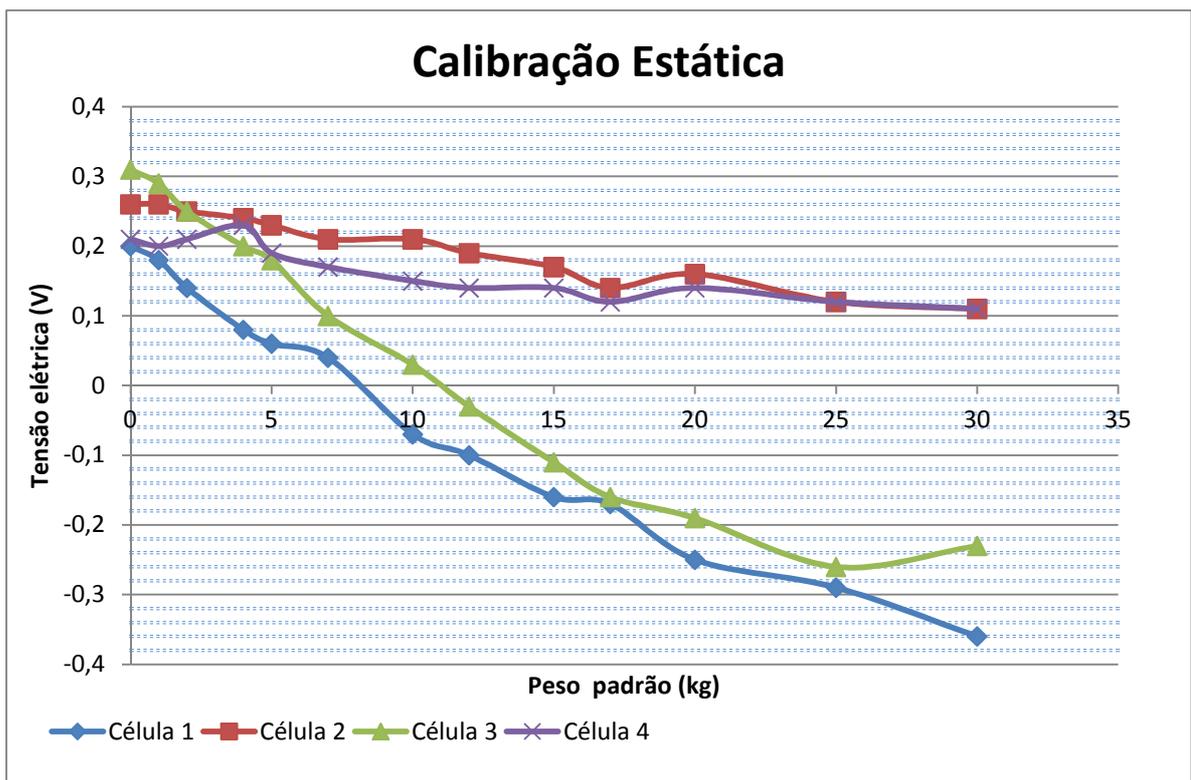


Figura 4.17: Diferença de tensão medida na soma das quatro células com a célula em que foi aplicado o peso padrão.

A Tabela 4.7 apresenta os dados obtidos da calibração dos eixos x e y. A inclinação das retas significa uma diferença de ganho entre os eixos x e y, porém este fator pode ser ajustado via *software*.

Tabela 4.7: Calibração xy

<b>Peso padrão (kg)</b>	<b>Tensão eixo x (V)</b>	<b>Tensão eixo y (V)</b>
-12	-6,41	-5,23
-10	-6,13	-4,33
-8	-4,93	-3,43
-7	-4,36	-2,97
-6	-3,67	-2,53
-5	-3,06	-2,10
-4	-2,40	-1,68
-3	-1,81	-1,23
-2	-1,19	-0,78
-1	-0,53	-0,38
-0,2	-0,03	0,00
0,2	0,00	0,02
1	0,42	0,49
2	0,93	0,92
3	1,51	1,42
4	2,03	1,92
5	2,55	2,38
6	3,06	2,84
7	3,58	3,32
8	4,11	3,79
10	5,12	4,56
12	6,15	-

De acordo com os dados experimentais, a sensibilidade linearizada do sistema pode ser dada por:

$$\text{eixo x} = 0,54.m - 0,23 \text{ V/kg}$$

$$\text{eixo y} = 0,44.m + 0,11 \text{ V/kg}$$

$$\text{eixo z} = 0,0595.m - 0,0169 \text{ V/kg}$$

onde (m) é a massa aplicada em cada eixo.

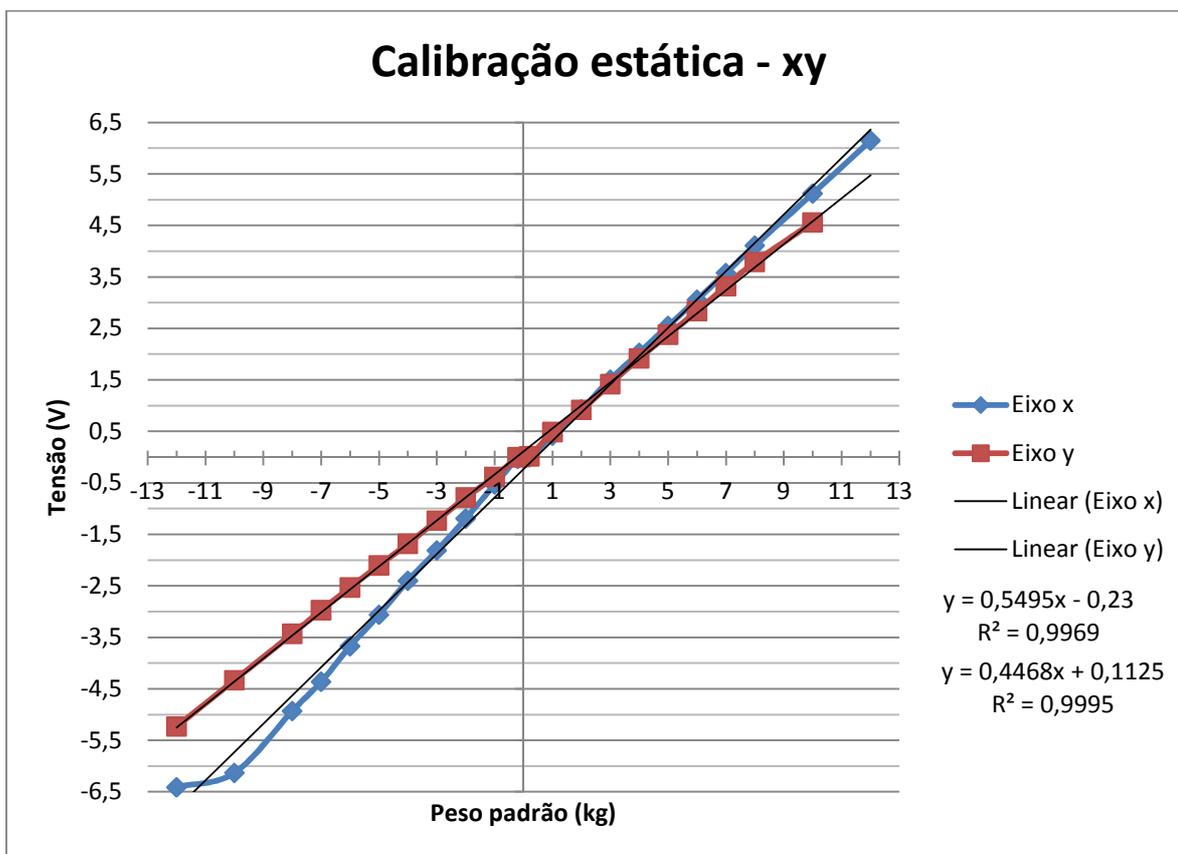


Figura 4.18: Representação gráfica da calibração estática nos eixos x e y.

O erro de linearidade encontrado no eixo x (azul) foi de 6,2% e no eixo y (vermelho) de 1,5%, valores altos se comparado ao valor encontrado no eixo z (0,49%), porém este fato se deve a deficiência do sistema com roldana montado para calibração. Em algumas faixas de medida, os valores encontrados são muito bons, e ajustam-se perfeitamente a curva do ajuste linear.

### 4.3 Condicionamento de sinais e aquisição de dados

O condicionamento realizado permitiu com que fossem obtidos dados de forma compatível com a necessidade do projeto e para a aquisição de dados. Para condicionamento do sinal proveniente dos extensômetros, foram utilizados dois estágios de amplificação com o

circuito integrado INA126 (amplificador de instrumentação) com ganho configurado em 100 cada um. Estes estágios de ganho proporcionaram uma saída de tensão na faixa de -10V a 10V, compatíveis com a placa de aquisição USB 6008. Os filtros utilizados realizaram o corte de 24dB/oitava em torno de 100Hz fazendo com que as frequências de ressonância dos modos de vibração da plataforma de força ficassem acima da frequência escolhida no passa-baixas.

A calibração estática realizada no Laboratório de Instrumentação com pesos padrão de zero até 73kg dispostos no centro da plataforma trouxe como resultado no eixo z, um valor de  $R^2=1$  frente a um ajuste de curva linear, evidenciando a utilização da plataforma de força e suas células de carga em regime elástico. Além disso, mostra que o sistema desenvolvido obteve êxito na reprodução do resultado matemático teórico que é linear com a força aplicada e a tensão de alimentação. O modelo matemático permite também, de acordo com a linearidade apresentada, perceber que a fonte de tensão constante desenvolvida está funcionando corretamente, não proporcionando alterações de linearidade na faixa de medida realizada.

A aquisição experimental dinâmica foi realizada através do método do impacto com um acelerômetro comercial como sensor (descrito na Seção 3.5). Estes dados foram adquiridos da mesma forma, ou seja, com uma amostragem de 1000 amostras por segundo e 12 bits de resolução. Após a pancada, a curva no tempo é exibida na Figura 4.20, os dados foram analisados através de FFT trazendo como resultado o gráfico apresentado na Figura 4.19. A Tabela 4.8 compara os dados encontrados experimentalmente com as simulações.

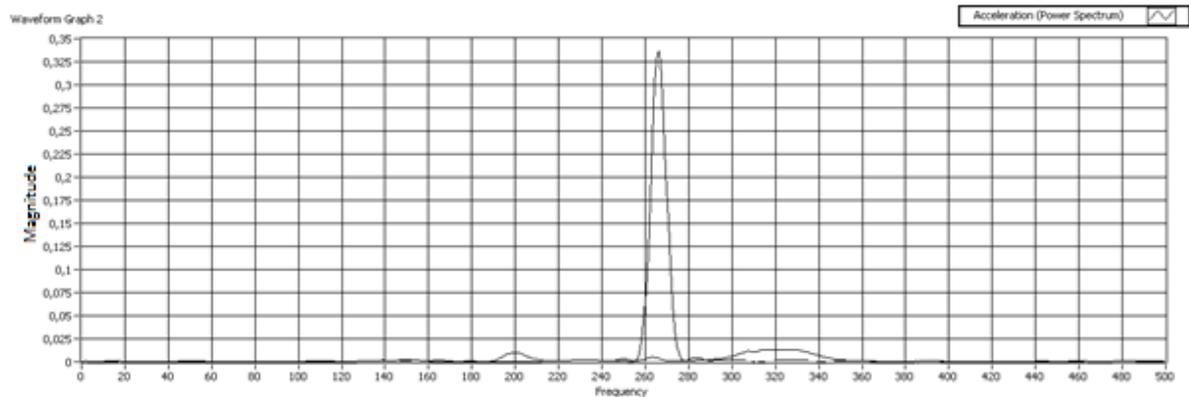


Figura 4.19: Resultado da análise de FFT (Magnitude por Hz).

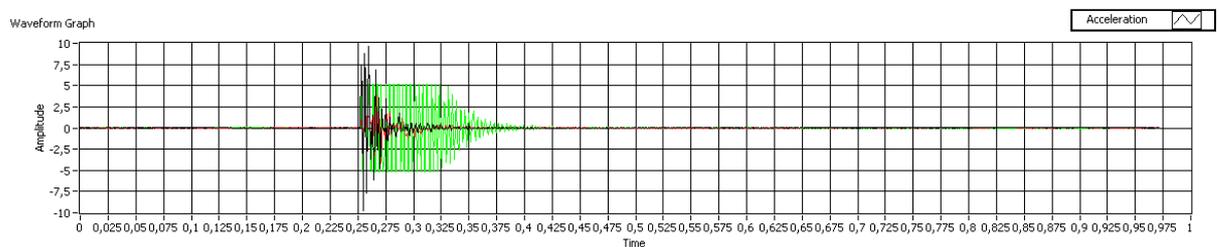


Figura 4.20: Ensaio dinâmico em função no tempo, em verde o eixo z, considerado na análise ( $\text{m/s}^2$  por segundo).

Através da comparação realizada na Tabela 4.8 é possível perceber a coerência entre os dados simulados e experimentais. Os valores encontrados, tanto no ensaio experimental, quanto na simulação, não oferecem risco na utilização da plataforma, onde as frequências envolvidas são da ordem de unidades de Hertz.

Tabela 4.8: Comparação dos modos de vibração simulados e experimentais

Modo de vibração	Simulação	Experimental	Diferença
1	183Hz	158Hz	25Hz
2	205Hz	200Hz	5Hz
3	206Hz	201Hz	5Hz
4	314Hz	265Hz	49Hz
5	349Hz	323Hz	26Hz

#### 4.4 Ensaios com a plataforma

Após a calibração da plataforma e os ensaios dinâmicos, um voluntário fez uso da plataforma para fins de ensaio (Figura 4.21). Durante esse período, foi avaliada a resposta da plataforma e comparada com os valores de calibração, para efeitos de validação.

Além da força resultante no eixo z, foram avaliados o centro de pressão (COP) e as forças nos eixos x e y. Através das Figuras 4.22 e 4.23 é possível visualizar o posicionamento frente aos eixos x e y, em conjunto com a Figura 4.24, que apresenta os valores obtidos no *software* no momento do ensaio.

A mudança de local da plataforma, assim como apenas a movimentação dela no mesmo local, causa uma alteração significativa no ajuste de zero, tornando impossível a configuração permanente deste parâmetro devido a deformações causadas pela irregularidade do piso do Laboratório de Instrumentação. Idealmente, a chapa inferior deveria ser rígida, mas como se pôde perceber, a deformação da chapa inferior de acordo com o piso causa alteração na medida inicial, fazendo com que seja necessário o ajuste de zero a cada movimentação da plataforma de força. Por esse motivo, durante a realização dos ensaios, o local da plataforma foi marcado no piso para evitar mudanças de lugar.

Ocorre também, devido a imperfeições mecânicas (assimetrias) e engastes deficientes (parafusos), uma interferência do eixo z no eixo x, mostrando que a deformação em relação ao eixo z faz com que a plataforma perceba uma deformação no eixo x. Para minimizar esses efeitos, a plataforma deve ser instalada sempre no mesmo local.



Figura 4.21: Ensaio com voluntário.



Figura 4.22: Posicionamento no eixo y.

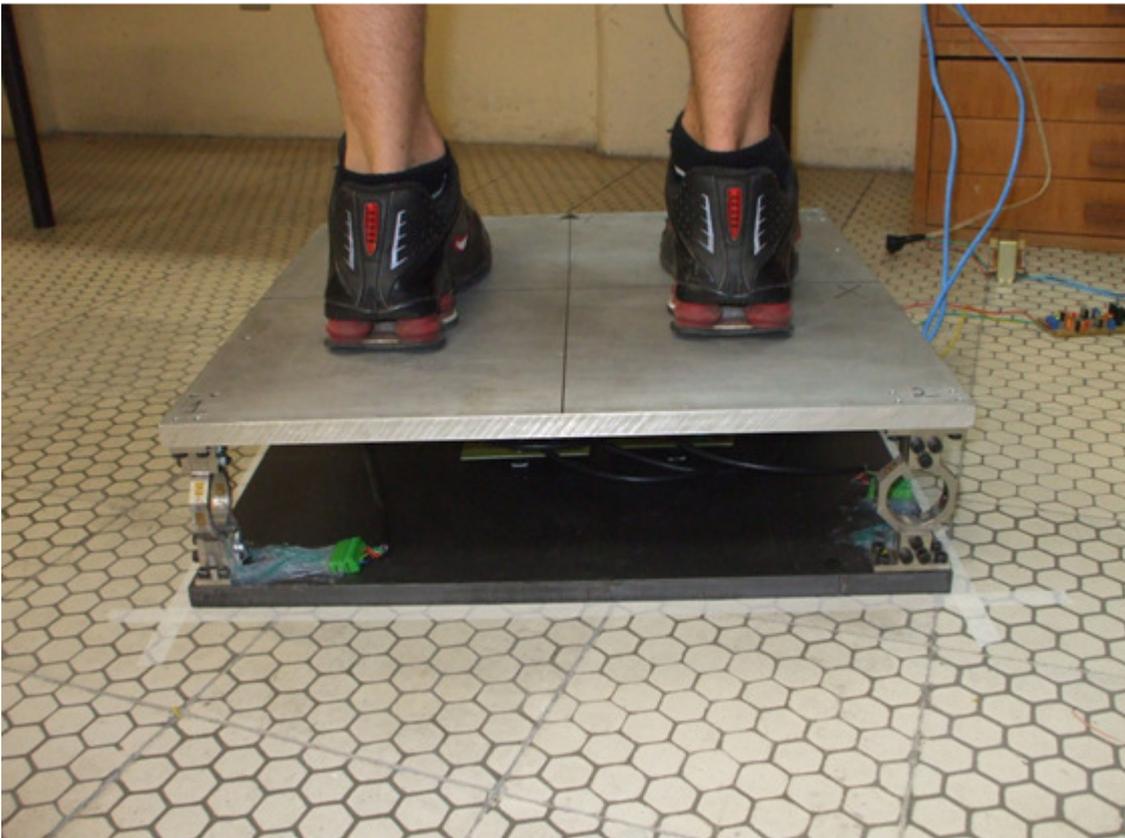


Figura 4.23: Posicionamento no eixo x.

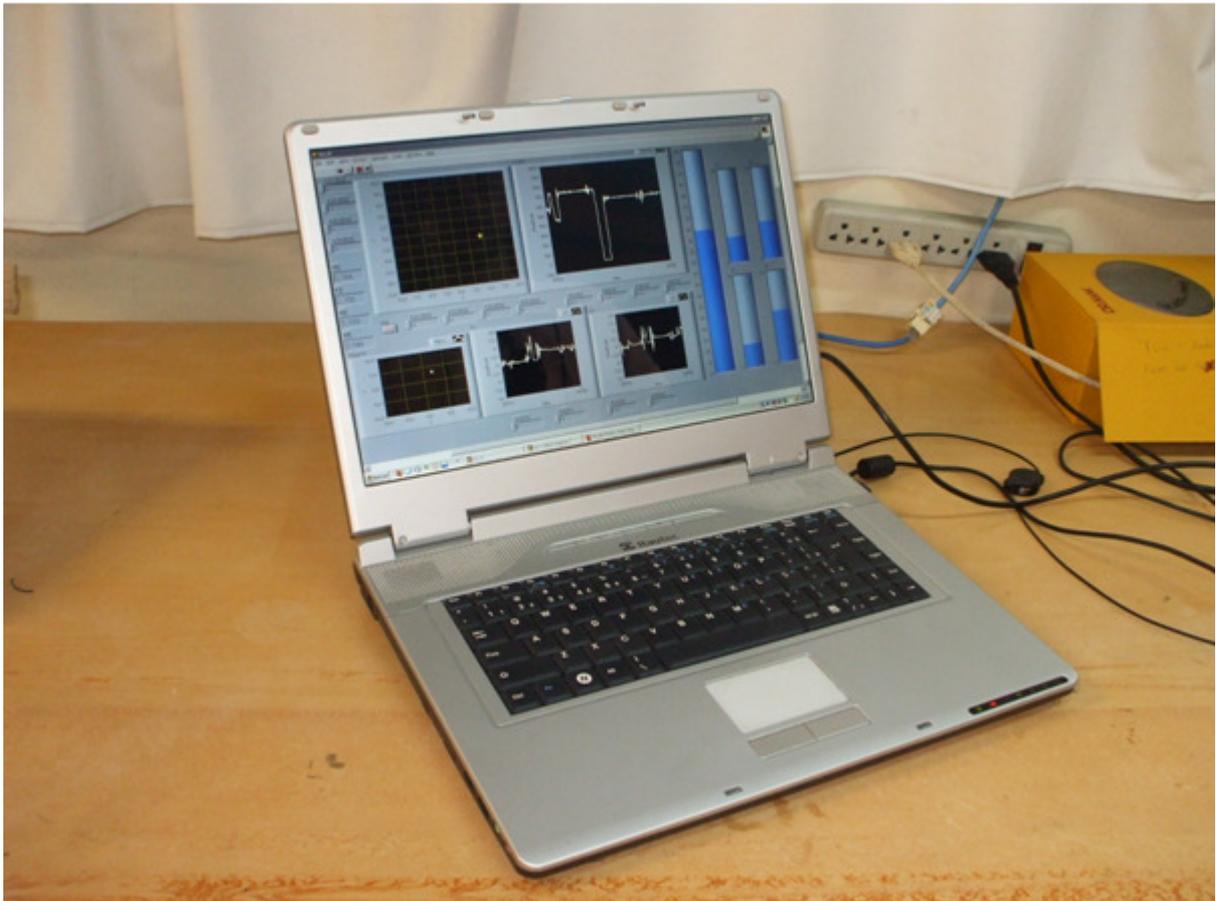


Figura 4.24: Leitura dos resultados durante ensaio

#### 4.5 Comparação do modelo matemático aproximado, simulação e ensaio experimental de uma célula de carga em anel

A Figura 4.25 apresenta um diagrama do modelo de anel aproximado.

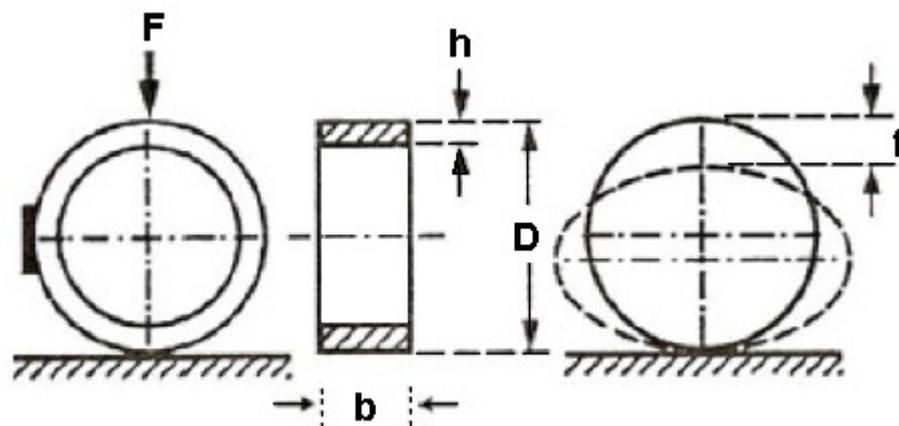


Figura 4.25: Dimensões de uma célula de carga em anel típica.

O modelo matemático aproximado de uma célula de carga em anel para  $h \ll D$ , apresenta as Equações 4.1 e 4.2 para tensão e deformação respectivamente:

$$\varepsilon = \frac{3.D.F}{\pi.b.h^2.E} \quad (4.1)$$

$$f = \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) \cdot D^3 \cdot F / b \cdot h^3 \cdot E \quad (4.2)$$

onde  $\varepsilon$  representa a deformação, D representa o diâmetro exterior do anel, F a força aplicada, h a espessura do anel, b representa a profundidade do anel e  $f$  representa o deslocamento na parte superior do anel.

A Equação 4.1 trata da deformação e a Equação 4.2 trata do deslocamento na parte superior do anel. Tomando os valores experimentais deste projeto e aplicando uma força de 250N temos:

$$\varepsilon = \frac{3.50.10^{-3}.250}{\pi.12.10^{-3}.(5.10^{-3})^2.1,9.10^{11}} = 209,41 \mu m/m$$

e para o deslocamento na parte superior do anel:

$$f = \frac{3}{2} \cdot \left( \frac{\pi}{4} - \frac{2}{\pi} \right) \cdot (50.10^{-3})^3 \cdot 250 / 12.10^{-3} \cdot (5.10^{-3})^3 \cdot 1,9.10^{11} = 2,447.10^{-5} m$$

$$= 24 \mu m$$

Para o modelo simulado, as Figuras 4.26 e 4.27 apresentam o resultado da simulação realizada para a mesma carga:

- deslocamento de 5,7 $\mu$ m no topo do anel;
- deformação em torno de 48,6 $\mu$ m/m no local do extensômetro.

Experimentalmente, através dos dados obtidos, pode-se calcular a deformação:

$$v_o = A \frac{\Delta R}{R} V_{REF} = 10000 \cdot GF \cdot \varepsilon \cdot V_{REF} = 10000 \cdot 2,13 \cdot \varepsilon \cdot 5$$

considerando que  $250\text{N}=25,4\text{kg}$  e utilizando a média dos valores encontrados na calibração para uma massa de  $25\text{kg}$ :

$$v_o = 5,5 = 10000 \cdot 2,13 \cdot \varepsilon \cdot 5$$

$$\varepsilon = 51,6\mu\text{m}/\text{m}$$

A Tabela 4.9 compara os resultados obtidos através dos três métodos.

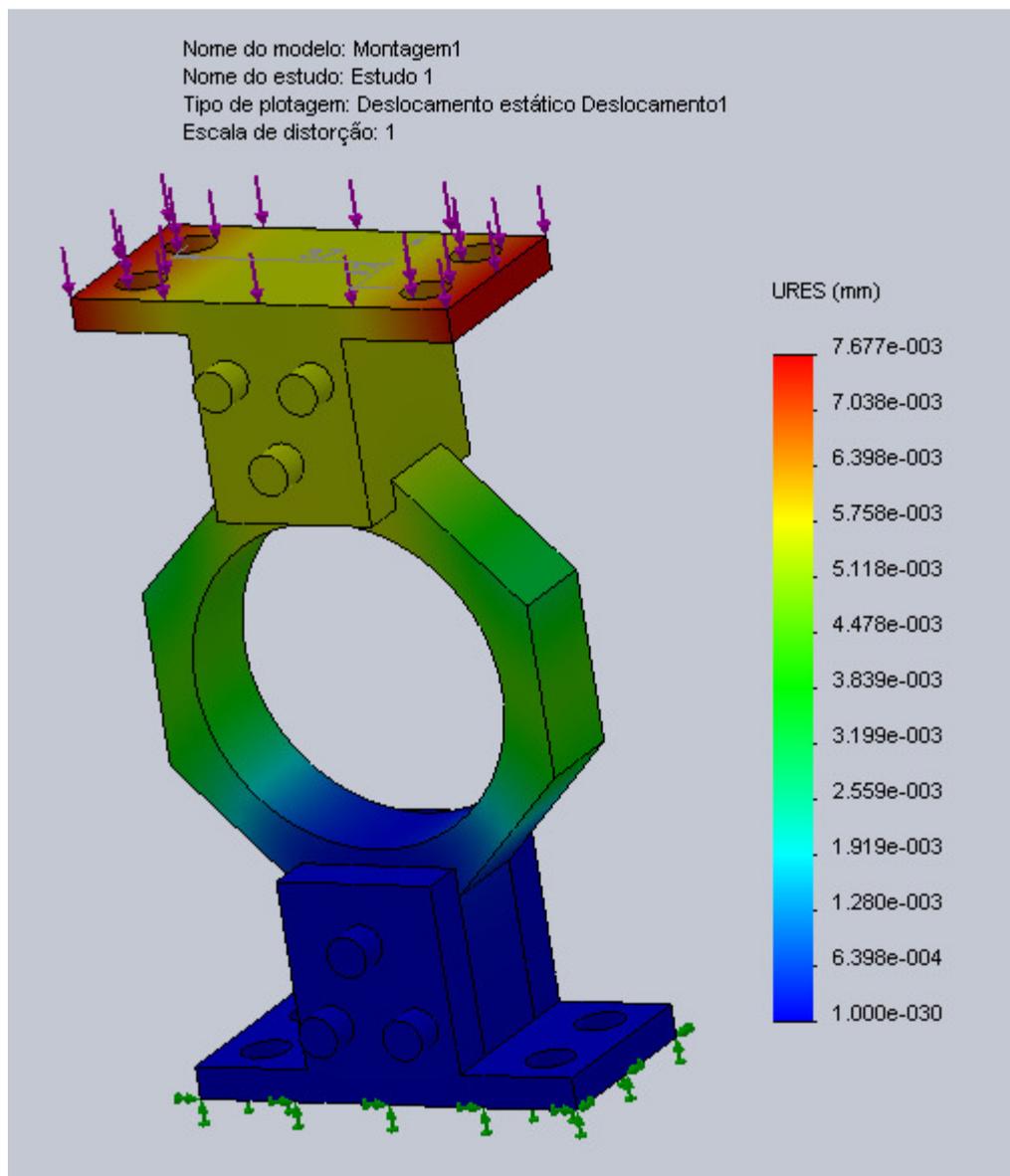


Figura 4.26: Deslocamento de  $5,7\mu\text{m}$  no topo do anel

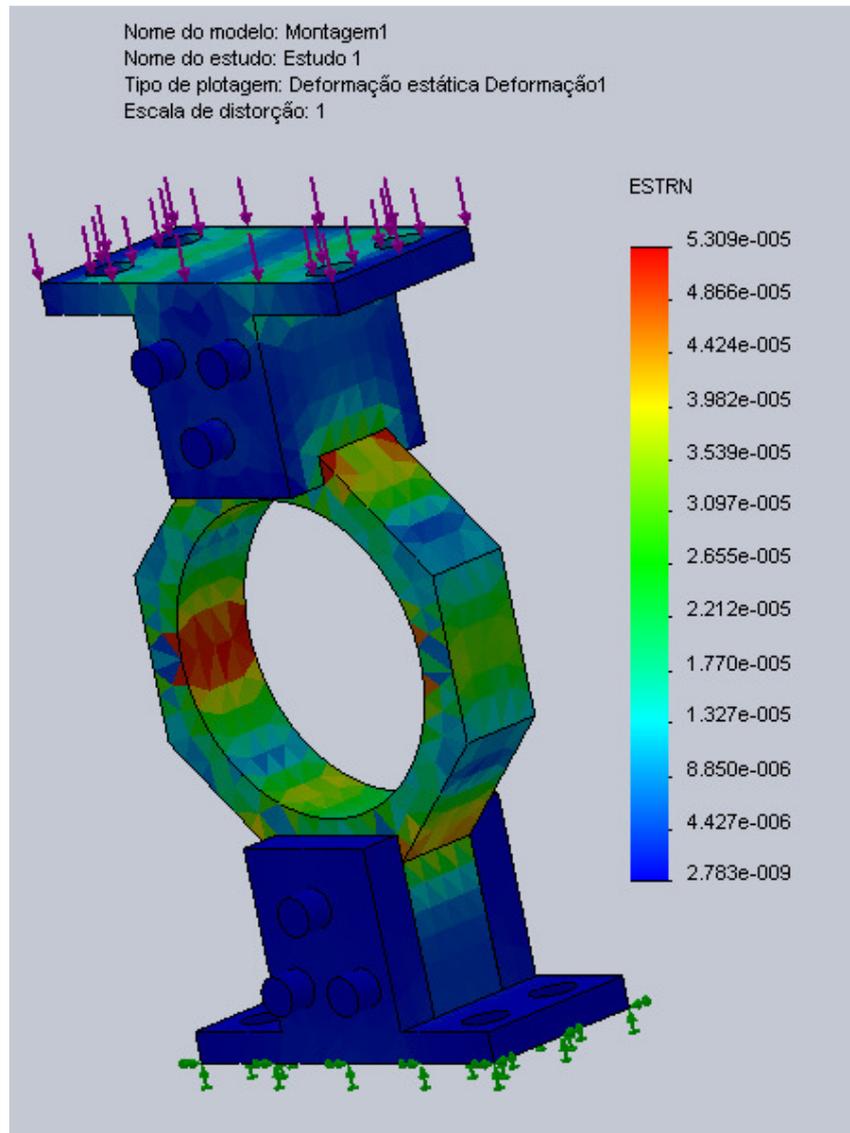


Figura 4.27: Deformação em torno de  $48,6\mu\text{m}/\text{m}$  no local do extensômetro

Tabela 4.9: Comparação do modelos matemático com a simulação e os dados experimentais

	Modelo matemático aproximado	Simulação	Experimental
Deslocamento ( $\mu\text{m}$ )	24	5,7	-
Deformação ( $\mu\text{m}/\text{m}$ )	209,41	48,6	51,6

Os resultados de deformação apresentados na Tabela 4.9 mostram uma diferença de 5,8% na comparação da simulação com o resultado obtido experimentalmente. Essa diferença provavelmente se deve a engastes deficientes ou imperfeições do sistema, além da plataforma inferior não ser rígida, conforme a simulação determina.

Em relação ao modelo matemático, houve uma diferença de 305,8%. A principal razão para este alto valor é a aproximação utilizada, onde a célula de carga do sistema real não é um anel conforme a representação da Figura 4.25. A célula de carga utilizada neste trabalho possui a parte superior com dimensões maiores e juntamente com os mancais, dificulta deformações naquela parte do anel, diferentemente do modelo matemático utilizado, fazendo com que haja uma diferença grande nos valores calculados, porém mantenha a mesma ordem de grandeza.

## 5. CONCLUSÕES

Através da análise dos dados obtidos nas simulações estáticas, foi possível determinar a força e as deformações que as células de carga seriam submetidas, assim foi possível concluir que os esforços envolvidos na plataforma de forças, quando na utilização dentro de seus valores nominais, não causariam deformações elásticas. Os ensaios dinâmicos através da transformada rápida de Fourier (FFT) mostraram que os valores das frequências dos modos de vibração da plataforma de força (faixa de centenas de Hertz) encontram-se fora da faixa de utilização (unidades de Hertz), dessa forma, não ocorrem problemas em relação a deformações excessivas ou vibrações indesejadas.

Em função da placa de aquisição utilizada neste projeto, o sinal foi tratado de forma que fosse compatível. Foram implementados dois estágios de ganho resultando em uma tensão máxima de 10V (limite da placa de aquisição) e dois estágios de filtro 12dB/oitava a fim de evitar ruídos em frequências não desejadas.

A calibração estática da plataforma de força obteve erro de linearidade de 0,49% no eixo principal (eixo z), representando bom funcionamento do sistema. Os eixos x e y obtiveram erros de linearidade maiores, de 6,2% e 1,5% respectivamente, devido a imperfeições nos métodos de calibração.

Na comparação das simulações com os dados experimentais, foram obtidos valores bem próximos, apresentando uma diferença de 5,8%.

## 6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

A plataforma de forças estudada neste trabalho não consegue realizar a caracterização completa da marcha humana. Devido a este fato, a sugestão de algum sistema adicional para caracterizar o posicionamento do indivíduo na plataforma, torna-se muito interessante. Um sistema desenvolvido através da acelerometria, lasers ou câmeras poderiam contribuir para a caracterização da reação do solo e complementar os dados da plataforma de força.

Conforme percebido, qualquer movimentação da plataforma de força prejudica o ajuste de zero. Considerando este fato, um ajuste automático de zero a cada utilização desenvolvido via *software*, poderia trazer melhores resultados na utilização da plataforma de força, porém precisa ser analisado um procedimento para avaliar o desnível da plataforma de força através de sensor apropriado.

Realizar aquisição de dados salvando o traço realizado pelo gráfico de COP conforme a Figura 2.2, de forma que os dados possam ser interpretados convenientemente.

Implementação de um sistema de conversão A/D micro processado, que facilitaria a aquisição de dados e poderia eliminar a necessidade do LabView para utilização plena da plataforma de forças. Além da exibição de dados em uma série de *displays*.

Projetar outra célula de carga reduzindo a massa do sistema e a altura da base da plataforma de força.

Desenvolvimento de um novo modelo matemático de melhor qualidade para contemplar a célula de carga estudada.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMADIO, A. C.; ÁVILA, A. O. V.; GUIMARÃES, A. C. S.; DAVID, A. C. D.; MOTA, C. B.; BORGES, D. M.; GUIMARÃES, F.; CARMO, H. M.; LOSS J.; SERRÃO, J. C.; REGINA DE SÁ, M.; BARROS, R. M. L. Métodos de medição em biomecânica do esporte: descrição de protocolos para aplicação nos centros de excelência esportiva. **Grupo de Biomecânica para a Rede do Centro de Excelência Esportiva do Ministério de Esporte e Turismo (CENESP-MET)**, 2005.

Application Note 078. **Measuring Strain with Strain Gauges**. National Instruments, 2003.

BAGESTEIRO, L. B.; TAMAGNA, A. **Projeto e Construção de uma Célula de Carga Dinâmica Octogonal**. Porto Alegre: DEMEC - UFRGS. 21p. (Caderno Técnico de Engenharia Mecânica, nº 7), 1995.

BALBINOT, A. **Notas de aula. Disciplina de Instrumentação**, UFRGS, 2011.

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

BARELA, A. M. F.; DUARTE, M. Utilização da plataforma de força para aquisição de dados cinéticos durante a marcha humana. **Brazilian Journal of Motor Behavior**, 2011.

BECK, J. C. P. **Projeto, construção e análise de células de carga de placa e de anel**. Tese de mestrado. Engenharia Metalúrgica, UFRGS, 1983.

CAVALLO G.; CAMPOLO, D.; FOGLIANI, G.; GUGLIELMELLI, E. A novel method for in-situ calibration of a 2-dof force platform for tremor detection in small-sized animal models. **IEEE International Conference on Robotics and Automation, 2008**.

CEONI, F. C. **Medidas de tensões residuais por extensometria em componentes usados no setor da mobilidade**. Tese de mestrado no IPEN (instituto de pesquisas energéticas e nucleares), 2010.

CHUNG, T. M. Avaliação cinética e cinemática da marcha de adultos do sexo masculino **Acta Fisiátrica**, revista eletrônica da Universidade de São Paulo com o apoio da Associação Brasileira de Medicina Física e Reabilitação, da Academia Brasileira de Medicina de Reabilitação e da Fundação Faculdade de Medicina, 1999.

CÔRREA D.; BALBINOT, A. **Accelerometry for the motion analysis of the lateral plane of the human body during gait**. Health & Technology. Artigo publicado em 8 Julho de 2011.

DUARTE M.; FREITAS, S. M. S. Revisão sobre posturografia baseada em plataforma de força para avaliação do equilíbrio. **Revista Brasileira de Fisioterapia**, 2010.

DUARTE, M. **Análise estabilográfica da postura ereta humana quase-estática**. Tese apresentada à Escola de Educação Física e Esporte da Universidade de São Paulo, 2000.

FRANÇA, F. A. **Instrumentação e Medidas: Grandezas Mecânicas**. UNICAMP 2007.

FRANCO, S. **Design with Operational Amplifiers and Analog Integrated Circuits**. Third Edition, Editora McGraw-Hill, 2002

GAZZOLA, J. M.; DONÁ, F.; GANANÇA, M. M.; SUAREZ, H.; GANANÇA, F. F.; CAOVIOLA, H. H. **Realidade virtual na avaliação e reabilitação dos distúrbios vestibulares**. **ACTA ORL/Técnicas em Otorrinolaringologia** - Vol. 27 (1: 22-7, 2009).

GIACOMOZZI, C.; MACELLARI, V. Piezo-Dynamometric Platform for a More Complete Analysis of Foot-to-Floor Interaction. **IEEE Transactions on rehabilitation engineering**, Vol. 5, No. 4, December 1997.

HERNANDEZ W. Improving the Response of a Load Cell by Using Optimal Filtering. **Sensors** – 2008.

JOHNSON, C. D. **Process control instrumentation technology**, Fifth Edition; Prentice-Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1997.

KOJIMA, A. N. **Extensometria: Avaliação de implantes de sextavado externo posicionados na configuração linear e compensada (*offset*), sob carregamento axial**. Tese de doutorado apresentada à Faculdade de Odontologia da UNESP, 2008.

LAZZARI, C. D. **Desenvolvimento e estudo de uma plataforma biomecânica aplicada ao ciclismo**, Trabalho de Conclusão de curso, Engenharia Elétrica, UFRGS, 2010.

MALERBA, P. C. C.; GUARNIERI, F. L.; BARROS, J. **Aplicação da extensometria através de strain gage: Elaboração de uma célula de carga com sistema de aquisição de dados computadorizado**. XII Encontro Latino Americano de Iniciação Científica e VIII Encontro Latino Americano de Pós-Graduação – Universidade do Vale do Paraíba, 2008

OMEGA Engineering INC. **The Strain Gage** <http://www.omega.com/literature/transactions/volume3/strain.html>. Acesso em 26/09/2011.

PORTNOI, M. **Extensometria: História, usos e aparelhos** <http://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/extensometria.html> acesso em 16/09/2011.

REIS, M. B.; JÚNIOR, E. B.; LIMA, A. P. **Refinamento do Circuito Elétrico e Aferição de Transdutores de Força (Células De Carga)**, Faculdade de Engenharia Campus de Ilha Solteira - Departamento de Engenharia Mecânica, 2006.

SOARES, P. H. C.; GOROSO, D. G.; LOPES J. A. F. **Plataforma de Força e Sistema de Imagem Integrados na Avaliação Postural. Artigo da SBIS (sociedade brasileira de informática em saúde)**, 2008.

UHLER, C. R. **Análise do controle postural de idosos jovens e idosos muitos Idosos com história de quedas.** Dissertação de mestrado em Fisioterapia, Universidade de São Paulo, 2008.

URQUIZA, M. A. **Desenvolvimento de uma plataforma de Força Multiaxial para Instrumentação Biomédica.** (Trabalho de Mestrado Universidade Federal de Uberlândia), 2005.

VASCONCELLOS D. K. **Efeito dos ciclos térmicos para aplicação da cerâmica na passividade de próteses implanto-suportadas, observado pela extensometria.** Tese Faculdade de Odontologia de São José dos Campos, Universidade Estadual Paulista, 2005.

VERDERI, E. **Educação postural e qualidade de vida.** Revista Digital – efdeportes.com, 2002, <http://www.efdeportes.com/efd51/postura.htm> acesso em 23/09/2011.

WANG H.; CHEN S.; LIU J. **Measuring System of A 3D Force Platform for Plantar Pressure Distribution. Automation and Logistics IEEE International Conference on 8/2009.**

WIECZOREK, S. A. **Equilíbrio em adultos e idosos: Relação entre tempo de movimento e acurácia durante movimentos voluntários na postura em pé,** Dissertação de mestrado em Educação Física na Universidade de São Paulo, 2003.

ZATSIORSKY, V. M. **Kinematics of human motion.** Champaign: Human Kinetics; 1998.

## APÊNDICE

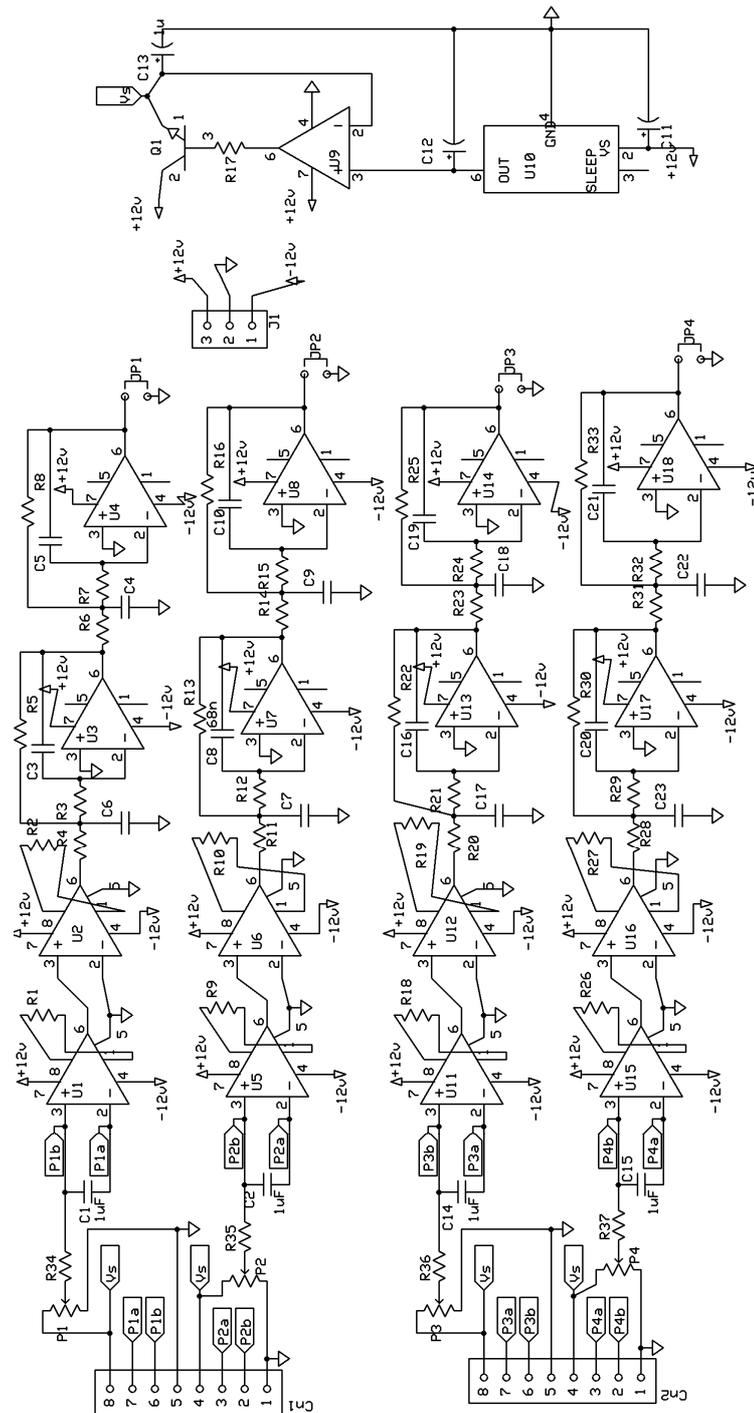


Figura A.1 – Esquema do circuito de condicionamento.